

(E2.4.2.) GUIA DE MONITORIZACIÓN DE FOSFATOS

Interreg
Sudoe



Co-funded by
the European Union

Phos4Cycle

0. Introducción

0.1. Contexto del proyecto.

El proyecto Phos4Cycle se desarrolla en el contexto de la creciente preocupación por la contaminación difusa por fósforo asociada a las actividades agroganaderas y su impacto sobre la calidad de las aguas superficiales. La acumulación y movilización de fosfatos en el suelo, su transporte a través de procesos de escorrentía y erosión, y su llegada a los sistemas acuáticos constituyen un desafío relevante para la gestión sostenible de los territorios agrícolas y ganaderos, especialmente a escala de cuenca.

En este contexto, resulta necesario disponer de herramientas técnicas que permitan comprender la dinámica del fósforo en los sistemas productivos y evaluar el riesgo asociado a su movilización hacia el medio acuático, considerando de forma integrada los compartimentos suelo, sedimentos y agua, así como la influencia de los manejos agroganaderos y de las condiciones climáticas. La monitorización a escala de cuenca se plantea como un enfoque adecuado para abordar esta problemática desde una perspectiva territorial y funcional.

El proyecto Phos4Cycle aborda esta necesidad mediante el desarrollo y validación de un sistema integrado de monitorización del fósforo, aplicado en distintos sistemas agroganaderos representativos del espacio SUDOE. A través de un enfoque basado en pilotos reales, el proyecto genera conocimiento técnico aplicado orientado a mejorar la prevención de la contaminación por fosfatos y a apoyar la gestión agroambiental desde una perspectiva de economía circular y sostenibilidad.

0.2. Objetivo de la guía.

El objetivo de la presente guía es proporcionar un marco técnico y metodológico de referencia para el diseño, la implantación y la interpretación de sistemas de monitorización del fósforo a escala de cuenca en sistemas agroganaderos. El documento establece criterios operativos que permiten integrar información procedente del suelo, los sedimentos y el agua, facilitando su análisis conjunto en relación con las prácticas de manejo y las condiciones climáticas.

La guía está orientada a apoyar la evaluación del riesgo de contaminación por fosfatos y a mejorar la toma de decisiones técnicas en materia de planificación y gestión agroambiental, desde un enfoque preventivo y basado en datos. Asimismo, pretende servir como herramienta de apoyo para la replicabilidad de los sistemas de monitorización, permitiendo su adaptación a distintos contextos territoriales y edafoclimáticos.

0.3. Público destinatario.

La presente guía está dirigida principalmente a personal técnico y entidades involucradas en la gestión agroambiental y de los recursos hídricos, incluyendo administraciones públicas, gestores de cuencas, servicios de asesoramiento agrario y ganadero, y organizaciones vinculadas a la planificación territorial. Asimismo, el documento resulta de interés para centros de investigación y entidades técnicas que desarrollen actividades relacionadas con la monitorización ambiental y la prevención de la contaminación difusa.

La guía se concibe como una herramienta de apoyo técnico para profesionales con conocimientos en gestión agraria, medioambiental o hidrológica, orientada a facilitar la comprensión, el diseño y la aplicación de sistemas de monitorización del fósforo en contextos reales. El documento no tiene carácter normativo ni legal, y no sustituye a la legislación vigente ni a los instrumentos reglamentarios aplicables, sino que ofrece criterios técnicos y metodológicos basados en la experiencia del proyecto para apoyar la toma de decisiones y la planificación de actuaciones desde un enfoque preventivo.

0.4. Relación con los pilotos del GT2.

La presente guía se fundamenta en la experiencia adquirida durante el desarrollo de los pilotos de monitorización ejecutados en el marco del Grupo de Trabajo 2 (GT2) del proyecto Phos4Cycle. Los contenidos y recomendaciones recogidos en el documento se derivan directamente del diseño, la implantación y el seguimiento de dichos pilotos, y reflejan las lecciones aprendidas en distintos contextos agroganaderos y territoriales.

La información generada a través de los pilotos ha permitido validar, en condiciones reales, los enfoques metodológicos propuestos en la guía, así como identificar las principales fortalezas, limitaciones y factores críticos asociados a la monitorización del fósforo a escala de cuenca. En este sentido, la guía no reproduce los resultados específicos de los pilotos, sino que sintetiza y generaliza los criterios técnicos y metodológicos que han demostrado ser más relevantes para la evaluación del riesgo de contaminación por fosfatos y la interpretación de los datos obtenidos.

De este modo, la guía actúa como un elemento de conexión entre el trabajo experimental desarrollado en los pilotos y su posible aplicación en otros territorios, contribuyendo a la transferencia del conocimiento generado en el GT2 y a la replicabilidad de los sistemas de monitorización desarrollados en el proyecto.

1. Alcance y ámbito de aplicación

Este apartado define los contextos territoriales y productivos en los que resulta aplicable la metodología de monitorización del fósforo propuesta en la presente guía, estableciendo el marco general para su utilización en sistemas agroganaderos.

La metodología ha sido aplicada y validada en distintos sistemas representativos del espacio SUDOE, incluyendo explotaciones agrícolas extensivas, sistemas vitivinícolas, explotaciones ganaderas extensivas, sistemas hortícolas y explotaciones ganaderas intensivas. Esta diversidad

de contextos ha permitido comprobar su aplicabilidad en condiciones edafoclimáticas y de manejo muy diferentes, siempre que exista interacción entre el suelo, los procesos de escorrentía y el transporte de sedimentos y nutrientes.

1.1. Sistemas productivos a los que aplica la metodología.

La metodología desarrollada en el marco de Phos4Cycle ha sido concebida con un carácter transversal, pudiendo aplicarse a diversos sistemas productivos representativos del espacio SUDOE. Su ámbito de aplicación abarca aquellos sistemas en los que existe interacción entre el manejo del suelo, el uso de fertilizantes o efluentes y los procesos de transporte de nutrientes hacia el medio acuático.

En este contexto, la metodología resulta aplicable a

- Sistemas de cultivo y regadío, incluyendo cultivos herbáceos extensivos (cereal) y cultivos intensivos (maíz, hortalizas), donde la gestión de la fertilización mineral y los procesos de escorrentía superficial constituyen factores determinantes en la movilización del fósforo.
- Cultivos permanentes, como viñedo y olivar, frecuentemente asociados a terrenos con pendiente, en los que el riesgo de erosión del suelo y el transporte de fósforo particulado ligado a sedimentos adquieren especial relevancia.
- Sistemas ganaderos intensivos, como explotaciones de vacuno de leche o porcino, en los que la gestión de efluentes orgánicos y su aplicación sobre el suelo condicionan la acumulación y movilización de nutrientes a escala de parcela o subcuenca.
- Sistemas silvopastoriles y ganadería extensiva, como dehesas o sistemas de pastoreo, donde la distribución espacial del ganado y la deposición de deyecciones generan patrones heterogéneos de acumulación de fósforo, requiriendo un enfoque específico de monitorización.
- Sistemas avícolas, especialmente en condiciones de producción extensiva, donde la gestión de la cama y de los residuos orgánicos puede influir en la dinámica del fósforo en el entorno inmediato y en las subcuencas asociadas.

De forma general, la metodología es aplicable a cualquier sistema agrícola o agroganadero en el que sea necesario evaluar la relación entre las prácticas de manejo y la transferencia de fósforo hacia las masas de agua, siempre que el análisis se aborde desde una perspectiva funcional a escala de subcuenca.

1.2. Escala territorial recomendada.

La eficacia de la monitorización del fósforo depende en gran medida de la selección de una escala de trabajo que permita captar de forma integrada la interacción entre las prácticas de manejo y los procesos de transporte de nutrientes hacia el medio acuático

En este sentido, la metodología se basa en un enfoque a escala de cuenca o subcuenca hidrográfica, al ser la unidad más adecuada para comprender las dinámicas de transferencia del fósforo desde las zonas de producción (agrícolas o ganaderas) hacia las

masas de agua, integrando el conjunto de procesos hidrológicos que gobiernan estos flujos.

Escalas de aplicación

La aplicación de la metodología puede adaptarse a distintos niveles territoriales en función de las características del sistema y de las problemáticas identificadas:

Zonas vulnerables a la contaminación por nutrientes

En estos contextos, la aplicación de la metodología resulta especialmente relevante, al permitir evaluar la eficacia de las medidas de gestión y el cumplimiento de los objetivos ambientales. La monitorización del fósforo actúa como un indicador clave del funcionamiento del sistema y de la presión ejercida sobre las masas de agua.

Escala local o de subcuenca

Constituye la escala prioritaria de aplicación. Permite establecer una relación directa entre el uso del suelo, las prácticas de manejo y la calidad del agua en el punto de salida, facilitando la interpretación de los procesos de escorrentía y transporte de nutrientes.

Escala de cuenca intermedia o regional

En sistemas con mayor complejidad, como áreas de regadío o territorios con redes de drenaje desarrolladas, puede ser necesario trabajar a escalas superiores que integren el funcionamiento del sistema hidráulico completo. En estos casos, la metodología permite analizar de forma agregada los flujos de fósforo y apoyar la toma de decisiones a nivel territorial.

Dimensión de las unidades de análisis

La experiencia de los pilotos pone de manifiesto que la monitorización del fósforo debe abordarse desde una visión de sistema, evitando el análisis aislado de parcelas individuales.

Se recomienda:

- priorizar unidades hidrológicas funcionales (subcuencas) frente a parcelas aisladas
- evitar escalas demasiado reducidas que no capten los procesos de transporte
- considerar escalas mayores cuando la conectividad hidráulica lo requiera

En términos orientativos, las unidades de trabajo pueden variar desde pequeñas subcuencas de pocas hectáreas en sistemas controlados, hasta unidades de mayor tamaño (decenas o centenas de hectáreas) en sistemas con redes de drenaje complejas.

