

(E2.4.1.) INFORME DE PILOTOS

Interreg
Sudoe



Co-funded by
the European Union

Phos4Cycle

0. Introducción

0.1. Objetivo del documento E2.4.1.

El objetivo del presente entregable (E2.4.1) es recopilar, sistematizar y presentar de forma estructurada los resultados técnicos derivados del pilotaje de monitorización de fosfatos desarrollado en el marco del Grupo de Trabajo 2 (GT2) del proyecto Phos4Cycle. El documento recoge la descripción de los pilotos implementados en los distintos sistemas agroganaderos representativos del espacio SUDOE, así como el diseño y la metodología aplicada en cada uno de ellos, con el fin de garantizar la coherencia y comparabilidad de la información generada.

El informe integra la información técnica obtenida durante la ejecución de los pilotos en diferentes formatos, incluyendo cartografía asociada a la delimitación de las subcuencas de estudio, la tipología de los suelos y la localización de los puntos de muestreo de suelo, sedimentos y agua. Asimismo, incorpora series temporales relativas al contenido inicial y a la evolución de las principales formas de fósforo en el suelo, a la evolución de variables climáticas relevantes y a la concentración de fósforo y sólidos en suspensión en el medio acuático.

Adicionalmente, el documento incluye representaciones gráficas y análisis que permiten explorar la relación entre la concentración de fósforo en el agua y la presencia de sólidos en suspensión, así como la interacción entre las variables edáficas, climáticas y de manejo observadas durante el periodo de pilotaje. En su conjunto, la información presentada constituye una base técnica sólida para la comprensión de la dinámica del fósforo en los sistemas agroganaderos analizados y para su posterior utilización en el desarrollo del modelo de análisis del riesgo y de la guía de monitorización del proyecto.

0.2. Qué es el pilotaje en Phos4Cycle

El pilotaje desarrollado en el marco del proyecto Phos4Cycle constituyó el núcleo técnico-experimental del Grupo de Trabajo 2 (GT2) y tuvo como finalidad validar, en condiciones reales y representativas del espacio SUDOE, un sistema integrado de monitorización del fósforo asociado a las actividades agroganaderas. Los pilotos se diseñaron a escala de cuenca hidrográfica y se implementaron en distintos sistemas productivos, con el objetivo de capturar la variabilidad edafoclimática, de manejo y de presión antrópica existente en los territorios de estudio.

A través del pilotaje, Phos4Cycle generó información técnica basada en datos reales sobre la dinámica del fósforo en el suelo, los sedimentos y el agua, así como sobre su relación con las prácticas de manejo agrícola y ganadero y las condiciones climáticas. Esta información constituyó la base para el desarrollo del modelo de análisis del riesgo de contaminación por fosfatos y para la elaboración de la guía de monitorización del

proyecto, contribuyendo a mejorar el conocimiento y la gestión sostenible del fósforo a escala de cuenca.

1. Contexto territorial y productivo

El conjunto de pilotos desarrollados en el marco del proyecto se distribuye en distintos territorios del espacio SUDOE, abarcando una amplia diversidad de condiciones edafoclimáticas, sistemas productivos y configuraciones hidrológicas. Esta diversidad constituye un elemento clave del enfoque metodológico, ya que permite analizar la dinámica del fósforo en contextos representativos de los principales sistemas agroganaderos del suroeste europeo.

Los pilotos se han implementado en sistemas productivos contrastados, incluyendo agricultura extensiva cerealista, sistemas leñosos (viñedo y olivar), sistemas agroforestales de dehesa y sistemas ganaderos intensivos y semi-intensivos asociados a la producción forrajera y la explotación avícola. Asimismo, se han considerado tanto sistemas de secano como de regadío, así como escenarios con drenaje natural y sistemas con drenaje artificial, lo que permite capturar una amplia variabilidad en los procesos de movilización y transporte de nutrientes.

Desde el punto de vista territorial, los pilotos se localizan en cuencas hidrográficas pertenecientes a distintos sistemas fluviales del espacio SUDOE, caracterizadas por condiciones topográficas variables, que van desde llanuras aluviales con pendientes muy reducidas hasta sistemas con pendientes moderadas y presencia de procesos erosivos activos. Esta heterogeneidad influye directamente en los mecanismos de generación de escorrentía, en la conectividad hidrológica y en la capacidad de transporte de sedimentos.

El contexto edafoclimático abarca desde climas mediterráneos continentales con marcada estacionalidad y episodios de precipitación intensa, hasta climas oceánicos con precipitaciones más regulares a lo largo del año. Los suelos presentan también una elevada variabilidad, incluyendo desde suelos poco evolucionados y con baja disponibilidad de fósforo, hasta suelos agrícolas con mayor capacidad de retención y acumulación de este nutriente.

En este marco, la selección de los pilotos responde a la necesidad de analizar la dinámica del fósforo desde una perspectiva integrada, considerando la interacción entre el manejo agronómico, las características del suelo, la configuración hidrológica de las parcelas y las condiciones climáticas. Este enfoque permite generar conocimiento aplicable al conjunto del espacio SUDOE y sienta las bases para el desarrollo de modelos de análisis del riesgo de contaminación por fósforo y de estrategias de gestión adaptadas a diferentes contextos productivos.

1.1. Definición de pilotos

1.1.1. Piloto 1 – Sistema agrícola extensivo (Castilla y León, España)

España / Castilla y León / Cuenca hidrográfica del Duero

ITAGRA.CT



Figura 1. Piloto ITAGRA.CT. España. Palencia

Sistema productivo

El piloto se desarrolla en un sistema agrícola extensivo de carácter cerealista, basado en el cultivo de herbáceos anuales dentro de rotaciones representativas del centro-sur de la provincia de Palencia. El manejo agronómico responde a prácticas convencionales, incluyendo labores de preparación del suelo, siembra y fertilización mineral, con especial relevancia de la fertilización fosfatada en el establecimiento y desarrollo del cultivo.

Este tipo de sistema productivo condiciona de forma directa la dinámica del fósforo en el sistema suelo–planta–agua, especialmente en lo relativo a su acumulación en el suelo y a su movilización potencial asociada a procesos de escorrentía superficial y transporte de sedimentos.

Descripción del entorno

El piloto se localiza en un entorno agrícola continuo característico de campiña cerealista, con predominio de superficies cultivadas y ausencia de discontinuidades significativas en el uso del suelo. Esta homogeneidad espacial permite analizar de forma representativa los procesos de redistribución de fósforo a escala de parcela y subcuenca, minimizando la influencia de aportes externos.

La configuración del territorio favorece el análisis de la conectividad hidrológica interna del sistema, así como la identificación de zonas de generación, transporte y acumulación de escorrentía.

Características de la cuenca

La cuenca asociada al piloto presenta un uso del suelo homogéneo y netamente agrícola, con una configuración hidrológica funcionalmente cerrada, en la que los flujos de escorrentía se generan y concentran exclusivamente dentro de la propia parcela.

El relieve se caracteriza por pendientes suaves pero continuas, que estructuran el drenaje superficial mediante una red de líneas de flujo bien definidas. Estas vías preferentes canalizan la escorrentía hacia un eje de drenaje principal situado en la parte baja de la parcela, actuando como zonas clave para el transporte de sedimentos y fósforo particulado durante episodios de precipitación.

Desde el punto de vista edáfico, los suelos presentan texturas medias a franco-arcillosas, con presencia de carbonatos y una capacidad moderada-alta de retención de nutrientes. Estas características favorecen la adsorción del fósforo en las fracciones finas del suelo, condicionando que su movilización se produzca principalmente asociada al transporte de partículas durante procesos erosivos.

Contexto edafoclimático

El área de estudio se enmarca en un clima mediterráneo continentalizado, caracterizado por inviernos fríos, veranos secos y una marcada estacionalidad en las precipitaciones. Aunque la pluviometría anual es moderada, la concentración de precipitaciones en episodios de alta intensidad incrementa el riesgo de escorrentía superficial y movilización de fósforo.

Estas condiciones favorecen la ocurrencia de eventos puntuales de exportación de fósforo, especialmente cuando coinciden con momentos de baja cobertura vegetal o tras la aplicación de fertilización.

Importancia del sistema productivo

El sistema agrícola extensivo cerealista constituye uno de los principales modelos productivos del centro-sur de la provincia de Palencia y, en general, de amplias zonas de Castilla y León. Su elevada extensión territorial y homogeneidad de manejo lo convierten en un elemento clave en el balance regional de nutrientes.

Desde el punto de vista ambiental, pequeñas variaciones en las prácticas de fertilización y manejo del suelo pueden traducirse en impactos acumulativos significativos sobre la calidad del suelo y del agua a escala de cuenca.

Problemática asociada al fósforo

En este tipo de sistemas productivos, la dinámica del fósforo está condicionada por la aplicación de fertilización mineral y por las características edáficas del suelo. La elevada capacidad de retención favorece la acumulación de fósforo en el horizonte superficial,

mientras que su movilización se produce principalmente en forma de fósforo particulado asociado a procesos de erosión y escorrentía.

La combinación de fertilización, estructura del suelo y eventos de precipitación intensa genera un escenario en el que pueden producirse pérdidas difusas de fósforo hacia el medio hídrico. El piloto permite analizar estos procesos en condiciones reales, identificando los mecanismos de transporte y las zonas de mayor riesgo dentro de la cuenca.

