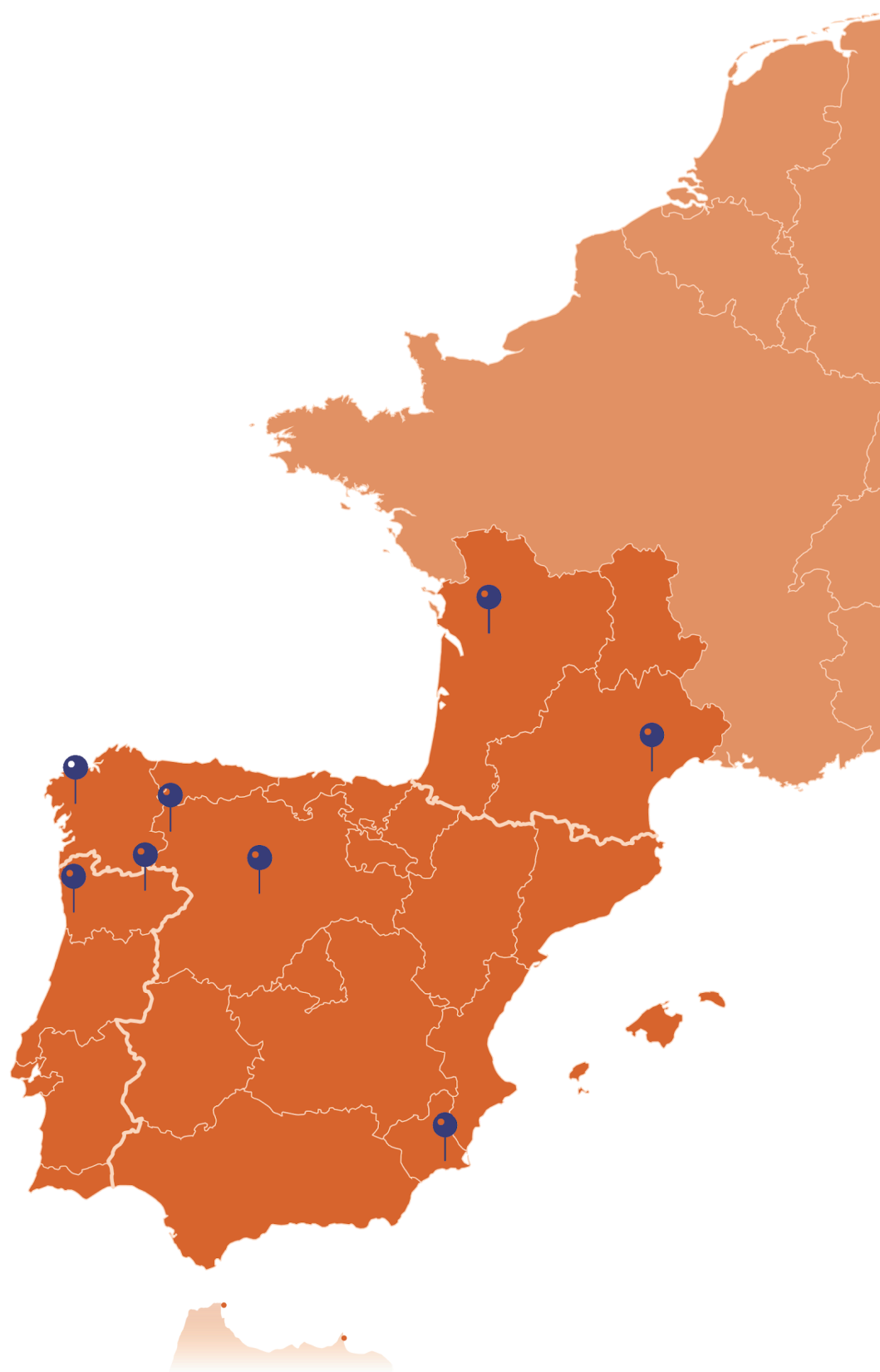




## ENDORSE

# E 1.3.1

Informe sobre la evaluación  
económica social y ambiental del P



*Cooperar está en tus manos*



## INFORMACIÓN DEL PROYECTO

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

## INFORMACIÓN DEL INFORME

<b>Nº del Entregable</b>	1.3.1
<b>Nombre del Entregable</b>	Informe sobre la evaluación económica social y ambiental del P
<b>Beneficiario principal</b>	Fundación Centro Gallego de Investigaciones del agua
<b>Beneficiarios participantes</b>	Todos los socios y asociados del proyecto
<b>Grupo de trabajo</b>	GT1
<b>Actividad</b>	A1.3
<b>Líder del GT</b>	Fundación Centro Gallego de Investigaciones del agua

**Fecha de publicación** 10/06/2026

**Resumen** Este informe presenta una evaluación integrada de las dimensiones ambientales, económicas y sociales del ciclo del fósforo en la región SUDOE. El análisis combina Análisis de Ciclo de Vida, datos territoriales de emisiones y consulta con *stakeholders* para caracterizar el modelo actual de gestión del fósforo y establecer una línea base frente a la cual comparar futuras soluciones de recuperación. Los resultados muestran que el sistema actual genera presiones ambientales significativas (2,53 mil millones kg CO<sub>2</sub> eq en suministro de fertilizantes; 14,8 kt P/año en emisiones de EDAR), vulnerabilidades económicas derivadas de la dependencia exterior y volatilidad de precios (~1.849 M€/año), y barreras sociales relacionadas con la confianza, información y viabilidad de productos recuperados. El informe identifica oportunidades para avanzar hacia una gestión más circular del fósforo mediante recuperación en EDAR, optimización agrícola y estrategias de comunicación adaptadas a distintos actores, proporcionando una base sólida para las fases posteriores del proyecto ENDORSE.

## ÍNDICE

<b>Objetivos del informe</b>	<b>5</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>6</b>
<b>2. Metodología integrada del análisis</b>	<b>7</b>
<b>3 Evaluación ambiental</b>	<b>8</b>
3.1 Introducción y objetivos	8
3.2 Enfoque	8
3.3 Inventario del ciclo de vida (LCI) y modelización de los sistemas analizados	9
3.4 Resultados	13
3.5 Interpretación y conclusiones	24
<b>4 Evaluación económica</b>	<b>26</b>
4.1 Enfoque	26
4.2 Metodología e indicadores	26
4.3 Coste económico del modelo actual de gestión del fósforo	26
4.4 Flujos de fósforo no recuperados y relevancia estratégica	30
4.5 Potencial económico de la recuperación y circularidad del fósforo	32
4.6 Percepción de los actores sobre la dimensión económica del fósforo	34
4.7 Síntesis de la evaluación económica	35
<b>5 Evaluación social</b>	<b>37</b>
Introducción y objetivo del análisis social	37
5.2 Enfoque	37
5.3 Percepción de la gestión del fósforo	38
5.4 Barreras sociales identificadas para la implantación de soluciones circulares	43
5.5 Framing comunicativo adaptado a las barreras sociales identificadas en la adopción de los fertilizantes recuperados	44
<b>6 Conclusiones</b>	<b>48</b>
<b>7 Bibliografía</b>	<b>49</b>

## Objetivos del informe

El objetivo de la actividad A1.3 es evaluar de manera integrada las implicaciones ambientales, económicas y sociales asociadas al ciclo del fósforo en la región SUDOE, tomando como base el diagnóstico previamente desarrollado en la actividad A1.2.

A partir de la caracterización de los principales flujos, emisiones y patrones de uso del fósforo, este análisis busca traducir dicha información en términos de impactos, costes y percepción social, permitiendo comprender no sólo el funcionamiento del sistema, sino también sus efectos y condicionantes desde una perspectiva de sostenibilidad.

En particular, el entregable persigue:

- Analizar el **impacto ambiental** del ciclo del fósforo, con especial atención a las emisiones al medio acuático y su contribución a procesos de eutrofización.
- Evaluar las **implicaciones económicas** derivadas del uso actual de fertilizantes fosfatados, incluyendo la dependencia de recursos externos y los costes asociados.
- Examinar la **percepción social** del uso del fósforo y de las soluciones basadas en su recuperación, identificando barreras y oportunidades para su implementación.

De forma conjunta, este análisis permite definir un **escenario base (baseline)** del sistema actual, que servirá como referencia para la comparación con las soluciones innovadoras propuestas en el marco del proyecto ENDORSE, así como para orientar el diseño de pilotos y la identificación de los principales retos para la transición hacia un modelo más circular y sostenible.

## 1. Introducción

El fósforo (P) es un recurso esencial para la producción agrícola y, por tanto, para la seguridad alimentaria, pero su gestión actual presenta importantes desafíos tanto desde el punto de vista ambiental como económico y social. En el contexto europeo, y particularmente en la región SUDOE, esta problemática se manifiesta a través de una doble dinámica: por un lado, una fuerte dependencia de importaciones de fósforo mineral, y por otro, pérdidas significativas hacia el medio ambiente derivadas de su uso ineficiente. Estas pérdidas, especialmente hacia el medio acuático, contribuyen de forma directa a procesos de eutrofización y degradación de los ecosistemas.

La región SUDOE —que comprende España, Portugal y el sur de Francia— presenta unas características territoriales, climáticas y productivas que intensifican estos retos. La elevada relevancia del sector agroalimentario, la presión sobre los recursos hídricos y la coexistencia de sistemas productivos intensivos con ecosistemas sensibles convierten este espacio en un contexto especialmente relevante para el análisis del ciclo del fósforo y para el desarrollo de estrategias de gestión más sostenibles y circulares.

En este marco se sitúa el proyecto ENDORSE, que propone avanzar hacia un modelo de economía circular del fósforo mediante la recuperación de este nutriente a partir de corrientes residuales y su posterior valorización como fertilizante. Este cambio de enfoque requiere, no obstante, una comprensión no solo del funcionamiento del sistema, sino también de sus implicaciones en términos de impactos, costes y aceptación social.

En este sentido, el presente entregable se apoya en el diagnóstico desarrollado en la actividad A1.2, en el que se caracterizaron los principales flujos de fósforo, las emisiones asociadas y las percepciones de los actores en la región SUDOE. A diferencia de dicho análisis, el objetivo de esta actividad no es realizar una nueva caracterización del sistema, sino llevar a cabo una **reinterpretación evaluativa** de la información existente, orientada a comprender sus implicaciones desde una perspectiva integrada.

El análisis se centra en los territorios de España, Portugal y Francia, adoptando una escala territorial basada principalmente en unidades NUTS II y, cuando procede, en regiones hidrográficas, con el fin de reflejar adecuadamente las dinámicas espaciales del ciclo del fósforo.

De este modo, la actividad A1.3 tiene como finalidad **traducir los flujos de fósforo identificados previamente en impactos ambientales, costes económicos y percepción social**, proporcionando una visión más completa del sistema y estableciendo una base sólida para la comparación con las soluciones innovadoras que se desarrollarán en el marco del proyecto ENDORSE.

## 2. Metodología integrada del análisis

El enfoque metodológico se estructura en tres dimensiones complementarias. En primer lugar, la **evaluación ambiental** analiza las presiones asociadas al ciclo del fósforo, con especial atención a la eutrofización del medio acuático. Para ello, combina el **Análisis de Ciclo de Vida** (ISO, 2006a; ISO, 2006b) de procesos clave —principalmente el suministro de fertilizantes fosforados y la gestión del fósforo en la línea de aguas de las EDAR— con **datos territoriales de emisiones de fósforo** procedentes de la actividad A1.2. Esta aproximación permite diferenciar entre impactos asociados a la cadena de suministro de fertilizantes, emisiones difusas agrícolas y emisiones puntuales urbanas.

En segundo lugar, la **evaluación económica** traduce los flujos físicos de fósforo en indicadores económicos orientativos, con el fin de caracterizar la relevancia del consumo de fertilizantes fosfatados, la dependencia de materias primas externas, la exposición a la volatilidad de precios y el valor estratégico de los flujos actualmente no recuperados. Esta evaluación no constituye un análisis de viabilidad técnico-económica de tecnologías específicas, sino una **caracterización macroeconómica del sistema actual** y de sus vulnerabilidades estructurales.

En tercer lugar, la **evaluación social** analiza la percepción de los actores sobre la gestión actual del fósforo y sobre las soluciones basadas en su recuperación. Para ello, se emplean los resultados de los procesos de **cocreación, cuestionarios y entrevistas** desarrollados en las actividades A1.2 y A1.3. El análisis se centra en identificar barreras, condiciones de aceptación, necesidades de información y factores de confianza que pueden influir en la futura implantación de soluciones circulares.

Las tres dimensiones se desarrollan de forma complementaria y permiten construir un escenario base multidimensional del ciclo del fósforo en la región SUDOE. Este baseline no pretende integrar todos los resultados en un único indicador, sino ofrecer una lectura estructurada de las principales presiones ambientales, vulnerabilidades económicas y condiciones sociales que caracterizan el sistema actual. De este modo, proporciona una referencia común para contextualizar las futuras soluciones desarrolladas en ENDORSE y comparar su desempeño ambiental, económico y social en fases posteriores del proyecto.

## 3 Evaluación ambiental

### 3.1 Introducción y objetivos

La gestión del fósforo constituye uno de los principales retos ambientales asociados tanto a los sistemas agrícolas como a los sistemas urbanos de saneamiento, debido a su estrecha relación con los procesos de eutrofización del medio acuático. Aunque el fósforo es un nutriente esencial para la producción agrícola y el funcionamiento de los ecosistemas, su utilización ineficiente y su liberación al medio generan importantes presiones sobre las masas de agua continentales y costeras.

En la región SUDOE, las principales fuentes de fósforo al medio acuático están asociadas, por un lado, al sistema agrícola y, por otro, a los vertidos procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR). En el ámbito agrícola, las aportaciones al medio acuático se producen principalmente de forma difusa, a través de procesos de erosión y escorrentía desde las parcelas agrícolas. En el ámbito urbano, las emisiones se producen de forma puntual, fundamentalmente a través del fósforo residual presente en los efluentes tratados de las EDAR.

En este contexto, el presente análisis tiene como objetivo evaluar las implicaciones ambientales de las actuales estrategias de gestión del fósforo en la región SUDOE, poniendo el foco en las emisiones de fósforo al medio acuático y en su contribución potencial a la eutrofización. El análisis se plantea como una evaluación ambiental de base, orientada a caracterizar la situación actual del sistema y a identificar los principales puntos críticos ambientales asociados al ciclo del fósforo.

Para ello, se adopta un enfoque híbrido que combina el **Análisis de Ciclo de Vida (ACV)** de procesos clave, con datos territoriales de emisiones de fósforo procedentes del diagnóstico previo realizado en la actividad A1.2. Este enfoque permite integrar, por una parte, los impactos ambientales asociados al suministro de fertilizantes fosforados minerales y, por otra, las emisiones de fósforo al medio acuático estimadas a escala territorial. Asimismo, permite incorporar la contribución de los sistemas de depuración de aguas residuales, considerando las emisiones puntuales de fósforo en el efluente y los consumos químicos asociados a su eliminación.

El análisis se estructura en torno a dos subsistemas complementarios:

- el sistema de fertilización fosforada, centrado en la producción y suministro de fertilizantes minerales de fósforo, así como en las emisiones difusas agrícolas estimadas previamente;
- el sistema de depuración de aguas residuales, centrado en la línea de aguas de las EDAR, considerando la carga de fósforo entrante, las emisiones de fósforo en el efluente tratado y el consumo de cloruro férrico empleado para su precipitación química.

A través de este enfoque, el estudio busca identificar los principales puntos críticos ambientales del ciclo actual del fósforo en la región SUDOE, caracterizar las contribuciones relativas de las fuentes difusas y puntuales a la eutrofización del medio acuático, y establecer una línea base ambiental que permita orientar futuras estrategias de mejora, recuperación y gestión circular del fósforo.

### 3.2 Enfoque

La evaluación ambiental de la gestión actual del fósforo en la región SUDOE se aborda mediante un enfoque híbrido, que combina el **Análisis de Ciclo de Vida (ACV)** de procesos clave con datos territoriales de emisiones de fósforo al medio acuático procedentes del diagnóstico desarrollado en la actividad A1.2.1. Este planteamiento permite diferenciar entre los impactos generados aguas arriba por la producción y suministro de insumos —fertilizantes fosforados y reactivos químicos— y las presiones directas ejercidas sobre las masas de agua por las emisiones difusas agrícolas y las emisiones puntuales urbanas.

El análisis se focaliza en la **eutrofización del medio acuático**, al tratarse del principal impacto ambiental asociado a las pérdidas de fósforo hacia las masas de agua. Para ello, se consideran dos ámbitos complementarios: el **sistema agrícola**, vinculado al suministro de fertilizantes fosforados minerales y a las emisiones difusas de fósforo desde superficies agrícolas; y el **sistema de depuración de aguas residuales**, considerado como fuente puntual de emisión de fósforo al medio receptor.

En el caso del sistema agrícola, el ACV se centra en el **suministro de fertilizantes fosforados minerales**, incluyendo las etapas de extracción y beneficio de roca fosfórica, síntesis de fertilizantes y transporte/distribución hasta el punto de uso agrícola. La operación de aplicación en campo no se incluye en el inventario. Las emisiones difusas de fósforo al medio acuático no se modelizan como una fracción directa del fertilizante aplicado, sino que se incorporan de forma independiente a partir de las estimaciones territoriales de fósforo emitido por erosión desde parcelas agrícolas desarrolladas en el entregable A1.2.1. De este modo, se evita atribuir de forma simplificada las pérdidas difusas exclusivamente al fertilizante mineral aplicado.

En el caso de las EDAR, el ACV se centra en un modelo simplificado de la **línea de aguas**, considerando la gestión de 1 kg de fósforo entrante en la planta. El inventario incluye el fósforo residual emitido en el efluente tratado y el consumo de cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) asociado a la precipitación química del fósforo (tratamiento convencional de eliminación de fósforo en EDAR). El fósforo entrante se utiliza como flujo de referencia del sistema, pero no se modeliza como consumo de recurso, ya que representa la carga contaminante gestionada por la EDAR. De forma complementaria, las emisiones puntuales territoriales de fósforo procedentes de EDAR se incorporan a partir de las estimaciones desarrolladas en el entregable A1.2.1, expresadas como cargas anuales emitidas al medio acuático.

La modelización de los procesos de ACV se realiza en **SimaPro** (PRé Sustainability, 2021), utilizando procesos disponibles en la base de datos **Ecoinvent v3** (Wernet et al., 2016) para representar la producción y suministro de fertilizantes fosforados, así como la producción del  $\text{FeCl}_3$  empleado en EDAR. La evaluación de impactos se realiza mediante el método **Environmental Footprint 3.1 (adapted) V1.04**, priorizando las categorías de **eutrofización de agua dulce** y **eutrofización marina**. De forma complementaria, se consideran otras categorías relevantes para interpretar los impactos asociados a la producción y transporte de fertilizantes y al consumo de reactivos químicos en EDAR: **acidificación, cambio climático, uso de recursos fósiles, uso de recursos minerales y metales, y uso de agua**.

Aunque el método **Environmental Footprint** incluye un conjunto amplio de categorías de impacto, en este estudio se seleccionan aquellas más relevantes para las características del sistema analizado y para el objetivo principal de la evaluación ambiental: analizar la contribución del ciclo actual del fósforo a la **eutrofización del medio acuático**. Por este motivo, se priorizan las categorías de **eutrofización de agua dulce** y **eutrofización marina**, que permiten representar las principales vías de impacto asociadas a las emisiones de nutrientes hacia masas de agua continentales y costeras. La primera refleja principalmente el enriquecimiento por fósforo en sistemas de agua dulce y se expresa en **kg P eq**, mientras que la segunda está asociada principalmente a los aportes de nitrógeno al medio marino y se expresa en **kg N eq**.

De forma complementaria, se consideran otras categorías ambientales que permiten interpretar los impactos asociados a la producción y transporte de fertilizantes y al consumo de reactivos químicos en EDAR. El **cambio climático** se expresa en **kg CO<sub>2</sub> eq** y recoge las emisiones de gases de efecto invernadero. La **acidificación**, expresada en **mol H<sup>+</sup> eq**, permite evaluar el efecto potencial de emisiones acidificantes al aire, agua y suelo. El **uso de recursos fósiles**, expresado en **MJ**, recoge el agotamiento de recursos energéticos fósiles, mientras que el **uso de recursos minerales y metales**, expresado en **kg Sb eq**, representa el agotamiento de recursos minerales no renovables. Finalmente, el **uso de agua**, expresado en **m<sup>3</sup> de agua equivalente asociados a escasez hídrica (m<sup>3</sup> depriv.)**, permite considerar el impacto potencial del consumo de agua dulce en relación con la escasez hídrica regional.

En términos metodológicos, los resultados se presentan en dos niveles. Por un lado, los resultados unitarios de ACV permiten identificar los procesos y flujos que dominan cada categoría de impacto: en fertilizantes, por **1 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> suministrado** mediante el mix considerado; y en EDAR, por **1 kg de P entrante** en la línea de aguas. Por otro lado, los datos territoriales procedentes del A1.2.1 permiten contextualizar la presión real sobre las masas de agua, diferenciando entre emisiones agrícolas difusas y emisiones puntuales de EDAR.

Este enfoque permite establecer una **línea base ambiental** del ciclo actual del fósforo en la región SUDOE, diferenciando entre los impactos asociados a la cadena de suministro de fertilizantes y reactivos, y las emisiones directas de fósforo al medio acuático. Esta línea base servirá como referencia para valorar, en fases posteriores del proyecto ENDORSE, el potencial ambiental de las soluciones de recuperación y valorización de fósforo.

### 3.3 Inventario del ciclo de vida (LCI) y modelización de los sistemas analizados

El inventario de ciclo de vida recoge los principales flujos de materia, energía y emisiones utilizados para modelizar la gestión actual del fósforo en la región SUDOE. El análisis se estructura en dos subsistemas: el suministro de fertilizantes fosforados minerales y la depuración de aguas residuales urbanas.

#### 3.3.1 Inventario del sistema de los fertilizantes fosforados

El inventario del sistema de fertilización fosforada se orienta a cuantificar los impactos ambientales asociados al suministro actual de fertilizantes minerales de fósforo. La unidad funcional del subsistema se define como:

### Suministro de 1 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mediante el *mix* actual de fertilizantes fosforados, excluyendo la operación de aplicación agrícola.

El uso de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como referencia responde a que tanto la composición comercial de los fertilizantes como las estadísticas de consumo agrícola se expresan habitualmente en esta unidad. Esta elección facilita la conexión entre los datos de consumo disponibles y la modelización del inventario en ACV.

El sistema se modela con un enfoque *cradle-to-farm gate*, incluyendo las etapas necesarias para producir y suministrar el fertilizante hasta el punto de uso agrícola. En particular, se consideran las siguientes fases:

- extracción y beneficio de roca fosfórica;
- síntesis del fertilizantes fosforado;
- transporte y distribución.

Para representar el uso actual de fertilizantes fosforados, se construye un *mix representativo*, ponderado en función de la contribución de cada producto al total de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicado. Esta aproximación permite reflejar que los fertilizantes comerciales presentan composiciones diferentes y que su contribución real al aporte de fósforo no depende únicamente de la masa de producto aplicada, sino de su contenido en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

La Tabla 1 recoge los fertilizantes considerados en el *mix*, expresados en términos de toneladas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y de su contribución relativa al total de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aportado. Esta tabla constituye la base para la construcción del fertilizante medio empleado en la modelización.