Criterios para la selección de la escala

La elección de la escala de intervención debe realizarse caso por caso, en función de:

Phos4Cycle

- la problemática de contaminación identificada
- la estructura del sistema productivo
- la densidad de explotaciones o presión ganadera
- la conectividad hidrológica del territorio
- la existencia de infraestructuras de drenaje

Este proceso debe apoyarse en un diagnóstico previo del sistema, combinando análisis cartográfico (modelo digital del terreno, red de drenaje) y verificación en campo.

Recomendación metodológica

Como criterio general, se recomienda trabajar a la menor escala posible que permita:

- capturar los flujos reales de agua y sedimentos
- identificar la relación entre manejo y respuesta del sistema
- disponer de un punto de salida claramente definido

Este enfoque garantiza que el sistema de monitorización proporcione información útil para la gestión del territorio, evitando tanto la simplificación excesiva como la pérdida de representatividad.

1.3. Limitaciones detectadas.

La implementación de los sistemas de monitorización en el marco del proyecto Phos4Cycle ha permitido identificar una serie de limitaciones técnicas, metodológicas y operativas que deben ser consideradas en el diseño y aplicación de futuros sistemas de seguimiento del fósforo.

Estas limitaciones no invalidan la metodología, pero condicionan la interpretación de los resultados y refuerzan la necesidad de un diseño adaptado a cada contexto.

Limitaciones asociadas al diseño del sistema

Una de las principales dificultades detectadas es la selección de unidades de estudio adecuadas desde el punto de vista hidrológico. En particular, resulta complejo identificar parcelas o subcuencas en las que el punto de salida recoja exclusivamente el flujo procedente del área de estudio, sin interferencias externas. La presencia de aportes laterales o conexiones no controladas puede comprometer la interpretación de los resultados.

Asimismo, la delimitación de subcuencas requiere disponer de modelos digitales del terreno de alta resolución, que no siempre están disponibles. En ausencia de esta información, puede ser necesario recurrir a levantamientos topográficos específicos o técnicas de teledetección para garantizar una delimitación precisa.

Otra limitación relevante es la necesidad de contar con varias subcuencas comparables dentro de una misma explotación, lo que no siempre es posible en condiciones reales, dificultando la comparación entre estrategias de manejo.

Limitaciones asociadas a la monitorización y equipamiento

Durante los pilotos se han identificado limitaciones relacionadas con el uso de sensores y sistemas de monitorización continua. En particular, la acumulación de materia orgánica, sedimentos o biofilm en sondas ópticas puede afectar a la calidad de los datos, especialmente en medios con bajo caudal o aguas estancadas. La ausencia de planes de mantenimiento y calibración adecuados puede generar desviaciones en los parámetros medidos, como turbidez o conductividad.

En sistemas con elevada carga de sólidos, como parcelas con pendiente o eventos de escorrentía intensa, los equipos de muestreo pueden presentar problemas de colmatación o saturación, dificultando la obtención de muestras representativas.

Limitaciones asociadas a factores climáticos e hidrológicos

La metodología presenta una fuerte dependencia de los eventos climáticos, especialmente de la precipitación. Los periodos prolongados de sequía limitan la generación de escorrentía y, por tanto, la obtención de datos, mientras que los eventos extremos (lluvias intensas o inundaciones) pueden superar la capacidad de los equipos o provocar su desplazamiento o pérdida.

En sistemas de regadío o con gestión hidráulica activa, la manipulación de caudales mediante compuertas o bombeos introduce una variabilidad adicional que puede enmascarar el efecto directo de las prácticas de manejo, siendo necesario registrar estas operaciones para una correcta interpretación.

Limitaciones asociadas al manejo y al sistema productivo

En sistemas agrícolas, la aplicación de determinadas enmiendas, como el biochar, puede interferir en la medición del fósforo disponible (P Olsen), debido a su capacidad de adsorción. Esto puede generar lecturas que no reflejan de forma inmediata la disponibilidad real del fósforo en el corto plazo.

En sistemas ganaderos, especialmente en condiciones extensivas como la dehesa, la heterogeneidad espacial del suelo y de las deyecciones, junto con la presencia de ganado, introduce limitaciones operativas en la toma de muestras y en la representatividad de los datos.

Limitaciones asociadas a la escala temporal

Los procesos de acumulación, transformación y transferencia del fósforo se desarrollan a lo largo de periodos temporales prolongados, lo que implica que los resultados obtenidos en campañas cortas deben interpretarse con cautela.

Un seguimiento limitado a una única campaña o a un solo ciclo productivo no permite captar la variabilidad interanual ni distinguir entre efectos estructurales del manejo y variaciones climáticas puntuales. Por ello, se recomienda disponer de series temporales de varios años, así como de datos de referencia iniciales que permitan evaluar la evolución del sistema.

Consideración final

Estas limitaciones ponen de manifiesto la necesidad de abordar la monitorización del fósforo desde un enfoque flexible y adaptado al contexto, integrando información técnica, conocimiento del sistema y planificación a medio plazo. La anticipación de estos condicionantes permite mejorar el diseño de los sistemas de monitorización y reforzar la fiabilidad de los resultados obtenidos.

2. Enfoque metodológico general

2.1. Enfoque a escala cuenca.

La monitorización del fósforo en sistemas agroganaderos requiere un enfoque integrado que permita analizar de forma conjunta los procesos que tienen lugar en el suelo, el transporte de partículas y nutrientes mediante la escorrentía y su eventual transferencia hacia el medio acuático.

En este contexto, la metodología propuesta se basa en el análisis del sistema productivo a escala de cuenca o subcuenca hidrográfica, considerada como la unidad funcional más adecuada para comprender la dinámica del fósforo. Este enfoque permite integrar las características del suelo, las condiciones climáticas y las prácticas de manejo agronómico o ganadero dentro de un sistema hidrológicamente conectado.

Fundamento del enfoque a escala de cuenca

Trabajar a escala de cuenca permite analizar el comportamiento del sistema como una unidad en la que los procesos de escorrentía superficial y transporte de sedimentos conectan las diferentes zonas del terreno.

La escorrentía generada en cada subcuenca actúa como elemento integrador, movilizandopartículas de suelo y nutrientes desde las áreas de contribución hasta el punto de salida. De este modo, el análisis conjunto del agua y de los sedimentos transportados permite estimar la cantidad de fósforo movilizado y relacionarla con:

- las características edáficas del sistema
- la distribución del uso del suelo
- las prácticas de manejo aplicadas

Ventajas del enfoque a escala de subcuenca

La experiencia de los pilotos ha demostrado que el trabajo a escala de subcuenca presenta varias ventajas clave:

- permite una caracterización detallada del uso del suelo y de las prácticas de fertilización o manejo ganadero
- facilita la instalación de puntos de monitorización en líneas de drenaje representativas (regueras, valas, cauces)

Phos4Cycle

- mejora la precisión en la evaluación del riesgo, evitando la dilución de los procesos en unidades territoriales demasiado grandes
- permite establecer comparaciones entre diferentes estrategias de manejo dentro de una misma explotación
- mantiene una relación directa entre las prácticas aplicadas y la respuesta observada en el sistema

Selección de unidades de estudio

La selección de las unidades de monitorización debe basarse en una lógica de cuenca, priorizando aquellas explotaciones o áreas con mayor potencial de transferencia de fósforo hacia las masas de agua.

Para ello, es recomendable realizar un análisis previo que tenga en cuenta:

- la proximidad al sistema hidrográfico
- la conectividad hidrológica
- la intensidad del manejo (fertilización, carga ganadera, aplicación de efluentes)
- las características del medio receptor

Este análisis permite identificar las áreas más relevantes desde el punto de vista del riesgo de contaminación difusa.

Aplicación en distintos sistemas productivos

El enfoque a escala de subcuenca ha demostrado ser aplicable en distintos contextos productivos:

- en sistemas agrícolas, permite relacionar la fertilización y el manejo del suelo con la escorrentía generada
- en sistemas ganaderos extensivos, facilita el análisis de la distribución espacial de las deyecciones y su relación con los flujos de agua
- en sistemas intensivos, permite evaluar la contribución de los efluentes orgánicos al sistema
- en sistemas con drenaje artificial, integra el funcionamiento de la red hidráulica en el análisis

En todos los casos, la subcuenca se confirma como la unidad más adecuada para captar los flujos reales de agua y nutrientes sin perder el vínculo con las prácticas de manejo.

Integración de la información

El sistema de monitorización se fundamenta en la integración de diferentes fuentes de información:

- suelo, como reservorio del fósforo
- sedimentos, como vector principal del transporte particulado
- agua, como medio de transferencia hacia el sistema receptor

El análisis conjunto de estas matrices, en relación con las condiciones del territorio y las prácticas de manejo, permite comprender los procesos de movilización del fósforo y evaluar el riesgo de su transferencia hacia el medio acuático.

2.2. Integración suelo-sedimento-agua.

La monitorización del fósforo en sistemas agroganaderos requiere considerar de forma conjunta los distintos compartimentos en los que se producen los procesos de almacenamiento, movilización y transporte del nutriente. El fósforo no se comporta como un elemento aislado, sino que circula entre tres matrices interdependientes: suelo, sedimentos y agua.

El **suelo** constituye el principal reservorio del fósforo, siendo el receptor inicial del nutriente a través de la fertilización mineral o de las aportaciones orgánicas. Su capacidad de retención y disponibilidad de este nutriente, depende de factores como la textura, el pH, el contenido en materia orgánica y la capacidad de adsorción. Cuando esta capacidad se ve superada, o cuando se producen procesos de erosión, el fósforo deja de estar disponible para el cultivo y pasa a formar parte de los flujos de transporte dentro del sistema.