1.1.2. Piloto 2 – Sistema leñoso (viñedo y olivar) (La Rioja, España)

España / La Rioja / Cuenca hidrográfica del Ebro

Gobierno de La Rioja – Servicio de Investigación Agraria (ICVV)



Figura 2. Piloto Gobierno de la Rioja. España. La Rioja

Sistema productivo

El piloto se desarrolla en sistemas leñosos representativos de la región, fundamentalmente viñedo para vinificación y olivar. Se trata de cultivos permanentes implantados en ladera, gestionados mediante prácticas agronómicas habituales en este tipo de sistemas, incluyendo manejo del suelo, control de la vegetación espontánea y fertilización.

Este tipo de sistemas presenta particularidades relevantes en la dinámica del fósforo, ya que la interacción entre pendiente, manejo del suelo y cobertura vegetal condiciona los procesos de erosión y el transporte de partículas, siendo estos mecanismos clave en la movilización del fósforo.

Descripción del entorno

El piloto se localiza en un paisaje caracterizado por laderas estructuradas en terrazas o bancales, donde predominan los cultivos leñosos. Este tipo de configuración geomorfológica genera una fuerte diferenciación espacial entre zonas de generación de escorrentía en las partes altas y zonas de acumulación en las partes bajas.

La alternancia entre viñedo y olivar, junto con la disposición en ladera, favorece la aparición de procesos erosivos y la redistribución de materiales dentro de la propia subcuenca.

Características de la cuenca

La cuenca presenta una topografía variable, con pendientes que oscilan entre moderadas y suaves (aproximadamente entre el 2% y el 10%), lo que condiciona una esorrentía relativamente rápida en las zonas más elevadas y procesos de acumulación en las zonas de menor pendiente.

Se identifican procesos activos de erosión hídrica, especialmente en las zonas con menor cobertura vegetal o con manejo más intensivo del suelo, manifestándose en forma de surcos y transporte de sedimentos hacia las partes bajas de la ladera.

Desde el punto de vista edáfico, los suelos son poco evolucionados y presentan una elevada heterogeneidad, condicionada por el material parental (lutitas y areniscas) y por la dinámica erosiva. Esta variabilidad edáfica influye en la capacidad de retención del fósforo y en su susceptibilidad a ser movilizado.

El drenaje superficial está fuertemente condicionado por la topografía y por la disposición de las parcelas, generando una conectividad hidrológica significativa entre las zonas altas y bajas de la subcuenca.

Contexto edafoclimático

El área presenta un clima de transición entre mediterráneo y continental, con influencia tanto atlántica como mediterránea. Se caracteriza por inviernos fríos, veranos cálidos y secos, y una distribución irregular de las precipitaciones, concentradas principalmente en otoño y primavera.

Estas condiciones favorecen la aparición de eventos de precipitación de cierta intensidad que, en combinación con la pendiente, incrementan el riesgo de erosión y transporte de sedimentos, constituyendo uno de los principales mecanismos de movilización del fósforo en estos sistemas.

Importancia del sistema productivo

El viñedo y el olivar constituyen sistemas productivos de elevada relevancia económica y territorial en La Rioja, configurando el paisaje agrario y contribuyendo de forma significativa a la actividad agroalimentaria de la región.

Desde el punto de vista ambiental, estos sistemas desempeñan un papel clave en la dinámica de nutrientes a escala de cuenca, especialmente en lo relativo a procesos de erosión y redistribución de suelo, que pueden tener implicaciones directas sobre la calidad del agua.

Problemática asociada al fósforo

En sistemas leñosos en ladera, la principal vía de movilización del fósforo está asociada al transporte de sedimentos generado por procesos de erosión hídrica. La combinación de pendiente, eventos de precipitación y manejo del suelo favorece la pérdida de partículas finas, a las que el fósforo se encuentra adsorbido.

En este contexto, el fósforo se moviliza predominantemente en forma particulada, siendo las zonas de mayor pendiente y menor cobertura vegetal las principales áreas de generación, mientras que las zonas bajas actúan como áreas de acumulación.

El piloto permite analizar la relación entre manejo del suelo, procesos erosivos y transporte de fósforo, aportando información clave para la identificación de zonas de riesgo y la definición de estrategias de gestión orientadas a reducir la pérdida de nutrientes.

1.1.3. Piloto 4 y Piloto 7 – Sistemas agrícolas de regadío y ganaderos intensivos (Portugal – Coimbra y Aveiro)

Portugal / Región Centro / Cuencas hidrográficas del Mondego (Coimbra) y Vouga (Aveiro)

Instituto Politécnico de Coimbra (i2A) y Calcob



Figura 3. Pilotos IPC y Calcob. Portugal. Aveiro y Coimbra

Sistema productivo

El piloto integra dos sistemas agrícolas representativos del regadío intensivo del centro de Portugal, ambos basados en rotaciones de cultivos con una presencia estructural del maíz, aunque con orientaciones productivas diferenciadas.

En el caso de Coimbra, el sistema se orienta hacia la producción de cultivos hortícolas e industriales en rotación con maíz grano, mientras que en Aveiro predomina un sistema agrícola-ganadero vinculado a la producción de maíz forrajero y cultivos asociados destinados a la alimentación de ganado bovino de leche.

En ambos casos, se trata de sistemas de alta intensidad de manejo, con fertilización, rotaciones continuas y fuerte dependencia del control hídrico, lo que condiciona de forma significativa la dinámica del fósforo en el sistema suelo-agua.

Descripción del entorno

Los pilotos se desarrollan en entornos agrícolas altamente productivos, caracterizados por suelos de elevada fertilidad y por la presencia de infraestructuras hidráulicas que permiten el control del riego y del drenaje.

El piloto de Coimbra se sitúa en una llanura aluvial asociada al valle bajo del río Mondego, con un sistema de regadío altamente tecnificado. Por su parte, el piloto de Aveiro se localiza en una zona de transición hacia sistemas lagunares, con una estructura parcelaria más fragmentada y una red densa de canales y elementos lineales que condicionan la dinámica del agua.

Características de la cuenca

Ambos sistemas presentan relieves de muy baja pendiente, con condiciones topográficas que limitan la escorrentía superficial difusa y favorecen la acumulación de agua en superficie.

En este contexto, el comportamiento hidrológico está fuertemente condicionado por la presencia de sistemas de drenaje artificial, que permiten evacuar el exceso de agua y regular las condiciones de humedad del suelo. En Coimbra, este sistema se basa en una red estructurada de canales, estaciones de bombeo y dispositivos de control, mientras que en Aveiro el drenaje combina elementos naturales y artificiales en un entorno más heterogéneo.

Esta configuración determina un patrón de transporte de fósforo diferente al de sistemas en pendiente, en el que los flujos de salida no dependen exclusivamente de la escorrentía superficial, sino también de la circulación del agua a través de infraestructuras hidráulicas.

Contexto edafoclimático

El área presenta un clima de tipo oceánico con influencia atlántica, caracterizado por precipitaciones elevadas y relativamente bien distribuidas a lo largo del año. Estas condiciones contrastan con otros pilotos del proyecto y tienen implicaciones directas en la dinámica del fósforo.

Los suelos son mayoritariamente de origen aluvial, con elevada fertilidad y buena capacidad productiva, pero con susceptibilidad a la saturación hídrica. En determinadas condiciones, especialmente tras episodios de precipitación intensa, pueden producirse encharcamientos o inundaciones temporales que alteran los procesos de movilización y transporte de nutrientes.

La inclusión de dos pilotos dentro del mismo contexto territorial permite capturar la variabilidad asociada a la interacción entre clima húmedo, manejo intensivo y diferentes

configuraciones de drenaje, proporcionando una visión más completa del comportamiento del fósforo en sistemas de regadío.

Importancia del sistema productivo

Los sistemas agrícolas de regadío del centro de Portugal constituyen una de las bases productivas más relevantes del país, tanto en términos de producción agrícola como de soporte a sistemas ganaderos intensivos.

Su elevada intensidad de manejo, junto con la dependencia del control hídrico, los convierte en sistemas especialmente sensibles a la movilización de nutrientes, con un papel relevante en el balance de fósforo a escala de cuenca.

Problemática asociada al fósforo

En estos sistemas, la dinámica del fósforo está fuertemente condicionada por la interacción entre fertilización, manejo del agua y características del suelo.

La presencia de drenaje artificial y la elevada disponibilidad hídrica favorecen la movilización tanto de fósforo disuelto como particulado, a través de:

- flujos de drenaje
- circulación en canales
- episodios de saturación e inundación

A diferencia de sistemas en pendiente, donde predomina el transporte por escorrentía superficial, en estos sistemas el fósforo puede exportarse mediante flujos controlados, lo que introduce una complejidad adicional en su monitorización y análisis.

El piloto permite analizar estos procesos en condiciones reales de agricultura intensiva, aportando información clave para la evaluación del riesgo de contaminación por fósforo en sistemas de regadío con control hidráulico.

1.1.4. Piloto 5 – Sistema ganadero (sudoeste de Francia)

Francia / Nouvelle-Aquitaine (Landas) / Cuenca hidrográfica del Adour

Cámara de Agricultura de las Landas y entidades colaboradoras



Figura 4. Piloto ITAVI. Francia. Landas

Sistema productivo

El piloto se desarrolla en un sistema ganadero intensivo orientado a la producción de patos, característico del sudoeste de Francia. La actividad productiva se basa en la cría y manejo de animales en explotaciones especializadas, con una fuerte dependencia de la alimentación externa.

Este tipo de sistema introduce una dinámica particular del fósforo, en la que la principal entrada del nutriente se produce a través de la alimentación animal, siendo posteriormente redistribuido en el sistema mediante las deyecciones generadas.

Descripción del entorno

El piloto se localiza en una zona rural con presencia de explotaciones ganaderas y superficies agrícolas asociadas. El sistema se organiza en torno a las parcelas donde se gestionan las deyecciones ganaderas, que constituyen el principal vínculo entre la actividad productiva y el suelo.