**Tabla 1. Mix de fertilizantes fosforados considerado en la modelización.**

Fertilizante	t P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Peso en <i>mix</i> (%)
<b>Superfosfatos (SSP)</b>	8853	3.63
<b>Ácido fosfórico y otros</b>	29 722	12.19
<b>Total Fertilizantes Simples</b>	<b>38 575</b>	<b>15.82</b>
<b>MAP</b>	24 409	10.01
<b>DAP</b>	36 570	15.00
<b>Otros complejos (NPK proxy)</b>	144 224	59.16
<b>Total Fertilizantes Complejos</b>	<b>205 203</b>	<b>84.18</b>
<b>TOTAL</b>	<b>243 778</b>	<b>100</b>

Para la construcción del *mix* (Tabla 1) se priorizaron los datos expresados directamente en toneladas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> frente a las toneladas de producto comercializado, dado que la unidad funcional del análisis se define como el suministro de 1 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. En primer lugar, se diferenciaron los fertilizantes fosfatados simples y los fertilizantes complejos. Según las estadísticas proporcionadas por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación para 2023 (MAPA 2023a y 2024), el total de fertilizantes fosfatados simples asciende a 38 575 t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, mientras que los fertilizantes complejos representan 205 203 t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, alcanzando un total de 243 778 t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Dentro de los fertilizantes simples, el dato disponible para superfosfato de cal se interpreta como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> asociado a superfosfatos, con un valor de 8853 t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. El valor correspondiente a la categoría “ácido fosfórico y otros” se calculó por diferencia respecto al total de fertilizantes simples. En el caso de los fertilizantes complejos, las cantidades de MAP y DAP se calcularon a partir de las toneladas de producto comercializado y de sus contenidos típicos en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Para el MAP se consideró un contenido del 52% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, mientras que para el DAP se consideró un contenido del 46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. El resto de fertilizantes complejos —incluyendo complejos N-P, P-K y NPK— se agruparon bajo un proxy NPK representativo. Su contenido en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> se calculó por diferencia respecto al total de fertilizantes complejos.

Finalmente, el peso de cada categoría en el *mix* se calculó dividiendo las toneladas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de cada fertilizante entre el total de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> considerado:

$$\omega_i = \frac{P_{2O_5,i}}{243\,778}$$

donde  $\omega_i$  es el peso relativo del fertilizante  $i$  en el *mix* de  $P_2O_5$ .

A partir de este *mix*, se calcula la cantidad de producto fertilizante necesaria para suministrar 1 kg de  $P_2O_5$ . Este cálculo permite expresar todos los impactos ambientales en una base común y comparable.

La Tabla 2 presenta la conversión del *mix* de fertilizantes fosforados a la unidad funcional del análisis, definida como el suministro de 1 kg de  $P_2O_5$  mediante el *mix* actual de fertilizantes. En primer lugar, se calculó la cantidad de producto necesaria para aportar 1 kg de  $P_2O_5$  a partir del contenido de  $P_2O_5$  asumido para cada fertilizante. Posteriormente, esta cantidad se ponderó por el peso relativo de cada categoría en el *mix* definido en la Tabla 1. De este modo, la masa de producto incluida en el proceso agregado depende tanto de la contribución de cada fertilizante al total de  $P_2O_5$  como de su concentración en  $P_2O_5$ .

Los porcentajes de contenido en  $P_2O_5$  asumidos fueron los detallados en *ecoinvent* para los procesos de los productos correspondientes. En el caso de los superfosfatos, la categoría estadística se modelizó mediante un proceso de superfosfato simple, SSP, con un contenido del 21% de  $P_2O_5$ . Para MAP y DAP se emplearon los procesos específicos correspondientes, mientras que los fertilizantes complejos distintos de MAP y DAP se representaron mediante un proxy NPK 15-15-15. Esta última simplificación permite modelizar de forma agregada los complejos N-P, P-K y NPK restantes, aunque debe interpretarse como una aproximación metodológica y no como una reproducción exacta de la composición comercial real de todos los fertilizantes incluidos en dicha categoría.

**Tabla 2. Inventario unitario del mix de fertilizantes fosforados referido a 1 kg de  $P_2O_5$  suministrado.**

Fertilizante	Contenido $P_2O_5$ asumido (%)	kg producto/kg $P_2O_5$ del fertilizante	kg producto en 1 kg $P_2O_5$ del <i>mix</i>
Superfosfatos (SSP)	21	4.76	0.173
Ácido fosfórico y otros	54	1.85	0.226
MAP	52	1.92	0.193
DAP	46	2.17	0.326
Otros complejos (NPK proxy)	15	6.67	3.944
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>4.875</b>

La modelización de los procesos asociados a la producción y suministro de fertilizantes se realiza en **SimaPro**, utilizando procesos disponibles en la base de datos **ecoinvent**. Estos procesos permiten representar las principales etapas de la cadena de valor de los fertilizantes fosforados, incluyendo la extracción y beneficiación de roca fosfórica, la producción de intermedios químicos como ácido fosfórico, la síntesis de fertilizantes minerales y el transporte/distribución.

A partir de los procesos anteriores, el impacto ambiental del *mix* de fertilizantes se calcula como la suma ponderada de los impactos asociados a cada fertilizante considerado:

$$I_{mix} = \sum_i \omega_i \cdot I_i$$

- $I_{mix}$  representa el impacto ambiental medio del *mix* de fertilizantes por kg de  $P_2O_5$  suministrado;
- $\omega_i$  es el peso relativo del fertilizante  $i$  en el *mix*;
- $I_i$  es el impacto ambiental asociado al suministro de 1 kg de  $P_2O_5$  mediante el fertilizante  $i$ .

En el caso de fertilizantes compuestos, como MAP, DAP o NPK, los resultados expresados por kg de  $P_2O_5$  representan el impacto del producto comercial necesario para suministrar dicha cantidad de fósforo, incluyendo la co-aplicación de otros nutrientes cuando esta forma parte inherente del producto.

Este enfoque permite obtener un inventario representativo del suministro actual de fertilizantes fosforados, manteniendo la trazabilidad entre los datos de consumo, la composición de los productos y los procesos de fondo utilizados en la modelización ACV. Además, facilita la posterior agregación de resultados a escala regional mediante la cantidad total de  $P_2O_5$  consumida o comercializada para uso agrícola.

### 3.3.2 Modelización de las emisiones agrícolas de fósforo al medio acuático

Las emisiones de fósforo al medio acuático desde el sistema agrícola se incorporan a partir de las estimaciones desarrolladas en el entregable A1.2. Dichas estimaciones corresponden al fósforo emitido al agua por procesos de erosión desde parcelas agrícolas.

Esta aproximación se considera adecuada debido a la dificultad de atribuir de forma directa las pérdidas de fósforo al fertilizante mineral aplicado en una campaña concreta. Las emisiones de P desde suelos agrícolas dependen de múltiples factores, entre ellos el contenido previo de fósforo en el suelo, la acumulación histórica por fertilizaciones anteriores, el uso de enmiendas orgánicas o lodos, el tipo de suelo, la pendiente, la cobertura vegetal, la intensidad de la erosión, la escorrentía superficial y las condiciones climáticas y de manejo.

Por tanto, las emisiones agrícolas de fósforo al agua no se modelan como un porcentaje directo del fertilizante aplicado, sino como una **presión difusa integrada del sistema agrícola**. Esta presión incluye el efecto combinado del manejo agrícola, el estado del suelo y las aportaciones históricas y actuales de fósforo.

### 3.3.3 Inventario del sistema de depuración de aguas residuales

El inventario del sistema de depuración se centra en la gestión actual del fósforo en la **línea de aguas** de las estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (EDAR). El objetivo del modelo no es representar el funcionamiento completo de una EDAR, sino evaluar los principales flujos directamente relacionados con la emisión de fósforo al medio acuático y con el consumo de reactivos químicos empleados para su eliminación.

La unidad funcional considerada para este subsistema es:

#### Gestión de 1 kg de fósforo entrante en la línea de aguas de la EDAR.

El uso de fósforo elemental, en lugar de  $P_2O_5$ , responde a que las concentraciones de fósforo en aguas residuales, influentes y efluentes se expresan habitualmente como P. Esta unidad funcional permite relacionar de forma directa la carga de fósforo recibida por la planta con la fracción emitida finalmente al medio receptor y con el consumo de cloruro férrico empleado en la precipitación química.

El fósforo entrante se utiliza como **flujo de referencia** del sistema, pero no se modeliza como un consumo de recurso ni como un *input* de producto, ya que representa la carga contaminante gestionada por la EDAR. Por tanto, el inventario de ACV se construye a partir de dos elementos principales: el fósforo residual emitido en el efluente tratado y el consumo de  $FeCl_3$  asociado a la eliminación química del fósforo.

El fósforo emitido en el efluente tratado se incorpora como **emisión puntual al medio acuático**, al constituir la salida directa de fósforo más relevante para la evaluación de la eutrofización asociada a las EDAR. La cantidad emitida se determina a partir de los datos disponibles de concentración en el efluente, rendimiento de eliminación o cargas de salida reportadas en las fuentes utilizadas.

Para definir una línea base coherente con el alcance tecnológico del proyecto ENDORSE, la **eficiencia de eliminación de fósforo** se estimó a partir de las mismas plantas y datos operacionales utilizados para establecer el consumo específico de  $FeCl_3$ . Estas plantas cuentan con digestión anaerobia de fangos y se tomaron como referencia por tratarse del tipo de instalación en el que puede implementarse la tecnología de recuperación desarrollada en ENDORSE. De este modo, el modelo no representa una EDAR urbana genérica, sino una tipología de planta relevante para la comparación posterior con las soluciones del proyecto. A partir de estos datos, la eficiencia media de retirada de fósforo se estableció en el 79%, por lo que se estimó una **emisión residual de 0,21 kg de P en el efluente tratado por cada 1 kg de P entrante en la línea de aguas**.

El consumo de  $FeCl_3$  se incorpora como input de proceso a partir de datos operacionales confidenciales de EDAR, facilitados en el marco del proyecto. Dicho factor se establece en **12.44 kg de  $FeCl_3$  por kg de fósforo entrante en la EDAR**. Este valor permite representar de forma homogénea el consumo químico asociado a la gestión del fósforo en la línea de aguas y evaluar los impactos indirectos derivados de la producción y suministro del reactivo. En la modelización, el  $FeCl_3$  no se interpreta como una emisión al medio, sino como un **reactivo consumido** por el sistema de tratamiento. Sus impactos ambientales proceden de los procesos *upstream* asociados a su fabricación y suministro, incorporados mediante los procesos disponibles en la base de datos de ACV utilizada. De este modo, el modelo permite diferenciar entre la presión directa del fósforo residual emitido al agua y los impactos indirectos asociados al uso de reactivos químicos.

El fósforo eliminado durante el tratamiento se considera una fracción retirada de la línea de aguas. Dado el alcance definido para este análisis, no se modeliza el destino posterior de este fósforo en la línea de lodos ni su posible valorización o eliminación final. Esta delimitación permite mantener un modelo trazable, centrado en la contribución de las EDAR a la eutrofización del medio acuático y en el consumo de reactivos directamente asociado a la eliminación de fósforo.

De forma complementaria al ACV unitario, se incorporan las emisiones puntuales de fósforo al agua estimadas en el entregable A1.2.1, expresadas como cargas anuales emitidas desde los sistemas de depuración. Estos datos permiten contextualizar la presión territorial ejercida por las EDAR en España, Portugal y las regiones francesas incluidas en el ámbito SUDOE, e identificar los territorios donde se concentran las mayores emisiones puntuales de fósforo. De este modo, el análisis combina dos niveles de información: por un lado, el resultado unitario del ACV, que permite evaluar los impactos asociados a la gestión de 1 kg de P entrante y diferenciar la contribución del P efluente y del  $\text{FeCl}_3$ ; y, por otro, las emisiones territoriales procedentes del A1.2.1, que permiten interpretar la magnitud real de la presión ejercida por las EDAR sobre el medio acuático.

En el ACV, **la eutrofización de agua dulce está directamente condicionada por el fósforo residual emitido** en el efluente tratado. En cambio, categorías como **cambio climático, acidificación, uso de recursos fósiles, uso de recursos minerales y metales, uso de agua y eutrofización marina están asociadas principalmente al consumo de  $\text{FeCl}_3$** , al reflejar los impactos *upstream* de su producción y suministro.

En conjunto, este enfoque permite establecer una línea base de la gestión actual del fósforo en EDAR, diferenciando entre la presión directa del fósforo emitido en el efluente y los impactos indirectos derivados del uso de reactivos químicos. Esta línea base servirá como referencia para valorar, en fases posteriores del proyecto, el potencial de soluciones de recuperación de fósforo que puedan reducir tanto las emisiones residuales como la dependencia de la precipitación química convencional.

## 3.4 Resultados

Los resultados de la evaluación ambiental se presentan siguiendo la lógica empleada en la modelización. En primer lugar, se analizan los impactos asociados al suministro de fertilizantes fosforados minerales, obtenidos mediante ACV y expresados por kg de  $\text{P}_2\text{O}_5$  suministrado. En segundo lugar, se incorporan las emisiones difusas de fósforo al medio acuático procedentes del sistema agrícola, a partir de las estimaciones territoriales desarrolladas en el entregable A1.2.1. En tercer lugar, se presentan los resultados asociados a los sistemas de depuración de aguas residuales, combinando el ACV simplificado de la línea de aguas con las emisiones puntuales de fósforo estimadas previamente. Finalmente, los resultados se interpretan de forma integrada para identificar las principales fuentes de presión ambiental sobre las masas de agua.

Esta estructura permite diferenciar entre los impactos derivados de procesos productivos —como la extracción, producción y transporte de fertilizantes o la fabricación de reactivos químicos— y las emisiones directas de fósforo al medio acuático, tanto de origen difuso agrícola como puntual urbano. Asimismo, facilita una lectura conjunta de los resultados en relación con la eutrofización, que constituye la categoría ambiental prioritaria del análisis, evitando atribuir de forma directa las emisiones territoriales de fósforo exclusivamente al uso actual de fertilizantes minerales.

### 3.4.1 Resultados del suministro de fertilizantes fosforados

#### 3.4.1.1 Impactos unitarios del suministro de fertilizantes fosforados

Los impactos asociados al suministro de fertilizantes fosforados se evaluaron para la unidad funcional de **1 kg de  $\text{P}_2\text{O}_5$  suministrado mediante el *mix* de fertilizantes considerado**. Es decir, el resultado representa el impacto ambiental medio del suministro actual de fertilizantes fosforados, modelizado a partir de la composición del *mix* y de los procesos seleccionados en ecoinvent.

El análisis se desagregó en tres grandes etapas: **extracción y beneficiado de la roca fosfórica, síntesis de fertilizantes y transporte/distribución**. Esta estructura permite identificar si los impactos se concentran en la obtención de la materia prima fosfatada, en los procesos industriales de transformación y formulación del fertilizante, o en las operaciones de transporte asociadas a su suministro. Para mantener una modelización homogénea, se emplearon procesos de ecoinvent con geografía **RER** como aproximación representativa del contexto europeo, y procesos tipo **market** para el transporte y distribución de los productos considerados.

Además del análisis por etapas, se evaluó la contribución relativa de cada fertilizante o proxy incluido en el *mix*: superfosfatos/SSP, ácido fosfórico, MAP, DAP y NPK proxy. Esta lectura permite diferenciar entre los impactos explicados por el peso relativo de cada

fertilizante en el aporte total de  $P_2O_5$  y aquellos derivados de una mayor intensidad ambiental específica de determinados productos.

La Tabla 3 muestra los impactos ambientales asociados al suministro de **1 kg de  $P_2O_5$**  mediante el *mix* de fertilizantes fosforados. Los resultados incluyen tanto categorías directamente relacionadas con nutrientes, como la **eutrofización de agua dulce** y la **eutrofización marina**, como otras categorías relevantes para interpretar los impactos industriales y energéticos del suministro de fertilizantes, entre ellas **cambio climático**, **acidificación**, **uso de recursos fósiles**, **uso de recursos minerales y metales** y **uso de agua**.

Tabla 3. Impactos ambientales del suministro de 1 kg de  $P_2O_5$  mediante el mix de fertilizantes fosforados.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Extracción y beneficio de la roca fosfórica	Síntesis de fertilizantes	Transporte y distribución
Acidificación	mol H+ eq	1.08E-01	1.46E-03	1.05E-01	1.31E-03
Cambio climático	kg CO2 eq	5.03E+00	4.74E-01	4.30E+00	2.63E-01
Eutrofización, marina	kg N eq	4.69E-03	3.74E-04	3.80E-03	5.16E-04
Eutrofización, agua dulce	kg P eq	1.16E-03	1.99E-04	9.39E-04	2.37E-05
Uso de recursos, fósiles	MJ	7.14E+01	5.93E+00	6.17E+01	3.78E+00
Uso de recursos, minerales y metales	kg Sb eq	5.88E-05	3.89E-06	5.41E-05	8.35E-07
Uso de agua	m3 depriv.	4.09E+00	2.00E-01	3.87E+00	1.72E-02

Los resultados (Tabla 3 e Ilustración 1) muestran que la **síntesis de fertilizantes** constituye la etapa dominante en todas las categorías de impacto analizadas. Su contribución representa aproximadamente el **97% de la acidificación**, el **86% del cambio climático**, el **81% de la eutrofización marina**, el **81% de la eutrofización de agua dulce**, el **86% del uso de recursos fósiles**, el **92% del uso de recursos minerales y metales** y el **95% del uso de agua**. Este patrón indica que los principales impactos del suministro de fósforo mineral se concentran en los procesos industriales de transformación y formulación de fertilizantes. Por otra parte, la etapa de **extracción y beneficiado de la roca fosfórica** presenta una contribución secundaria, aunque no despreciable en algunas categorías. Su peso es especialmente visible en **eutrofización de agua dulce**, donde representa alrededor del **17%** del impacto total, y en **cambio climático**, donde supone aproximadamente el **9%**. Esta contribución se asocia a los procesos de obtención y concentración de la materia prima mineral, incluyendo consumos energéticos, movimiento de materiales y preparación de la roca antes de su transformación química. Por último, la etapa de **transporte/distribución** muestra, en general, una contribución menor que las dos etapas anteriores. Su peso se sitúa en torno al **5%** en cambio climático y uso de recursos fósiles, y alcanza aproximadamente el **11%** en eutrofización marina. En el resto de categorías, su contribución es reducida. Esto sugiere que, bajo las hipótesis de transporte representadas mediante procesos de mercado, el transporte actúa como una contribución complementaria dentro del inventario, mientras que la mayor parte de los impactos se concentran en la producción y síntesis de los fertilizantes.

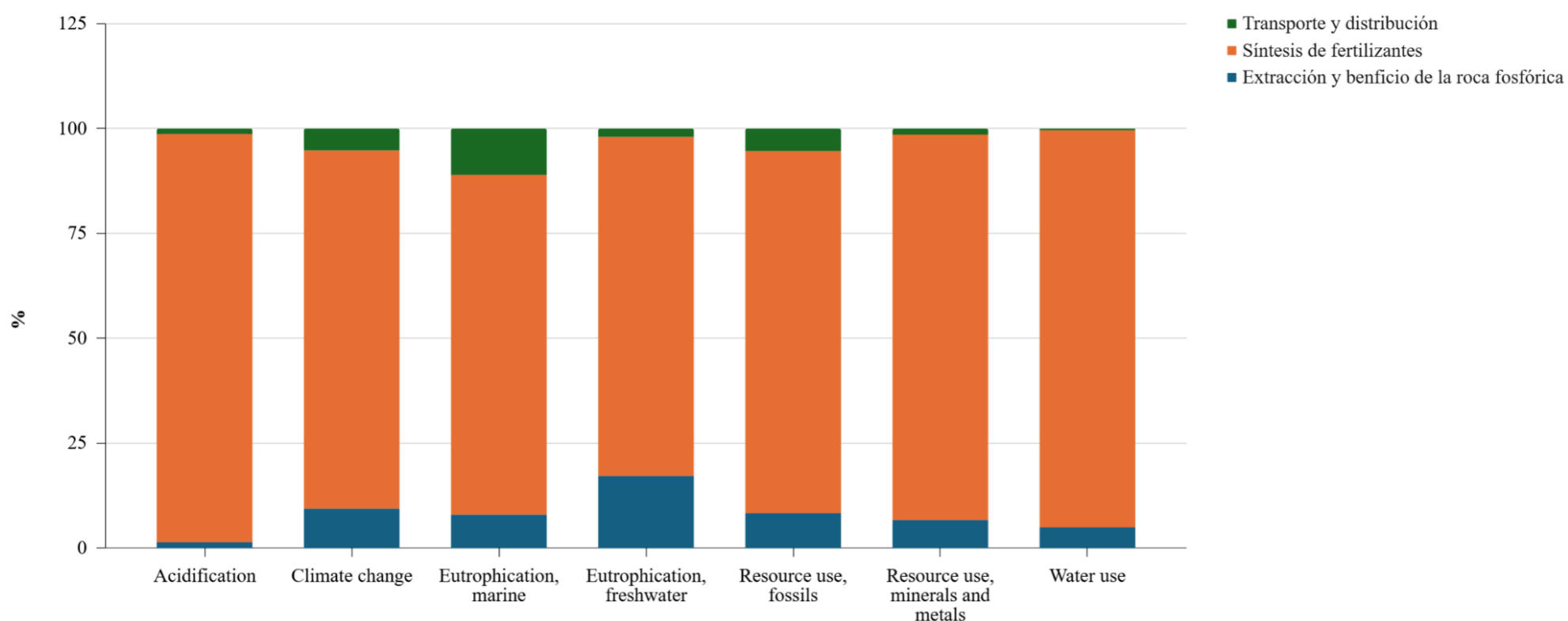


Ilustración 1. Contribución relativa de las principales etapas al impacto del suministro de fertilizantes fosforados.

La Ilustración 2 muestra la contribución relativa de cada fertilizante o proxy al impacto total del *mix*. En términos generales, el **NPK proxy** presenta una contribución elevada en la mayoría de categorías, lo que se explica tanto por su peso dominante en el *mix* de  $P_2O_5$  como por los impactos asociados a la producción de fertilizantes complejos. Su contribución es especialmente relevante en **cambio climático, eutrofización marina, uso de recursos fósiles, uso de recursos minerales y metales y uso de agua**. El **DAP** también presenta una contribución destacada, especialmente en acidificación y uso de agua, donde su peso relativo es superior al que cabría esperar únicamente por su participación en el *mix*. El **ácido fosfórico** muestra una contribución relevante en acidificación y uso de agua, mientras que el **MAP** y los **superfosfatos** presentan contribuciones más moderadas en la mayoría de categorías. En el caso de los superfosfatos, su presencia es más visible en eutrofización de agua dulce.