Los **sedimentos** actúan como el principal vector de transporte del fósforo particulado. Debido a la afinidad del fósforo por las partículas del suelo, los procesos de erosión hídrica movilizan fracciones finas enriquecidas en fósforo, que son transportadas por la escorrentía. La experiencia de los pilotos ha confirmado que, durante eventos de precipitación, una parte significativa del fósforo exportado se encuentra asociada a los sólidos en suspensión.

El **agua** constituye el medio de transferencia hacia el sistema receptor, permitiendo cuantificar la exportación de fósforo fuera de la unidad de estudio. En el medio hídrico, el fósforo puede presentarse en forma disuelta, directamente disponible y responsable de procesos de eutrofización, o en forma particulada, ligada a sedimentos, con capacidad de deposición y liberación progresiva.

Enfoque integrado

El análisis aislado de cada uno de estos compartimentos no permite explicar adecuadamente la dinámica del fósforo. La experiencia de los distintos pilotos, ha puesto de manifiesto que únicamente mediante una **visión integrada suelo-sedimento-agua** es posible:

- identificar los mecanismos predominantes de movilización del fósforo
- diferenciar entre transporte disuelto y particulado
- relacionar las pérdidas de fósforo con las prácticas de manejo
- interpretar la respuesta del sistema ante eventos de precipitación

Relación con las condiciones del sistema

La correcta interpretación de los flujos de fósforo requiere complementar la monitorización con una caracterización detallada del entorno físico, incluyendo:

- la topografía (pendiente y orientación), que condiciona la generación de escorrentía
- la conductividad hidráulica del suelo, que determina la infiltración frente al flujo superficial
- el tipo de suelo y su capacidad de retención de fósforo
- las líneas preferentes de escorrentía
- la existencia de puntos de salida donde se puedan realizar mediciones representativas

Esta información constituye la base para relacionar los datos obtenidos en suelo, sedimentos y agua con los procesos hidrológicos que gobiernan el sistema.

Implicaciones para la gestión

La integración de estas tres matrices permite establecer un enfoque de análisis basado en el balance del fósforo dentro del sistema. Este enfoque facilita la identificación de puntos críticos y pone de manifiesto que las medidas de mejora aplicadas en el suelo tienen un efecto en cascada:

- la reducción de la erosión disminuye la generación de sedimentos
- la disminución del transporte de sedimentos reduce la exportación de fósforo
- la reducción del fósforo transportado mejora la calidad del agua

2.3. Importancia del manejo agroganadero.

Las prácticas de manejo agronómico y ganadero constituyen uno de los factores determinantes en la dinámica del fósforo dentro de los sistemas agroganaderos. Estas prácticas influyen directamente en la disponibilidad del nutriente en el suelo, en los procesos de movilización de sedimentos y en el riesgo de transferencia hacia el medio acuático.

Por este motivo, la interpretación de los datos de monitorización debe realizarse siempre en relación con el manejo aplicado en cada sistema productivo, siendo imprescindible disponer de un **registro detallado y sistemático de las prácticas realizadas**.

Influencia del manejo en la dinámica del fósforo

Las prácticas de manejo condicionan los principales procesos que afectan al fósforo:

- la **fertilización** (tipo, dosis y momento) determina las entradas de fósforo al sistema
- la **estructura del suelo y su cobertura** influyen en la infiltración y en la generación de escorrentía

Phos4Cycle

- las **prácticas de conservación del suelo** afectan a la erosión y al transporte de partículas
- la **gestión ganadera** condiciona la distribución espacial de las deyecciones y, por tanto, de los aportes de fósforo

La combinación de estos factores determina si el fósforo permanece retenido en el suelo, disponible para el cultivo, o si pasa a formar parte de los flujos de pérdida.

Registro de las prácticas de manejo

Para una correcta interpretación de los resultados, es necesario documentar de forma exhaustiva el manejo aplicado, considerando dos dimensiones complementarias:

♦ Manejo agronómico

Debe incluir información relativa a:

- tipo de cultivo y rotaciones
- presencia y gestión de cubiertas vegetales
- labores de preparación del suelo
- fertilización mineral y orgánica (tipo, dosis, momento)
- otras prácticas que puedan afectar a la estructura o cobertura del suelo

La presencia de cobertura vegetal, en particular, se ha identificado como un factor clave para reducir la escorrentía y limitar el transporte de sedimentos y fósforo.

♦ Manejo ganadero

En sistemas con presencia de ganado, resulta fundamental registrar:

- carga ganadera
- distribución espacial del pastoreo
- duración y frecuencia de uso de las parcelas
- existencia de sistemas de pastoreo rotacional o manejo adaptativo
- número de lotes y su evolución en el tiempo

La experiencia de los pilotos ha puesto de manifiesto que la presencia, intensidad y distribución del pastoreo influyen de forma directa en la redistribución del fósforo en el suelo y en su posible movilización.

En particular, sistemas como el pastoreo rotacional pueden modificar significativamente la distribución de las deyecciones, reduciendo la acumulación puntual y contribuyendo a una mayor homogeneidad en los aportes de fósforo.

Relación entre manejo y monitorización

La integración del registro de manejos con los datos de monitorización permite:

- interpretar las variaciones observadas en suelo, sedimentos y agua
- identificar los factores que desencadenan episodios de pérdida de fósforo
- evaluar la eficacia de distintas estrategias de manejo

- establecer relaciones causa–efecto entre prácticas y resultados

Este enfoque es esencial para pasar de la simple medición de parámetros a la **comprensión del funcionamiento del sistema**.

Implicaciones para la gestión

El análisis conjunto de manejo y monitorización permite identificar prácticas que contribuyen a:

- mejorar la eficiencia del uso del fósforo
- reducir la erosión del suelo
- limitar el transporte de sedimentos
- disminuir el riesgo de contaminación de las masas de agua

Entre estas prácticas se incluyen la optimización de la fertilización, el mantenimiento de cubiertas vegetales, la mejora de la estructura del suelo y la gestión adecuada del pastoreo.

2.4. Necesidad de datos comparables.

Para garantizar la comparabilidad de los resultados entre distintos territorios y sistemas productivos, es necesario definir un conjunto común de variables que permita caracterizar de forma homogénea los procesos de almacenamiento, movilización y transporte del fósforo.

La dinámica del fósforo está condicionada por la interacción entre el suelo, los procesos hidrológicos y las condiciones climáticas, por lo que el sistema de monitorización debe integrar información procedente de estos tres ámbitos. La utilización de un protocolo común de recogida de datos permite no solo interpretar los resultados a escala local, sino también agregarlos y compararlos a escala territorial.

2.4.1 Variables edáficas

Las variables edáficas permiten caracterizar el suelo como reservorio de fósforo y evaluar su capacidad de retención o liberación.

Se recomienda la determinación sistemática de:

- Fósforo disponible (ej. método Olsen), como indicador de la fracción potencialmente movilizable
- Fósforo total, para evaluar la acumulación a largo plazo
- Textura del suelo, clave para interpretar la retención de partículas y el riesgo de erosión
- pH, que condiciona la solubilidad del fósforo
- Materia orgánica, relacionada con la estabilidad estructural y la dinámica del nutriente
- Carbonatos, especialmente en suelos calizos, por su influencia en la fijación del fósforo

- Conductividad eléctrica, como indicador del estado químico del suelo

Grado de saturación de fósforo, cuando sea posible, para identificar si el suelo actúa como sumidero o fuente

Asimismo, es necesario registrar las prácticas que afectan directamente al suelo:

- fertilización (mineral y orgánica)
- labores del suelo
- cubiertas vegetales
- aportes de deyecciones
- ración ganadera

2.4.2 Variables hidrológicas

Las variables hidrológicas permiten caracterizar el transporte del fósforo desde el suelo hacia el medio acuático.

Se recomienda monitorizar:

- Nivel y caudal de agua, preferiblemente en continuo, para estimar cargas de fósforo
- Fósforo total en agua, como indicador global del transporte
- Fósforo disuelto, relacionado con el riesgo de eutrofización
- Sólidos en suspensión / turbidez, como proxy del fósforo particulado
- Conductividad eléctrica del agua, útil para identificar distintas fuentes de aporte
- Dirección e intensidad de escorrentía, vinculadas a eventos de precipitación
- Estado de saturación del suelo, clave en la generación de escorrentía
- Presencia de drenaje artificial, como vía adicional de transporte

El análisis conjunto de estas variables permite diferenciar entre transporte disuelto y particulado, así como estimar la carga total de fósforo exportada.

2.4.3 Variables climáticas

Las variables climáticas son determinantes en la activación de los procesos de movilización y transporte del fósforo.

Se recomienda registrar:

- Precipitación acumulada
- Intensidad de precipitación, especialmente en eventos erosivos
- Temperatura (mínima, máxima y media)
- Eventos extremos (tormentas, inundaciones, sequías prolongadas, episodios de hielo/deshielo)

La intensidad de la precipitación resulta especialmente relevante, ya que es el principal factor desencadenante de la escorrentía y del arrastre de sedimentos.

2.4.4. Importancia de la integración de datos

La integración de estas variables permite:

Phos4Cycle

- interpretar los procesos de movilización del fósforo
- diferenciar efectos de manejo frente a efectos climáticos
- identificar episodios críticos de transporte
- construir modelos de evaluación del riesgo

Este enfoque garantiza que los datos obtenidos sean comparables entre sistemas y útiles para la toma de decisiones a escala de explotación o territorio.