La relación entre las explotaciones ganaderas y las superficies agrarias permite analizar la transferencia de nutrientes desde la producción animal hacia el medio terrestre.

Características de la cuenca

La cuenca presenta condiciones de baja pendiente, con un drenaje superficial poco marcado en comparación con sistemas en ladera. No obstante, la conectividad hidrológica existente permite el transporte de agua y nutrientes desde las parcelas hacia los sistemas hídricos.

El comportamiento hidrológico está condicionado tanto por las características del suelo como por la distribución espacial de las aplicaciones de deyecciones, lo que puede generar variabilidad en la movilización de nutrientes dentro de la cuenca.

Contexto edafoclimático

El área se enmarca en un clima oceánico, caracterizado por precipitaciones relativamente abundantes y bien distribuidas a lo largo del año.

Estas condiciones favorecen la disponibilidad de agua en el suelo y pueden influir en los procesos de movilización de nutrientes, especialmente en situaciones de aplicación de deyecciones en superficie.

Importancia del sistema productivo

El sistema ganadero de producción de patos constituye una actividad económica relevante en la región de las Landas, con un papel destacado dentro del sector agroalimentario local.

La gestión de las deyecciones generadas en este tipo de sistemas representa un elemento clave desde el punto de vista ambiental, especialmente en relación con el balance de nutrientes y su posible transferencia al medio.

Problemática asociada al fósforo

En este tipo de sistemas, la dinámica del fósforo está fuertemente condicionada por las entradas externas de nutrientes a través de la alimentación animal y su posterior acumulación en las deyecciones.

La aplicación de estas deyecciones en parcelas agrícolas puede generar una acumulación progresiva de fósforo en el suelo, lo que incrementa el potencial de movilización del nutriente bajo determinadas condiciones.

El piloto permite analizar la relación entre la gestión de las deyecciones, la acumulación de fósforo en el suelo y su posible movilización hacia el medio hídrico, aportando información relevante para la evaluación del riesgo de contaminación difusa en sistemas ganaderos.

Condicionantes sanitarios

El inicio y desarrollo de las actividades se ha visto condicionado por la situación sanitaria derivada de la influencia aviar altamente patógena (IAAP), que ha afectado de forma significativa al sector avícola en el territorio durante el periodo de ejecución del proyecto.

La aparición de brotes en granjas y el incremento del nivel de riesgo sanitario a escala nacional han implicado la aplicación de medidas estrictas de bioseguridad, incluyendo restricciones en el acceso a las explotaciones, limitaciones en el movimiento de animales y modificaciones en las condiciones de manejo.

Estas circunstancias han condicionado el arranque del piloto y la planificación inicial de algunas actividades, si bien no han comprometido la validez del diseño experimental,

que se ha adaptado a las condiciones reales del sistema manteniendo la coherencia metodológica con el resto de pilotos del proyecto.

1.1.5. Piloto 6 – Sistema agroforestal de dehesa (Extremadura, España)

España / Extremadura / Subcuenca del arroyo de La Rinconada (cuenca del Guadiana)

FEDEHESA



Figura 5. Piloto FEDEHESA. España. La Rinconada

Sistema productivo

El piloto se desarrolla en un sistema agroforestal de dehesa, caracterizado por la combinación de arbolado disperso, pastizales naturales y aprovechamiento ganadero extensivo, principalmente mediante pastoreo ovino. Este sistema se gestiona con una baja intensidad de insumos externos, con escasa o nula aplicación de fertilización mineral, lo que condiciona de forma significativa la dinámica del fósforo en el sistema suelo-planta.

A diferencia de sistemas agrícolas intensivos, la dinámica del fósforo en la dehesa está más ligada a los ciclos naturales de nutrientes, al reciclaje asociado al pastoreo y a la distribución heterogénea de aportes orgánicos.

Descripción del entorno

El piloto se localiza en un entorno representativo del ecosistema de dehesa mediterránea, caracterizado por un paisaje abierto con arbolado disperso y predominio de pastizales. La estructura del sistema genera una elevada heterogeneidad espacial, tanto en la cobertura vegetal como en la distribución de nutrientes.

La baja intensidad de manejo y la limitada intervención agronómica permiten analizar la dinámica del fósforo en condiciones próximas al funcionamiento natural del sistema.

Características de la cuenca

La cuenca presenta pendientes suaves y un drenaje superficial bien definido hacia un cauce estacional, activado principalmente durante episodios de precipitación intensa. La escorrentía es generalmente baja, pero puede incrementarse de forma puntual en eventos climáticos extremos.

El uso del suelo es predominantemente pastoral, con una cobertura vegetal que contribuye a reducir los procesos erosivos en condiciones normales. No obstante, la heterogeneidad del sistema puede generar zonas localizadas con diferente comportamiento hidrológico.

Desde el punto de vista edáfico, los suelos son poco evolucionados, con texturas francas a franco-arenosas, bajo contenido en fósforo disponible y niveles moderados de materia orgánica. Estas características limitan la disponibilidad de fósforo para las plantas y condicionan su dinámica en el sistema.

Contexto edafoclimático

El área se enmarca en un clima mediterráneo, caracterizado por veranos secos y calurosos e inviernos suaves, con precipitaciones concentradas en otoño e invierno. Esta distribución estacional condiciona tanto la producción de pasto como los procesos de escorrentía y transporte de nutrientes.

La combinación de periodos secos prolongados y eventos de precipitación concentrados influye en la movilización puntual de fósforo, aunque en menor medida que en sistemas agrícolas intensivos.

Importancia del sistema productivo

La dehesa constituye uno de los sistemas agroganaderos más representativos del suroeste de la península ibérica, con una elevada importancia desde el punto de vista ecológico, económico y territorial. Se trata de un sistema de alto valor ambiental, clave para la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de servicios ecosistémicos.

Desde el punto de vista del fósforo, estos sistemas presentan un comportamiento diferenciado respecto a sistemas intensivos, lo que los convierte en un escenario relevante para el análisis comparado dentro del proyecto.

Problemática asociada al fósforo

A diferencia de otros sistemas productivos, la problemática del fósforo en la dehesa no está asociada a procesos de acumulación o contaminación difusa, sino a un déficit estructural de este nutriente en el suelo, que limita la productividad del pasto.

La disponibilidad de fósforo está condicionada por la baja fertilización externa y por la dinámica natural del sistema, en la que el reciclaje de nutrientes a través del pastoreo genera una distribución espacial heterogénea del fósforo.

Los procesos de movilización de fósforo hacia el medio hídrico son generalmente limitados, debido a la baja intensidad de manejo y a la cobertura vegetal existente, aunque pueden producirse de forma puntual en eventos de precipitación intensa.

El piloto permite analizar la dinámica del fósforo en un sistema de baja presión antrópica, aportando una referencia clave para la comparación con sistemas agrícolas intensivos y para la evaluación de escenarios de equilibrio o déficit de nutrientes.

1.2. Representatividad territorial del conjunto de pilotos

El conjunto de pilotos definidos en el marco del proyecto configura una red de estudio representativa de los principales sistemas agroganaderos del espacio SUDOE, abarcando una amplia diversidad de condiciones productivas, edafoclimáticas y de configuración hidrológica.

Desde el punto de vista de los sistemas productivos, los pilotos incluyen agricultura extensiva de cereal, cultivos leñosos en ladera (viñedo y olivar), sistemas agroforestales de dehesa, sistemas ganaderos intensivos y sistemas agrícolas de regadío con elevada intensidad de manejo. Esta diversidad permite cubrir un amplio espectro de escenarios en los que la dinámica del fósforo presenta comportamientos diferenciados.

En relación con las condiciones edafoclimáticas, los pilotos se distribuyen en contextos mediterráneos continentales, mediterráneos atlánticos y oceánicos, con regímenes de precipitación contrastados, que van desde situaciones de marcada estacionalidad hasta contextos con precipitaciones más regulares y elevadas. Estas diferencias condicionan los procesos de movilización de fósforo, especialmente en relación con la generación de escorrentía, la ocurrencia de eventos extremos y la disponibilidad hídrica del suelo.

Desde el punto de vista hidrológico, los pilotos incluyen tanto sistemas con drenaje natural en condiciones de pendiente, donde predominan los procesos de escorrentía superficial y erosión, como sistemas de baja pendiente con drenaje artificial, en los que el transporte de nutrientes está condicionado por la presencia de infraestructuras hidráulicas. Asimismo, se incorporan sistemas con baja intervención antrópica, como la dehesa, donde los procesos de movilización del fósforo están más ligados a dinámicas naturales.

Esta combinación de condiciones permite analizar la dinámica del fósforo en un rango amplio de situaciones representativas del territorio SUDOE, incluyendo escenarios de acumulación, déficit, redistribución y movilización del nutriente.

La complementariedad entre los distintos pilotos refuerza la solidez del conjunto, permitiendo no solo el análisis individual de cada sistema, sino también la comparación entre contextos productivos y ambientales diferentes. Este enfoque proporciona una

base robusta para la identificación de patrones comunes y la generación de conocimiento transferible a otros territorios con características similares dentro del espacio SUDOE.