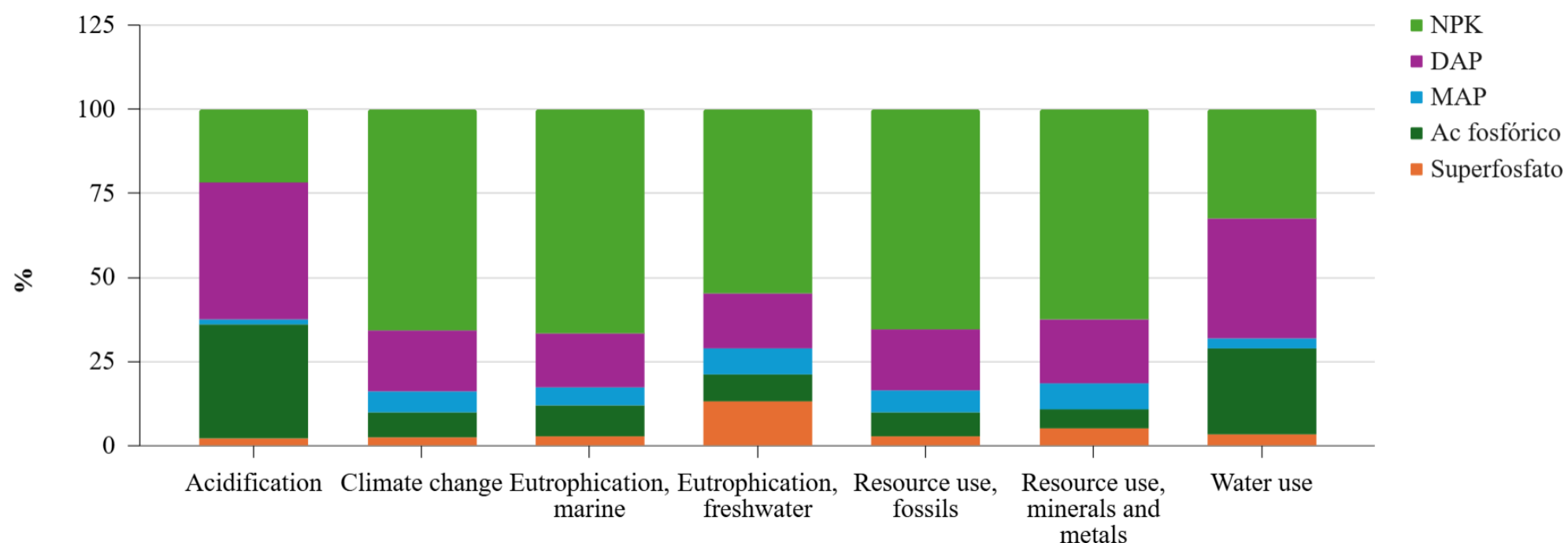


Ilustración 2. Contribución relativa de cada fertilizante/proxy al impacto total del mix de fertilizantes fosforados.

A partir de ambas figuras, puede concluirse que el impacto del *mix* está condicionado por una combinación de dos factores: por un lado, la **composición del mix**, dominada por fertilizantes complejos representados mediante el proxy NPK; y, por otro, la **intensidad ambiental específica** de determinados productos, **especialmente DAP, ácido fosfórico y NPK** en algunas categorías. Esta doble lectura permite diferenciar entre impactos derivados del peso relativo de cada fertilizante en el consumo total de  $P_2O_5$  e impactos asociados a procesos productivos particularmente intensivos.

En conjunto, los resultados ponen de manifiesto que **la etapa de síntesis de fertilizantes constituye el principal punto crítico ambiental** del suministro actual de fósforo mineral. Por tanto, las estrategias orientadas a reducir la dependencia de fertilizantes

minerales convencionales o a sustituir parcialmente estos insumos por fuentes recuperadas podrían tener un efecto relevante sobre los impactos asociados al suministro de fósforo en la región SUDOE.

### 3.4.1.2 Escalado de los impactos asociados al suministro de fertilizantes fosforados

Una vez obtenidos los impactos ambientales unitarios del *mix* de fertilizantes fosforados, expresados por **1 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> suministrado**, los resultados se escalaron territorialmente a partir de los datos disponibles de consumo o requerimiento de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Este escalado permite pasar de un resultado unitario de ACV a una estimación agregada de los impactos ambientales asociados al suministro actual de fertilizantes fosforados en el espacio SUDOE.

Dado que el inventario unitario se construyó a partir del **mix español de fertilizantes fosforados**, el impacto por kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> se mantuvo constante para todos los territorios. Por tanto, las diferencias entre países o regiones no reflejan variaciones en la intensidad ambiental del fertilizante medio, sino diferencias en la cantidad total de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> consumida o requerida. Esta aproximación permite obtener una comparación homogénea entre territorios, aunque debe interpretarse como una estimación de primer orden, ya que no incorpora posibles diferencias nacionales o regionales en la composición real del *mix* de fertilizantes.

Para **España**, se utilizaron los datos oficiales de ventas agrícolas de fertilizantes fosforados publicados por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación para 2023 (MAPA 2023a). Para **Portugal** y **Francia SUDOE**, la estimación se realizó a partir de la Superficie Agrícola Utilizada (SAU) regional para el 2023 (Eurostat, 2026) y de los valores de consumo de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por hectárea disponibles para el mismo año (European Commission, 2026a). En el caso de Portugal, se consideraron las agrupaciones regionales de **Norte e Centro**, **Alentejo e Algarve** y **Ribatejo e Oeste**. En el caso de Francia, se consideraron las regiones SUDOE de **Nouvelle-Aquitaine**, **Occitanie** y **Auvergne**.

Los resultados agregados por país (Tabla 4) muestran que el suministro de fertilizantes fosforados considerado en el análisis representa un total aproximado de **502.203 t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>** en el conjunto de los territorios analizados. España concentra **243.778 t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>**, Francia SUDOE **222.380 t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>** y Portugal **36.510 t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>**. En consecuencia, los impactos totales escalados están dominados por España y Francia, debido a su mayor consumo absoluto de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Tabla 4. Impactos totales asociados al suministro de fertilizantes fosforados por territorio.

Categoría de impacto	Unidad	España	Portugal	Francia (SUDOE)	Total
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> consumido/requerido	t	243 778	36 510	222 380	502 203
Acidificación	mol H+ eq	2.63E+07	3.94E+06	2.40E+07	5.42E+07
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> eq	1.22E+09	1.84E+08	1.12E+09	2.53E+09
Eutrofización, marina	kg N eq	1.14E+06	1.71E+05	1.04E+06	2.36E+06
Eutrofización, agua dulce	kg P eq	2.82E+05	4.24E+04	2.58E+05	5.83E+05
Uso de recursos, fósiles	MJ	1.74E+10	2.61E+09	1.59E+10	3.59E+10
Uso de recursos, minerales y metales	kg Sb eq	1.43E+04	2.15E+03	1.31E+04	2.95E+04
Uso de agua	m <sup>3</sup> depriv.	9.95E+08	1.49E+08	9.10E+08	2.05E+09

A escala agregada, España representa aproximadamente el **49%** del P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> considerado, Francia SUDOE alrededor del **44%** y Portugal cerca del **7%**. Esta distribución explica que los impactos totales del suministro de fertilizantes fosforados se concentren principalmente en España y Francia. En términos de cambio climático, el suministro de fertilizantes fosforados supone aproximadamente **1,22E+09 kg CO<sub>2</sub> eq** en España y **1,12E+09 kg CO<sub>2</sub> eq** en Francia SUDOE, frente a **1,84E+08 kg CO<sub>2</sub> eq** en Portugal. Una pauta similar se observa en el resto de categorías de impacto, dado que el mismo factor unitario se aplica a todos los territorios.

En el caso de la eutrofización, el suministro de fertilizantes fosforados genera, en el conjunto de los territorios analizados, aproximadamente **2,36E+06 kg N eq** de eutrofización marina y **5,83E+05 kg P eq** de eutrofización de agua dulce. Estos valores corresponden a los impactos *upstream* asociados a la producción y suministro de fertilizantes, y no deben confundirse con las emisiones directas de fósforo al medio acuático derivadas de la aplicación agrícola o de los vertidos de EDAR, que se analizan de forma independiente.

A escala regional, los resultados permiten identificar una distribución desigual de los impactos asociados al suministro de fertilizantes fosforados. En España (Tabla 5), las mayores cargas se concentran en **Castilla y León** (2,80E+05 kg N eq en eutrofización marina y 6,92E+04 kg P eq en eutrofización de agua dulce) y **Andalucía** (2,40E+05 kg N eq y 5,95E+04 kg P eq, respectivamente), seguidas de **Aragón**, **Castilla-La Mancha**, **Comunidad Valenciana**, **Murcia** y **Extremadura**. Esta distribución responde principalmente al volumen de ventas agrícolas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> registrado en cada comunidad autónoma.

Tabla 5. Impactos asociados al suministro de fertilizantes fosforados por comunidad autónoma en España.

CCAA	Ventas Agrícolas 2023 (ton de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Eutrofización, marina (kg N eq)	Eutrofización, agua dulce (kg P eq)
Galicia	5224	2.45E+04	6.06E+03
P. de Asturias	1220	5.72E+03	1.42E+03
Cantabria	623	2.92E+03	7.23E+02
País Vasco	2012	9.44E+03	2.33E+03
Navarra	5942	2.79E+04	6.89E+03
La Rioja	939	4.40E+03	1.09E+03
Aragón	33 755	1.58E+05	3.92E+04
Cataluña	6654	3.12E+04	7.72E+03
Baleares	837	3.93E+03	9.71E+02
Castilla y León	59 613	2.80E+05	6.92E+04
Madrid	4839	2.27E+04	5.61E+03
Castilla La Mancha	23 071	1.08E+05	2.68E+04
C. Valenciana	17 007	7.98E+04	1.97E+04
Murcia	15 704	7.37E+04	1.82E+04
Extremadura	14 609	6.85E+04	1.69E+04
Andalucía	51 264	2.40E+05	5.95E+04

En Portugal (Tabla 6), los impactos regionales presentan valores relativamente próximos entre las agrupaciones consideradas, aunque responden a combinaciones distintas de superficie agrícola e intensidad de consumo de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. **Norte e Centro** y **Ribatejo e Oeste** muestran impactos totales similares: en el primer caso, debido a una superficie agrícola elevada combinada con un consumo medio por hectárea; y en el segundo, debido a un consumo unitario de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> notablemente más alto pese a contar con menor superficie. **Alentejo e Algarve**, aunque presenta una SAU muy elevada, muestra un impacto relativo menor debido a su menor consumo de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por hectárea. Esta comparación regional permite observar que el impacto total no depende únicamente de la superficie agrícola, sino también de la intensidad de uso de fertilizantes fosforados por hectárea. Por ello, territorios con menor SAU pero mayores consumos unitarios pueden presentar impactos agregados similares a los de territorios más extensos.

Tabla 6. Impactos asociados al suministro de fertilizantes fosforados por región en Portugal.

Región	SAU (ha)	Consumo kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Eutrofización, marina (kg N eq)	Eutrofización, agua dulce (kg P eq)
Norte e Centro	1 086 390	11.88	6.05E+04	1.50E+04
Alentejo e Algarve	2 203 280	4.91	5.07E+04	1.25E+04
Ribatejo e Oeste	406 920	31.42	6.00E+04	1.48E+04

En Francia SUDOE (Tabla 7), **Nouvelle-Aquitaine** concentra la mayor contribución debido a la combinación de una elevada superficie agrícola y un consumo de  $P_2O_5$  por hectárea también significativo. **Occitanie** presenta igualmente una contribución relevante, mientras que **Auvergne** muestra valores menores debido a una superficie agrícola inferior dentro del ámbito considerado. En conjunto, las regiones francesas analizadas presentan una carga ambiental asociada al suministro de fertilizantes fosforados comparable a la observada para España a escala nacional.

**Tabla 7. Impactos asociados al suministro de fertilizantes fosforados por región en Francia SUDOE.**

Región	SAU (ha)	Consumo kg $P_2O_5$ /ha	Eutrofización, marina (kg N eq)	Eutrofización, agua dulce (kg P eq)
<b>Nouvelle-Aquitaine</b>	3 913 850	27.59	5.06E+05	1.25E+05
<b>Occitanie</b>	3 309 810	23.94	3.72E+05	9.19E+04
<b>Auvergne</b>	1 425 190	24.68	1.65E+05	4.08E+04

En conjunto, **el escalado territorial proporciona una estimación de la magnitud ambiental asociada al suministro actual de fertilizantes fosforados** en los territorios analizados. Esta lectura complementa el resultado unitario del ACV, ya que permite pasar del impacto por kg de  $P_2O_5$  a la carga ambiental total asociada al consumo agrícola de fósforo mineral. Los resultados obtenidos constituyen, por tanto, una línea base territorial frente a la cual podrán compararse en fases posteriores las alternativas de recuperación y valorización de fósforo desarrolladas en el proyecto ENDORSE.

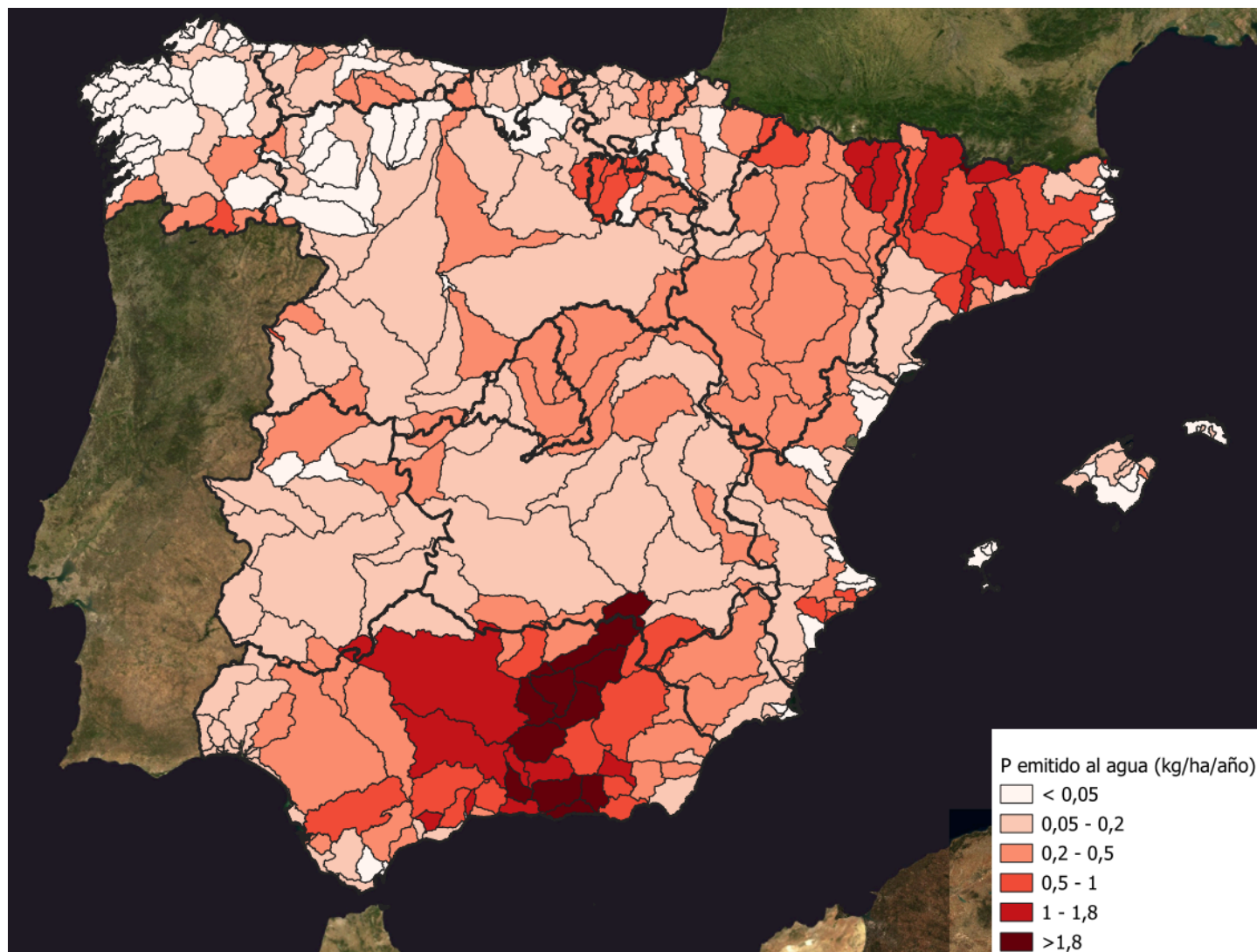
### 3.4.1.3 Emisiones agrícolas de fósforo al medio acuático

Las emisiones agrícolas de fósforo al medio acuático se analizan a partir de las estimaciones territoriales desarrolladas en el entregable A1.2.1. Por tanto, este apartado no constituye una nueva modelización de pérdidas de fósforo a partir del ACV de fertilizantes, sino una reinterpretación de los resultados ya obtenidos en el diagnóstico previo, orientada a contextualizar la presión difusa ejercida por el sistema agrícola sobre las masas de agua.

Estas emisiones corresponden a pérdidas de fósforo asociadas principalmente a procesos de erosión y escorrentía desde superficies agrícolas. En consecuencia, deben interpretarse como una presión difusa integrada del sistema agrario y no como emisiones atribuibles exclusivamente al uso actual de fertilizantes minerales. El fósforo movilizado hacia el medio acuático puede proceder de distintas fuentes, incluyendo fertilizantes minerales aplicados en la campaña, fertilizaciones orgánicas, purines, estiércoles, lodos tratados, reservas acumuladas en el suelo por aplicaciones históricas y fósforo naturalmente presente en el suelo. Asimismo, la magnitud de las pérdidas depende de factores como la pendiente, el tipo de suelo, la cobertura vegetal, la intensidad de la erosión, la escorrentía, el manejo agronómico y las condiciones climáticas.

Esta distinción es fundamental para evitar una interpretación simplificada de los resultados. A diferencia del ACV del suministro de fertilizantes, que expresa los impactos por **1 kg de  $P_2O_5$  suministrado**, las emisiones agrícolas al agua se presentan como **cargas territoriales de fósforo emitidas al medio acuático**.

Los resultados se presentan a escala territorial, con el objetivo de identificar las zonas donde se concentran las mayores pérdidas estimadas de fósforo hacia las masas de agua. Cuando es posible, las cargas absolutas se complementan con indicadores de intensidad, como pérdidas por hectárea, ya que las emisiones totales están fuertemente condicionadas por la superficie agrícola de cada territorio. Esta doble lectura permite diferenciar entre regiones con grandes superficies agrarias y regiones que, aun teniendo menor superficie, pueden presentar mayores tasas relativas de pérdida de fósforo.



**Ilustración 3. Estimación de las pérdidas de fósforo ( $\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ ) a las masas de agua, en España, debidas a la erosión hídrica en áreas agrícolas. Fuente: elaborada a partir de datos de Panagos et al. (2022). Extraída de ENDORSE Entregable 1.2.1.**

En el caso de España, el entregable A1.2.1 utilizó dos aproximaciones complementarias para estimar las pérdidas difusas de fósforo desde suelos agrícolas. Por un lado, se aplicaron los coeficientes de emisión de Álvarez et al. (2018) a la superficie agrícola nacional, diferenciando entre tierras de labor y otras tierras agrícolas. A partir de una superficie total agrícola de **25.266.636 ha**, formada por **11.197.349 ha de tierras de labor** y **14.069.287 ha de otras tierras agrícolas**, la emisión difusa estimada a escala nacional asciende a aproximadamente **10 kt P/año**. De esta cantidad, alrededor de **9 kt P/año** corresponden a tierras de labor y aproximadamente **1 kt P/año** a otras tierras agrícolas. Esta magnitud es coherente con estimaciones previas para España, que sitúan las emisiones de suelos agrícolas a masas de agua en torno a **12 kt P/año**. La desagregación por comunidades autónomas muestra una marcada heterogeneidad territorial. En términos absolutos, las mayores emisiones estimadas se concentran en **Castilla y León, Castilla-La Mancha, Andalucía, Extremadura y Cataluña**. Este patrón se explica, en gran medida, por la amplia superficie de tierras de labor existente en estas comunidades, que condiciona el volumen total de pérdidas estimadas. No obstante, los valores absolutos deben interpretarse con cautela, ya que, con esta metodología, las comunidades con mayor superficie agrícola presentan mayores emisiones totales aunque su intensidad de pérdida por hectárea no sea necesariamente la más elevada.

Una segunda aproximación empleada en el A1.2.1 se basó en las estimaciones de Panagos et al. (2022) sobre pérdidas de fósforo por erosión hídrica en áreas agrícolas (Ilustración 3). Estas pérdidas se expresan en  $\text{kg P/ha/año}$  y permiten aproximar la intensidad territorial de exportación de fósforo hacia el agua. A partir de las medianas de las tasas de emisión representadas en la Ilustración 3 y de la Superficie Agrícola Utilizada reportada por el INE para 2020, se estimaron las emisiones totales de P al agua por comunidad autónoma (Tabla 8).

El total de emisiones difusas estimado para España mediante esta segunda aproximación se sitúa en torno a **5 kt P/año**, aproximadamente la mitad de la estimación obtenida mediante los coeficientes aplicados en el A1.2.1. Esta diferencia refleja las incertidumbres asociadas a la estimación de emisiones difusas y las diferencias metodológicas entre enfoques. No obstante, ambas aproximaciones coinciden en señalar la relevancia de las pérdidas agrícolas de fósforo y la existencia de zonas con mayor presión potencial sobre el medio acuático. En particular, las estimaciones basadas en Panagos et al. (2022) muestran valores elevados en comunidades como **Andalucía, Castilla-La Mancha, Castilla y León, Aragón y Cataluña**. En algunos casos, como Andalucía o Cataluña, el resultado se explica tanto por la superficie agrícola como por tasas relativamente elevadas de pérdida de P por hectárea.

Tabla 8. Emisiones totales de P al agua estimadas para cada comunidad autónoma de España a partir de las medianas de las tasas de emisión de Panagos et al. (2022) y de la superficie agrícola utilizada (SAU) reportada por el INE para el año 2020. Extraída de ENDORSE Entregable 1.2.1.

CCAA	SAU (ha)	Mediana de las emisiones de P	Emisiones totales de P (kt)
<b>Galicia</b>	597993	0.03	0.018
P. de Asturias	333189	0.09	0.030
<b>Cantabria</b>	228844	0.10	0.023
País Vasco	176245	0.17	0.030
<b>Navarra</b>	511241	0.25	0.128
La Rioja	213306	0.18	0.038
<b>Aragón</b>	2217490	0.27	0.599
Cataluña	1092215	0.32	0.350
<b>Baleares</b>	167531	0.04	0.007
Castilla y León	5277137	0.13	0.686
<b>Madrid</b>	303330	0.24	0.073
Castilla La Mancha	4244352	0.22	0.934
<b>C. Valenciana</b>	589311	0.11	0.065
Murcia	373049	0.18	0.067
<b>Extremadura</b>	2785472	0.11	0.306
Andalucía	4748844	0.35	1.662

Para Portugal (Tabla 9), el análisis se basa en los resultados recogidos en los **Planos de Gestão de Região Hidrográfica - 3.º ciclo (2022-2027)** (APA, 2024a), ya incorporados en el entregable A1.2.1. Estos datos permiten diferenciar las emisiones difusas de fósforo al agua asociadas a agricultura y ganadería por región hidrográfica.