DINÁMICA DEL FÓSFORO EN EL SISTEMA SUELO–SEDIMENTO–AGUA

Enfoque a escala de subcuenca – Procesos y compartimentos clave

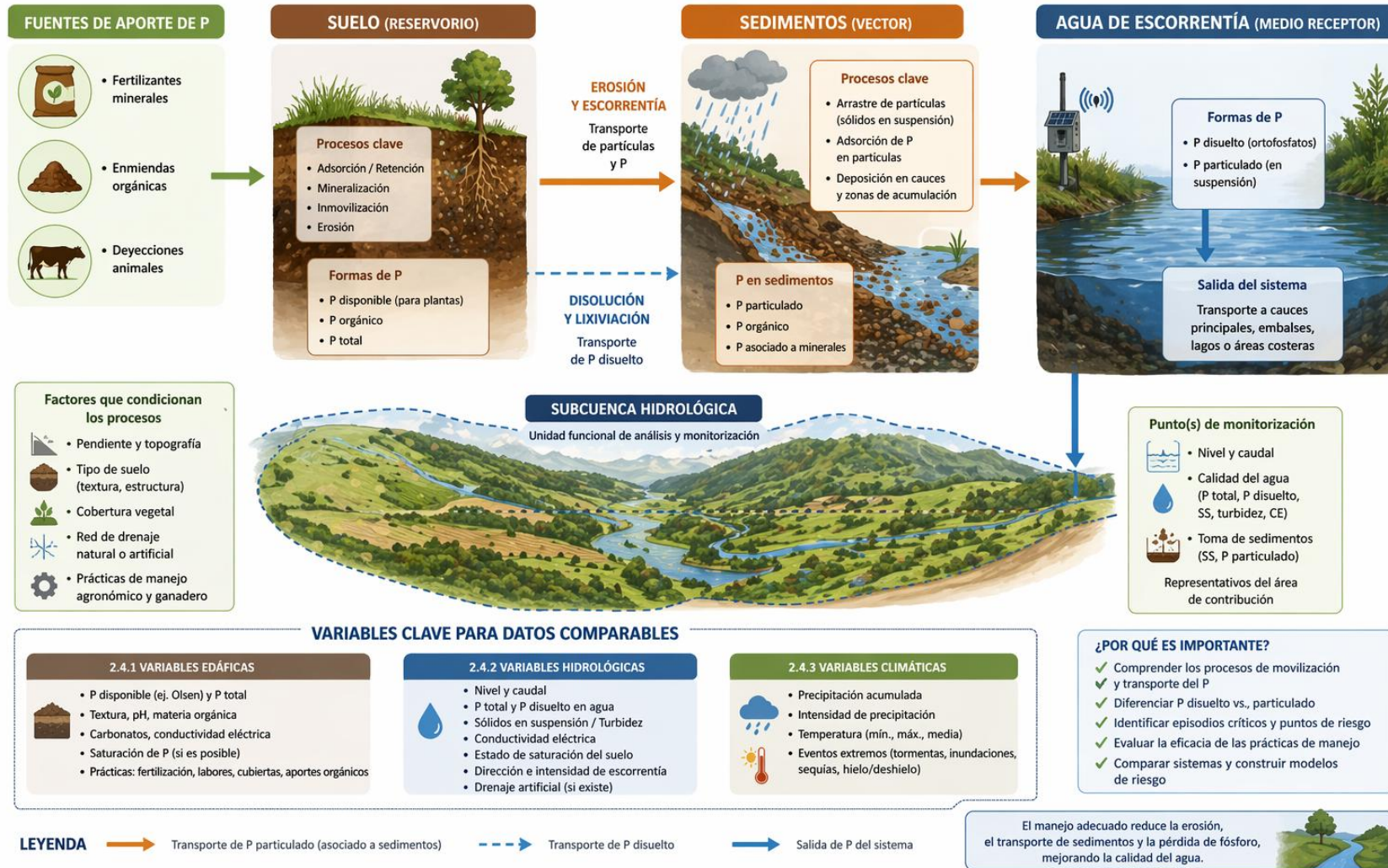


Figura 1 – Dinámica del fósforo en el sistema suelo–sedimentos–agua

3. Diseño del sistema de monitorización

El diseño del sistema de monitorización constituye una etapa clave para garantizar la obtención de datos representativos que permitan evaluar la dinámica del fósforo en sistemas agroganaderos. La correcta selección de la unidad de estudio, la delimitación hidrológica de las subcuencas y la definición de los puntos de muestreo determinan en gran medida la calidad e interpretabilidad de los resultados.

El enfoque metodológico adoptado se basa en el análisis del sistema productivo como una unidad hidrológica conectada, en la que los procesos de movilización del fósforo se estudian desde su origen en el suelo hasta su transporte mediante la escorrentía superficial, los sedimentos y el agua.

De forma general, el diseño del sistema de monitorización se estructura en tres fases: selección de la unidad de estudio y delimitación de la cuenca o subcuenca, identificación de subcuencas funcionales y definición de la red de muestreo y monitorización.

3.1 Selección y delimitación de la cuenca

La selección y delimitación de la cuenca de estudio constituye el punto de partida del sistema de monitorización. El objetivo es identificar una unidad hidrológica funcional en la que sea posible analizar de forma coherente los procesos de generación de escorrentía, movilización de sedimentos y transporte de fósforo hasta un punto de salida medible.

Trabajar a esta escala permite relacionar las concentraciones de fósforo detectadas en el agua con las características del suelo, la topografía y las prácticas de manejo desarrolladas dentro del área de estudio. La delimitación debe realizarse mediante análisis de modelos digitales del terreno, apoyados cuando sea necesario en cartografía complementaria y validación en campo.

3.1.1 Criterios técnicos mínimos

Para que la unidad seleccionada resulte adecuada, debe cumplir una serie de condiciones mínimas. En primer lugar, debe presentar una topografía que permita la generación y concentración de escorrentía, ya sea mediante pendientes, vaguadas, líneas naturales de drenaje, valas o cauces secundarios. En segundo lugar, debe existir un punto de salida claramente definido en el que converja el flujo procedente del área monitorizada, facilitando la instalación de estaciones de control o la recogida de muestras.

También es necesario que el sistema productivo sea representativo del tipo de explotación que se pretende analizar, ya sea agrícola, ganadera o mixta, y que las prácticas de manejo puedan documentarse con suficiente trazabilidad. En sistemas ganaderos, además, debe garantizarse que la superficie seleccionada sea efectivamente

utilizada por los animales y que se disponga de información mínima sobre carga ganadera, tiempo de ocupación, rotaciones y distribución espacial del pastoreo o de las deyecciones.

Por último, debe asegurarse la accesibilidad al área monitorizada y la viabilidad operativa del sistema, incluyendo tanto la toma de muestras como la instalación y mantenimiento de equipos. En sistemas extensivos o con presencia de ganado, esto implica además que la delimitación no interfiera con el funcionamiento normal de la explotación y que sea compatible con el uso de cercados, movimientos de animales y labores habituales.

3.1.2 Escala óptima

La escala de trabajo debe permitir captar los procesos reales de movilización del fósforo sin perder el vínculo con las prácticas de manejo aplicadas. De forma general, la subcuenca funcional dentro de la explotación se considera la unidad más adecuada, ya que permite analizar la generación de escorrentía y el transporte de nutrientes manteniendo una relación directa con el uso del suelo y la gestión agronómica o ganadera.

En sistemas comparativos, resulta recomendable disponer de varias subcuencas con características similares, de manera que puedan evaluarse distintas estrategias de manejo bajo condiciones comparables. En contextos agrícolas de pequeña y media escala, puede ser suficiente trabajar con superficies relativamente reducidas, mientras que en sistemas con redes de drenaje artificial o mayor complejidad hidráulica puede ser necesario ampliar la escala para integrar adecuadamente el funcionamiento del sistema. Como orientación general, conviene evitar unidades demasiado pequeñas, donde la variabilidad espacial domine sobre los procesos hidrológicos, así como unidades excesivamente grandes, donde se diluya la relación entre manejo y respuesta.

3.1.3 Errores frecuentes y recomendaciones

Uno de los errores más frecuentes consiste en delimitar la cuenca únicamente a partir de herramientas SIG, sin validación posterior en campo. En la práctica, pequeñas irregularidades del terreno, zonas compactadas, caminos, drenajes artificiales, compuertas o bombeos pueden modificar de forma importante las trayectorias reales del agua y los sedimentos. Por ello, la delimitación teórica debe contrastarse siempre mediante observación directa, preferiblemente durante o tras episodios de lluvia.

Otro problema habitual es seleccionar parcelas en las que el punto de salida recibe aportes procedentes de áreas externas no controladas, lo que dificulta enormemente la interpretación de los resultados. También se detectan dificultades cuando las subcuencas delimitadas presentan diferencias excesivas de pendiente, tamaño o uso del suelo, ya que ello reduce la comparabilidad entre tratamientos.

En sistemas ganaderos intensivos o avícolas deben considerarse además riesgos específicos, como los condicionantes sanitarios, las restricciones de acceso y la necesidad de aplicar protocolos de bioseguridad durante las campañas de campo.

Como recomendación general, se debe combinar el análisis topográfico con la información sobre usos del suelo, la red de drenaje, el manejo hidráulico y el conocimiento práctico del gestor de la explotación, ajustando el diseño a la realidad funcional del terreno.

3.2 Definición de puntos de muestreo

La definición de los puntos de muestreo debe asegurar una representación adecuada de la variabilidad espacial del sistema y permitir relacionar las características del suelo, el comportamiento hidrológico y las prácticas de manejo con la dinámica del fósforo. La ubicación de los puntos no debe responder únicamente a criterios geométricos o de facilidad de acceso, sino a una lógica funcional que refleje los procesos de generación, acumulación y transporte dentro de cada subcuenca.