Piloto	Ubicación	Sistema productivo	Condiciones hidrológicas	Tipo de suelo	Clima	Dinámica del fósforo
ITAGRA	Castilla y León (España)	Agricultura extensiva cerealista	Cuenca cerrada, pendiente suave, drenaje natural	Franco a franco-arcilloso, con carbonatos	Mediterráneo continental	Acumulación en suelo y movilización puntual asociada a escorrentía
FEDEHESA	Extremadura (España)	Sistema agroforestal de dehesa	Pendientes suaves, drenaje natural, baja escorrentía	Suelos poco evolucionados, bajo P disponible	Mediterráneo	Déficit de fósforo, dinámica controlada por reciclaje natural
Gobierno de La Rioja	La Rioja (España)	Viñedo y olivar en ladera	Pendientes moderadas, escorrentía activa, erosión	Suelos heterogéneos, poco evolucionados	Mediterráneo-continental	Movilización de fósforo particulado asociada a erosión
ITAVI	Landas (Francia)	Sistema ganadero intensivo (patos)	Baja pendiente, drenaje natural	Variable, asociado a uso agrícola de deyecciones	Oceánico	Entrada de fósforo vía alimentación y acumulación en suelo
IPC-Calcob (Coimbra)	Baixo Mondego (Portugal)	Regadío intensivo (rotaciones con maíz)	Baja pendiente, drenaje artificial controlado	Suelos aluviales, alta fertilidad	Oceánico	Dinámica condicionada por riego y drenaje
IPC-Calcob (Aveiro)	Baixo Vouga (Portugal)	Sistema agrícola-ganadero (maíz forrajero)	Baja pendiente, drenaje mixto (natural + artificial)	Suelos de valle y zonas húmedas	Oceánico	Movilización ligada a drenaje y conexión con sistema lagunar

Tabla 1. Resumen características pilotos

2. Diseño del piloto (Metodología)

2.1 Delimitación de la cuenca

2.1.1. Metodología empleada (MDE, SIG, GPS).

La definición de los pilotos se basa en la generación de cartografía hidrológica derivada de modelos digitales del terreno, que permite identificar y delimitar subcuencas funcionales dentro de cada zona de ejecución. Para ello, se parte de la selección de parcelas o áreas de estudio que presentan una configuración topográfica adecuada para el análisis de los flujos de escorrentía superficial y la diferenciación de áreas de aportación, con el objetivo de establecer unidades espaciales homogéneas desde el punto de vista hidrológico, sobre las que posteriormente se definen las acciones a ejecutar en el marco del proyecto.

La delimitación de las subcuencas se realiza mediante el análisis de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), representados en formato ráster con resoluciones espaciales

comprendidas entre 10 y 20 metros de tamaño de píxel, integrados en entornos de Sistemas de Información Geográfica, fundamentalmente en QGIS. A partir de los MDE, se aplica una secuencia de algoritmos de análisis hidrológico que incluye la corrección de depresiones, el cálculo de direcciones de flujo y la acumulación de flujo, permitiendo identificar las áreas de drenaje y estructurar la red hidrológica del territorio.

En función de los umbrales de acumulación definidos y de la resolución del modelo, se generan distintos niveles jerárquicos de delimitación de subcuencas, desde niveles más generales (niveles 1–2), asociados a áreas de aportación amplias, hasta niveles de mayor detalle (niveles 4–5), que permiten una definición fina de subcuencas funcionales dentro de cada piloto. Esta aproximación jerárquica facilita la selección del nivel de detalle más adecuado en función de las características topográficas del territorio y de los objetivos del pilotaje, estableciéndose con carácter general tres subcuencas operativas por piloto adaptadas a la escala y heterogeneidad de cada territorio.

En aquellos territorios donde se dispone de cartografía oficial de alta resolución, los MDE utilizados proceden de fuentes públicas disponibles. No obstante, en los casos en los que dicha información no alcanza la resolución necesaria para una correcta delimitación hidrológica, como en los pilotos localizados en Coimbra y Aveiro (Portugal), los Modelos Digitales de Elevaciones se generan específicamente mediante vuelos de dron y generación de modelos digitales de superficie (MDS) posteriormente transformados en MDE, lo que permite obtener una representación precisa del relieve y mejorar la definición de las subcuencas.

En el caso del piloto desarrollado en Francia, el análisis parte de la explotación avícola existente como unidad inicial de estudio. A partir del análisis hidrológico de la explotación, se identifican dos subcuencas diferenciadas en lugar de las tres previstas inicialmente. En este contexto, durante los primeros meses de trabajo se considera la totalidad de la explotación como zona de manejo tradicional y, en una fase posterior, las dos subcuencas delimitadas se definen como zonas experimentales sobre las que se estructuran las acciones del proyecto.

Este enfoque metodológico común de generación de cartografía y delimitación de subcuencas permite adaptar el diseño de los pilotos a las características hidrológicas reales de cada territorio, garantizando al mismo tiempo la coherencia metodológica necesaria para el análisis comparado de los resultados. Asimismo, establece una base estructurada para la integración de datos y el desarrollo del modelo predictivo del proyecto.

2.1.2. Superficie pilotos.

La superficie de trabajo en cada piloto no se define como una extensión fija, sino que viene determinada por la delimitación hidrológica realizada a partir del análisis de los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE). En este sentido, la unidad de estudio corresponde a la cuenca o conjunto de subcuencas funcionales identificadas dentro de cada área piloto.

Phos4Cycle

En términos generales, las superficies analizadas presentan una extensión variable en función de las características topográficas y del sistema productivo, situándose en rangos que permiten garantizar tanto la representatividad del sistema como la viabilidad operativa del muestreo y la monitorización.

En la mayoría de los pilotos, la superficie total se estructura en torno a varias subcuencas operativas, que constituyen la base para el diseño experimental y la implementación de las diferentes estrategias de manejo. Estas subcuencas presentan dimensiones suficientes para capturar los procesos hidrológicos relevantes, manteniendo al mismo tiempo una escala adecuada para el seguimiento detallado de las variables analizadas.

Este enfoque permite trabajar a una escala intermedia, situada entre la parcela convencional y la cuenca hidrológica de mayor tamaño, facilitando tanto el análisis de procesos como la comparabilidad entre territorios con condiciones contrastadas.

Las superficies de cada piloto:

- ◆ ITAGRA

Superficie total subcuencas: 39.130 m² (3,913 ha)

Superficie de ejecución: 39.130 m² (3,913 ha)

- ◆ La Rioja

Superficie total subcuencas: 86.000 m² (8,60 ha)

Superficie de ejecución: 73.600 m² (7,36 ha)

- ◆ Coimbra (Portugal)

Superficie total subcuencas: 31.290 m² (3,129 ha)

Superficie de ejecución: 31.290 m² (3,129 ha)

- ◆ Aveiro (Portugal)

Superficie total subcuencas: 21.000 m² (2,10 ha)

Superficie de ejecución: 21.000 m² (2,10 ha)

- ◆ Francia

Superficie total subcuencas: 50.219 m² (5,022 ha)

Superficie de ejecución: 50.219 m² (5,022 ha)

- ◆ FEDEHESA

Superficie total subcuencas: 471.576 m² (47,16 ha)

Superficie de ejecución: 158.599 m² (15,86 ha)

Detallando estas superficies por cada subcuenca y piloto:

Piloto	Subcuenca	Superficie total subcuenca (m ²)	Superficie de ejecución (m ²)
ITAGRA	SMT	7.030	7.030
	SM1	12.820	12.820
	SM2	19.280	19.280
Gobierno de La Rioja	SMT	23.000	23.000
	SM1	42.000	41.000
	SM2	21.000	9.600
IPC-Calcob Coimbra	SMT	11.090	11.090
	SM1	9.950	9.950
	SM2	10.250	10.250
IPC-Calcob Aveiro	SMT	6.054	6.054
	SM1	10.985	10.985
	SM2	3.960	3.960
ITAVI	SMT	27.210	27.210
	SM1	23.009	23.009
FEDEHESA	SMT	280.143	108.683
	SM1	63.716	49.916
	SM2	127.717	47.000

Tabla 2. Superficies [m²] de cada piloto por sistema de manejo

Las superficies analizadas abarcan un rango amplio, lo que permite incluir tanto sistemas intensivos de pequeña escala como sistemas extensivos de mayor dimensión. Esta variabilidad refuerza la representatividad del conjunto de pilotos y permite analizar la dinámica del fósforo en diferentes escalas dentro del territorio SUDOE.

2.1.3. Zonificación interna (zonas alta, media, baja; criterios).

La zonificación interna de los pilotos se ha definido, de forma general, a partir de criterios hidrológicos derivados del análisis de Modelos Digitales de Elevación (MDE), permitiendo diferenciar áreas funcionales dentro de cada subcuenca en función de su posición en la pendiente, la acumulación de flujo y su papel en los procesos de generación, transporte y acumulación de agua, sedimentos y fósforo.

Bajo este enfoque común, se distinguen tres tipos de zonas:

- Zona alta (cabecera): áreas de mayor cota topográfica y menor acumulación de flujo, donde se genera la esorrentía inicial.
- Zona media (transición): sectores intermedios donde el flujo superficial se concentra progresivamente y aumenta la conectividad hidrológica.
- Zona baja (acumulación): áreas de menor cota, con elevada acumulación de flujo y mayor capacidad de recepción de aportes procedentes del conjunto de la subcuenca.

Este esquema general se ha aplicado de forma homogénea en los pilotos donde la delimitación hidrológica ha constituido la base del diseño experimental, si bien presenta adaptaciones en función de las características específicas de cada sistema:

Piloto ITAGRA (Castilla y León): la zonificación se ha realizado íntegramente a partir de criterios topográficos derivados del MDT PNOA (resolución 5 m), mediante el cálculo de direcciones y acumulación de flujo en entorno SIG. La parcela presenta una pendiente media del 2,24 % y una ligera orientación NW-SE, con convergencia del flujo hacia el sector sureste. Se diferencian tres zonas funcionales: zona alta (SM_T), zona media (SM_1) y zona baja (SM_2), todas ellas hidrológicamente conectadas. La homogeneidad edáfica de la parcela permite atribuir las diferencias observadas principalmente al manejo aplicado.