Los resultados muestran que las mayores emisiones agrícolas se concentran en **RH5 Tejo e Ribeiras do Oeste, RH7 Guadiana, RH3 Douro y RH6 Sado e Mira**. Sin embargo, al considerar conjuntamente agricultura y ganadería, la presión difusa total aumenta de forma notable en regiones como **RH5 Tejo e Ribeiras do Oeste y RH4 Vouga, Mondego e Lis**, donde la contribución ganadera es particularmente relevante.

Este resultado refuerza la necesidad de interpretar las emisiones difusas como una presión integrada del sistema agropecuario, y no únicamente como resultado del uso de fertilizantes minerales. En Portugal, la contribución de la ganadería a las pérdidas difusas de fósforo resulta especialmente significativa en varias regiones hidrográficas, lo que pone de manifiesto la importancia de considerar también la gestión de estiércoles, purines y otros flujos orgánicos dentro del ciclo territorial del fósforo.

Tabla 9. Emisiones difusas de P al agua (kt año<sup>-1</sup>) estimadas, por región hidrográfica, para la agricultura y la ganadería en Portugal. Fuente: Planos de Gestão de Região Hidrográfica – 3.º ciclo (2022–2027). Extraída de ENDORSE Entregable 1.2.1.

Región hidrográfica	Agricultura	Ganadería
RH1 Minho e Lima	0.06	0.20
RH2 Cávado, Ave e Leça	0.1	0.94
RH3 Douro	0.64	1.33
RH4 Vouga, Mondego e Lis	0.29	4.33
RH5 Tejo e Ribeiras do Oeste	1.11	8.13
RH6 Sado e Mira	0.53	2.18
RH7 Guadiana	0.67	1.83
RH8 Ribeiras Algarve	0.088	0.11

En el caso de las regiones francesas incluidas en el ámbito SUDOE, el entregable A1.2.1 utilizó las estimaciones de Panagos et al. (2022) para aproximar las pérdidas de fósforo por erosión hídrica en áreas agrícolas (Ilustración 4). Estas estimaciones permiten caracterizar la intensidad potencial de pérdida de P hacia las masas de agua en las regiones consideradas.

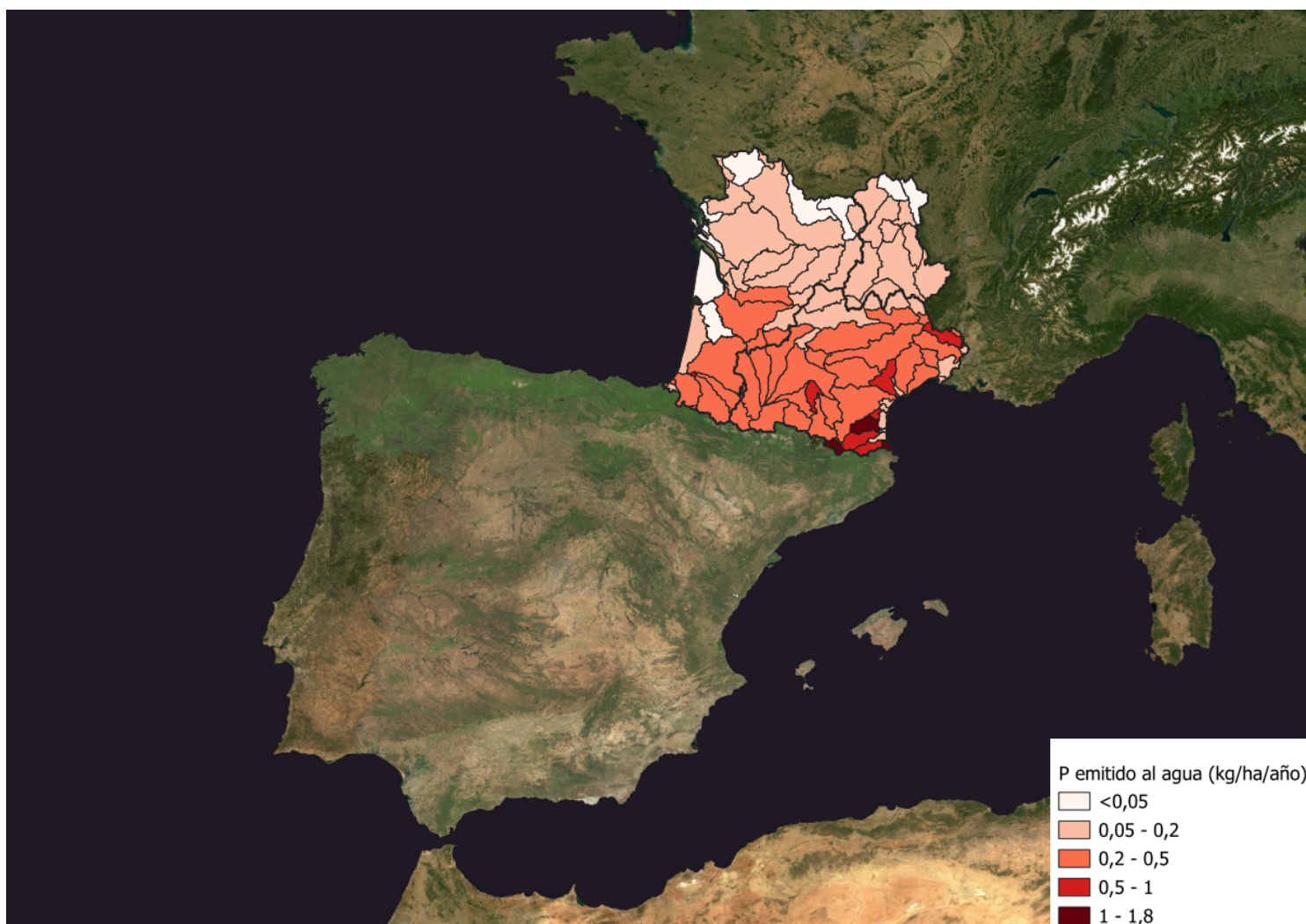


Ilustración 4. Estimación de las pérdidas de fósforo (kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) a las masas de agua debidas a la erosión hídrica en áreas agrícolas en las áreas francesas que pertenecen a la Región SUDOE. Fuente: Panagos et al. (2022). Extraída de ENDORSE Entregable 1.2.1.

La Tabla 10 muestra que **Occitanie** presenta las mayores pérdidas estimadas de fósforo, debido a una tasa mediana de pérdida por hectárea claramente superior a la de las otras regiones consideradas. **Nouvelle-Aquitaine** presenta una superficie agrícola mayor, pero una tasa de pérdida más moderada, lo que da lugar a un valor total inferior al de Occitanie. **Auvergne**, por su parte, muestra la menor pérdida total estimada, asociada tanto a una menor superficie agrícola como a una menor tasa de pérdida de P por hectárea. Estos resultados evidencian que las pérdidas difusas de fósforo no dependen únicamente de la extensión agrícola, sino también de las condiciones territoriales y agronómicas que determinan la erosión y la movilización del fósforo hacia el agua.

**Tabla 10. Estimación de las emisiones difusas de P al agua para las regiones de Francia que pertenecen al ámbito SUDOE. Fuentes: Panagos et al. (2022) y MAASA (2020). Extraída de ENDORSE Entregable 1.2.1.**

Región	SAU (ha)	Mediana pérdidas de P (kg/ha/año)	Pérdidas totales estimadas (kt P)
Nouvelle-Aquitaine	3 871 872	0.127	0.49
Occitanie	3 131 211	0.399	1.25
Auvergne	1 449 709	0.068	0.10

### 3.4.2 Resultados de los sistemas de depuración de aguas residuales

El análisis de los sistemas de depuración de aguas residuales combina dos niveles complementarios. En primer lugar, se presentan los resultados del ACV simplificado de la línea de aguas de las EDAR, expresados por **1 kg de P entrante en la depuradora**. Este análisis permite evaluar los impactos asociados al fósforo residual emitido en el efluente tratado y al consumo de cloruro férrico empleado para su precipitación química. En segundo lugar, se incorporan las emisiones puntuales de fósforo al agua estimadas en el entregable A1.2.1, que permiten contextualizar la magnitud territorial de las descargas procedentes de EDAR en España, Portugal y Francia SUDOE.

#### 3.4.2.1 Resultados unitarios del ACV de la línea de aguas

El modelo de ACV de EDAR se centra en la línea de aguas y considera dos elementos principales: el **fósforo residual emitido en el efluente tratado** y el **consumo de FeCl<sub>3</sub>** asociado a la precipitación química del fósforo. El fósforo entrante se utiliza como referencia funcional del sistema, pero no se modeliza como consumo de recurso, ya que representa la carga contaminante gestionada por la planta.

Los resultados (Tabla 11) muestran que las categorías de impacto no asociadas directamente a la eutrofización de agua dulce están dominadas por el consumo de FeCl<sub>3</sub>. Esto ocurre en acidificación, cambio climático, eutrofización marina, uso de recursos fósiles, uso de recursos minerales y metales, y uso de agua. En estas categorías, el fósforo emitido en el efluente no presenta contribución directa en el método aplicado, mientras que el FeCl<sub>3</sub> incorpora los impactos asociados a su producción y suministro.

En cambio, la categoría de **eutrofización de agua dulce** está claramente dominada por la emisión directa de fósforo en el efluente tratado. Del impacto total de **2,16E-01 kg P eq por kg de P entrante**, **2,10E-01 kg P eq** proceden del P emitido al agua, mientras que el FeCl<sub>3</sub> aporta **5,64E-03 kg P eq**. Esto confirma que, para esta categoría, la presión directa del fósforo residual vertido al medio acuático es el principal factor explicativo del impacto.

Estos resultados evidencian la existencia de un balance ambiental entre la reducción del fósforo en el efluente y el consumo de reactivos químicos necesario para lograr dicha eliminación. Desde el punto de vista de la eutrofización de agua dulce, el factor crítico es minimizar el fósforo residual emitido. Sin embargo, desde una perspectiva más amplia de ACV, el uso de FeCl<sub>3</sub> introduce impactos indirectos relevantes, especialmente en cambio climático, acidificación y uso de recursos fósiles.

Tabla 11. Impactos ambientales asociados a la gestión de 1 kg de P entrante en la línea de aguas de una EDAR.

Categoría de impacto	Unidad	Total	P efluente	FeCl3
Acidificación	mol H+ eq	7.09E-02	0.00E+00	7.09E-02
Cambio climático	kg CO2 eq	1.04E+01	0.00E+00	1.04E+01
Eutrofización, marina	kg N eq	1.29E-02	0.00E+00	1.29E-02
Eutrofización, agua dulce	kg P eq	2.16E-01	2.10E-01	5.64E-03
Uso de recursos, fósiles	MJ	1.30E+02	0.00E+00	1.30E+02
Uso de recursos, minerales y metales	kg Sb eq	3.25E-04	0.00E+00	3.25E-04
Uso de agua	m3 depriv.	3.99E+00	0.00E+00	3.99E+00

### 3.4.2.2 Emisiones puntuales de fósforo procedentes de EDAR

De forma complementaria al ACV unitario, se incorporan las emisiones puntuales de fósforo al agua estimadas en el entregable A1.2.1, expresadas como cargas anuales emitidas desde los sistemas de depuración. Estos datos permiten contextualizar la presión territorial ejercida por las EDAR e identificar los territorios donde se concentran las mayores emisiones puntuales de fósforo.

En España (Tabla 12), las emisiones de fósforo procedentes de EDAR se estimaron a partir del volumen de aguas residuales tratadas y de la concentración media de fósforo en el efluente. Cuando no se disponía de concentración específica, se utilizó la media nacional como aproximación. El resultado agregado para España asciende a aproximadamente **9.790 t P/año** emitidas al agua desde EDAR. Las mayores emisiones puntuales de fósforo desde EDAR se concentran en **Cataluña, Andalucía, País Vasco y Castilla y León**. En estos casos, la magnitud de la emisión está condicionada tanto por el volumen de aguas residuales tratadas como por la concentración media de fósforo en el efluente. Cataluña presenta el mayor valor estimado, con **1.786 t P/año**, seguida de Andalucía, con **1.341 t P/año**, País Vasco, con **1.248 t P/año**, y Castilla y León, con **1.021 t P/año**.

Tabla 12. Estimación de la emisión total de P de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) a las aguas por comunidades autónomas en España. Fuentes: INE y base de datos de la UWWTD.

CCAA	Volumen de aguas residuales tratadas (m <sup>3</sup> día <sup>-1</sup> )	Concentración media de salida (mg L <sup>-1</sup> )	Emisiones totales de fósforo a las aguas (ton año <sup>-1</sup> )
Galicia	1 498 152	1.52	829
P. de Asturias	246 006	1.14	103
Cantabria	874 605	1.45	464
País Vasco	1 619 783	2.11	1248
Navarra	429 506	*	322
La Rioja	135 311	2.14	106
Aragón	586 480	1.69	362
Cataluña	2 707 751	1.81	1786
Baleares	333 591	3.46	422
Castilla y León	1 400 261	2.00	1021
Madrid	1 634 765	0.59	355
Castilla La Mancha	604 317	2.04	450

<b>C. Valenciana</b>	745 523	1.96	533
Murcia	331 189	2.31	280
<b>Extremadura</b>	225 209	*	169
Andalucía	1 637 261	2.24	1341
<b>España</b>	15 009 710	2.05	9790

\*Sin datos, se utiliza la media nacional.

En Portugal (Tabla 13), los datos procedentes de los Planos de Gestão de Região Hidrográfica permiten estimar las emisiones puntuales de fósforo asociadas a EDAR por región hidrográfica. Las mayores emisiones se registran en **RH5 Tejo e Ribeiras do Oeste**, con **0,95 kt P/año**, seguida de **RH6 Sado e Mira**, con **0,63 kt P/año**. El resto de regiones presentan valores inferiores, aunque también contribuyen a la presión puntual total sobre las masas de agua.

En Francia SUDOE (Tabla 14), los datos disponibles permiten comparar la carga de fósforo entrante y saliente de las EDAR, así como el rendimiento de retención del nutriente. **Occitanie** presenta la mayor carga de entrada, con **5,06 kt P/año**, y una salida estimada de **1,28 kt P/año**, con un rendimiento de retención del **68%**. **Nouvelle-Aquitaine** presenta una entrada de **2,10 kt P/año**, una salida de **0,71 kt P/año** y un rendimiento del **66%**. **Auvergne** presenta valores mucho menores, con **0,07 kt P/año** de entrada y **0,03 kt P/año** de salida, así como un rendimiento de retención del **50%**.

**Tabla 13. Emisiones puntuales de P al agua (kt año<sup>-1</sup>) estimadas para cada sector y región hidrográfica. Fuente: Planos de Gestão de Região Hidrográfica – 3.º ciclo (2022–2027).**

Región hidrográfica	EDAR
<b>RH1 Minho e Lima</b>	0.033
RH2 Cávado, Ave e Leça	0.32
<b>RH3 Douro</b>	0.24
RH4 Vouga, Mondego e Lis	0.32
<b>RH5 Tejo e Ribeiras do Oeste</b>	0.95
RH6 Sado e Mira	0.63
<b>RH7 Guadiana</b>	0.30
RH8 Ribeiras Algarve	0.18

En conjunto, los resultados nos revelan la magnitud del impacto que suponen las emisiones al medio acuático de fósforo procedente de las EDAR, especialmente en territorios con mayores cargas de aguas residuales urbanas tratadas. A diferencia de las emisiones difusas agrícolas, las emisiones de EDAR se producen en puntos identificables y están directamente relacionadas con el funcionamiento de los sistemas de tratamiento, las cargas influentes, los rendimientos de eliminación y la concentración residual en el efluente.

Tabla 14. Flujos totales de fósforo (kt año<sup>-1</sup>) en las corrientes de entrada y salida de las EDAR y eficiencia de retención del nutriente. Fuentes: SIEAG (2024) y SIE (2022)

Región	Entrada (kt P año <sup>-1</sup> )	Salida (kt P año <sup>-1</sup> )	Rendimiento (%)
Nouvelle-Aquitaine	2.10	0.71	66
Occitanie	5.06	1.28	68
Auvergne	0.07	0.03	50

### 3.5 Interpretación y conclusiones

Los resultados de la evaluación ambiental muestran que el ciclo actual del fósforo en la región SUDOE genera presiones relevantes en dos planos diferenciados: por un lado, los impactos asociados al suministro de fertilizantes fosforados minerales y, por otro, las emisiones directas de fósforo al medio acuático procedentes tanto del sistema agrícola como de las EDAR. Esta distinción es clave para interpretar correctamente los resultados, ya que no todas las presiones responden a la misma lógica ni requieren el mismo tipo de estrategia de mitigación.

En el caso del suministro de fertilizantes fosforados, el ACV muestra que la mayor parte de los impactos se concentra en la etapa de síntesis de fertilizantes, que domina todas las categorías ambientales analizadas. Los impactos asociados a la extracción y beneficiado de la roca fosfórica y al transporte/distribución son menores en términos relativos, aunque mantienen cierta relevancia en categorías concretas. Esto indica que la carga ambiental del fósforo mineral está fuertemente vinculada a los procesos industriales de transformación y formulación de fertilizantes.

El escalado territorial permite dimensionar la magnitud de estos impactos. En el conjunto de los territorios analizados, el suministro de fertilizantes fosforados representa aproximadamente **502.203 t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>**, asociadas a impactos del orden de **2,53E+09 kg CO<sub>2</sub> eq**, **2,36E+06 kg N eq** de eutrofización marina, **5,83E+05 kg P eq** de eutrofización de agua dulce y **3,59E+10 MJ** de uso de recursos fósiles. España y Francia SUDOE concentran la mayor parte de estas cargas debido al mayor volumen de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> considerado, mientras que Portugal presenta una contribución menor en términos absolutos.

No obstante, estos impactos del suministro de fertilizantes deben diferenciarse de las emisiones agrícolas difusas de fósforo al medio acuático. Estas emisiones no representan una pérdida atribuible exclusivamente al fertilizante mineral aplicado, sino una presión integrada del sistema agrícola y agropecuario. El fósforo movilizado puede proceder de fertilización mineral y orgánica, reservas acumuladas en el suelo, estiércoles, purines, lodos tratados y fósforo naturalmente presente en el sistema. Además, su transferencia hacia el agua depende de factores territoriales como la erosión, la escorrentía, la pendiente, el tipo de suelo, la cobertura vegetal y las prácticas de manejo.

Los resultados procedentes del entregable A1.2.1 evidencian una elevada variabilidad territorial en estas pérdidas difusas. En España, las estimaciones se sitúan en el orden de **5–10 kt P/año**, dependiendo de la aproximación metodológica empleada. En Portugal, la ganadería aparece como una fuente relevante de presión difusa en varias regiones hidrográficas, lo que refuerza la necesidad de interpretar estas emisiones como una presión agropecuaria integrada. En Francia SUDOE, las diferencias regionales muestran que la intensidad de pérdida por hectárea puede ser tan determinante como la superficie agrícola total.

En el caso de las EDAR, los resultados muestran una casuística diferente. A diferencia de las pérdidas agrícolas, las emisiones de fósforo procedentes de depuración se producen en puntos identificables y están directamente relacionadas con el funcionamiento de los sistemas de tratamiento, las cargas influentes, los rendimientos de eliminación y la concentración residual en el efluente. En el ACV unitario, la eutrofización de agua dulce está dominada por el fósforo residual emitido al agua, mientras que el consumo de FeCl<sub>3</sub> explica la mayor parte de los impactos indirectos en categorías como cambio climático, acidificación, uso de recursos fósiles, uso de recursos minerales y uso de agua.

A escala territorial, las EDAR representan una fuente puntual relevante de fósforo al medio acuático. Las emisiones estimadas alcanzan aproximadamente **9.790 t P/año en España**, mientras que en **Portugal (2,97 kt P/año)** destacan regiones hidrográficas como **RH5 Tejo e Ribeiras do Oeste** y **RH6 Sado e Mira**, y en **Francia SUDOE (~2,02 kt P/año)** las mayores cargas se concentran en **Occitanie** y **Nouvelle-Aquitaine**. Estos resultados sitúan a las EDAR como ámbitos prioritarios para analizar mejoras en la

eliminación de fósforo y oportunidades de recuperación, especialmente al tratarse de sistemas donde el fósforo se concentra en flujos más localizados que en el caso de las pérdidas agrícolas difusas.

En conjunto, la evaluación ambiental muestra que la transición hacia una gestión más sostenible del fósforo requiere actuar sobre dos frentes complementarios. En el sistema agrícola, resulta necesario **reducir la dependencia de fertilizantes minerales convencionales** y, al mismo tiempo, **prevenir las pérdidas difusas mediante una mejor gestión agronómica**, optimización de dosis, reducción de la erosión y gestión adecuada de fuentes orgánicas. En los sistemas de depuración, el reto consiste en **reducir el fósforo residual emitido al medio acuático** y **valorar alternativas que permitan recuperar el nutriente, disminuyendo la dependencia de la precipitación química convencional** y los impactos asociados al consumo de reactivos.

Desde la perspectiva del proyecto ENDORSE, los resultados permiten establecer una línea base ambiental frente a la que comparar futuras soluciones de recuperación y valorización de fósforo. Esta línea base no sólo recoge los impactos asociados al suministro actual de fertilizantes minerales, sino también la magnitud de las emisiones directas de fósforo al medio acuático y el papel específico de las EDAR como puntos concentrados de gestión del nutriente. Por tanto, proporciona una referencia útil para evaluar en fases posteriores si las soluciones desarrolladas contribuyen a reducir impactos, recuperar recursos secundarios y avanzar hacia un modelo más circular de gestión del fósforo en la región SUDOE.

## 4 Evaluación económica

### 4.1 Enfoque

La evaluación económica del ciclo del fósforo (P) en la región SUDOE analiza las implicaciones económicas, la dependencia estructural y las vulnerabilidades asociadas al **modelo actual de gestión del fósforo en España, Portugal y Francia**.

El fósforo constituye un nutriente esencial para la producción agrícola y la seguridad alimentaria, pero también una **materia prima estratégica** cuya disponibilidad depende fuertemente de mercados internacionales altamente concentrados y expuestos a inestabilidad geopolítica, energética y comercial. En el contexto europeo, esta dependencia resulta especialmente relevante dada la limitada disponibilidad de recursos fosfatados propios y el elevado peso de las importaciones de roca fosfórica, ácido fosfórico y fertilizantes elaborados.

La dimensión económica del ciclo del fósforo no puede, por tanto, analizarse únicamente a partir del coste directo de los fertilizantes. El modelo actual genera vulnerabilidades económicas adicionales asociadas a: la dependencia estructural de importaciones; la exposición a la volatilidad de precios internacionales; la limitada resiliencia territorial y autonomía estratégica regional; la baja circularidad de los flujos de nutrientes; y la pérdida de corrientes potencialmente valorizables procedentes de sistemas urbanos.