3.2.1 Número mínimo recomendado

El número de puntos de muestreo debe ajustarse a la heterogeneidad del sistema, aunque como referencia general se recomienda un mínimo de cinco puntos de suelo por subcuenca en sistemas agrícolas y ganaderos, pudiendo incrementarse cuando exista una elevada variabilidad edáfica o topográfica. En sistemas ganaderos intensivos o avícolas, donde la distribución del fósforo depende en gran medida del uso del espacio por los animales, puede ser conveniente aumentar la densidad de puntos en las zonas de mayor frecuencia de ocupación.

En la monitorización del agua, la lógica es diferente. Para sistemas de monitorización continua, se recomienda seleccionar al menos un punto en la salida o en la confluencia principal de las subcuencas, pudiendo establecerse puntos adicionales aguas arriba cuando existan afluentes significativos o posibles interferencias externas. Para muestreo puntual o discreto, puede ser necesario instalar varios puntos en el sentido del flujo, incluidos dispositivos de recogida de escorrentía superficial o lisímetros de succión, según el objetivo del seguimiento.

En el caso de los sedimentos, el número de puntos dependerá de la configuración del sistema y del patrón de convergencia de los flujos. En general, se recomienda seleccionar puntos en zonas de concentración del escurrimiento, líneas de drenaje y áreas de deposición.

La georreferenciación precisa de todos los puntos seleccionados resulta imprescindible para repetir el muestreo en campañas sucesivas y analizar la evolución temporal de los parámetros observados.

3.2.2 Ubicación estratégica

La ubicación de los puntos debe definirse a partir de la integración entre análisis hidrológico y caracterización espacial del suelo. Para ello, resulta especialmente útil combinar el modelo digital del terreno con mapas de conductividad eléctrica aparente, ya que esta última permite identificar diferencias en textura, humedad, estructura o salinidad del suelo y delimitar zonas relativamente homogéneas desde el punto de vista edáfico.

A partir de esta información, los puntos de suelo deben distribuirse de manera que representen adecuadamente los gradientes topográficos y las distintas unidades funcionales dentro de cada subcuenca, incluyendo zonas altas, medias y bajas, así como áreas de acumulación donde el fósforo pueda concentrarse por transporte interno.

En el caso del agua, los puntos deben localizarse en las zonas en las que el flujo abandona la unidad de estudio o en tramos representativos del drenaje, preferiblemente rectilíneos y estables, evitando áreas con erosión lateral intensa o deposición excesiva de materiales que puedan alterar las mediciones. En sistemas con drenaje artificial, debe prestarse atención especial a la localización de valas, canales, compuertas y bombeos.

En sistemas ganaderos, la localización de los puntos debe reflejar también el patrón de ocupación del espacio por los animales. Es importante incluir tanto zonas de alta presión, próximas a edificios, puntos de agua, zonas de sombra o de alimentación, como áreas menos frecuentadas que puedan servir de referencia comparativa.

La experiencia de los pilotos confirma que una correcta ubicación estratégica de los puntos resulta más determinante para la calidad del sistema que un incremento indiscriminado del número de muestras.

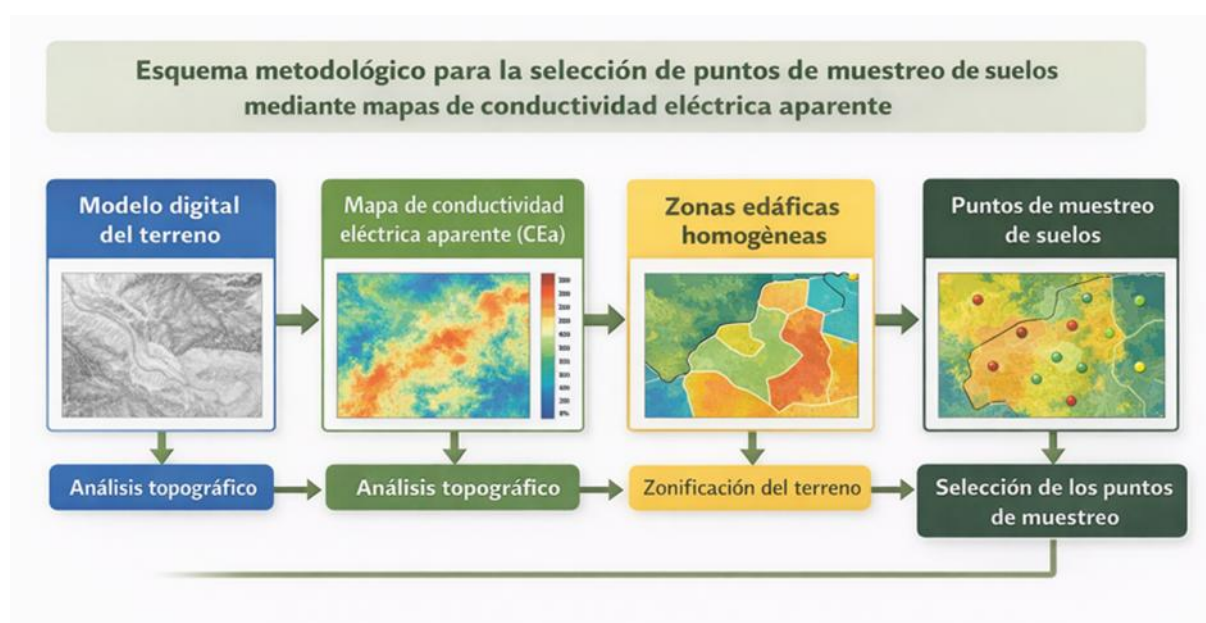


Figura 2 – Esquema metodológico para la selección de los puntos de muestreo

3.2.3 Relación con los usos del suelo

La red de muestreo debe diseñarse teniendo en cuenta los usos del suelo presentes en la cuenca o subcuenca y la diferenciación funcional generada por el manejo. En sistemas agrícolas, esto implica representar distintas estrategias de fertilización, laboreo, cubiertas vegetales o rotaciones. En sistemas ganaderos, deben considerarse la intensidad del pastoreo, la distribución del ganado, las áreas de acumulación de deyecciones y la existencia de zonas de exclusión o manejo diferenciado.

Siempre que sea posible, resulta recomendable incluir puntos en áreas de menor intensidad de uso o con función de referencia, como pastos permanentes, zonas forestales o áreas con baja intervención, con el fin de contar con un valor de base frente al que comparar la respuesta de las zonas sometidas a mayor presión.

La integración entre usos del suelo, topografía, hidrología y propiedades edáficas permite interpretar con mayor precisión los mecanismos que controlan la acumulación, movilización y transporte del fósforo dentro del sistema monitorizado.

4. Monitorización del fósforo

La monitorización del fósforo en sistemas agroganaderos debe abordarse de forma integrada, considerando los distintos compartimentos en los que el nutriente se almacena, se transforma y se moviliza. En este sentido, el seguimiento debe incluir el análisis del fósforo presente en el suelo, su posible movilización a través de sedimentos y su transporte mediante el agua de escorrentía o drenaje.

La combinación de estos tres niveles de monitorización permite comprender los procesos que determinan la pérdida de fósforo desde los sistemas productivos hacia el medio acuático, así como evaluar el efecto de las prácticas de manejo aplicadas en el territorio. Esta visión integrada resulta especialmente importante porque la pérdida de fósforo no depende de un único factor, sino de la interacción entre disponibilidad en el suelo, capacidad de movilización, conectividad hidrológica y condiciones climáticas.

4.1 Monitorización en suelo

4.1.1 Parámetros clave

El análisis del suelo constituye la base para comprender la dinámica del fósforo dentro del sistema productivo, ya que el suelo actúa como reservorio principal del nutriente. Los parámetros a monitorizar deben permitir caracterizar tanto la disponibilidad inmediata del fósforo como la capacidad del suelo para retenerlo o liberarlo a medio y largo plazo.

Como variables mínimas recomendadas, deben incluirse el **fósforo disponible**, preferiblemente mediante métodos normalizados como Olsen en suelos neutros o alcalinos y Bray en suelos ácidos, y el **fósforo total**, que permite estimar la acumulación global de fósforo derivada de fertilización mineral, aportes orgánicos o deyecciones directas. La combinación de ambos parámetros resulta especialmente útil para diferenciar entre la fracción potencialmente movilizable a corto plazo y el stock acumulado que puede representar un riesgo difuso a más largo plazo.

Estas determinaciones deben completarse con una caracterización físico-química del suelo, que incluya, como mínimo, **textura y granulometría**, **pH**, **materia orgánica**, **carbonatos** en suelos calizos y, cuando sea posible, **conductividad eléctrica** y **capacidad de adsorción o saturación de fósforo**. En determinados contextos puede resultar útil complementar con otros nutrientes principales para contextualizar la fertilidad global del sistema. En sistemas extensivos, como la dehesa, parámetros como

el pH y la materia orgánica son especialmente relevantes para interpretar la respuesta del suelo frente a distintos manejos ganaderos.

4.1.2 Frecuencia recomendada

La frecuencia de monitorización del suelo debe adaptarse al tipo de sistema productivo y a la dinámica esperable de los procesos edáficos.

En sistemas agrícolas, se recomienda una **caracterización inicial de referencia** al comienzo del ciclo o antes de implantar cambios de manejo, seguida de **muestreos intermedios en momentos clave**, como fases posteriores a la fertilización, desarrollo vegetativo o periodos de mayor riesgo de movilización, y un **muestreo final** tras la campaña o al inicio del periodo lluvioso, con el fin de evaluar el fósforo residual expuesto al transporte. En términos generales, al menos dos campañas al año suelen ser recomendables en sistemas con fertilización o manejo intensivo del suelo.