Piloto FEDEHESA (Extremadura): la zonificación interna se ha basado en criterios topográficos y de posición en la pendiente, diferenciando zonas alta, media y baja en cada subcuenca. Esta clasificación se ha utilizado como base para la asignación de distintos manejos ganaderos (manejo tradicional, manejo holístico y zona de exclusión), permitiendo analizar gradientes de transporte y acumulación de fósforo en sistemas agroforestales.

Piloto ITAVI (Francia): la zonificación combina criterios topográficos con la intensidad de uso del territorio por parte de los animales. Se identifican zonas con diferente altitud (aproximadamente entre 109 y 125 m) y distinta frecuencia de tránsito de los patos, siendo las áreas próximas a los edificios las de mayor presión ganadera y, por tanto, mayor riesgo de acumulación de deyecciones. Esta aproximación introduce una componente funcional adicional vinculada al manejo animal, complementando el análisis puramente hidrológico.

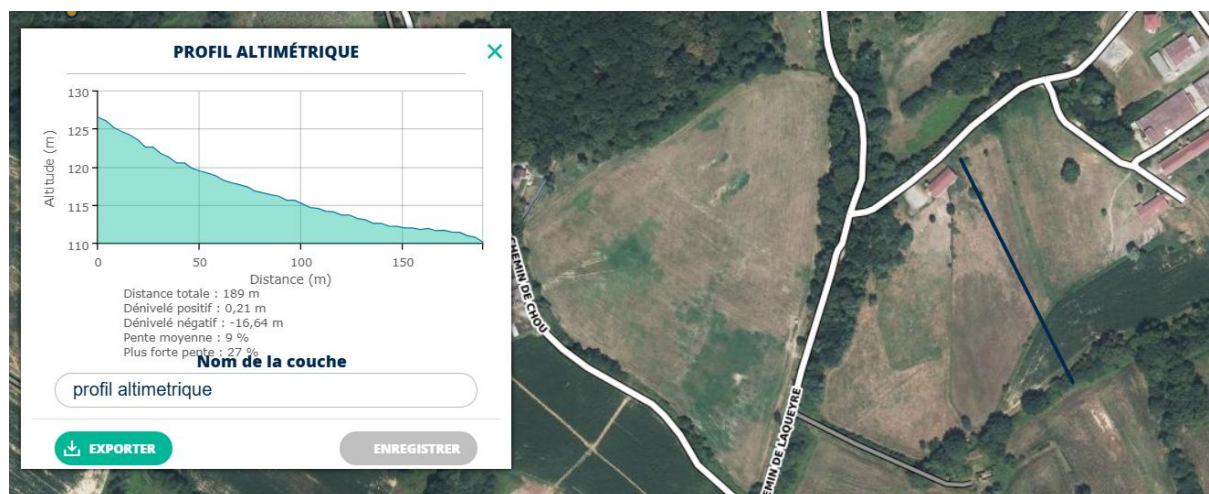


Figura 6. Detalle altimétrico piloto Francia. Landas. ITAVI

Piloto La Rioja (España): no se ha establecido una zonificación interna diferenciada dentro de cada subcuenca, ya que la definición de tratamientos se ha realizado directamente a escala de subcuenca completa. No obstante, la delimitación hidrológica permite mantener la coherencia metodológica con el resto de pilotos para el análisis de los procesos de transporte de fósforo.

Pilotos de Portugal (Coimbra y Aveiro): la zonificación se ha estructurado a nivel de subcuenca, diferenciando tres unidades experimentales (manejo tradicional, manejo ajustado a balance de nutrientes y manejo con biochar). Aunque no se ha definido explícitamente una zonificación interna en zonas alta, media y baja dentro de cada subcuenca, la delimitación hidrológica y la distribución espacial de las parcelas permiten integrar estos pilotos dentro del enfoque general de análisis del proyecto.

2.2 Parcelas de estudio: subcuencas

El diseño experimental del proyecto se basa en la utilización de subcuencas hidrológicas como unidades de estudio, sobre las cuales se definen distintos escenarios de manejo con el objetivo de evaluar el impacto de medidas preventivas en la dinámica del fósforo.

Cada piloto se estructura, con carácter general, en varias subcuencas funcionales hidrológicamente delimitadas, que actúan como unidades experimentales independientes pero comparables. Sobre estas unidades se implementan diferentes estrategias de manejo, permitiendo analizar su efecto sobre los procesos de generación, transporte y acumulación de fósforo en condiciones reales de campo.

2.2.1. Subcuenca de referencia (sin medidas preventivas).

En cada piloto se ha definido una subcuenca o parcela de referencia caracterizada por la ausencia de medidas preventivas específicas, representando el manejo convencional o habitual de cada sistema productivo.

Esta parcela de referencia constituye el escenario base frente al cual se comparan el resto de tratamientos. En función del contexto de cada piloto, este manejo corresponde a:

- Sistemas agrícolas (ITAGRA-IPC CALCOB-GOBIERNO DE LA RIOJA): fertilización mineral o manejo tradicional del agricultor sin incorporación de estrategias específicas de mitigación.
- Sistemas agroforestales (FEDEHESA): manejo ganadero convencional, sin modificaciones orientadas a la reducción del impacto sobre el suelo o la redistribución de nutrientes.
- Sistemas ganaderos (ITAVI): zonas de uso habitual por los animales sin intervención específica, representando las condiciones reales de deposición de deyecciones.

La definición de esta parcela permite establecer una línea base representativa de las condiciones reales de explotación, imprescindible para evaluar la eficacia de las medidas implementadas.

2.2.2. Subcuencas con medidas preventivas.

De forma paralela a la subcuenca de referencia, en cada piloto se han definido una o varias subcuencas en las que se implementan medidas preventivas específicas, adaptadas al contexto agronómico o ganadero, con el objetivo de reducir las pérdidas de fósforo y mejorar su retención y gestión en el sistema suelo-agua.

Las medidas aplicadas en cada piloto son las siguientes:

Piloto ITAGRA (Castilla y León):

Se establecen dos subcuencas con manejo diferenciado respecto al control:

SM1: fertilización mineral ajustada de forma variable en función de las características del suelo y del cultivo. Se aportó un fertilizante NPK 8-9-10

SM2: aplicación de biochar combinada con fertilización tradicional. El biochar fue dosificado en 100 kg/ha.

Estas estrategias permiten evaluar tanto el efecto de la optimización de nutrientes como la capacidad de retención del fósforo mediante enmiendas.

Piloto La Rioja (España):

Se implementan medidas preventivas a escala de subcuenca:

SM1: implantación de cubierta vegetal como medida de control de escorrentía y erosión.

SM2: aplicación de biochar como enmienda para mejorar la retención de fósforo. El biochar fue dosificado en 312 kg/ha.

Piloto FEDEHESA (Extremadura):

Se definen dos estrategias de manejo ganadero diferenciadas respecto al control:

SM1: manejo ganadero con enfoque holístico.

SM2: zona de exclusión de ganado, sin pastoreo ni pisoteo.

Esta última permite evaluar el efecto de la ausencia de presión ganadera sobre la dinámica del fósforo, especialmente en términos de reducción de aportes y mejora de la estructura del suelo.

Piloto ITAVI (Francia):

Se establecen una subcuenca, lo que permite un enfoque comparativo entre manejos:

SM1: aplicación de un ajuste en la alimentación, orientado a modificar la composición de las deyecciones y, por tanto, su impacto sobre la dinámica del fósforo.

Adicionalmente, dentro de cada subcuenca se identifica una variabilidad espacial asociada a la frecuencia de uso del terreno por los animales, con una mayor presión ganadera en las zonas próximas a los edificios y una menor en las zonas más alejadas. Esta distribución introduce un gradiente funcional que influye en la acumulación de deyecciones y en el riesgo de movilización de fósforo, complementando el análisis comparativo entre subcuencas.

Pilotos de Portugal (Coimbra y Aveiro):

En cada piloto se establecen tres subcuencas con distinto manejo:

SM1: fertilización ajustada en base al balance de nutrientes del suelo y del cultivo.

SM2: aplicación de biochar combinada con fertilización tradicional.

Estas medidas permiten comparar estrategias de optimización del uso de nutrientes frente a soluciones de mejora de la retención en el suelo.

Las medidas preventivas implementadas abarcan tanto estrategias agronómicas (fertilización ajustada, cubiertas vegetales), como enmiendas del suelo (biochar) y modificaciones del manejo ganadero (control de carga y exclusión), lo que permite evaluar su eficacia en distintos contextos productivos dentro del territorio SUDOE.

2.2.3. Justificación del diseño comparativo.

El diseño comparativo adoptado en los distintos pilotos se fundamenta en la evaluación de estrategias de manejo que, según la literatura científica, presentan potencial para reducir las pérdidas de fósforo y mejorar su retención y eficiencia en el sistema suelo-agua.

Las medidas seleccionadas responden a mecanismos específicos de control de la dinámica del fósforo, que pueden agruparse en tres grandes enfoques: retención en suelo, reducción de movilización y control de aportes.

a) Aplicación de biochar

El biochar ha sido ampliamente estudiado como enmienda con capacidad para mejorar la retención de fósforo en el suelo. Su elevada superficie específica, porosidad y presencia de grupos funcionales favorecen:

- la adsorción de fósforo soluble, especialmente en suelos con baja capacidad de retención,
- la reducción de la lixiviación y transporte por escorrentía,
- la interacción con cationes (Ca, Fe, Al) que estabilizan el fósforo en formas menos móviles.