Por ello, la presente evaluación adopta una **perspectiva sistémica**. Más que analizar la rentabilidad de tecnologías concretas, el objetivo es caracterizar la relevancia económica del consumo de fósforo en la región, evaluar el grado de dependencia exterior, estimar el valor económico teórico de los flujos actualmente no recuperados, y analizar el potencial de la recuperación como herramienta para mejorar la resiliencia y la circularidad territorial. La evaluación constituye un *escenario de referencia (baseline)* frente al cual podrán compararse las soluciones desarrolladas en el marco del proyecto ENDORSE.

### 4.2 Metodología e indicadores

La evaluación se basa en los flujos físicos de fósforo desarrollados en la Actividad A1.2, que proporciona los datos de consumo, importaciones, balances agrícolas y emisiones para los tres países. El análisis traduce estos flujos a indicadores económicos para caracterizar la importancia económica del aprovisionamiento de fertilizantes fosfatados, la exposición a los mercados internacionales y el valor teórico de los flujos actualmente no valorizados.

El análisis **no pretende constituir un estudio de viabilidad técnico-económica de tecnologías específicas de recuperación. Proporciona una caracterización económica estratégica de escala macro**. Los resultados deben interpretarse como órdenes de magnitud orientativos, no como valoraciones económicas exactas.

Para transformar los flujos expresados en P o  $P_2O_5$  a toneladas equivalentes de producto fertilizante comercializado, se utilizó un ratio medio  $P_2O_5$ /producto derivado del mercado español de fertilizantes fosfatados en 2023 (MAPA, 2023b). Dicho ratio se calculó a partir de la relación entre las ventas agrícolas de  $P_2O_5$  y el volumen total de fertilizantes fosfatados comercializados en España, resultando en un contenido medio aproximado del 16,14%  $P_2O_5$  en producto. Este ratio se aplicó también a Francia y Portugal únicamente con fines comparativos y de estimación macroeconómica. Los resultados deben interpretarse como aproximaciones orientativas sujetas a incertidumbre derivada de posibles diferencias en la composición real del *mix* de fertilizantes entre territorios.

#### 4.2.1 Fuentes de datos y precios de referencia

Los flujos físicos proceden del Entregable A1.2 y sus fuentes estadísticas primarias: MAPA (2023b) para España, INE Portugal (2024) para Portugal, y MAASA (2025) para Francia. Las emisiones de EDARs proceden de EEA (2023), APA (2024b), SIEAG (2024) y SIE (2022).

Los precios de referencia se obtienen del *Agri-food Data Portal* de la Comisión Europea (European Commission, 2026b), que publica mensualmente precios de fertilizantes fosfatados expresados en **€/t de producto fertilizante formulado** para el conjunto de la UE. Para garantizar la homogeneidad comparativa entre países, se adopta el precio de referencia unificado de **594 €/t producto** (media anual 2025, dato oficial CE) para los tres países. La metodología de conversión de flujos físicos a valores económicos se describe en cada subapartado donde se aplica.

### 4.3 Coste económico del modelo actual de gestión del fósforo

Este apartado cuantifica el gasto económico asociado al aprovisionamiento de fertilizantes fosfatados en los tres países de la región, tomando como base los volúmenes del A1.2 y el precio de referencia unificado (594 €/t de producto). Los resultados se expresan

como órdenes de magnitud orientativos. El análisis pone de relieve tanto la magnitud del gasto como la estructura de dependencia exterior, que determina el grado de exposición de cada sistema productivo a la volatilidad del mercado internacional. La Tabla 15 y la Ilustración 5 muestran la evolución del precio de referencia de la UE.

Tabla 15. Evolución del precio de referencia de fertilizantes fosfatados en la UE.

Período	Precio indicativo (€/t producto)
2019	363
2020	310
2021	566
2022	926 (máx. mensual: 1035)
2023	612
2024	588
<b>2025 — precio de referencia unificado</b>	<b>594</b>
2026 (enero–abril)	643 (máx.: 700)

Fuente: European Commission — Agri-food Data Portal (2026b).

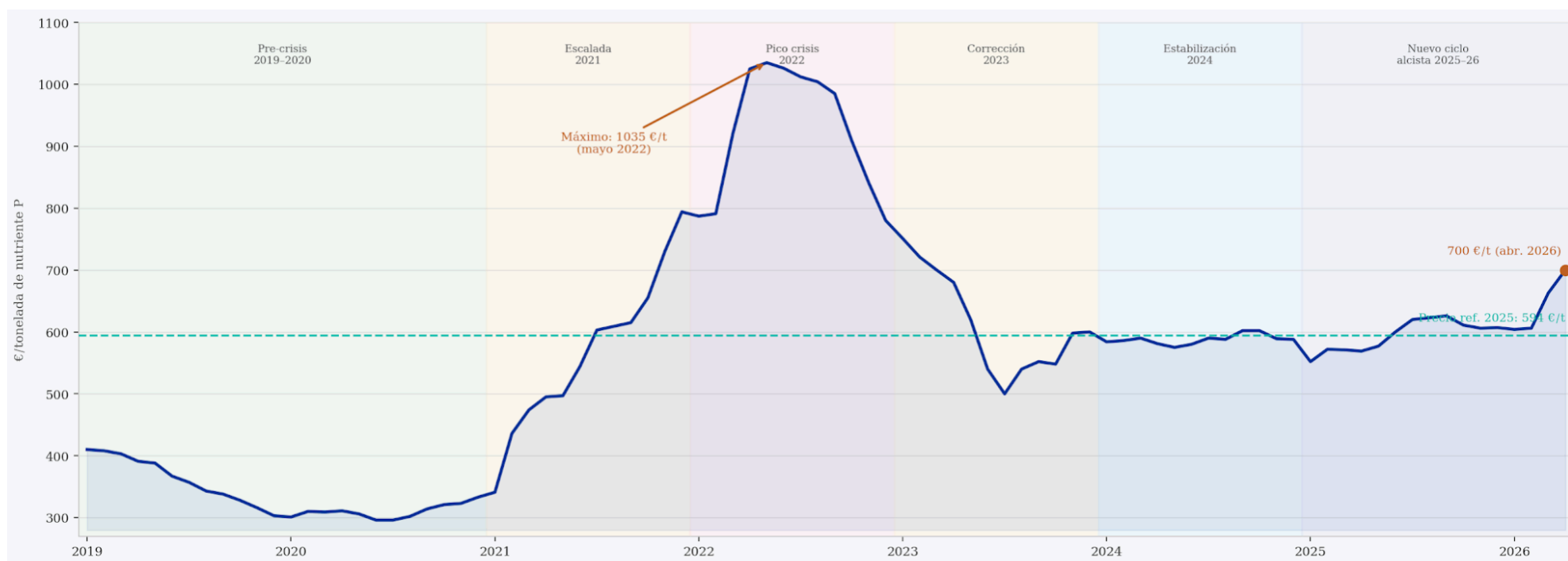


Ilustración 5. Evolución mensual del precio de referencia del fósforo (P) en la UE (enero 2019 – abril 2026). Fuente: European Commission — Agri-food Data Portal (2026b). Precios mensuales de fertilizantes fosfatados agregados por nutriente P. Unidad: €/t de producto fertilizante de P.

Los datos oficiales de la CE muestran que el precio del P pasó de una media de ~336 €/t en el período pre-crisis (2019–2020) a un pico de 926 €/t en 2022 (con un máximo mensual de 1035 €/t en mayo de 2022), seguido de una corrección en 2023 (media 612 €/t) y una nueva estabilización en 2024–2025 (588 y 594 €/t respectivamente). Los datos de 2026 muestran ya una tendencia alcista renovada, con una media de 643 €/t en el primer cuatrimestre y un máximo de 700 €/t en abril (European Commission, 2026b), confirmando que la normalización post-crisis no derivó en estabilización sostenida.

A esta tendencia se añade una presión alcista estructural adicional derivada de la implementación progresiva de **aranceles europeos sobre fertilizantes de origen ruso y bielorruso**, en vigor desde julio de 2025 y con previsión de alcanzar 430 €/t para los fertilizantes fosfatados —incluyendo DAP, MAP y NPK— en julio de 2028 (Consejo Europeo, 2025).

### 4.3.1 España

El mercado español de fertilizantes fosfatados en 2023 registró ventas agrícolas de ~244 kt P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/año e importaciones de ~257 kt P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/año (MAPA, 2023b; A1.2, Tabla 16).

Para estimar el valor económico equivalente del mercado de fertilizantes fosfatados, se utilizó el ratio medio P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/producto derivado del *mix* real de fertilizantes fosfatados comercializados en España en 2023 (MAPA, 2023b). Las ventas agrícolas de 243 778 t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> correspondieron a un volumen total de 1.510.181 t de producto fertilizante fosfatado comercializado —incluyendo fosfatados simples, MAP, DAP, complejos NP/PK y NPK—, lo que arroja un **contenido medio aproximado del 16,14% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en producto**. Aplicando el precio de referencia europeo de 594 €/t de producto fertilizante, el valor económico equivalente del mercado español de fertilizantes fosfatados se sitúa en el orden de **~897 M€/año**.

Esta cifra subestima parcialmente la dependencia estructural real: más del 65% de las materias primas fosfatadas empleadas por la industria española procede de importaciones, principalmente de Marruecos (Álvarez et al., 2018), situando la **dependencia exterior efectiva por encima del 70%**. Territorialmente, Castilla y León y Andalucía concentran cerca del 45% del consumo nacional (MAPA, 2023b; A1.2).

Tabla 16. Principales indicadores económicos orientativos del ciclo del fósforo en España.

Indicador	Valor orientativo
Ventas agrícolas fertilizantes fosfatados (kt P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /año)	~244
Importaciones fertilizantes fosfatados (kt P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /año)	~257
Total fertilizante fosfatado mercado agrícola (kt producto/año)	~1510
Precio de referencia CE 2025 (€/t producto)	594
Gasto estimado sector agrícola (orden de magnitud)	~897 M€/año
Dependencia exterior estimada	>70%
SAU España	23,5 M ha
Coste medio fertilización fosfatada (€/ha SAU)	~38

Fuente: MAPA (2023b); European Commission (2026b); Álvarez et al. (2018). Elaboración propia.

### 4.3.2 Portugal

Portugal presenta una elevada dependencia estructural de fósforo, aunque la caracterización de su consumo requiere diferenciar entre los flujos totales de fósforo agrícola y el consumo estimado de fertilizantes minerales fosforados empleado en este análisis. Según los datos recogidos en la actividad A1.2, la demanda agrícola de fósforo se sitúa en torno a **45–46 kt P/año** (INE Portugal, 2024; A1.2). No obstante, para mantener la coherencia con la evaluación ambiental y con el escalado territorial realizado en el apartado 3.4.1.2 (Tabla 4), la estimación económica se basa en el consumo de fertilizantes minerales fosforados calculado para Portugal en 2023, equivalente a **~37 kt P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/año**.

Aplicando de forma orientativa el mismo ratio medio P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/producto derivado del mercado español de fertilizantes fosfatados en 2023 (**16,14% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en producto**), este consumo equivaldría a **~226 kt de producto fertilizante fosfatado comercializado**. Al utilizar el precio de referencia europeo de **594 €/t de producto**, el valor económico equivalente del mercado portugués de fertilizantes fosforados minerales se sitúa en el orden de **134 M€/año**.

Aunque Portugal ha sido considerado tradicionalmente un territorio con una dependencia exterior muy elevada debido a la limitada producción nacional de fertilizantes fosfatados (Lima et al., 2024), esta situación podría estar evolucionando. Las entrevistas realizadas en el marco del proyecto apuntan a la presencia o desplazamiento reciente de empresas productoras hacia Portugal, por lo que la dependencia exterior efectiva podría requerir una actualización posterior con datos industriales más recientes.

Tabla 17. Principales indicadores económicos orientativos del ciclo del fósforo en Portugal.

Indicador	Valor orientativo
<b>Demanda agrícola total de fósforo (kt P/año)</b>	~45–46
<b>Consumo estimado de fertilizantes minerales (kt P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> /año)</b>	~37
<b>Total fertilizante fosfatado mercado agrícola (kt producto/año)</b>	~226
<b>Precio de referencia CE 2025 (€/t producto)</b>	594
<b>Gasto estimado sector agrícola (orden de magnitud)</b>	~134 M€/año
<b>Producción nacional de fertilizantes fosfatados</b>	Limitada, aunque con posible evolución reciente
<b>Dependencia exterior estimada</b>	Alta

Fuente: INE Portugal (2024); Lima et al. (2024); European Commission (2026b). Elaboración propia.

### 4.3.3 Francia

Francia presenta un perfil más diversificado que España y Portugal, tanto por la evolución de sus aportes minerales como por la mayor integración de fuentes orgánicas en el sistema agrícola. A escala nacional, los aportes minerales de fósforo se redujeron de aproximadamente **796 kt P/año** en la campaña 2000/2001 a **322 kt P/año** en la campaña 2023/2024, lo que supone una reducción cercana al **59%** (MAASA, 2025; A1.2, Tablas 14 y 15). Expresado como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, este valor equivale a aproximadamente **738 kt P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/año** para el conjunto de Francia.

No obstante, estos valores nacionales no representan específicamente el ámbito territorial SUDOE. Para mantener la coherencia con la evaluación ambiental y con el escalado territorial realizado en el apartado 3.4.1.2 (Tabla 4), la estimación económica se basa en el consumo de fertilizantes minerales fosforados calculado para las regiones francesas incluidas en el ámbito SUDOE. Este consumo asciende a aproximadamente **222 kt P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/año** en 2023, considerando las regiones de Nouvelle-Aquitaine, Occitanie y Auvergne. Aplicando de forma orientativa el mismo ratio medio P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/producto derivado del mercado español de fertilizantes fosfatados en 2023 (**16,14% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en producto**), este consumo equivaldría a aproximadamente **1378 kt de producto fertilizante fosfatado comercializado**. Al utilizar el precio de referencia europeo de **594 €/t de producto**, el valor económico equivalente del mercado de fertilizantes fosforados minerales en Francia SUDOE se sitúa en el orden de **818 M€/año**.

Además, la mayor presencia de fuentes orgánicas en el sistema francés —aproximadamente el **60%** de los aportes agrícolas totales— reduce parcialmente la exposición estructural frente a la volatilidad del fertilizante mineral importado. Esta mayor diversificación no elimina la dependencia del fósforo mineral, pero sí aporta una mayor resiliencia relativa respecto a España y Portugal.

Tabla 18. Principales indicadores económicos orientativos del ciclo del fósforo en Francia.

Indicador	Valor orientativo
Aportes minerales de fósforo, total Francia (kt P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /año)	~738
Consumo estimado de fertilizantes minerales fosforados, Francia SUDOE (kt P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /año)	~222
Equivalente fertilizante fosforados, Francia SUDOE (kt producto/año)	~1378
Precio de referencia CE 2025 (€/t producto)	594
Gasto estimado fertilizante mineral, Francia SUDOE (orden de magnitud)	~818 M€/año
Aportes de origen orgánico (% sobre total)	~60%
Reducción aportes minerales desde campaña 2000/2001	~-59%

Fuente: MAASA (2025); European Commission (2026b). Elaboración propia

#### 4.3.4 Evaluación integrada del espacio SUDOE

A escala SUDOE (Tabla 19), el modelo actual representa un gasto anual del orden de **~1849 M€/año** bajo condiciones de precio de referencia 2025, que podría superar los 2883 M€/año en escenarios equivalentes al pico de 2022. Esta exposición se ve agravada por la elevada concentración geopolítica del suministro: Marruecos concentra más del 70% de las reservas mundiales probadas de roca fosfórica (USGS, 2024). La Tabla 19 sintetiza los principales indicadores económicos del ciclo del fósforo para los tres países.

Tabla 19. Indicadores económicos comparativos del espacio SUDOE.

Indicador	España	Portugal	Francia SUDOE	SUDOE total
Consumo fertilizantes (kt P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /año)	~244	~37	~222	~503
Precio de referencia unificado (€/t Producto)	594	594	594	594
Gasto estimado (M€/año)	~897	~134	~818	~1849
Gasto estimado — pico 2022 (M€/año)	~1398	~209	~1276	~2883
Dependencia exterior estimada	>70%	Alta	Moderada-alta	Alta
Balance agrario (kg P/ha/año)	+2.6	+2.2	+2.2	—
Emisiones puntuales EDARs (kt P/año)	~9.8	~3.0	~2.0 (SUDOE)	~14.8
Integración reciclaje orgánico	Media (~52%)	Media	Alta (~60%)	—
Exposición a volatilidad internacional	Alta	Alta	Moderada	—

Fuente: A1.2, MAPA (2023b); INE Portugal (2024); MAASA (2025); European Commission (2026b); EEA (2023); SIEAG (2024); SIE (2022); APA (2024). Elaboración propia.

El modelo actual de fósforo en el espacio SUDOE puede caracterizarse por una **elevada dependencia exterior**, una **fuerte exposición a la volatilidad internacional** y unos **niveles de circularidad todavía reducidos**, con diferencias notables entre los tres países. Francia exhibe la mayor resiliencia relativa, con un ~60% de los aportes agrícolas procedentes de fuentes orgánicas y una reducción del consumo mineral del ~59% respecto al año 2000. España y Portugal presentan un perfil de mayor dependencia, con balances agrarios positivos (~+2.6 y ~+2.2 kg P/ha/año respectivamente) y una dependencia exterior alta.

#### 4.4 Flujos de fósforo no recuperados y relevancia estratégica

Una parte significativa del fósforo que circula por los sistemas urbanos de la región SUDOE no se reincorpora actualmente al ciclo productivo, sino que es vertida al medio acuático o transferida a corrientes de lodos de depuración. Estos flujos representan pérdidas de nutrientes potencialmente valorizables y ponen de manifiesto las limitaciones del modelo lineal actual de gestión del fósforo.

El análisis realizado en este apartado no pretende estimar beneficios económicos directos asociados a la recuperación, ni calcular la rentabilidad de tecnologías específicas. Su objetivo es identificar y contextualizar los principales flujos de fósforo actualmente no recuperados dentro del sistema urbano, así como ilustrar su relevancia estratégica desde la perspectiva de la circularidad y la dependencia de recursos externos.

Debe señalarse además que el fósforo presente en las corrientes urbanas no se encuentra íntegramente disponible para recuperación. Las tecnologías de recuperación —incluyendo la precipitación en cascada desarrollada en ENDORSE— operan principalmente sobre **corrientes internas concentradas** (por ejemplo, sobrenadantes de digestión anaerobia y otras corrientes de condensados o de centrifugados), y no directamente sobre el efluente final vertido al medio.

##### 4.4.1 Emisiones de fósforo procedentes de las EDARs

Las emisiones puntuales de fósforo procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) constituyen uno de los principales flujos urbanos de fósforo no reintegrados al ciclo productivo. Aunque una parte importante del fósforo se elimina (sin valorización) durante el tratamiento, una fracción continúa siendo descargada al medio receptor.

Los datos mostrados en las Tablas 12, 13 y 14 (apartado 3.4.2.2) corresponden a estimaciones de las emisiones anuales de fósforo asociadas a las EDAR en distintos territorios del espacio SUDOE. Estas emisiones reflejan la magnitud de los flujos de fósforo que continúan abandonando el sistema urbano sin aprovechamiento material. Aunque no todo este fósforo (14.8 kt P/año) es técnica o económicamente recuperable, los datos evidencian la existencia de un recurso secundario relevante actualmente insuficientemente integrado en esquemas de economía circular.

Las diferencias regulatorias entre territorios condicionan de forma significativa la magnitud de estas emisiones y los incentivos para su reducción. En Portugal, los límites de vertido más estrictos en zonas sensibles (1–2 mg P/L) generan una mayor presión normativa sobre la eliminación de fósforo. En contraste, algunos sistemas extensivos de tratamiento en Francia presentan requisitos menos exigentes, reduciendo el incentivo directo para implementar soluciones avanzadas de recuperación (entrevistas ENDORSE, 2026).

##### 4.4.2 Fósforo contenido en lodos de depuración

Durante el tratamiento de aguas residuales, una proporción importante del fósforo influente es transferida a los lodos de depuración. Según la literatura disponible para España, aproximadamente el 60% del fósforo que entra en las EDARs queda retenido en los lodos (Álvarez et al., 2018).

A diferencia del efluente final, los lodos constituyen una corriente con mayor concentración de fósforo y, por tanto, con un mayor potencial de valorización material. No obstante, el fósforo contenido en los lodos se presenta mayoritariamente en formas orgánicas o minerales de biodisponibilidad variable, lo que dificulta su equivalencia directa con fertilizantes minerales convencionales.

La aplicación agrícola de lodos, compostados o tratados, constituye actualmente la principal vía de retorno del fósforo urbano al sistema productivo en los países del espacio SUDOE, aunque con niveles de implantación y aceptación heterogéneos. Francia presenta una integración relativamente elevada de valorización orgánica; Portugal mantiene una estrategia favorable, aunque condicionada por cuestiones regulatorias y logísticas; mientras que en España persisten mayores reticencias relacionadas con la percepción de contaminantes y calidad agronómica (entrevistas ENDORSE, 2026).

En este contexto, los lodos de depuración representan uno de los principales reservorios secundarios de fósforo dentro del ciclo urbano y constituyen una corriente prioritaria para futuras estrategias de recuperación y valorización.

#### 4.4.3 Externalidades económicas asociadas a pérdidas de fósforo

Las pérdidas de fósforo al medio acuático están asociadas a impactos ambientales y económicos indirectos, especialmente en relación con procesos de eutrofización y deterioro de la calidad del agua.

Entre las principales externalidades se incluyen:

- incremento de costes de tratamiento y potabilización;
- deterioro ecológico de masas de agua;
- proliferación de algas y episodios de hipoxia;
- pérdida de servicios ecosistémicos;
- y mayores exigencias regulatorias para operadores de saneamiento y abastecimiento.

La cuantificación económica precisa de estas externalidades resulta compleja, dado que la eutrofización depende de múltiples factores y de la interacción entre nutrientes, hidrología y condiciones ambientales locales. Sin embargo, diversos estudios europeos señalan que la presión por nutrientes puede incrementar significativamente los costes de gestión del agua, reforzando el argumento estratégico a favor de una gestión más circular y eficiente del fósforo.

### 4.5 Potencial económico de la recuperación y circularidad del fósforo

Este apartado analiza el potencial estratégico asociado a la recuperación de fósforo en el espacio SUDOE y revisa los principales factores que condicionan su interés económico desde la perspectiva de la circularidad, la dependencia exterior y la resiliencia territorial. El análisis **no constituye una evaluación de viabilidad económica de la tecnología ENDORSE**, cuyos costes y rendimientos reales serán determinados durante las fases de validación piloto del proyecto.

#### 4.5.1 Justificación estratégica de la recuperación de fósforo

La recuperación de fósforo presenta interés estratégico en el contexto europeo debido a la elevada dependencia exterior de fertilizantes y materias primas fosfatadas. La Unión Europea considera la roca fosfórica una materia prima crítica debido a la concentración geográfica de reservas y a los riesgos asociados al suministro internacional (European Commission, 2023).

En el espacio SUDOE, los sistemas agrícolas de España y Portugal presentan una elevada dependencia de importaciones de fertilizantes fosfatados y materias primas asociadas, mientras que Francia mantiene también una dependencia significativa, aunque parcialmente compensada por una mayor integración de fuentes orgánicas de nutrientes (A1.2).