En sistemas ganaderos, especialmente cuando existe ocupación por lotes sucesivos de animales, el protocolo ideal debe permitir seguir la evolución del fósforo **antes, durante y después del periodo de ocupación**, de forma que pueda estimarse el impacto directo de la presencia animal sobre los niveles de fósforo del suelo. En sistemas más extensivos y de dinámica lenta, como la dehesa, puede ser suficiente mantener una **frecuencia mínima anual**, complementada con muestreos adicionales cuando se produzcan cambios significativos en el manejo o condiciones climáticas excepcionales.

4.1.3 Relación con el manejo

Los resultados de suelo deben interpretarse siempre a la luz de las prácticas de manejo aplicadas. Esto exige disponer de un registro detallado de fertilización mineral y orgánica, aplicación de enmiendas, cubiertas vegetales, labores del suelo, carga ganadera, duración del pastoreo, rotación de parcelas o usos intermedios del terreno.

En sistemas agrícolas, esta interpretación permite ajustar el **balance de nutrientes**, revisar dosis y momentos de aplicación, decidir si conviene incorporar el fertilizante al suelo o mantenerlo en superficie y evaluar el efecto de medidas como la aplicación de biochar o el mantenimiento de cubiertas vegetales. En parcelas con pendiente, por ejemplo, la incorporación del fertilizante o la presencia de cobertura puede resultar crítica para reducir el arrastre por las primeras lluvias. En sistemas ganaderos, el vínculo entre analíticas y manejo permite relacionar la evolución del fósforo con la carga animal, la duración de ocupación, la rotación entre parcelas y la distribución espacial de las deyecciones.

4.2 Monitorización de sedimentos

4.2.1 Cuándo es relevante

La monitorización de sedimentos resulta especialmente relevante en aquellos sistemas donde el transporte de fósforo está dominado por la erosión y el arrastre de partículas. Esto ocurre con mayor intensidad en parcelas con pendiente moderada o elevada, suelos con baja estabilidad estructural, ausencia de cobertura vegetal, episodios de lluvia

intensa o presencia de canales de drenaje donde se concentran y depositan materiales finos.

También es particularmente útil cuando se pretende evaluar la eficacia de prácticas de conservación del suelo, como cubiertas, siembra directa, bandas vegetadas o cambios en el manejo de la escorrentía. En sistemas extensivos como la dehesa, aunque los eventos sean más puntuales, los episodios de lluvia intensa pueden tener una contribución relevante al transporte de fósforo, por lo que la monitorización de sedimentos debe plantearse de forma selectiva en los momentos de mayor interés.

4.2.2 Información que aporta

El análisis de sedimentos permite identificar la **fracción particulada del fósforo** y evaluar el papel de la erosión como mecanismo de pérdida de nutrientes. Aporta información sobre la intensidad de los procesos erosivos, la granulometría del material transportado y la composición del fósforo asociado a las diferentes fracciones.

En sistemas avanzados de seguimiento, puede resultar de interés analizar no solo el fósforo total en sedimentos, sino también otras variables como la **textura del sedimento**, la **materia orgánica**, el **contenido hídrico**, el **potencial redox** o la **conductividad de la fase intersticial**, especialmente en medios donde el fósforo retenido pueda liberarse posteriormente a la columna de agua. En este sentido, los sedimentos actúan no solo como vector de transporte, sino también como un “archivo” de acumulación de fósforo a medio y largo plazo.

4.2.3 Recomendaciones prácticas

El muestreo de sedimentos debe planificarse con especial atención a la hidrología del sistema y a las condiciones de accesibilidad. Como criterio general, se recomienda seleccionar **puntos de convergencia del flujo**, líneas naturales de drenaje o salidas de subcuenca, donde el material transportado se integre de forma representativa. Cuando se tomen muestras de sólidos en suspensión en el agua, conviene priorizar la **fase ascendente del hidrograma**, ya que es en ese momento cuando suele producirse la mayor movilización de partículas.

En sistemas con alta carga orgánica o presencia de ganado, debe distinguirse entre sedimentos de origen mineral y materiales orgánicos o efluentes. En campañas sobre explotaciones ganaderas o avícolas, además, deben respetarse siempre las medidas de biosanidad y acceso establecidas por la explotación. Dada la logística asociada a este tipo de muestreo, suele ser más eficaz priorizar la representatividad y calidad de las muestras que aumentar indiscriminadamente su número.

4.3 Monitorización en agua

4.3.1 Incluye muestreo clásico y/o monitorización remota

La monitorización del agua puede realizarse mediante **muestreo puntual o clásico** y mediante **monitorización continua o remota**, siendo ambos enfoques complementarios.

El muestreo clásico consiste en la recogida manual de muestras de agua para su análisis posterior en laboratorio. Este método permite analizar con precisión parámetros complejos, incluidas distintas formas de fósforo, y sigue siendo imprescindible para la calibración de los sistemas automáticos y para las determinaciones de referencia.

La monitorización continua o remota se basa en la instalación de sensores o sistemas de imagen en puntos de control que permiten registrar, con alta frecuencia temporal, variables como nivel, caudal, turbidez, conductividad o sólidos en suspensión, e incluso estimar la dinámica del fósforo a partir de relaciones calibradas. En el proyecto se ha utilizado este enfoque mediante sistemas automáticos, incluyendo cámaras y plataformas de transmisión de datos.

En relación con el muestreo manual, la experiencia de La Rioja pone de manifiesto una cuestión importante: **el muestreo manual sin dispositivos de recogida de escorrentía no es el sistema más adecuado cuando se pretende capturar episodios rápidos de escorrentía superficial**. En estos casos, resulta recomendable instalar dispositivos específicos de recogida, como pequeños depósitos o captadores situados en canales de escorrentía, diseñados para recoger exclusivamente el agua que circula durante el evento, minimizando el desfase entre precipitación y muestreo.

4.3.2 Ventajas y limitaciones de cada enfoque

El **muestreo clásico** presenta como principales ventajas su robustez, su flexibilidad analítica y la posibilidad de obtener resultados de laboratorio con alta precisión. Además, es el método de referencia para muchos parámetros utilizados en contextos regulatorios. Como limitaciones, ofrece una resolución temporal baja y puede perder eventos de transferencia muy breves, especialmente durante tormentas o episodios de escorrentía rápida. Requiere además una elevada movilización humana precisamente en los momentos más críticos.

La **monitorización remota o continua** permite capturar eventos de corta duración, seguir la evolución temporal del sistema y disponer de alertas o información casi en tiempo real. Entre sus ventajas destaca la adquisición continua de datos y la posibilidad de documentar visualmente el comportamiento hidrológico del punto de control. Como limitaciones, exige calibración previa, mantenimiento recurrente, suministro energético, verificación operativa frecuente y un coste superior de instalación y explotación. También puede verse afectada por condiciones meteorológicas adversas, deposición de residuos, problemas de comunicación o limitaciones de transmisión de datos.

4.3.3 Condiciones óptimas de uso

Las condiciones óptimas para la monitorización del agua dependen del régimen hidrológico del sistema y del objetivo del seguimiento.

En muestreo puntual, la captación debe planificarse antes, durante y después de los episodios de lluvia, especialmente cuando se espere escorrentía suficiente para movilizar fósforo y sedimentos. En sistemas como la dehesa, donde la escorrentía es

estacional y los caudales continuos son escasos, la flexibilidad operativa y la capacidad de reacción rápida son factores decisivos para aprovechar las ventanas de muestreo.

En monitorización continua, es imprescindible seleccionar puntos que mantengan presencia de agua suficiente durante el periodo de seguimiento o, al menos, en las fases hidrológicamente activas. También deben elegirse tramos estables, con buen acceso y condiciones adecuadas para la instalación y mantenimiento del equipo. La planificación debe anticipar una fase suficiente de calibración antes de los periodos críticos.

4.3.4 Aspectos críticos detectados

La experiencia acumulada en los pilotos ha permitido identificar varios aspectos críticos. En primer lugar, la necesidad de establecer **curvas de calibración específicas para cada localización**, dado que la relación entre turbidez, sólidos en suspensión y fósforo puede variar notablemente entre sistemas. En segundo lugar, la dependencia de las condiciones meteorológicas e hidrológicas, que puede dificultar tanto la recogida de imágenes como la captación de muestras representativas. En tercer lugar, la necesidad de garantizar el funcionamiento continuo de la transmisión de datos, el suministro energético y el mantenimiento preventivo de los equipos.

A ello se suma, en el caso del muestreo puntual, la dificultad de sincronizar la toma de muestra con el evento real de escorrentía. Este desfase puede alterar de forma importante la concentración de sólidos en suspensión y, por tanto, la interpretación del fósforo particulado transportado. Por ese motivo, cuando no sea posible implantar monitorización continua, conviene al menos disponer de sistemas pasivos o semiautomáticos de recogida que reduzcan la dependencia de la presencia física en campo.

5. Integración de datos y análisis del riesgo

El análisis del riesgo de movilización de fósforo requiere integrar información procedente de distintas fuentes y escalas, combinando datos edáficos, hidrológicos, climáticos y de manejo. Esta integración permite pasar de una monitorización descriptiva a una **interpretación funcional del sistema**, orientada a identificar situaciones de riesgo y apoyar la toma de decisiones.

Ninguna de las variables consideradas de forma aislada permite explicar el comportamiento del fósforo. Es la interacción entre ellas la que determina si el nutriente permanece en el sistema o es movilizado hacia el medio acuático.

5.1 Tipología de datos considerados

La evaluación del riesgo debe basarse en un conjunto de datos estructurado que permita caracterizar tanto el estado del sistema como los procesos que controlan la movilización del fósforo.

Phos4Cycle

En primer lugar, se consideran **datos edáficos**, que incluyen el fósforo disponible y total, así como las propiedades físico-químicas del suelo (textura, pH, materia orgánica, carbonatos, etc.), que determinan la capacidad de retención y liberación del nutriente.