Diversos estudios (Lehmann & Joseph, 2015; Biederman & Harpole, 2013) han demostrado que el biochar puede incrementar la capacidad de intercambio del suelo y mejorar la retención de nutrientes, reduciendo su pérdida hacia cuerpos de agua.

b) Ajuste de la fertilización (balance de nutrientes)

La optimización de la fertilización en función de las necesidades del cultivo y las características del suelo es una de las estrategias más efectivas para reducir pérdidas de fósforo.

Este enfoque permite:

- evitar excesos de fósforo disponible en el suelo,
- reducir la fracción susceptible de ser transportada por escorrentía o drenaje,
- mejorar la eficiencia de uso del nutriente (PUE).

Según Sharpley et al. (2013), el ajuste de la fertilización es un elemento clave en la mitigación de la contaminación difusa por fósforo en sistemas agrícolas intensivos.

c) Implantación de cubiertas vegetales

Las cubiertas vegetales contribuyen a la reducción de pérdidas de fósforo mediante:

- disminución de la escorrentía superficial,
- reducción de la erosión del suelo, principal vía de transporte de fósforo particulado,
- incremento de la infiltración y estabilización estructural del suelo.

Estudios como los de Blanco-Canqui et al. (2015) evidencian que las cubiertas vegetales pueden reducir significativamente las pérdidas de sedimentos y nutrientes en sistemas agrícolas.

d) Manejo ganadero y control de la presión animal

En sistemas ganaderos, la dinámica del fósforo está fuertemente condicionada tanto por la cantidad de fósforo ingerido por los animales como por su distribución espacial a través de las deyecciones.

Las estrategias evaluadas en el proyecto abordan ambos aspectos:

- Exclusión de ganado, que elimina la aportación directa de fósforo y reduce la compactación del suelo, favoreciendo la infiltración y disminuyendo la escorrentía.
- Manejo adaptativo de la carga ganadera, orientado a una distribución más homogénea de las deyecciones en el territorio.
- Modificación de la alimentación animal, como en el caso del piloto ITAVI, mediante la incorporación de fitasas en la ración de patos.

La inclusión de fitasas en la alimentación tiene un efecto directo sobre la eficiencia en el uso del fósforo, ya que estas enzimas permiten la hidrólisis del fitato (principal forma de fósforo en los piensos vegetales), aumentando su digestibilidad y reduciendo la cantidad de fósforo excretado.

Este mecanismo se traduce en:

- una reducción del fósforo total en las deyecciones,
- una disminución del riesgo de acumulación en suelo,

y, por tanto, una menor probabilidad de movilización hacia sistemas acuáticos.

Diversos estudios han demostrado que el uso de fitasas puede reducir significativamente la excreción de fósforo en aves, mejorando la eficiencia nutricional y disminuyendo el impacto ambiental (Selle & Ravindran, 2007; Adeola & Cowieson, 2011).

La combinación de estrategias de manejo espacial (presión ganadera) y nutricional (ajuste de la ración) permite abordar de forma integral el control del fósforo en sistemas ganaderos.

e) Justificación del enfoque a escala de subcuenca

La utilización de subcuencas como unidades experimentales permite integrar los efectos de estas medidas a escala funcional, capturando:

- la interacción entre suelo, agua y manejo,
- los procesos reales de transporte de fósforo (disuelto y particulado),
- la influencia de la conectividad hidrológica en la exportación de nutrientes.

Este enfoque está alineado con metodologías ampliamente utilizadas en estudios de contaminación difusa (Sharpley et al., 2003), donde la escala de cuenca se considera clave para la evaluación de medidas de mitigación.

3. Monitorización realizada

3.1 Monitorización de suelo

3.1.1. Tipo de muestreo y localización de los puntos de muestreo

La monitorización de suelo se ha basado en un diseño de muestreo sistemático-estratificado, distribuido sobre las subcuencas experimentales con el objetivo de capturar tanto la variabilidad hidrológica como la variabilidad edáfica interna de cada piloto. La profundidad de muestreo considerada ha sido, con carácter general, de 0–30 cm, correspondiente al horizonte superficial donde se concentra la mayor parte de la dinámica del fósforo asociada al manejo agronómico y ganadero.

La localización de los puntos de muestreo se ha definido mediante la integración de dos criterios principales:

Delimitación hidrológica de las subcuencas, obtenida a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE), que permite identificar zonas de generación, tránsito y acumulación de flujos.

Variabilidad edáfica interna, caracterizada mediante mapas de conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa).

La conductividad eléctrica aparente constituye un indicador indirecto de la heterogeneidad del suelo, ya que se relaciona con propiedades como la textura, el contenido de arcilla, la humedad y la materia orgánica. Su utilización permite identificar unidades relativamente homogéneas dentro de cada subcuenca y, por tanto, optimizar la representatividad del muestreo.

Con carácter general, en los distintos pilotos la CEa se ha obtenido mediante equipos de medida específicos instalados en vehículos (tipo quad o plataformas móviles), que permiten realizar un muestreo continuo del suelo y generar cartografía de alta resolución. Estos sistemas de medición proximal permiten obtener mapas detallados de variabilidad espacial, que posteriormente se integran en entornos SIG para la selección de puntos de muestreo.

En el caso del piloto de Coimbra, debido a limitaciones operativas, no se realizó el mapeo continuo mediante sensor móvil. En su lugar, se llevó a cabo una campaña específica basada en la toma de puntos discretos georreferenciados, distribuidos de forma sistemática en la parcela, a partir de los cuales se determinó la conductividad eléctrica en laboratorio. Este enfoque permitió obtener una aproximación a la variabilidad edáfica y asegurar la representatividad del muestreo, aunque con menor resolución espacial que en los casos con sensor continuo.

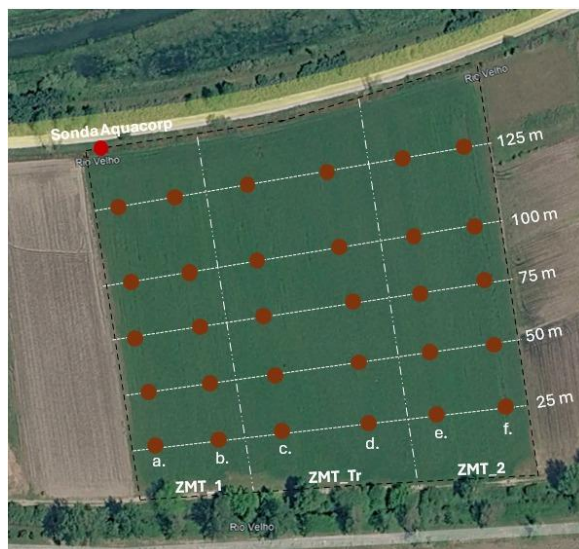


Figura 7. Detalle muestreo georreferenciado piloto IPC-Calcob. Portugal. Coimbra. Puntos muestreo para determinación conductividad aparente.

A partir de la combinación de ambos criterios (posición hidrológica y variabilidad edáfica), se definieron los puntos de muestreo dentro de cada subcuenca. En términos generales, se ha trabajado con una densidad de muestreo de aproximadamente cinco puntos por subcuenca, si bien este número se ha ajustado en función de la superficie y heterogeneidad de cada piloto.

El muestreo de suelo se ha realizado mediante la toma de muestras puntuales o compuestas, en función del objetivo del análisis. En fases iniciales de caracterización, se han empleado en algunos casos muestreos compuestos en zigzag, mientras que el seguimiento temporal se ha basado en puntos fijos georreferenciados, permitiendo evaluar la evolución de las variables analizadas a lo largo del tiempo.

Este enfoque metodológico garantiza que la red de muestreo de suelo responda a una lógica funcional basada en la conectividad hidrológica y la variabilidad edáfica, permitiendo interpretar de forma robusta la dinámica del fósforo dentro de cada subcuenca.

La red de muestreo definida para cada piloto quedó georreferenciada e integrada en entorno SIG, tal y como se muestra a continuación. En cada caso, se integran la red de drenaje interno y la delimitación de subcuencas, derivadas del análisis hidrológico, junto con el mapa de conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa). La combinación de ambos elementos permite la selección de puntos representativos de monitorización, en los que se realizan los muestreos de suelo de forma sistemática a lo largo del periodo de ejecución del piloto

ITAGRA-Castilla y León-España (Villamuriel de Cerrato-Palencia)

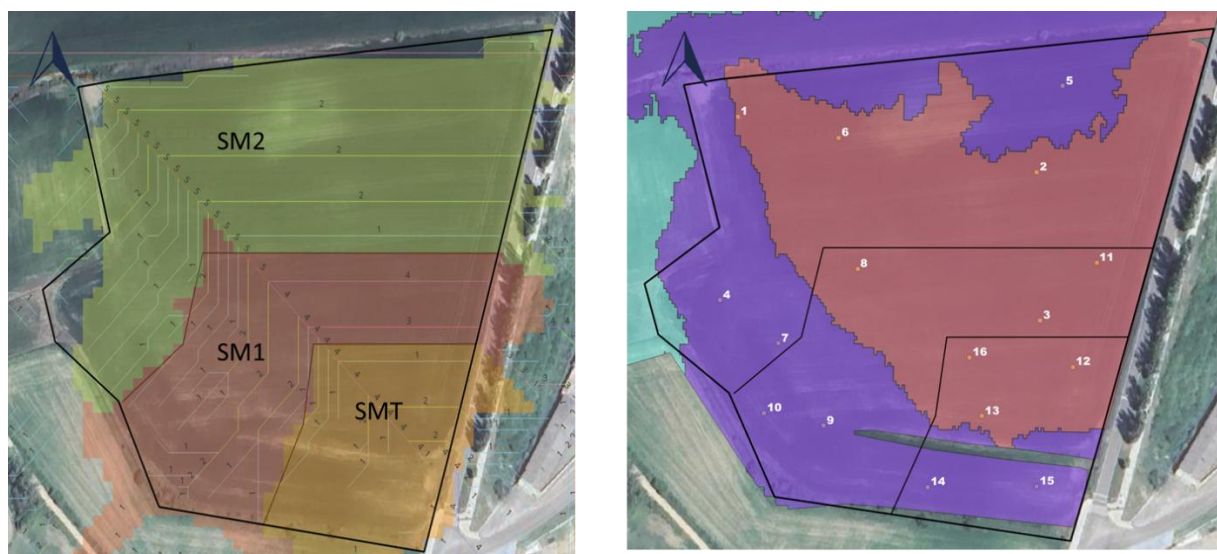


Figura 8. Piloto de ITAGRA en Villamuriel de Cerrato (Palencia, España). Integración de la cartografía hidrológica (delimitación de subcuencas basada en red de drenaje y acumulación de flujo) y la variabilidad edáfica (mapa de conductividad eléctrica aparente del suelo, CEa) para la definición de la red de puntos de muestreo de suelo.