En este contexto, la recuperación de fósforo puede contribuir potencialmente a:

- incrementar la circularidad de nutrientes;
- reducir parcialmente la dependencia exterior;
- diversificar fuentes de suministro;
- reforzar la resiliencia territorial;

- y reducir presiones ambientales asociadas a pérdidas de nutrientes.

Más allá de la rentabilidad financiera directa, la recuperación se enmarca por tanto en objetivos más amplios relacionados con economía circular, autonomía estratégica y sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios europeos.

#### 4.5.2 Condiciones económicas indicativas para la recuperación

La viabilidad económica de la recuperación de fósforo depende fuertemente de las características de las corrientes tratadas, especialmente de la concentración de fósforo presente en ellas.

La literatura científica identifica los sobrenadantes de digestión anaerobia y otras corrientes internas concentradas de EDAR como las más favorables para procesos de precipitación de estruvita y recuperación de fósforo (Dockhorn, 2009). En este sentido, Dockhorn (2009) señala que los costes operativos y de mantenimiento de sistemas de recuperación de estruvita varían considerablemente según la configuración tecnológica y la concentración de fósforo en la corriente tratada, observándose costes significativamente menores en corrientes altamente concentradas frente a corrientes diluidas.

En consecuencia, la recuperación de fósforo no puede evaluarse de forma homogénea para todas las EDAR ni para todas las corrientes urbanas. La viabilidad depende de factores específicos como:

- concentración de fósforo;
- caudal tratado;
- configuración de la línea de fangos;
- costes energéticos y de reactivos;
- escala de operación;
- y posibilidades de valorización del producto recuperado.

En el caso del proyecto ENDORSE, la tecnología de precipitación en cascada se orienta precisamente a corrientes internas concentradas, buscando maximizar la recuperación de sales de fósforo en condiciones potencialmente más favorables desde el punto de vista operativo.

Adicionalmente, el Reglamento (UE) 2019/1009 relativo a productos fertilizantes de la UE incorpora determinadas sales recuperadas —incluyendo estruvita bajo condiciones específicas— dentro del marco regulatorio europeo de fertilizantes, facilitando potencialmente su comercialización y valorización agronómica (European Commission, 2019; ESPP, 2024).

#### 4.5.3 Información necesaria para una evaluación completa del potencial de recuperación

Una evaluación económica completa del potencial de recuperación de fósforo en el espacio SUDOE requeriría disponer de información que, en la fase actual del proyecto, no está aún disponible. Concretamente, serían necesarios:

En primer lugar, datos sobre la **composición y caudal de las corrientes internas concentradas** de las EDARs —principalmente sobrenadantes de digestión anaerobia y licores de centrifugado—, que son las corrientes sobre las que actúa la precipitación en cascada propuesta en ENDORSE. Estas corrientes, con concentraciones de fósforo muy superiores al efluente final, son las que determinan el potencial real de recuperación. El A1.2 proporciona datos de emisiones en efluente final, que constituyen un indicador del fósforo que sale al medio pero no son equivalentes al fósforo precipitable en corrientes concentradas.

En segundo lugar, los **rendimientos de recuperación reales de la tecnología ENDORSE** en condiciones de operación piloto. La eficiencia de precipitación depende de múltiples factores —pH, temperatura, concentración de iones competidores, tiempo de residencia— que varían entre instalaciones y que solo pueden determinarse mediante experimentación en los pilotos previstos en el GT2 de este proyecto.

En tercer lugar, **el precio de mercado alcanzable para las sales recuperadas** en el contexto específico del espacio SUDOE, que depende de la calidad agronómica del producto, los canales de distribución disponibles y la disposición a pagar de los agricultores de cada territorio.

En este sentido, la presente evaluación económica cumple el papel de *escenario de referencia (baseline)* frente al cual contrastar los resultados que generarán las actividades de validación del GT2. Una vez disponibles los datos de los pilotos, será posible desarrollar una evaluación tecno-económica específica de la tecnología ENDORSE que complemente y actualice el análisis presentado en este apartado.

#### 4.5.4 Sensibilidad frente a escenarios de precios

El interés económico relativo de la recuperación de fósforo está estrechamente ligado a la evolución de los precios internacionales de fertilizantes fosfatados. Los datos de la Comisión Europea muestran una elevada volatilidad reciente en el mercado europeo (Ilustración 5), con incrementos significativos durante la crisis de 2022 y nuevos aumentos registrados entre 2025 y principios de 2026 (European Commission, 2026b). En paralelo, la elevada concentración global de reservas de roca fosfórica y de producción de fertilizantes constituye un factor de vulnerabilidad estratégica para la UE (European Commission, 2023; USGS, 2024).

En este contexto, la **recuperación de fósforo** puede adquirir progresivamente mayor relevancia como **herramienta complementaria de resiliencia y diversificación de suministro**, especialmente en escenarios caracterizados por: precios elevados de fertilizantes minerales; incremento de costes energéticos; restricciones comerciales; presión regulatoria creciente sobre nutrientes; y mayor demanda de soluciones de economía circular. No obstante, la competitividad real de los productos recuperados dependerá de los resultados tecnológicos obtenidos en las fases piloto, de las condiciones específicas de cada instalación y de la evolución futura del mercado.

### 4.6 Percepción de los actores sobre la dimensión económica del fósforo

La dimensión económica del ciclo del fósforo fue identificado como una factor clave en las percepciones recogidas mediante los cuestionarios desarrollados en el marco de la actividad A1.2 y las entrevistas con agentes clave en el ciclo del fósforo de España, Francia y Portugal. Este apartado tiene el objetivo de sintetizar las principales conclusiones cualitativas obtenidas, organizadas por tipo de actor, y complementa el análisis desarrollado en los apartados anteriores con las perspectivas de quienes intervienen directamente en el ciclo del fósforo.

A diferencia del análisis económico cuantitativo, este apartado no pretende ofrecer estimaciones de costes ni valoraciones de mercado, sino caracterizar las **percepciones, barreras y condicionantes económicos que influyen en las decisiones de uso, producción, recuperación y valorización del fósforo** desde la visión de los actores implicados.

#### 4.6.1 Sector agrícola

Los actores del sector agrícola coinciden en señalar el **precio** de los fertilizantes como uno de los principales condicionantes económicos de sus decisiones de fertilización. La volatilidad registrada en los últimos años —con incrementos significativos durante el período 2021–2022 que no siempre se vieron compensados por mejoras equivalentes en el precio de venta de los cultivos— ha reducido los márgenes de muchas explotaciones y ha generado una mayor sensibilidad frente al coste de los insumos.

Los costes de nutrición pueden representar en torno al 20–25% de los costes operativos anuales en cultivos con mayores requerimientos nutricionales o sistemas productivos más intensivos, proporción que se ha incrementado notablemente en los últimos años. Esta presión económica ha llevado a algunos agricultores a replantear estrategias de manejo, ajustar dosis de aplicación o buscar alternativas que permitan **reducir la dependencia de fertilizantes minerales importados**.

En las explotaciones con acceso a purines, estiércoles u otros recursos orgánicos, el encarecimiento de los fertilizantes minerales puede favorecer un mayor aprovechamiento de estas corrientes. Sin embargo, los actores señalan que esta sustitución presenta limitaciones prácticas: composición variable, elevados volúmenes de aplicación, costes de transporte, dificultades logísticas y necesidad de complementación con fertilizantes minerales para cubrir equilibradamente las necesidades nutricionales.

Respecto a los fertilizantes recuperados, los cuestionarios muestran una disposición favorable a su uso, pero condicionada por factores económicos. La competitividad de precio frente a los fertilizantes convencionales sigue siendo el criterio más determinante, aunque algunos actores estarían dispuestos a asumir un precio ligeramente superior si el producto aporta beneficios ambientales, de sostenibilidad o de imagen. **Las principales barreras económicas identificadas son: precio elevado de los productos recuperados, falta de confianza en su calidad y disponibilidad, dificultades logísticas y ausencia de incentivos públicos**

#### 4.6.2 Industria de fertilizantes

Desde la perspectiva de la industria, la dimensión económica del fósforo está estrechamente vinculada a la estructura global del mercado y a la dependencia de materias primas internacionales. Las entrevistas reflejan que el sector es especialmente sensible a dinámicas geopolíticas, comerciales y logísticas, dado que una parte importante de las materias primas fosfatadas procede de un número limitado de países productores.

Un elemento diferencial destacado por la industria es el peso de los **costes logísticos**. Los fertilizantes son productos de gran volumen y valor relativo limitado por tonelada, lo que hace que el transporte tenga un peso muy significativo en el precio final. Esta cuestión es especialmente relevante para los fertilizantes recuperados, cuya competitividad depende no sólo del coste de obtención del fósforo sino también de su concentración, estabilidad física, facilidad de transporte, almacenamiento y capacidad de procesamiento industrial. Una baja concentración de nutrientes, una elevada humedad o una composición variable pueden dificultar la integración de los productos recuperados en procesos industriales estandarizados y comprometer su viabilidad económica, incluso cuando la valorización del subproducto sea ambientalmente favorable.

Las entrevistas apuntan también a una presión alcista estructural sobre el precio de las materias primas fosfatadas derivada de la demanda industrial no agrícola — incluyendo fabricación de baterías, aplicaciones industriales y sectores vinculados a la defensa —, que puede ejercer competencia sobre la disponibilidad y precio del fósforo mineral. En este contexto, la industria reconoce interés en explorar fuentes alternativas, pero subraya que los productos recuperados deben cumplir **requisitos exigentes de concentración, biodisponibilidad, ausencia de contaminantes, estabilidad de composición, encuadre legal y procesabilidad** para ser competitivos frente a materias primas convencionales como el DAP.

#### 4.6.3 Gestión de aguas residuales

Desde la perspectiva de los gestores de EDAR, la dimensión económica del fósforo aparece asociada principalmente a dos cuestiones: los costes derivados de su eliminación para cumplir los límites de vertido y la viabilidad económica de implantar procesos específicos de recuperación.

La eliminación de fósforo mediante precipitación química implica consumo de reactivos, incremento en la producción de lodos y mayores necesidades de gestión y transporte de estos residuos — costes que se han visto incrementados en los últimos años por el aumento del precio de reactivos, energía y gestión de fangos. Esta situación refuerza el interés por optimizar los procesos de eliminación y explorar **alternativas que permitan reducir consumos** o valorizar parte del fósforo retenido.

La recuperación de fósforo en EDARs se percibe como una oportunidad alineada con los principios de economía circular, pero su viabilidad económica depende de condiciones muy específicas: escala de la instalación, concentración de fósforo en las corrientes disponibles, existencia de digestión anaerobia, inversión inicial requerida, costes operativos y retorno económico potencial del producto recuperado. En instalaciones de menor tamaño o con bajas concentraciones de fósforo, la implantación de tecnologías de recuperación puede resultar difícil de justificar económicamente.

Un factor decisivo señalado por los actores es la competencia con las vías actuales de valorización de lodos. Mientras la aplicación agrícola de lodos tratados siga siendo operativa, legalmente viable y económicamente menos costosa que la recuperación específica de fósforo, esta última puede no percibirse como prioritaria en ausencia de incentivos, exigencias regulatorias más estrictas o demanda real del producto recuperado.

### 4.7 Síntesis de la evaluación económica

La evaluación económica del ciclo del fósforo en la región SUDOE revela un sistema estructuralmente vulnerable, condicionado por una **elevada dependencia exterior, una exposición significativa a la volatilidad de los mercados internacionales y unos niveles de circularidad todavía limitados**. Esta vulnerabilidad no es únicamente un fenómeno estadístico: los propios actores del

sistema la experimentan de forma directa, y sus percepciones permiten comprender con mayor profundidad los mecanismos por los que esa dependencia se traduce en riesgo económico real.

El gasto estimado en fertilizantes fosfatados para el espacio SUDOE —del orden de ~1849 M€/año bajo condiciones de precio de referencia 2025, y potencialmente superior a 2883 M€/año en escenarios equivalentes al pico de 2022— refleja la magnitud de una exposición que el sector agrícola siente con especial intensidad. **España y Portugal muestran una dependencia especialmente alta**, mientras que **Francia presenta una situación relativamente más diversificada** gracias a su mayor integración de fuentes orgánicas. Los **costes de fertilización representan en torno al 20-25% de los costes operativos anuales** en cultivos intensivos, y la volatilidad del período 2021-2023 comprimió márgenes sin que las mejoras en el precio de venta pudieran compensarlo plenamente. La tendencia alcista renovada en 2025-2026 y la implementación progresiva de aranceles sobre fertilizantes sugieren que esta presión no es coyuntural sino estructural.

El análisis pone de manifiesto la **existencia de flujos relevantes de fósforo actualmente insuficientemente valorizados** dentro del sistema urbano. Las **emisiones procedentes de EDAR alcanzan ~14.8 kt P/año en el espacio SUDOE**, a las que se suma el **fósforo retenido en lodos de depuración**. Aunque no todo este fósforo es técnica ni económicamente recuperable, estos flujos evidencian recursos secundarios que no se reintegran plenamente al ciclo productivo. Los gestores de EDAR reconocen el interés de la recuperación, pero señalan que, mientras las vías actuales de valorización de lodos sigan siendo operativas y económicamente accesibles, la recuperación específica de fósforo difícilmente se percibirá como prioritaria sin incentivos regulatorios o beneficios económicos claros.

El interés por los fertilizantes recuperados existe y es reconocible entre los actores consultados, especialmente en un contexto de precios elevados y creciente sensibilidad ambiental. Sin embargo, esa apertura está condicionada por factores que los datos estadísticos no capturan. La **logística emerge como una barrera transversal de primer orden: la concentración del producto, la humedad, la estabilidad física, los costes de transporte y la distancia entre las fuentes de recuperación y las zonas de demanda** agrícola pueden comprometer la viabilidad de los fertilizantes recuperados con independencia del precio del mineral de referencia. A ello se añaden requisitos de calidad agronómica consistente, compatibilidad con los sistemas de aplicación existentes y marcos regulatorios claros.

La evaluación en su conjunto permite concluir que la **transición hacia la circularidad del fósforo en el espacio SUDOE es estratégicamente relevante y económicamente justificable** en términos de contexto de mercado, pero que su materialización **enfrenta condicionantes técnicos, logísticos e institucionales** que no pueden resolverse únicamente desde la argumentación macroeconómica. La viabilidad dependerá de que las tecnologías de recuperación demuestren rendimientos y costes competitivos en instalaciones reales, de que existan canales de distribución y demanda agrícola activos, y de que el marco regulatorio e incentivador evolucione en la dirección adecuada. En ausencia de estas condiciones, el potencial estratégico del fósforo recuperado seguirá siendo reconocido pero insuficientemente aprovechado.

## 5 Evaluación social

### Introducción y objetivo del análisis social

El fósforo constituye un nutriente esencial para la producción agrícola y, por tanto, un recurso estratégico para la seguridad alimentaria y el funcionamiento de los sistemas agroalimentarios. Sin embargo, su gestión actual plantea importantes retos ambientales, económicos y sociales, vinculados tanto a la dependencia de fertilizantes minerales convencionales como a la necesidad de mejorar el aprovechamiento de fuentes secundarias ricas en este nutriente. En este contexto, la transición hacia modelos más circulares requiere no solo desarrollar soluciones técnicas viables, sino también comprender las condiciones sociales que pueden facilitar o limitar su implantación.

La evaluación social desarrollada en la región SUDOE responde a esta necesidad mediante el análisis de dos dimensiones principales. En primer lugar, examina la **percepción de las prácticas actuales de gestión del fósforo**, basadas fundamentalmente en el uso de fertilizantes minerales y en vías ya implantadas de valorización orgánica, como la aplicación agrícola de estiércoles, purines y lodos de depuradora. En segundo lugar, analiza el grado de **aceptación de soluciones innovadoras orientadas a la recuperación de fósforo a partir de flujos residuales**, en línea con los principios de la economía circular.

Este enfoque resulta especialmente relevante en el marco del proyecto ENDORSE, ya que la viabilidad de las soluciones propuestas no depende únicamente de su rendimiento técnico, ambiental o económico. Su adopción también está condicionada por elementos como la confianza en su seguridad y eficacia, la percepción de riesgos, el nivel de conocimiento disponible, la disposición al cambio y la capacidad de los distintos actores para incorporar nuevas prácticas. Así, la evaluación social complementa los análisis técnicos incorporando una perspectiva centrada en las barreras percibidas, las necesidades de formación e información y otros condicionantes que pueden influir en la aplicación efectiva de estas soluciones.

En este sentido, el objetivo final de la evaluación social es identificar las principales barreras sociales que pueden limitar la implementación de soluciones de recuperación de fósforo. A partir de este diagnóstico, será posible orientar futuras acciones de sensibilización, formación y participación adaptadas a las necesidades de agricultores, industria, administraciones públicas y otros actores relevantes del ciclo del fósforo.

### 5.2 Enfoque

El enfoque metodológico adoptado para la evaluación de los impactos sociales se basa en la información generada en las actividades A1.2 y A1.3 del proyecto ENDORSE. La actividad A1.2, cuyos resultados y metodología se detallan en el *Entregable 1.2.1*, proporcionó la base inicial para la diagnosis del ciclo del fósforo en la región SUDOE, combinando revisión de fuentes secundarias, análisis de datos publicados y procesos de cocreación con stakeholders. Para el presente entregable se han reutilizado los recursos generados en dicha actividad, si bien el análisis se ha reorientado hacia la percepción social del ciclo del fósforo y de las alternativas de recuperación, prestando menor atención al mapeo de agentes, que ya fue abordado en profundidad en el entregable anterior.

En particular, se han considerado los resultados de los cuestionarios desarrollados en la A1.2, centrando la interpretación en las percepciones de los actores participantes respecto a la gestión tradicional del fósforo, el uso de fertilizantes fosforados y la aceptación de soluciones basadas en la recuperación de fósforo a partir de corrientes residuales. Este enfoque permite identificar barreras percibidas relacionadas con la confianza, la seguridad, la eficacia agronómica, el conocimiento técnico disponible o la posible desconfianza asociada al origen residual de los productos.

Asimismo, se ha realizado un análisis detallado de las entrevistas en profundidad llevadas a cabo en el marco de la A1.2. En total, se analizaron 9 entrevistas con expertos procedentes de los tres países participantes, pertenecientes a perfiles clave del ciclo del fósforo. Entre ellos se incluyen representantes del sector agrícola y agroganadero, con perfiles tanto técnicos como de gestión y representación sectorial; expertos de la industria de fertilizantes vinculados a actividades de I+D+i, desarrollo técnico y estrategia de negocio; y profesionales del ámbito de la gestión de aguas residuales, incluyendo perfiles técnicos asociados a la operación y gestión de EDAR.

Se trató de entrevistas semiestructuradas, detalladas y de carácter cualitativo, con una duración superior a 30 minutos, orientadas a recoger conocimiento operativo y sectorial sobre las principales barreras técnicas, económicas, regulatorias y sociales que pueden condicionar la recuperación y valorización del fósforo en la región SUDOE.

De forma complementaria, la actividad A1.3 permitió profundizar en la evaluación social mediante nuevos procesos de cocreación y consulta. En primer lugar, se organizó una sesión con actores expertos y socios del proyecto para presentar y discutir los resultados

agregados obtenidos en las fases previas. Durante esta sesión, los participantes valoraron el grado de acuerdo con las conclusiones preliminares mediante una escala Likert de 1 a 5 y aportaron comentarios cualitativos. Este ejercicio permitió contrastar la solidez de los resultados, identificar convergencias y discrepancias entre la percepción de los stakeholders y la visión experta, y validar la formulación de las principales preguntas e indicadores sociales.

A partir de esta sesión, el cuestionario fue refinado y ampliado a través del *Innovation Hub* del proyecto (<https://endorsehub.eu/>), con el objetivo de alcanzar una audiencia más diversa. Esta encuesta abierta a la ciudadanía y a otros perfiles interesados permitió recoger percepciones más amplias sobre el ciclo de vida de los fertilizantes fosforados, el nivel de conocimiento sobre la recuperación de fósforo, la aceptación de productos derivados de fuentes secundarias y la percepción de riesgos y beneficios asociados a su uso. La consulta incluyó variables relacionadas con el grado de familiaridad con el ciclo del fósforo, la confianza en diferentes tipos de fertilizantes, la percepción de seguridad ambiental y sanitaria, la disposición a aceptar productos recuperados y las principales barreras para su implantación. Su objetivo fue complementar la visión experta y sectorial con una aproximación más amplia a la percepción social, contribuyendo a evaluar el grado de aceptación de estrategias circulares de recuperación y reutilización de fósforo. No obstante, dado que esta consulta continúa activa y en fase de ampliación de la muestra, los resultados obtenidos hasta el momento no se incluyen en el presente análisis. Se ha considerado metodológicamente más adecuado reservar su explotación para fases posteriores del proyecto ENDORSE, cuando se disponga de un nivel de participación más amplio y representativo que permita obtener conclusiones más robustas y comparables.

A partir de la información obtenida, el análisis incorpora una primera aproximación de *framing* comunicativo basada en las ciencias del comportamiento, partiendo de la premisa de que los mensajes adaptados a las preocupaciones y motivaciones de distintos públicos pueden resultar más efectivos que mensajes genéricos. Con este fin, y a partir de los datos recogidos durante el proyecto, se construyen tres perfiles orientativos, entendidos como grupos de personas o actores con mayor sensibilidad hacia determinados temas: aspectos técnico-prácticos, beneficios ambientales y cuestiones de confianza social o reputacional. Para cada barrera identificada se plantean mensajes adaptados a estos perfiles, de modo que, en fases posteriores, si se analiza la predominancia de unos u otros perfiles en distintos sectores o en la población general, puedan ajustarse las estrategias de comunicación y aumentar su efectividad. Este enfoque se plantea como una herramienta complementaria, entre otras, para contribuir a reducir las barreras sociales detectadas.

En conjunto, esta metodología permite identificar diferencias entre percepciones sociales, conocimiento experto y evidencias técnicas, así como detectar barreras percibidas, posibles vías para superarlas y oportunidades para reforzar la transición hacia una gestión más circular del fósforo. De este modo, la evaluación social proporciona una base práctica para diseñar acciones de sensibilización, formación y comunicación adaptadas a las necesidades de agricultores, industria, gestores de residuos, administraciones públicas y otros actores relevantes del ciclo del fósforo.

### 5.3 Percepción de la gestión del fósforo

La gestión tradicional del fósforo en la región SUDOE se articula principalmente en torno al uso de fertilizantes fosforados minerales convencionales y, en determinados contextos, a la valorización agrícola de corrientes orgánicas como estiércoles, purines y lodos de depuradora. Los resultados obtenidos en las actividades A1.2 y A1.3 permiten analizar cómo se percibe este modelo actual, qué limitaciones se le atribuyen y qué grado de apertura existe hacia alternativas basadas en la recuperación y reutilización de fósforo.