En segundo lugar, se integran **datos hidrológicos**, especialmente aquellos relacionados con la generación de escorrentía y el transporte de sedimentos, como la presencia de flujo superficial, los sólidos en suspensión, la turbidez, el nivel o caudal del agua y, cuando es posible, la concentración de fósforo en agua.

A estos se suman los **datos climáticos**, fundamentalmente precipitación, intensidad de lluvia, temperatura y ocurrencia de eventos extremos, que actúan como principal motor de los procesos de movilización.

Finalmente, se incorporan **datos de manejo agronómico y ganadero**, que resultan determinantes para interpretar el origen del fósforo y su distribución en el sistema. Estos incluyen fertilización mineral y orgánica, manejo del suelo, presencia de cubiertas, rotaciones, así como, en sistemas ganaderos, carga animal, duración del pastoreo, distribución espacial de las deyecciones o, en sistemas intensivos, características de la alimentación y gestión de estiércoles.

En sistemas específicos, como la producción avícola, pueden incorporarse además datos complementarios como consumos, composición del alimento, producción de deyecciones o balances de masa, que permiten estimar con mayor precisión los flujos de fósforo dentro del sistema.

5.2 Variables determinantes del riesgo

El riesgo de movilización de fósforo no depende únicamente de su concentración, sino de la combinación de factores que favorecen su transporte fuera del sistema.

De forma general, este riesgo puede interpretarse a partir de tres componentes principales:

- **Fuente de fósforo**, asociada a la cantidad de fósforo disponible en el suelo o aportado recientemente, ya sea mediante fertilización, enmiendas orgánicas o deyecciones animales.
- **Capacidad de movilización**, determinada por las características del suelo y del terreno, como la pendiente, la estabilidad estructural, la cobertura vegetal o la susceptibilidad a la erosión.
- **Conectividad hidrológica**, es decir, la facilidad con la que el fósforo movilizado puede alcanzar un punto de drenaje o una masa de agua, en función de la red de escorrentía, la presencia de canales o la distancia al punto de salida.

En sistemas ganaderos, especialmente en aquellos con acceso a parcelas exteriores, adquiere relevancia la **distribución espacial de las deyecciones**. La fracción de fósforo depositada en zonas directamente expuestas al agua de escorrentía constituye el principal vector de riesgo, frente a aquella fracción que permanece controlada en instalaciones o almacenamientos.

Asimismo, en sistemas intensivos, la **calidad de la alimentación** y la digestibilidad del fósforo condicionan directamente la cantidad de fósforo excretado, lo que introduce un factor adicional de control del riesgo desde el origen.

Estos tres componentes permiten estructurar el riesgo de forma operativa, facilitando su interpretación en términos de probabilidad de movilización y priorización de medidas de gestión.

5.3 Relación manejo-clima-respuesta

El análisis del riesgo debe centrarse en la interacción entre las prácticas de manejo y las condiciones climáticas, ya que es esta combinación la que determina la respuesta del sistema.

Los episodios de mayor riesgo suelen producirse cuando coinciden:

- **altos niveles de fósforo disponible en superficie** (tras fertilización, aplicación de estiércoles o acumulación de deyecciones),
- **con eventos de precipitación intensos o concentrados**,
- especialmente cuando el suelo presenta condiciones favorables al escurrimiento (saturación, baja cobertura, compactación).

Ejemplos típicos incluyen las primeras lluvias tras periodos secos, donde se produce un efecto de “lavado” del fósforo acumulado en superficie, o precipitaciones intensas tras periodos de pastoreo concentrado o aplicación reciente de fertilizantes.

Por el contrario, determinadas prácticas de manejo pueden reducir significativamente este riesgo, como la presencia de cubiertas vegetales, la incorporación del fertilizante al suelo, la reducción de la carga ganadera en periodos críticos o la adaptación del calendario de manejo a las condiciones meteorológicas.

En sistemas con mayor capacidad de control operativo, como explotaciones con manejo en estabulación parcial, la gestión de la presencia de animales en función de las condiciones climáticas puede actuar como una herramienta directa de mitigación del riesgo.

5.4 Importancia de la dimensión temporal

La dimensión temporal es un elemento clave en la interpretación del riesgo de contaminación por fósforo.

Por un lado, los procesos edáficos presentan una **dinámica lenta**, donde la acumulación o reducción del fósforo en el suelo se produce de forma progresiva a lo largo de campañas o años. Esto implica que los efectos de las prácticas de manejo no siempre son inmediatos y requieren seguimiento a medio y largo plazo.

Por otro lado, los procesos de movilización y transporte del fósforo están asociados a **eventos puntuales**, principalmente episodios de lluvia, que pueden generar picos de exportación de nutrientes en periodos muy cortos de tiempo.

Esta dualidad hace necesario combinar:

- un enfoque de **seguimiento continuo o a largo plazo**, que permita detectar tendencias y acumulaciones,
- con un enfoque de **análisis por eventos**, orientado a identificar los momentos de mayor riesgo y cuantificar su impacto.

En este contexto, la monitorización a lo largo de varios ciclos productivos o años resulta fundamental para diferenciar entre efectos estructurales del sistema y variabilidad interanual asociada al clima.

Además, la comparación entre periodos (riego vs. invierno, seco vs. húmedo) permite comprender mejor los mecanismos dominantes de transporte y ajustar las estrategias de manejo en función del calendario de riesgo.

6. Uso de los resultados para la toma de decisiones

6.1. Aplicación práctica y modelo de apoyo a la decisión

Los resultados obtenidos en los distintos pilotos han permitido desarrollar un modelo integrado de interpretación de la dinámica del fósforo en sistemas agroganaderos, basado en la combinación de variables edáficas, hidrológicas, climáticas y de manejo. Este modelo permite identificar las condiciones bajo las cuales el fósforo pasa de estar retenido en el sistema a ser movilizado hacia el medio acuático, estableciendo relaciones causa–efecto entre prácticas de gestión y respuesta del sistema.

El modelo desarrollado constituye la base de un sistema de apoyo a la decisión que será implementado en una herramienta digital accesible a través de una plataforma web. Esta herramienta permitirá introducir información básica del sistema (caracterización del suelo, uso del suelo, manejo aplicado, condiciones climáticas, etc.) y obtener una evaluación del riesgo de movilización del fósforo, junto con orientaciones técnicas para su mitigación.

Desde un punto de vista operativo, el modelo permite:

- evaluar el estado inicial del sistema en términos de disponibilidad y acumulación de fósforo,
- identificar situaciones de riesgo asociadas a eventos de precipitación o manejo,
- anticipar episodios de movilización en función de la interacción suelo–clima–manejo,
- priorizar zonas dentro de la parcela o subcuenca donde actuar,
- validar el efecto de cambios en el manejo mediante el seguimiento temporal.

De este modo, se pasa de una monitorización descriptiva a un enfoque predictivo y operativo, en el que los datos generados en campo se transforman en información útil para la toma de decisiones.

6.2. Aplicación en la gestión y en otros ámbitos

El sistema desarrollado permite su aplicación directa en la gestión agroganadera, facilitando la toma de decisiones a nivel de explotación en base a criterios objetivos.

En sistemas agrícolas, el modelo permite optimizar la fertilización ajustando las dosis a la capacidad real del suelo y evitando aplicaciones en momentos de alto riesgo, así como orientar la implantación de prácticas de conservación del suelo en zonas críticas de escorrentía.

En sistemas ganaderos, facilita la gestión de la carga y distribución del ganado, la planificación de los periodos de ocupación y descanso, y la identificación de zonas sensibles a la acumulación de deyecciones.

En sistemas intensivos, el modelo permite actuar en origen mediante la mejora de la eficiencia de la alimentación, reduciendo la excreción de fósforo y su potencial movilización posterior.

Más allá de la explotación, el modelo presenta un alto potencial de aplicación en distintos ámbitos:

- **Asesoramiento técnico**, permitiendo desarrollar recomendaciones específicas basadas en datos reales del sistema.
- **Planificación territorial**, mediante la identificación de subcuencas o zonas con mayor riesgo de exportación de fósforo.
- **Gestión de infraestructuras hidráulicas**, en sistemas de regadío o drenaje, donde el control del flujo influye en el transporte de sedimentos.
- **Industria agroalimentaria**, orientando el desarrollo de estrategias de reducción de impactos en origen.
- **Sistemas de digitalización agraria**, integrándose en plataformas de gestión o herramientas de agricultura de precisión.

6.3. Contribución a la estrategia del proyecto

La presente guía actúa como un elemento de conexión entre los resultados experimentales obtenidos en los pilotos y la estrategia global del proyecto, permitiendo traducir la evidencia técnica en criterios operativos aplicables a distintos territorios.

Uno de los principales aportes es la definición de un marco metodológico común que facilita la homogeneización de la monitorización del fósforo en el espacio SUDOE, permitiendo trabajar con una base técnica compartida entre regiones con sistemas productivos diversos.

La guía contribuye a:

- estructurar el conocimiento generado en los pilotos,
- establecer criterios comparables entre territorios,
- identificar prácticas de manejo prioritarias en función del riesgo,
- servir de base para el desarrollo de herramientas de apoyo a la decisión.

Este enfoque permite avanzar hacia una gestión del fósforo basada en la integración de datos y en la comprensión funcional del sistema, superando aproximaciones parciales centradas únicamente en el suelo o en el agua.

6.4. Valor para políticas públicas

Los resultados obtenidos aportan evidencia técnica directamente utilizable en el diseño, implementación y evaluación de políticas públicas relacionadas con la gestión de nutrientes, la protección del agua y la sostenibilidad de los sistemas agrarios.

A diferencia de enfoques tradicionales centrados principalmente en el nitrógeno, la metodología desarrollada permite integrar de forma operativa la dinámica del fósforo en la toma de decisiones, aportando información clave sobre los procesos de movilización, transporte y acumulación del nutriente a escala de cuenca.