Gobierno de la Rioja-La Rioja-España

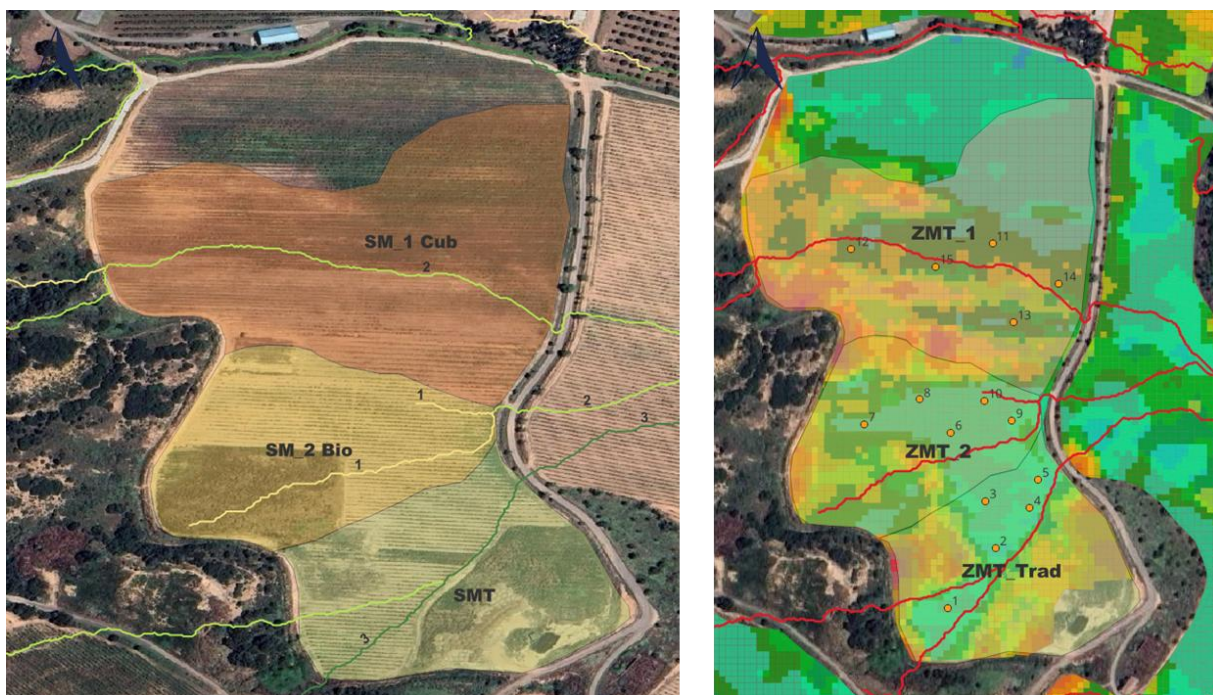


Figura 9. Piloto del Gobierno de la Rioja en La Rioja (España). Integración de la cartografía hidrológica (delimitación de subcuencas basada en red de drenaje y acumulación de flujo) y la variabilidad edáfica (mapa de conductividad eléctrica aparente del suelo, CEa) para la definición de la red de puntos de muestreo de suelo.

IPC-Calcob-Coimbra-Portugal



Figura 10. Piloto de IPC-Calcob en Coimbra (Portugal). Integración de la cartografía hidrológica (delimitación de subcuencas basada en red de drenaje y acumulación de flujo) y la variabilidad edáfica (mapa de conductividad eléctrica aparente del suelo, CEa) para la definición de la red de puntos de muestreo de suelo.

IPC-Calcob-Aveiro-Portugal

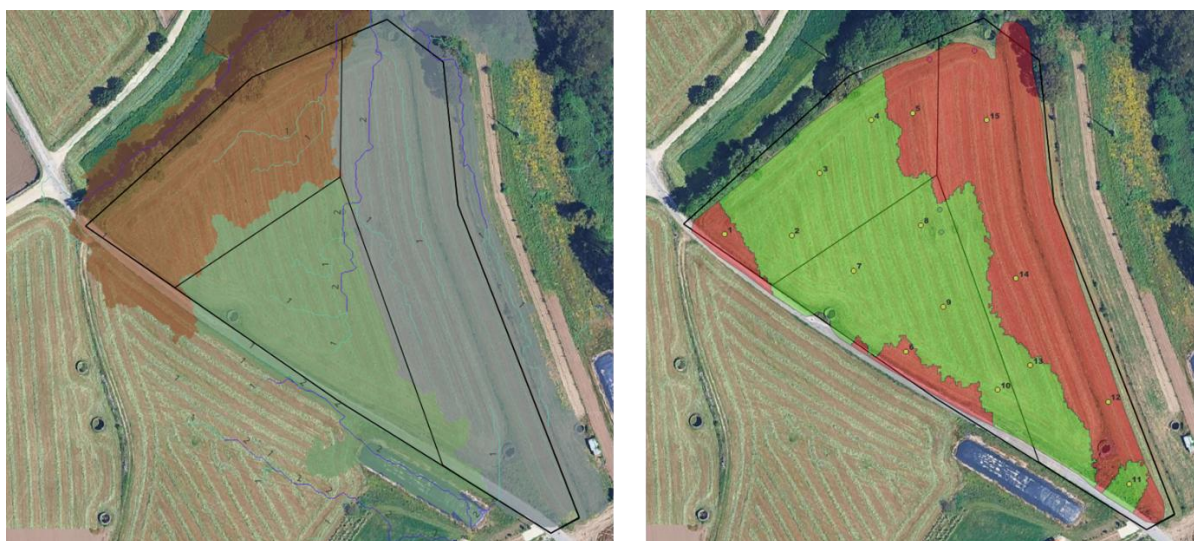


Figura 11. Piloto de IPC-Calcob en Aveiro (Portugal). Integración de la cartografía hidrológica (delimitación de subcuencas basada en red de drenaje y acumulación de flujo) y la variabilidad edáfica (mapa de conductividad eléctrica aparente del suelo, CEa) para la definición de la red de puntos de muestreo de suelo.

ITAVI-Orthez-Francia

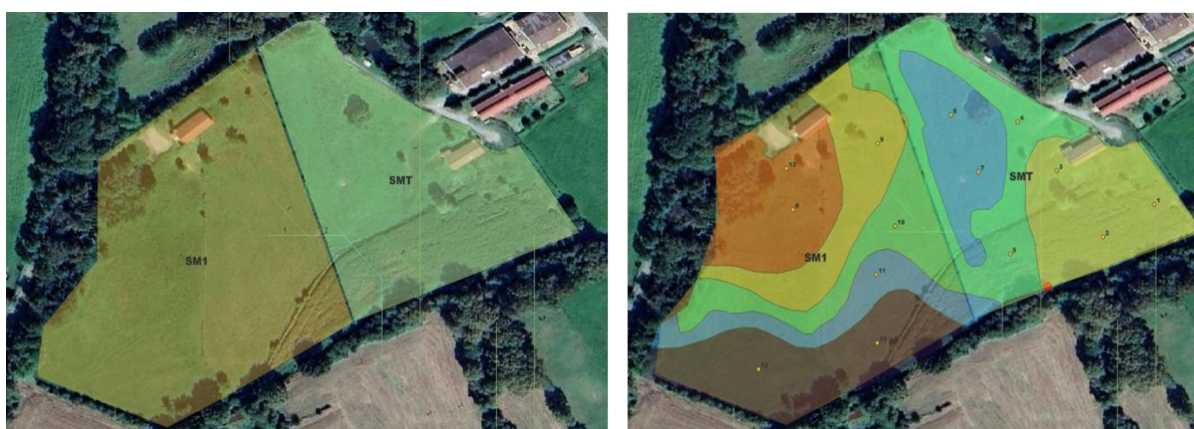


Figura 12. Piloto de ITAVI en Landas (Orthez, Francia). Integración de la cartografía hidrológica (delimitación de subcuencas basada en red de drenaje y acumulación de flujo) y la variabilidad edáfica (mapa de conductividad eléctrica aparente del suelo, CEa) para la definición de la red de puntos de muestreo de suelo.