En este apartado, los resultados se presentan de forma ordenada atendiendo a las principales fuentes de información empleadas. En primer lugar, se sintetizan las conclusiones derivadas de los procesos de cocreación desarrollados en la actividad A1.2, incluyendo los cuestionarios tipo Delphi y su ampliación posterior. Los resultados detallados de estos cuestionarios se recogen en el *Entregable 1.2.1*, por lo que en el presente entregable se retoman únicamente las tendencias más relevantes desde el punto de vista de la percepción social, con menor énfasis en el mapeo de agentes ya abordado en dicho documento. En segundo lugar, se incorporan los principales resultados de la sesión de cocreación de la actividad A1.3, orientada a validar, contrastar y matizar las conclusiones preliminares con expertos y socios del proyecto. Finalmente, el apartado dará paso al análisis específico de las entrevistas en profundidad, que permiten contextualizar con mayor detalle las barreras, oportunidades y condiciones de aceptación identificadas.

#### 5.3.1 Resultados de los procesos de cocreación

En términos generales, los resultados muestran una percepción ambivalente del modelo actual de gestión del fósforo. Por un lado, los fertilizantes fosforados convencionales son reconocidos como productos eficaces desde el **punto de vista agronómico** y necesarios para mantener la productividad agrícola, especialmente en sistemas intensivos o con altas exigencias nutricionales. Su

función productiva no se cuestiona de forma significativa, y los actores consultados tienden a valorarlos como insumos consolidados, fiables y plenamente integrados en las prácticas agrícolas actuales.

Sin embargo, esta valoración positiva convive con una preocupación creciente por las limitaciones ambientales, económicas y estructurales del modelo convencional. Entre los aspectos más señalados se encuentran la dependencia de materias primas minerales externas, la volatilidad de precios, los impactos derivados del uso intensivo de fertilizantes y la sostenibilidad del sistema a largo plazo. Aunque estas preocupaciones aparecen con distinta intensidad según el país y el perfil de los participantes, reflejan una conciencia compartida sobre la necesidad de avanzar hacia una gestión más circular, eficiente y menos dependiente de recursos no renovables.

La percepción sobre **la seguridad de los fertilizantes fosforados convencionales** presenta también matices relevantes. En general, los actores con mayor conocimiento técnico tienden a considerarlos productos seguros cuando se utilizan de acuerdo con las recomendaciones agronómicas y el marco normativo aplicable. No obstante, al valorar la percepción social más amplia, se identifica una mayor incertidumbre o desconfianza, especialmente en relación con los posibles impactos ambientales, la presencia de contaminantes o la falta de información clara y accesible para determinados perfiles de usuarios. Esto sugiere que la percepción del riesgo no depende únicamente de la evidencia técnica disponible, sino también del contexto social, regulatorio y comunicativo de cada territorio.

En relación con los **impactos ambientales**, los participantes reconocen que el uso de fertilizantes fosforados puede contribuir a problemas como la eutrofización, la pérdida de nutrientes hacia el medio acuático o la presión sobre recursos minerales no renovables. No obstante, durante la sesión de validación de la actividad A1.3 se introdujo un matiz importante: estos impactos no dependen exclusivamente del producto fertilizante, sino también de las condiciones de aplicación, las prácticas de manejo agronómico y el grado de control técnico existente en cada sistema productivo. Así, un uso ajustado a las necesidades reales del cultivo, apoyado en asesoramiento técnico, planificación de la fertilización y buenas prácticas agronómicas, puede reducir parte de los impactos ambientales habitualmente asociados al uso de fertilizantes minerales.

Esta reflexión desplaza parcialmente el foco del debate desde el producto en sí hacia el funcionamiento global del sistema agronómico y la forma en que se gestionan los nutrientes. En este sentido, la sostenibilidad del modelo actual no se percibe únicamente como una cuestión tecnológica o de sustitución de materias primas, sino también como un desafío vinculado a la eficiencia en el uso del fósforo, la transferencia de conocimiento, el asesoramiento técnico, la planificación territorial y la capacidad de los distintos actores para adoptar prácticas de fertilización más ajustadas al contexto local.

En cuanto a las soluciones basadas en **fósforo recuperado**, los procesos de cocreación muestran una predisposición generalmente favorable hacia su uso, especialmente cuando se asocian con beneficios ambientales, reducción de la dependencia de materias primas externas, aprovechamiento de recursos locales y mejora de la sostenibilidad del sistema. No se identifica, por tanto, una resistencia estructural fuerte hacia las estrategias de recuperación de fósforo dentro de los sectores consultados. Sin embargo, esta aceptación aparece claramente condicionada por la necesidad de garantizar niveles equivalentes a los de los fertilizantes convencionales en términos de seguridad, calidad, estabilidad, rendimiento agronómico y viabilidad económica.

Asimismo, las diferencias observadas entre la percepción propia de los participantes y la percepción que atribuyen a otros actores ponen de manifiesto posibles desajustes en términos de confianza, información y nivel de concienciación ambiental. En algunos casos, los participantes consideran que el entorno social podría mostrar posiciones más críticas o cautelosas que las expresadas individualmente, especialmente ante productos derivados de corrientes residuales. Este aspecto refuerza la importancia de la comunicación, la transparencia, la trazabilidad y la generación de confianza como elementos clave para facilitar la implantación de soluciones circulares.

En conjunto, los resultados indican que la gestión tradicional del fósforo sigue siendo percibida como necesaria y eficaz, pero cada vez más cuestionada desde el punto de vista de su sostenibilidad. Paralelamente, se observa una apertura significativa hacia alternativas basadas en la recuperación y reutilización de fósforo, siempre que estas puedan integrarse en sistemas de gestión agronómica seguros, eficientes y económicamente viables. Esta combinación de aceptación inicial y cautela pone de manifiesto la necesidad de acompañar el desarrollo tecnológico con acciones de formación, sensibilización, demostración y comunicación adaptadas a los distintos perfiles de actores implicados en el ciclo del fósforo en la región SUDOE.

## 5.3.2 Resultados de las entrevistas

### 5.3.2.1 Sector agrícola

Desde la perspectiva del sector agrícola, las entrevistas realizadas muestran una visión principalmente pragmática del fósforo y de los fertilizantes fosforados, fuertemente vinculada a su función productiva y a la viabilidad económica de las explotaciones. Los agricultores y representantes del sector reconocen el **papel esencial del fósforo para mantener los rendimientos** agronómicos, especialmente en sistemas intensivos y cultivos con altas exigencias nutricionales, por lo que los fertilizantes minerales convencionales continúan percibiéndose como herramientas fiables, eficaces y adaptadas a las dinámicas actuales de producción. En este sentido, varios participantes señalaron que los sistemas de fertilización actuales están profundamente integrados en las rutinas de manejo agronómico, tanto por cuestiones de eficacia y facilidad de aplicación como por el conocimiento acumulado sobre su comportamiento en campo y su respuesta productiva.

No obstante, las entrevistas también reflejan una creciente preocupación por el incremento de los costes de fertilización, la volatilidad de los precios y la dependencia de materias primas externas, factores que condicionan de forma directa las decisiones de manejo y planificación agronómica. Algunos participantes señalaron que el aumento del **precio de los fertilizantes** ha llevado en determinados casos a replantear dosis de aplicación, priorizar determinados cultivos o buscar alternativas que permitan reducir parcialmente los costes asociados a la fertilización mineral. Esta preocupación económica aparece especialmente vinculada a la incertidumbre generada por la evolución reciente de los mercados internacionales y por la elevada dependencia de materias primas importadas.

Paralelamente, emerge una percepción cada vez más extendida de que el **modelo actual de fertilización debe evolucionar** hacia esquemas más eficientes y sostenibles, aunque esta transición se aborda desde una lógica fundamentalmente práctica y no exclusivamente ambiental. Más que una sustitución radical de los fertilizantes convencionales, varios actores plantean la necesidad de optimizar la gestión de nutrientes, mejorar la eficiencia de aplicación y aprovechar mejor los recursos orgánicos disponibles dentro del territorio. En este contexto, algunos participantes destacan que determinadas prácticas de fertilización continúan respondiendo en parte a inercias de manejo o rutinas históricas, y consideran que todavía existe margen de mejora en términos de asesoramiento técnico, ajuste de dosis y planificación agronómica.

La percepción sobre las corrientes orgánicas tradicionales, como **purines, estiércoles o lodos de depuradora**, resulta especialmente compleja. Por un lado, estos materiales son reconocidos como fuentes útiles de nutrientes y materia orgánica, especialmente en contextos de proximidad territorial o en explotaciones con disponibilidad directa de estos recursos. Sin embargo, también se identifican importantes limitaciones relacionadas con la logística, la homogeneidad del producto, la dificultad de ajustar las dosis, el transporte o la variabilidad en la composición. En algunos casos, los participantes consideran que la aplicación de estos materiales responde más a la necesidad de gestionar un residuo que a una estrategia agronómica plenamente optimizada.

En este contexto, la aceptación de soluciones basadas en **fósforo recuperado** aparece condicionada principalmente por aspectos como el precio, la facilidad de aplicación, la disponibilidad del producto, la compatibilidad con los cultivos y la confianza en su seguridad y rendimiento agronómico. Varios participantes señalaron que la percepción sobre los fertilizantes recuperados depende en gran medida del tipo de producto y del grado de tratamiento aplicado. Mientras que determinadas corrientes recuperadas continúan asociándose a una imagen negativa vinculada a los lodos de depuradora, otros productos más procesados, homogéneos o estabilizados generan una percepción potencialmente más favorable.

Asimismo, varios participantes indicaron que parte de la desconfianza hacia determinadas corrientes recuperadas deriva de experiencias previas relacionadas con la **presencia de contaminantes**, problemas de manejo, olores, afecciones sobre la estructura del suelo o falta de estabilidad y homogeneidad del producto. Estas experiencias han contribuido a generar cautela hacia soluciones percibidas como poco controladas o difíciles de integrar dentro de las dinámicas habituales de fertilización. Por ello, desde el sector agrícola se demanda que cualquier alternativa circular ofrezca garantías claras en términos de calidad, trazabilidad, estabilidad y resultados agronómicos, así como información técnica, ensayos demostrativos y acompañamiento especializado que faciliten su incorporación dentro de las prácticas habituales de manejo y reduzcan la percepción de riesgo asociada a este tipo de productos.

### 5.3.2.2 Industria de fertilizantes

Desde la perspectiva de la industria de fertilizantes, las entrevistas realizadas muestran una visión más centrada en la **viabilidad técnica, comercial y regulatoria** de los productos fosforados. El fósforo se percibe como una materia prima estratégica, pero también como un insumo fuertemente condicionado por mercados internacionales, disponibilidad de recursos minerales, costes

energéticos, transporte y exigencias normativas. En este sentido, la industria reconoce la vulnerabilidad asociada a la dependencia de materias primas importadas y a la volatilidad de los precios, pero subraya que la incorporación de fuentes alternativas o recuperadas sólo será viable si estas cumplen requisitos muy exigentes de calidad, estabilidad y competitividad.

Uno de los aspectos más destacados por el sector industrial es que el fósforo recuperado no debe entenderse necesariamente como un fertilizante final, sino, en muchos casos, como una materia prima secundaria que tendría que integrarse posteriormente en **formulaciones comerciales**. La industria trabaja mayoritariamente con fertilizantes compuestos, especialmente NPK, NP o PK, que requieren materias primas con características concretas y constantes. Por ello, no basta con que una corriente residual contenga fósforo: es necesario que presente una concentración suficiente, una composición relativamente homogénea, una fracción biodisponible adecuada y unas propiedades físico-químicas compatibles con los procesos industriales de formulación, granulación, mezcla, almacenamiento y distribución.

Desde esta perspectiva, los criterios de calidad adquieren una importancia central. Los entrevistados señalaron como requisitos clave la riqueza en fósforo, la disponibilidad del nutriente para las plantas, la ausencia de metales pesados y compuestos nocivos, la estabilidad sanitaria del material, la baja variabilidad entre lotes, la manipulabilidad y la posibilidad de transporte y procesado sin costes excesivos. La humedad, la granulometría, la generación de polvo, la dureza del grano o la facilidad de mezcla son aspectos especialmente relevantes para determinar si un producto recuperado puede incorporarse a una cadena industrial existente. Si el producto presenta baja concentración, elevada humedad o composición variable, su atractivo disminuye, ya que incrementa los costes logísticos, dificulta la planificación de la producción y reduce su competitividad frente a materias primas minerales convencionales.

La industria también identifica el **marco regulatorio** como una barrera importante. Aunque existe interés en avanzar hacia modelos de economía circular y reducir la dependencia de materias primas externas, los entrevistados señalan que la validación de nuevos productos o subproductos puede ser compleja, lenta y documentalmente exigente. La necesidad de cumplir con normativa nacional y europea, demostrar la ausencia de contaminantes y garantizar el encaje legal del producto condiciona tanto la inversión como la comercialización. En este sentido, la incertidumbre regulatoria no sólo afecta a los productores de fertilizantes recuperados, sino también a las empresas que podrían incorporarlos en sus formulaciones y asumir responsabilidad sobre el producto final.

En términos económicos, la percepción de la industria es especialmente clara: el fósforo recuperado solo podrá competir si ofrece una **relación coste-beneficio favorable**. La valorización de subproductos puede ser una oportunidad en un contexto de encarecimiento de las materias primas minerales, pero los costes de tratamiento, secado, estabilización, transporte y control de calidad pueden limitar su competitividad. Además, dado que los fertilizantes son productos con márgenes ajustados y elevada sensibilidad al precio, cualquier incremento de coste puede dificultar su entrada en el mercado. Por ello, algunos entrevistados consideran que los productos recuperados podrían ganar atractivo si se asocian a **beneficios adicionales verificables**, como una menor huella de carbono, certificaciones ambientales, compatibilidad con agricultura ecológica o cumplimiento de objetivos regulatorios de circularidad.

En conjunto, la industria de fertilizantes muestra una actitud abierta pero exigente hacia las soluciones de recuperación de fósforo. Existe interés en explorar materias primas secundarias y reducir la dependencia de fuentes minerales importadas, pero la aceptación industrial dependerá de que los productos recuperados puedan integrarse en procesos existentes sin comprometer la calidad, la seguridad, la estabilidad del suministro ni la competitividad económica. Desde esta perspectiva, la recuperación de fósforo no se percibe únicamente como una oportunidad ambiental, sino como un reto de estandarización, trazabilidad, regulación y adaptación al mercado.

### 5.3.2.3 Gestión de aguas residuales

Desde la perspectiva del sector de gestión de aguas residuales, las entrevistas realizadas muestran que el fósforo se percibe cada vez más como un recurso estratégico dentro de una lógica de economía circular, aunque su gestión sigue estando condicionada principalmente por el cumplimiento normativo, la estabilidad operativa de las instalaciones y los costes asociados al tratamiento. En las EDAR, el fósforo se aborda tradicionalmente como un parámetro que debe eliminarse del agua residual para evitar impactos sobre el medio receptor, especialmente en zonas sensibles a procesos de eutrofización. Por ello, la prioridad operativa continúa siendo garantizar la calidad del efluente y cumplir los límites de vertido establecidos, más que recuperar el fósforo como producto valorizable.

En los sistemas convencionales, el fósforo eliminado queda mayoritariamente incorporado a los lodos de depuradora, ya sea mediante acumulación biológica en la biomasa o mediante precipitación química con sales de hierro o aluminio. Esta estrategia

permite reducir la carga de fósforo en el efluente, pero desplaza el problema hacia la línea de fangos, incrementando el volumen de lodos generados y los costes de gestión, transporte y destino final. En algunos casos, la valorización agrícola o el compostaje de lodos tratados sigue siendo la vía principal para reincorporar parcialmente el fósforo al suelo, siempre que se cumplan los requisitos legales, sanitarios y de calidad aplicables.

Las entrevistas reflejan que la recuperación específica de fósforo, por ejemplo mediante producción de estruvita u otros fosfatos precipitados, se percibe como una opción técnicamente interesante, pero todavía condicionada por importantes barreras prácticas. Entre ellas destacan la escala de la instalación, la concentración de fósforo en las corrientes laterales, la disponibilidad de digestión anaerobia, la necesidad de inversión inicial, los costes energéticos y de reactivos, y la incertidumbre sobre el retorno económico. En muchas instalaciones, especialmente de menor tamaño o con configuraciones extensivas, la recuperación dedicada de fósforo no se considera prioritaria si no existe una obligación normativa o un beneficio económico claro.

Desde el punto de vista operativo, los gestores de aguas residuales también señalan que **cualquier solución de recuperación debe integrarse sin comprometer la robustez del tratamiento** ni la estabilidad del proceso. La eliminación de fósforo mediante precipitación química puede ser eficaz para cumplir límites de vertido, pero implica consumo de reactivos y mayor producción de lodos. Por su parte, la recuperación en corrientes laterales puede ofrecer ventajas ambientales y de valorización, pero requiere condiciones técnicas específicas y una gestión adecuada del producto obtenido. Por ello, la decisión de implantar tecnologías de recuperación no depende únicamente del potencial de recuperación de fósforo, sino también de su compatibilidad con la operación diaria de la EDAR.

La percepción del sector también está condicionada por la aceptación posterior de los productos derivados del tratamiento de aguas residuales. Aunque los lodos tratados y otros productos recuperados pueden cumplir requisitos normativos, su origen urbano o residual puede generar desconfianza en el mercado agrícola, especialmente por la posible presencia de metales pesados, contaminantes emergentes, microplásticos o patógenos. Esta percepción refuerza la necesidad de controles analíticos, trazabilidad y criterios de calidad claramente comunicados, de modo que los productos obtenidos puedan ser aceptados no solo desde el punto de vista regulatorio, sino también por los usuarios finales.

En conjunto, el sector de gestión de aguas residuales identifica un potencial claro para avanzar hacia la recuperación de fósforo, pero considera que su implantación dependerá de la existencia de condiciones técnicas, económicas y regulatorias favorables. La recuperación será más viable en instalaciones con corrientes concentradas, escala suficiente y posibilidades de valorización del producto final. En ausencia de estas condiciones, la gestión tradicional mediante eliminación del fósforo y valorización de lodos tratados seguirá siendo la opción predominante. Por tanto, desde este sector, la transición hacia soluciones circulares requiere combinar innovación tecnológica, seguridad regulatoria, aceptación de mercado y una evaluación realista de los costes y beneficios asociados.

#### 5.3.2.4 Síntesis transversal de las entrevistas

Las entrevistas realizadas permiten complementar y contextualizar los resultados obtenidos en los procesos de cocreación, aportando una visión más detallada sobre los factores que condicionan actualmente la gestión del fósforo y la posible implantación de soluciones circulares basadas en su recuperación. En términos generales, los tres sectores coinciden en reconocer el carácter estratégico del fósforo y la necesidad de avanzar hacia modelos de gestión más eficientes y sostenibles. Sin embargo, esta transición se aborda desde perspectivas y prioridades diferentes según la posición de cada actor dentro del sistema. Mientras que el sector agrícola prioriza fundamentalmente la eficacia agronómica, la viabilidad económica y la facilidad de integración en las prácticas habituales de manejo, la industria de fertilizantes centra su atención en la calidad, homogeneidad y compatibilidad técnica de las materias primas recuperadas con los procesos industriales existentes. Por su parte, los gestores de aguas residuales perciben el fósforo simultáneamente como un contaminante que debe eliminarse para cumplir la normativa y como un recurso potencial susceptible de valorización dentro de estrategias de economía circular.

Uno de los elementos comunes identificados en las entrevistas es la **importancia de la confianza como factor determinante** para la aceptación de soluciones recuperadas. Esta confianza se relaciona directamente con la seguridad del producto, la ausencia de contaminantes, la estabilidad de composición, la trazabilidad y la demostración de resultados agronómicos equivalentes a los fertilizantes convencionales. En este sentido, varios participantes señalaron que parte de la desconfianza existente hacia determinadas corrientes recuperadas deriva de experiencias previas asociadas a lodos de depuradora u otros productos percibidos como heterogéneos o insuficientemente controlados. Como consecuencia, la aceptación de nuevas soluciones dependerá en gran medida de la capacidad de garantizar estándares elevados de calidad y de comunicar de forma clara y transparente las características de los productos recuperados.

Las entrevistas también muestran que las **barreras económicas y operativas** continúan siendo determinantes. El precio de los fertilizantes, la volatilidad de los mercados internacionales y los costes asociados al tratamiento, transporte y aplicación condicionan las decisiones de todos los sectores implicados. Aunque existe interés en reducir la dependencia de materias primas minerales importadas y en aprovechar recursos secundarios disponibles localmente, la implantación de soluciones de recuperación solo se percibe viable si estas resultan competitivas desde el punto de vista económico y pueden integrarse de forma sencilla en las dinámicas existentes de producción, distribución y aplicación agrícola.

Otro aspecto relevante es que los entrevistados coinciden en señalar que la **sostenibilidad del sistema** no depende únicamente del tipo de fertilizante utilizado, sino también de la forma en que se gestionan los nutrientes dentro del sistema agronómico y territorial. En este sentido, se destaca la necesidad de mejorar la eficiencia en el uso del fósforo, optimizar las prácticas de fertilización y reforzar el asesoramiento técnico y la transferencia de conocimiento hacia los usuarios finales. Esta visión desplaza parcialmente el foco desde la simple sustitución de productos hacia una concepción más amplia de la gestión sostenible de nutrientes.

Finalmente, las entrevistas ponen de manifiesto que la transición hacia modelos circulares de recuperación de fósforo no se percibe como una transformación exclusivamente tecnológica, sino como un proceso condicionado por factores sociales, económicos, regulatorios y territoriales. La aceptación de estas soluciones dependerá no solo de su viabilidad técnica, sino también de la capacidad de generar confianza entre los distintos actores, establecer marcos regulatorios claros, garantizar la calidad de los productos y desarrollar estrategias de sensibilización y formación adaptadas a las necesidades reales de agricultores, industria y gestores del ciclo urbano del agua.

#### 5.4 Barreras sociales identificadas para la implantación de soluciones circulares

El análisis de los procesos de cocreación y de las entrevistas sectoriales permite identificar un conjunto de barreras sociales que pueden limitar la implantación de soluciones circulares basadas en la recuperación de fósforo. Estas barreras no se explican únicamente por factores técnicos o económicos, sino también por elementos relacionados con la percepción de riesgo, la confianza en los productos recuperados, el nivel de conocimiento disponible y la capacidad de los distintos actores para incorporar nuevas prácticas dentro de sus dinámicas habituales.

Una de las barreras más relevantes es la **desconfianza asociada al origen residual** de algunos productos recuperados. Aunque los actores consultados muestran una predisposición generalmente favorable hacia la recuperación de fósforo, esta aceptación disminuye cuando los productos se asocian a corrientes percibidas como problemáticas, especialmente lodos de depuradora. La preocupación por la posible presencia de metales pesados, contaminantes emergentes, patógenos, microplásticos u otros compuestos no deseados condiciona la percepción de seguridad y puede limitar la disposición al uso, incluso cuando los productos cumplen los requisitos normativos. Por ello, la seguridad debe demostrarse mediante controles analíticos rigurosos, trazabilidad y comunicación clara, no solo mediante el cumplimiento técnico de la normativa.