En el contexto del espacio SUDOE, esta aportación resulta especialmente relevante para el desarrollo y mejora de marcos normativos y estratégicos existentes:

- ❖ **España**, donde la metodología puede complementar la aplicación del Real Decreto 47/2022 y reforzar la gestión en **zonas vulnerables**, incorporando el fósforo como elemento clave en la contaminación difusa. Asimismo, aporta herramientas objetivas para el diseño y seguimiento de **ecorregímenes de la PAC**, especialmente aquellos relacionados con cubiertas vegetales, manejo del suelo o fertilización sostenible.
- ❖ **Francia**, donde el enfoque contribuye a reforzar programas como los Programmes d'Actions Nitrates y las estrategias de gestión de cuencas (SDAGE), aportando criterios técnicos para integrar el fósforo en la evaluación del riesgo de eutrofización y en la planificación territorial a escala de bassin versant.
- ❖ **Portugal**, donde la metodología puede integrarse en instrumentos como el Plano de Ação para as Zonas Vulneráveis y en la gestión de recursos hídricos en regiones como el Baixo Mondego o Baixo Vouga, mejorando la capacidad de diagnóstico y priorización de medidas en sistemas agrícolas intensivos y de regadío.

A nivel europeo, los resultados contribuyen de forma directa a objetivos estratégicos definidos en:

- la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE), al mejorar la caracterización de presiones difusas,
- la Directiva de Nitratos (91/676/CEE), ampliando su enfoque hacia el fósforo,
- la Estrategia del Suelo para 2030, mediante indicadores operativos de pérdida de nutrientes,
- la estrategia Farm to Fork, en relación con la reducción de pérdidas de nutrientes.
- La Directiva 2025/2360 del Parlamento Europeo y el Consejero, de 12 de noviembre de 2025 relativa a la vigilancia y la resiliencia del suelo

Además, la disponibilidad de datos comparables y metodologías armonizadas permite:

- mejorar la coherencia entre territorios,

Phos4Cycle

- reducir la incertidumbre en la evaluación de medidas,
- facilitar el seguimiento de políticas públicas con base empírica.

En este sentido, el valor principal del sistema no reside únicamente en la generación de datos, sino en su capacidad para **convertir la monitorización en un instrumento de apoyo real a la gobernanza ambiental**.

6.5. Potencial de transferencia y capitalización

El sistema desarrollado presenta un elevado potencial de transferencia, al estar basado en principios metodológicos replicables y en una estructura de monitorización adaptable a distintos sistemas productivos y contextos territoriales.

La guía actúa como elemento clave de esta transferencia, al traducir la experiencia de los pilotos en un marco operativo que permite su aplicación directa por parte de técnicos, administraciones y entidades del sector.

En particular, el sistema facilita:

- el diseño estructurado de redes de monitorización a escala de cuenca,
- la aplicación de protocolos armonizados de muestreo y análisis,
- la interpretación integrada de datos suelo-agua-sedimentos,
- la identificación operativa de zonas de riesgo (hotspots) de pérdida de fósforo.

Uno de los principales elementos de valor añadido es la integración del modelo conceptual en una herramienta digital, que permite:

- procesar datos de entrada (suelo, clima, manejo),
- generar indicadores de riesgo de forma automatizada,
- apoyar la toma de decisiones sin necesidad de reproducir el esfuerzo experimental completo.

Este enfoque transforma los resultados de los pilotos en una **solución operativa, escalable y replicable**, facilitando:

- su aplicación en nuevos territorios,
- su integración en servicios de asesoramiento agronómico,
- su uso por parte de administraciones públicas en procesos de planificación y evaluación.

A escala del espacio SUDOE, esta capacidad de transferencia contribuye directamente a la capitalización del conocimiento generado, permitiendo construir una base común para la gestión del fósforo en sistemas agroganaderos y favoreciendo la coherencia entre políticas, territorios y actores.

7. Recomendaciones técnicas para replicabilidad

Este apartado recoge las condiciones técnicas, operativas y organizativas necesarias para reproducir el sistema de monitorización desarrollado, garantizando la obtención de datos representativos y comparables en distintos contextos agroganaderos.

7.1. Requisitos mínimos

La replicabilidad del sistema de monitorización requiere asegurar una serie de condiciones básicas que permitan mantener la coherencia metodológica y la calidad de los datos obtenidos.

En primer lugar, resulta imprescindible disponer de una delimitación hidrológica clara del área de estudio, basada en el análisis de modelos digitales del terreno y validada en campo. La identificación de subcuencas funcionales y de un punto de salida bien definido, donde converja exclusivamente el flujo procedente del área analizada, es un requisito fundamental para interpretar correctamente los procesos de transporte de fósforo.

Asimismo, es necesario establecer una red de muestreo representativa que integre los distintos compartimentos del sistema (suelo, sedimentos y agua). Esto implica definir un número suficiente de puntos de muestreo por subcuenca, distribuidos en función del gradiente topográfico, la variabilidad edáfica y los usos del suelo, así como incluir puntos estratégicos en zonas de convergencia de escorrentía.

Desde el punto de vista analítico, se requiere disponer de una caracterización inicial del sistema, incluyendo parámetros edáficos clave (fósforo disponible, fósforo total, pH, materia orgánica, textura), que actúe como referencia para la interpretación de la evolución temporal. Del mismo modo, es imprescindible contar con acceso a laboratorios capaces de realizar análisis normalizados tanto en suelo como en agua.

Otro requisito fundamental es la disponibilidad de información detallada sobre el manejo agronómico o ganadero, incluyendo fertilización, rotaciones, carga ganadera o distribución del pastoreo. Sin este registro, la interpretación de los datos pierde gran parte de su valor explicativo.

Finalmente, la implementación del sistema requiere garantizar el acceso regular a la parcela y a los puntos de muestreo, así como disponer de capacidad técnica para realizar campañas de muestreo en condiciones variables de campo. En sistemas específicos, como los ganaderos intensivos, deben considerarse además las restricciones de acceso derivadas de protocolos de bioseguridad.

7.2. Factores críticos de éxito

La experiencia acumulada en los distintos pilotos ha permitido identificar una serie de factores clave que condicionan el éxito del sistema de monitorización más allá de los requisitos técnicos mínimos.

Uno de los aspectos más relevantes es el conocimiento práctico del territorio, que permite interpretar correctamente los flujos de escorrentía, validar la delimitación hidrológica y ajustar la ubicación de los puntos de muestreo a la realidad funcional del sistema. Este conocimiento debe combinarse con herramientas SIG y análisis técnico para garantizar un diseño robusto.

La implicación del agricultor o ganadero constituye otro factor determinante, ya que facilita el acceso a la información de manejo y a la parcela, y permite una mejor interpretación de los resultados. La coordinación entre el equipo técnico y el gestor de la explotación resulta clave para asegurar la continuidad del seguimiento.

Desde el punto de vista operativo, la planificación flexible del muestreo es esencial. La capacidad de adaptar el calendario a eventos climáticos, especialmente precipitaciones, determina en gran medida la posibilidad de captar episodios representativos de movilización de fósforo.

En sistemas con monitorización continua, la correcta calibración de los equipos y el mantenimiento regular de los sensores son elementos críticos para garantizar la fiabilidad de los datos. La acumulación de sedimentos, materia orgánica o fallos en la transmisión pueden introducir errores si no se gestionan adecuadamente.

Asimismo, la existencia de una red de colaboración (laboratorios, técnicos, asesores, entidades locales) facilita tanto la ejecución del muestreo como la interpretación y valorización de los resultados.

Por último, la integración de un enfoque multidisciplinar, combinando conocimientos en edafología, agronomía, hidrología y producción animal, resulta fundamental para interpretar de forma rigurosa la dinámica del fósforo.

7.3. Riesgos y limitaciones

La replicación del sistema de monitorización debe considerar una serie de riesgos y limitaciones que pueden afectar tanto a la calidad de los datos como a la continuidad del seguimiento.

Los factores climáticos constituyen el principal elemento de incertidumbre. Episodios de precipitaciones intensas pueden dificultar el acceso a los puntos de muestreo o incluso impedir la toma de muestras, mientras que periodos de sequía limitan la generación de escorrentía y la obtención de datos hidrológicos. Además, los eventos extremos pueden dañar equipos o alterar las condiciones de medida.

Otro aspecto relevante es la variabilidad entre sitios. Las diferencias en suelo, topografía, clima o manejo implican que los resultados no son directamente extrapolables, siendo necesario adaptar el diseño del sistema a las condiciones específicas de cada ubicación.

Desde el punto de vista operativo, existen riesgos asociados a la disponibilidad de recursos humanos y económicos. La monitorización requiere continuidad en el tiempo, capacidad de respuesta ante eventos puntuales y mantenimiento periódico de los equipos, aspectos que pueden verse limitados si no se planifican adecuadamente.

Phos4Cycle

En sistemas con instrumentación en campo, deben considerarse riesgos adicionales como daños físicos, vandalismo, acumulación de sedimentos en sensores, fallos de batería o interrupciones en la transmisión de datos, que pueden generar lagunas en las series temporales, especialmente en momentos críticos.

Asimismo, en determinados contextos productivos, como la ganadería intensiva, las restricciones de acceso derivadas de protocolos sanitarios (por ejemplo, en situaciones de riesgo de enfermedades como la gripe aviar) pueden limitar o interrumpir temporalmente el seguimiento.

Finalmente, debe considerarse que los procesos asociados a la dinámica del fósforo presentan una componente temporal relevante. Los cambios en el suelo son progresivos y pueden no ser detectables a corto plazo, lo que refuerza la necesidad de plantear sistemas de monitorización a medio y largo plazo para obtener resultados robustos.