Otra barrera importante es la **falta de información y formación específica** sobre el uso de fertilizantes recuperados. En el sector agrícola, la adopción de nuevas soluciones depende de que los usuarios conozcan aspectos prácticos como las dosis recomendadas, la biodisponibilidad del fósforo, la compatibilidad con distintos cultivos, los momentos de aplicación, las condiciones de almacenamiento y manejo, y la comparación con fertilizantes convencionales. La falta de conocimiento puede generar incertidumbre y frenar la adopción, incluso cuando existe una actitud positiva hacia la economía circular. En este sentido, asesores agronómicos, cooperativas, distribuidores y técnicos de campo desempeñan un papel clave como intermediarios de confianza.

También se identifica una barrera relacionada con la **confianza en la calidad y rendimiento agronómico** de los productos recuperados. Agricultores e industria necesitan materiales homogéneos, estables, seguros y comparables con los fertilizantes minerales convencionales. La variabilidad en la composición, la baja concentración de fósforo, la humedad elevada, la dificultad de manipulación o la falta de evidencia sobre el rendimiento en campo pueden reducir su aceptación. Para la industria de fertilizantes, además, los productos recuperados deben poder integrarse en formulaciones comerciales sin comprometer la calidad final, la estabilidad del suministro ni la eficiencia de los procesos productivos.

La **incertidumbre regulatoria** constituye otra limitación relevante. La falta de claridad sobre el encuadre legal de determinados productos recuperados puede generar inseguridad entre productores, distribuidores y usuarios finales. Los actores consultados señalan la necesidad de contar con marcos normativos claros, criterios de calidad armonizados, sistemas de certificación y garantías jurídicas que faciliten la comercialización y el uso agrícola de estos productos. Sin esta seguridad regulatoria, la inversión en tecnologías de recuperación y la aceptación por parte del mercado pueden verse limitadas.

La **viabilidad económica y logística** aparece igualmente como una barrera transversal. El precio sigue siendo uno de los principales factores que condicionan las decisiones de compra en el sector agrícola. Los fertilizantes recuperados deberán ser competitivos frente a las alternativas minerales o aportar beneficios adicionales claramente reconocibles, como estabilidad de suministro, menor huella ambiental, certificaciones o posibilidad de uso en agricultura ecológica. Además, la distancia entre las fuentes de recuperación y las zonas agrícolas, los costes de transporte, la disponibilidad regular del producto y la facilidad de aplicación son aspectos decisivos para su adopción.

Finalmente, se observa una barrera vinculada a la **percepción social y reputacional**. Algunos actores pueden mostrar cautela ante el uso de productos derivados de residuos por temor a efectos negativos sobre la imagen de sus cultivos, productos agrícolas o prácticas de producción. Esta preocupación puede ser especialmente relevante en cadenas agroalimentarias sensibles a la percepción del consumidor, certificaciones de calidad o exigencias de sostenibilidad. Por ello, las campañas de sensibilización deberán abordar no sólo los aspectos técnicos del producto, sino también los mensajes sobre seguridad, trazabilidad, beneficios ambientales y contribución a la economía circular.

En conjunto, estas barreras muestran que la implantación de soluciones circulares de recuperación de fósforo requiere una **estrategia de sensibilización diferenciada por tipo de actor**. Para agricultores, las campañas deberían centrarse en información práctica, demostraciones en campo, seguridad del producto, rendimiento agronómico y facilidad de aplicación. Para la industria de fertilizantes, será clave comunicar requisitos de calidad, estabilidad, trazabilidad y posibilidades de integración en formulaciones existentes. Para gestores de aguas residuales y residuos, las acciones deberán reforzar el valor del fósforo como recurso, la viabilidad de tecnologías de recuperación y la aceptación del mercado. Para administraciones públicas, será necesario destacar la importancia de marcos regulatorios claros, incentivos y sistemas de certificación. Así, la evaluación social permite pasar de una identificación general de barreras a un diseño más preciso de campañas de sensibilización adaptadas a las necesidades reales de agricultores y otros actores relevantes del ciclo del fósforo.

## 5.5 **Framing comunicativo adaptado a las barreras sociales identificadas en la adopción de los fertilizantes recuperados**

A partir de las barreras sociales identificadas en el apartado anterior, este apartado propone una primera aproximación exploratoria al uso del **framing comunicativo** como herramienta de apoyo a la aceptación de soluciones circulares basadas en la recuperación de fósforo. En el marco de las ciencias del comportamiento, el framing comunicativo hace referencia a la forma en que una información se presenta para conectar con las preocupaciones, valores, motivaciones y criterios de decisión de distintos públicos. No implica modificar la evidencia ni persuadir de forma acrítica, sino traducir información técnica compleja en mensajes comprensibles, relevantes y adaptados a las barreras sociales detectadas.

Este enfoque permite ir un paso más allá del análisis de percepción social desarrollado en los apartados anteriores. Tras identificar cómo los distintos actores perciben la gestión del fósforo, los fertilizantes convencionales y las alternativas recuperadas, el objetivo es avanzar hacia posibles **oportunidades de implementación**, explorando qué tipos de mensajes podrían contribuir a reducir incertidumbres, reforzar la confianza y facilitar una comprensión más clara de los beneficios, límites y condiciones de uso de los fertilizantes recuperados.

La propuesta debe entenderse como una aproximación inicial y prudente, no como una estrategia definitiva. Además, algunas barreras identificadas —como la incertidumbre regulatoria o la viabilidad económica y logística— no pueden resolverse desde el framing comunicativo: la comunicación puede ayudar a explicar avances o condiciones, pero su abordaje depende principalmente de marcos normativos claros, costes competitivos, disponibilidad del producto y condiciones operativas reales.

A efectos comunicativos, se proponen tres perfiles iniciales extraídos del análisis de contenido de encuestas y entrevistas. Estos perfiles no deben entenderse como sectores cerrados, sino como orientaciones o sensibilidades comunicativas que pueden aparecer en distintos tipos de personas y actores. El primero es un **perfil técnico-pragmático**, vinculado a discursos centrados en la eficacia, la seguridad, la facilidad de uso, la calidad, la homogeneidad, la trazabilidad y la compatibilidad con prácticas o procesos existentes. El segundo es un **perfil ambiental-circular**, más sensible a los beneficios ambientales, la reducción de pérdidas de fósforo, la economía circular, la protección del agua y la menor dependencia de materias primas externas. El tercero es un **perfil reputacional o de confianza social**, preocupado por la imagen de los cultivos, la aceptación del consumidor, la legitimidad pública y la posible desconfianza asociada al origen residual de los productos.

Aunque estos perfiles se han identificado principalmente a partir de actores expertos o semi-expertos vinculados al ciclo del fósforo, podrían aparecer también en otros públicos con distinto grado de especialización. Una futura investigación social permitiría analizar

qué perfiles predominan en diferentes sectores, grupos profesionales, franjas de edad o contextos territoriales, por ejemplo, rural/urbano, y a partir de ello, adaptar futuras campañas de comunicación a los públicos mayoritarios en cada ámbito. De este modo, los perfiles no sustituyen al análisis sectorial, sino que ofrecen una herramienta complementaria para ajustar los mensajes a distintas sensibilidades sociales. La encuesta abierta en el *Innovation Hub* del proyecto a público más general podrá contribuir a explorar si estas preocupaciones aparecen también en públicos más generales y qué perfiles se orientan más los públicos de los tres segmentos encontrados para recomendar adaptar los mensajes a futuro.

A continuación se detallan las **desconfianzas claves identificadas** y el abordaje propuesto sobre este marco de trabajo. Los abordajes propuestos no pretenden sustituir evidencias técnicas, sino orientar la forma en que dichas evidencias pueden comunicarse según las preocupaciones predominantes de cada perfil actual y que se encuentre a futuro.

### A) Desconfianza asociada al origen residual de algunos productos recuperados

Esta barrera se relaciona con la asociación entre productos recuperados y materiales percibidos como problemáticos, especialmente cuando se vinculan a lodos de depuradora u otras corrientes residuales. Aunque los actores consultados muestran una predisposición generalmente favorable hacia la recuperación de fósforo, la aceptación puede disminuir cuando el origen del producto activa dudas sobre seguridad, contaminación o calidad.

Para el **perfil técnico-pragmático**, el mensaje debería centrarse en la transformación del material, el control del proceso y la trazabilidad del producto final. La clave no es ocultar el origen residual, sino explicar que el producto recuperado no equivale directamente al residuo de partida.

**Abordaje propuesto:** framing de transformación, control y trazabilidad.

**Mensaje ejemplo:** “Lo relevante no es solo el origen del material, sino el proceso de recuperación y control que permite convertir una corriente residual en un nutriente útil, trazable y verificable.”

Para el **perfil ambiental-circular**, esta misma barrera puede reformularse como una oportunidad para evitar la pérdida de nutrientes y cerrar ciclos de recursos.

**Abordaje propuesto:** framing de recuperación de recursos y circularidad.

**Mensaje ejemplo:** “Recuperar fósforo permite aprovechar un recurso que actualmente puede perderse y avanzar hacia un uso más circular de los nutrientes.”

Para el **perfil reputacional o de confianza social**, el mensaje debe reforzar la legitimidad del uso de productos recuperados a partir de la idea de garantía, control y transparencia.

**Abordaje propuesto:** framing de confianza pública y uso responsable.

**Mensaje ejemplo:** “Usar nutrientes recuperados con garantías no reduce la calidad de una producción: demuestra compromiso con una agricultura más responsable, trazable y cuidadosa con el entorno.”

### B) Falta de información y formación específica

La falta de conocimiento práctico sobre dosis, biodisponibilidad, compatibilidad con cultivos, momentos de aplicación, almacenamiento, manejo o comparación con fertilizantes convencionales puede generar incertidumbre y frenar la adopción, incluso cuando existe una actitud positiva hacia la economía circular. En este caso, la comunicación debe reducir la distancia entre la innovación y su aplicación real.

Para el **perfil técnico-pragmático**, el framing debe centrarse en el acompañamiento práctico y en el papel de asesores agronómicos, cooperativas, distribuidores y técnicos de campo como intermediarios de confianza.

**Abordaje propuesto:** framing de acompañamiento práctico y transferencia técnica.

**Mensaje ejemplo:** “Con la información clave de la ficha técnica y el proveedor: dosis, cultivos recomendados, biodisponibilidad, manejo y almacenamiento no tendrás problema para aplicarlo correctamente e integrarlo con confianza en la explotación.”

Para el **perfil ambiental-circular**, el mensaje puede destacar que la circularidad requiere buenas prácticas de uso, no solo recuperación tecnológica.

**Abordaje propuesto:** framing de circularidad aplicada.

**Mensaje ejemplo:** “Cerrar el ciclo del fósforo implica recuperar nutrientes, pero también asegurar que se aplican correctamente y donde aportan valor.”

Para el **perfil reputacional o de confianza social**, el mensaje debe trasladar que la innovación se acompaña de formación, orientación y uso responsable.

**Abordaje propuesto:** framing de uso informado y responsable.

**Mensaje ejemplo:** “Recuerda que un fertilizante recuperado no se incorpora sin orientación: cuando va acompañado de información clara sobre su uso, aplicación y controles, puede integrarse como una práctica responsable y de confianza

### C) Confianza en la calidad y rendimiento agronómico

Esta barrera se relaciona con la necesidad de que los productos recuperados sean percibidos como homogéneos, estables, seguros y comparables con los fertilizantes minerales convencionales. La variabilidad en la composición, la baja concentración de fósforo, la humedad elevada, la dificultad de manipulación o la falta de evidencia sobre el rendimiento en campo pueden reducir su aceptación. Para la industria de fertilizantes, además, los productos recuperados deben poder integrarse en formulaciones comerciales sin comprometer la calidad final, la estabilidad del suministro ni la eficiencia de los procesos productivos.

Para el **perfil técnico-pragmático**, el framing debe apoyarse en evidencia práctica, ensayos, estabilidad del producto y comparación con alternativas conocidas.

**Abordaje propuesto:** framing de evidencia y equivalencia funcional.

**Mensaje ejemplo:** “Un fertilizante recuperado estable, manejable y probado en campo puede ofrecer el rendimiento que necesitas sin alterar las prácticas habituales de fertilización.”

Para el **perfil ambiental-circular**, el mensaje debe vincular el beneficio ambiental con la funcionalidad agronómica, evitando presentar la circularidad como un valor suficiente por sí solo.

**Abordaje propuesto:** framing de circularidad eficaz.

**Mensaje ejemplo:** “Los fertilizantes recuperados bien formulados permiten cerrar ciclos de nutrientes contribuyendo al medio ambiente sin renunciar a la eficacia que necesita el cultivo.”

Para el **perfil reputacional o de confianza social**, el mensaje puede formularse en términos de calidad verificable y confianza en el producto final.

**Abordaje propuesto:** framing de calidad verificable.

**Mensaje ejemplo:** “Un fertilizante recuperado con calidad verificada puede sostener una producción eficaz y transmitir una imagen de responsabilidad, control y confianza.”

### D) Percepción social y reputacional

Esta barrera se vincula al temor a que el uso de productos derivados de residuos afecte a la imagen de los cultivos, productos agrícolas o prácticas de producción. Puede ser especialmente relevante en cadenas agroalimentarias sensibles a la percepción del consumidor, certificaciones de calidad o exigencias de sostenibilidad. Por ello, el abordaje comunicativo debe ir más allá de los aspectos técnicos y conectar seguridad, trazabilidad, beneficios ambientales y contribución a la economía circular.

Para el **perfil técnico-pragmático**, el framing debe centrarse en trazabilidad, garantías y compatibilidad con estándares de producción.

**Abordaje propuesto:** framing de responsabilidad y trazabilidad.

**Mensaje ejemplo:** “Utilizar nutrientes recuperados con garantías puede reforzar una producción agrícola más trazable, eficiente y alineada con objetivos de sostenibilidad.”

Para el **perfil ambiental-circular**, el mensaje puede destacar la contribución del sistema agroalimentario a una gestión más responsable de los recursos y a la reducción de pérdidas de nutrientes.

---

**Abordaje propuesto:** framing de contribución ambiental del sistema agroalimentario.

**Mensaje ejemplo:** “La recuperación segura de fósforo permite reducir pérdidas de nutrientes y aprovechar mejor los recursos disponibles en el territorio.”

Para el **perfil reputacional o de confianza social**, el mensaje debe reforzar la legitimidad pública de estas soluciones, evitando que se perciban como una práctica de menor calidad o como una simple gestión de residuos.

**Abordaje propuesto:** framing de legitimidad social y confianza.

**Mensaje ejemplo:** “Recuperar fósforo de forma segura ayuda a aprovechar mejor los recursos y a reducir la pérdida de nutrientes hacia el agua.”

En conjunto, esta propuesta inicial permite pasar de la identificación de barreras a una primera traducción comunicativa de las preocupaciones detectadas. Su valor reside en orientar futuros materiales, talleres o consultas hacia una comunicación más adaptada a distintos públicos. En fases posteriores, estos mensajes podrían testarse con actores expertos y con públicos más generales para analizar qué enfoques generan mayor comprensión, confianza, legitimidad y disposición a aceptar soluciones circulares basadas en la recuperación de fósforo.

## 6 Conclusiones

El análisis desarrollado permite caracterizar el ciclo actual del fósforo en la región SUDOE como un sistema estratégico para la producción agrícola, pero sometido a tensiones ambientales, económicas y sociales relevantes. La gestión actual combina una elevada dependencia de fertilizantes minerales importados, pérdidas de fósforo hacia el medio acuático y barreras para la implantación de soluciones circulares de recuperación y reutilización.

**Desde el punto de vista ambiental**, los resultados muestran que la dimensión de los impactos asociados al ciclo del fósforo es significativa y justifica la necesidad de avanzar hacia modelos de gestión más eficientes. En el suministro de fertilizantes fosforados, los impactos se concentran principalmente en la etapa de síntesis, evidenciando el peso de los procesos industriales de transformación y formulación del fósforo mineral. A escala territorial, el suministro considerado representa más de 500.000 t de  $P_2O_5$ , asociadas a cargas ambientales relevantes en cambio climático, eutrofización, uso de recursos fósiles, uso de recursos minerales y uso de agua. España y Francia SUDOE concentran la mayor parte de estos impactos debido al mayor volumen de  $P_2O_5$  consumido o requerido.

Además, las emisiones directas de fósforo al medio acuático evidencian una presión ambiental relevante sobre las masas de agua. Las emisiones agrícolas difusas deben interpretarse como una presión integrada del sistema agrícola y agropecuario, condicionada por la fertilización mineral y orgánica, las reservas acumuladas en el suelo, la erosión, la escorrentía, el manejo agronómico y las condiciones territoriales. Su reducción es importante no solo para mejorar la eficiencia en el uso del fósforo, sino también para disminuir la contribución del sistema agrícola a los procesos de eutrofización.

En las EDAR, el análisis muestra una situación diferente: estos sistemas constituyen puntos concentrados de gestión y emisión de fósforo. La eutrofización de agua dulce está dominada por el fósforo residual emitido en el efluente, mientras que el uso de  $FeCl_3$  introduce impactos indirectos asociados al consumo de reactivos. Esto sitúa a las EDAR como espacios prioritarios para analizar mejoras en la eliminación y recuperación de fósforo, especialmente porque el nutriente se encuentra en flujos más localizados y potencialmente recuperables que en el caso de las pérdidas agrícolas difusas.

**Desde la perspectiva económica**, el modelo actual presenta una vulnerabilidad estructural asociada a la dependencia exterior y a la volatilidad de precios. El gasto estimado en fertilizantes fosforados para el espacio SUDOE es del orden de **1.849 M€/año** bajo condiciones de precio de referencia 2025, y podría superar los **2.883 M€/año** en escenarios equivalentes al pico de precios de 2022. Además, las emisiones procedentes de EDAR en la región SUDOE, estimadas en aproximadamente **14.8 kt P/año**, junto con el fósforo retenido en lodos, evidencian la existencia de flujos secundarios todavía insuficientemente valorizados.

**La evaluación social** muestra una apertura significativa hacia las soluciones de recuperación de fósforo, pero condicionada por factores como la confianza, la seguridad, la calidad, la trazabilidad, la viabilidad económica y la facilidad de integración en las prácticas existentes. Las principales barreras se relacionan con la percepción de riesgo asociada al origen residual de los productos, la posible presencia de contaminantes, la variabilidad de composición, la incertidumbre regulatoria, los costes logísticos y la falta de información práctica.

En este contexto, el framing comunicativo desarrollado en el entregable constituye una primera herramienta para traducir estas barreras en mensajes adaptados a distintos perfiles de actores. La diferenciación entre perfiles técnico-pragmáticos, ambiental-circulares y reputacionales permite orientar futuras acciones de comunicación, formación y sensibilización, contribuyendo a reforzar la confianza y la aceptación de las soluciones de recuperación.

Este entregable establece una línea base integrada —ambiental, económica y social— del ciclo actual del fósforo en la región SUDOE. Esta línea base será clave para comparar, en fases posteriores del proyecto ENDORSE, el desempeño de las soluciones de recuperación frente al modelo actual, considerando no solo su impacto ambiental, sino también su viabilidad económica, su encaje operativo, su aceptación social y sus necesidades de comunicación.

## 7 Bibliografía

Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2024a). *Planos de gestão de região hidrográfica de Portugal continental – 3.º ciclo de planeamento (2022–2027)*. Agência Portuguesa do Ambiente. <https://apambiente.pt/agua/3o-ciclo-de-planeamento-2022-2027>

Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2024b). *Relatório do Estado do Ambiente Portugal 2023*. Agência Portuguesa do Ambiente. <https://rea.apambiente.pt>

Álvarez, R., Villanueva, M., & Fernández-Aracil, P. (2018). *El ciclo del fósforo en España: diagnóstico y recomendaciones para una gestión más sostenible*. Fundación Biodiversidad / Red Española de Compostaje.

Consejo de la Unión Europea. (2025). *Reglamento (UE) 2025/1227 del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a la modificación de los derechos de aduana aplicables a las importaciones de determinadas mercancías originarias o exportadas de la Federación de Rusia y de la República de Bielorrusia*. Diario Oficial de la Unión Europea.

Dockhorn, T. (2009). About the economy of phosphorus recovery. In K. Ashley, D. Mavinic, & F. Koch (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams*. IWA Publishing.

European Commission. (2019). *Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products*. Official Journal of the European Union, L 170, 1–114.

European Commission. (2021). *Commission Recommendation (EU) 2021/2279 of 15 December 2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations*. Official Journal of the European Union, L 471, 1–396.

European Commission. (2023). *Critical Raw Materials Act — Annex I: List of critical raw materials*. COM(2023) 160 final.

European Commission. (2026a). *Fertiliser use and costs in EU farms — Agri-food Data Portal*. Directorate-General for Agriculture and Rural Development. <https://agridata.ec.europa.eu/extensions/FertiliserReport/FertiliserReport.html>

European Commission. (2026b). *Fertiliser prices — Agri-food Data Portal*. Directorate-General for Agriculture and Rural Development. <https://agridata.ec.europa.eu/extensions/DashboardFertiliser/FertiliserPrices.html>

European Environment Agency (EEA). (2023). *Waterbase — Water Quality / WISE — Water Information System for Europe*. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/waterbase-water-quality-icm>

European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP). (2024). *Struvite and other recovered phosphorus fertilisers under EU Fertilising Products Regulation 2019/1009*. ESPP Factsheet.

Eurostat. (2026). *Utilised agricultural area by NUTS 2 regions, crop groups and economic size classes [ef\_lus\_allcrops]*. European Commission. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ef\\_lus\\_allcrops/default/map?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ef_lus_allcrops/default/map?lang=en)

Instituto Nacional de Estadística (INE). (2024). *Estatísticas Agrícolas 2023*. Instituto Nacional de Estadística. ISBN 978-989-25-0641-X.

International Organization for Standardization (ISO). (2006a). *ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. International Organization for Standardization.

International Organization for Standardization (ISO). (2006b). *ISO 14044:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. International Organization for Standardization.

Lima, A., Caetano, N., Figueiredo, S., & Ramísio, P. (2024). Assessing phosphorus fluxes in Portugal. *Science of the Total Environment*, 912, 169208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.169208>

Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire. (2025). *Graph'Agri 2024 — L'agriculture en chiffres*. Service de la statistique et de la prospective.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). (2023a). *Estadística de consumo de fertilizantes en la agricultura*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). (2023b). *Encuesta sobre suministros y consumo de fertilizantes en la agricultura española 2022–2023*. Subdirección General de Estadística.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). (2024). *Anuario de estadística 2024*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Panagos, P., Köningner, J., Ballabio, C., Liakos, L., & Muntwyler, A. (2022). Improving the phosphorus budget of European agricultural soils. *Science of the Total Environment*, 853, 158706. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158706>

PRé Sustainability. (2021). *SimaPro Database Manual: Methods library*. <https://support.simapro.com/articles/Manual/SimaPro-Methods-manual>

Système d'Information sur l'Eau (SIEAG). (2023). *Système d'Information sur l'Eau du Bassin Adour-Garonne* [Base de datos]. <https://adour-garonne.eaufrance.fr>

Système d'Information sur l'Eau (SIE). (2022). *Données sur les rejets des stations d'épuration — Agences de l'Eau Adour-Garonne, Loire-Bretagne et Rhône-Méditerranée*. <https://www.eaufrance.fr>

U.S. Geological Survey. (2024). *Mineral commodity summaries 2024: Phosphate rock*. U.S. Department of the Interior. <https://doi.org/10.3133/mcs2024>

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>