FEHEDESA-La Rinconada-Badajoz-España

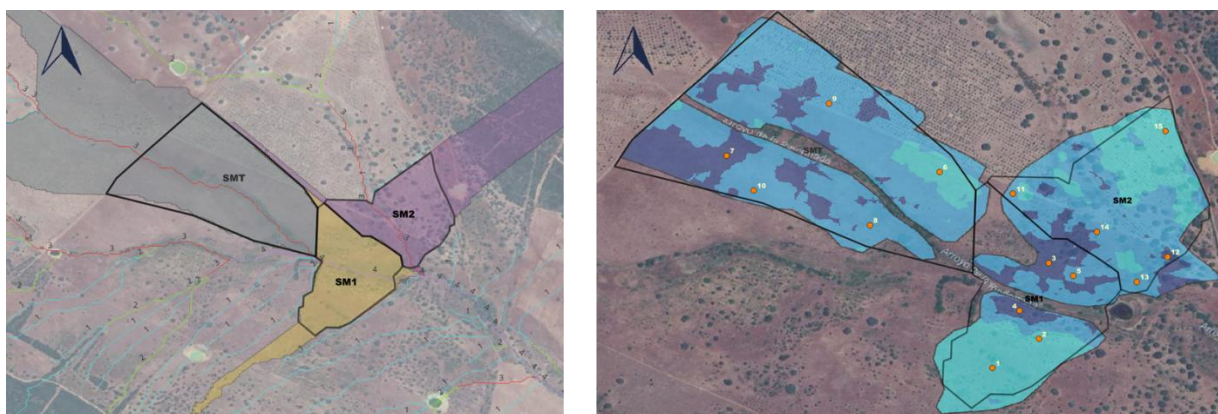


Figura 13. Piloto de FEHEDESA en Mérida (Badajoz, España). Integración de la cartografía hidrológica (delimitación de subcuencas basada en red de drenaje y acumulación de flujo) y la variabilidad edáfica (mapa de conductividad eléctrica aparente del suelo, CEa) para la definición de la red de puntos de muestreo de suelo.

3.1.2. Frecuencia.

La monitorización de suelos se ha realizado mediante campañas de muestreo periódicas a lo largo del ciclo de cultivo y del periodo de ejecución de los pilotos, con el objetivo de capturar la evolución temporal de las distintas fracciones de fósforo en relación con los manejos aplicados y las condiciones climáticas.

Con carácter general, el protocolo común del proyecto establece una secuencia de muestreo estructurada en seis campañas, que incluyen:

- 1 muestreo inicial de referencia, previo a la aplicación de las medidas, para la caracterización de partida del suelo.
- 4 muestreos intermedios, distribuidos en momentos clave del ciclo del cultivo o del sistema (desarrollo vegetativo, periodos de fertilización o eventos relevantes).
- 1 muestreo final, orientado a evaluar el efecto acumulado de las prácticas implementadas.

Esta frecuencia permite analizar tanto la variabilidad estacional como la respuesta del sistema a los manejos agronómicos y ganaderos, así como su interacción con episodios climáticos (precipitaciones, periodos secos, etc.), que pueden influir de forma significativa en la movilización del fósforo.

No obstante, la frecuencia exacta y el calendario de muestreo pueden presentar ligeras variaciones entre pilotos, en función de:

- el sistema productivo (cultivo anual, sistema ganadero, etc.),
- las condiciones climáticas locales,
- las limitaciones operativas de cada zona.

Durante el periodo de ejecución de las campañas de muestreo, se registraron episodios de precipitaciones intensas y persistentes en la Península Ibérica y el sur de Francia,

especialmente durante el periodo invernal y comienzos de primavera, lo que condicionó la operatividad en campo en varios pilotos.

Estas condiciones provocaron situaciones de saturación del suelo, encharcamiento y limitaciones de acceso a las parcelas, impidiendo la ejecución de una de las campañas de muestreo intermedio previstas en el protocolo inicial.

Como consecuencia, en algunos pilotos se dispone de tres muestreos intermedios en lugar de cuatro, manteniéndose en todo caso el muestreo inicial y el muestreo final, así como la coherencia temporal del seguimiento. Esta circunstancia no compromete la validez del análisis, dado que el resto de campañas permiten capturar adecuadamente la evolución de las variables monitorizadas y la respuesta del sistema a los manejos aplicados.

Cabe destacar que los episodios de precipitación registrados constituyen, en sí mismos, eventos de interés para el análisis de la dinámica del fósforo, al estar asociados a procesos de escorrentía y movilización de nutrientes.

3.1.3. Parámetros analizados relacionados con fósforo.

La monitorización de suelo se ha centrado en la determinación de distintos parámetros relacionados con la disponibilidad, acumulación y movilidad del fósforo, con el objetivo de caracterizar su dinámica en función de los manejos aplicados y de las condiciones edafoclimáticas de cada piloto.

Con carácter general, los análisis realizados incluyen tanto formas disponibles como formas totales de fósforo, así como parámetros edáficos que influyen directamente en su comportamiento.

a) Fósforo disponible (P Olsen)

El fósforo disponible se ha determinado mediante el método Olsen, ampliamente utilizado en suelos de carácter calizo o neutro, predominantes en varios de los pilotos del proyecto.

Este parámetro representa la fracción de fósforo potencialmente asimilable por las plantas y constituye un indicador clave para:

- evaluar el estado nutricional del suelo,
- analizar la eficiencia de la fertilización,
- detectar posibles situaciones de exceso que puedan derivar en pérdidas por escorrentía.

b) Fósforo total

El fósforo total permite cuantificar el contenido global de fósforo presente en el suelo, incluyendo tanto las fracciones disponibles como las formas no disponibles.

Su determinación es fundamental para:

Phos4Cycle

- evaluar procesos de acumulación a largo plazo,
- analizar el impacto de prácticas como la fertilización o la deposición de deyecciones,
- contextualizar los valores de fósforo disponible.

c) Determinación de la incertidumbre analítica

Permite asegurar la trazabilidad y robustez de los datos obtenidos, especialmente en análisis comparativos multitemporales entre subcuencas y tratamientos.

d) Parámetros edáficos relacionados

De forma complementaria, se analizan parámetros edáficos que influyen directamente en la dinámica del fósforo:

- pH: factor determinante en la solubilidad del fósforo. En suelos alcalinos, el fósforo tiende a precipitar en formas menos disponibles, especialmente en presencia de calcio.
- Carbonatos totales: condicionan la fijación del fósforo en formas cálcicas poco solubles, influyendo en su disponibilidad e inmovilización.
- Materia orgánica: puede favorecer tanto la retención del fósforo mediante complejación como su liberación progresiva a través de procesos de mineralización.
- Conductividad eléctrica: aporta información sobre el estado químico general del suelo y posibles condiciones que modifiquen la movilidad del fósforo en solución.
- Textura (determinada en el muestreo inicial): incluyendo los porcentajes de arena, limo y arcilla. La fracción arcillosa es especialmente relevante, ya que incrementa la capacidad de adsorción de fósforo y puede influir en el transporte particulado en episodios de escorrentía.

e) Relación con el manejo

El conjunto de parámetros analizados permite evaluar el efecto de las distintas estrategias implementadas en los pilotos, incluyendo:

- ajuste de fertilización,
- aplicación de biochar,
- implantación de cubiertas vegetales,
- manejo ganadero y control de la carga animal,
- modificación de la alimentación animal (fitasas).

De esta forma, se puede analizar la evolución del fósforo tanto desde el punto de vista agronómico (disponibilidad para el cultivo) como ambiental (riesgo de movilización y pérdida).

3.1.4. Registro de manejos agronómicos.

El seguimiento de los parámetros de suelo se ha complementado con un registro sistemático de los manejos agronómicos y ganaderos aplicados en cada piloto, con el objetivo de contextualizar la evolución de las variables analizadas y facilitar la interpretación de la dinámica del fósforo en el sistema.

Este registro incluye información relativa a las prácticas realizadas en cada subcuenca, permitiendo establecer relaciones directas entre el manejo aplicado y los resultados obtenidos en los análisis de suelo.

a) Manejo de fertilización

En los pilotos agrícolas se ha registrado la información relativa a la fertilización, incluyendo:

- tipo de fertilizante (mineral u orgánico),
- dosis aplicada,
- momento de aplicación,
- cuando procede, estrategia de ajuste en función del balance de nutrientes.

En particular, se han documentado prácticas como:

- fertilización convencional del agricultor (parcelas de referencia),
- fertilización ajustada en función de las características del suelo y del cultivo,
- combinación de fertilización con enmiendas como biochar.

Este registro resulta fundamental para interpretar la evolución del fósforo disponible y total en relación con las entradas de nutrientes al sistema.

b) Manejo del suelo y del cultivo

Se ha recogido información sobre las operaciones agronómicas realizadas en cada piloto, incluyendo:

- preparación del suelo,
- implantación y desarrollo del cultivo,
- establecimiento de cubiertas vegetales (cuando aplica),
- fechas de siembra, desarrollo y cosecha.

En el caso de La Rioja, este seguimiento adquiere especial relevancia al estar directamente vinculado a los momentos fenológicos utilizados como referencia para el muestreo de suelo.

c) Aplicación de medidas preventivas

El registro incluye la identificación y caracterización de las medidas implementadas en cada subcuenca, tales como:

- aplicación de biochar,
- implantación de cubiertas vegetales,
- ajuste de la fertilización,

- otras prácticas orientadas a mejorar la retención de nutrientes.

En cada caso, se ha documentado el momento de aplicación y las condiciones en las que se han llevado a cabo, permitiendo evaluar su efecto sobre la dinámica del fósforo.

d) Manejo ganadero

En los pilotos con componente ganadero (FEDEHESA e ITAVI), se ha registrado información específica sobre:

- carga ganadera,
- distribución espacial del pastoreo o uso del terreno,
- zonas de exclusión de ganado (cuando aplica),
- prácticas de manejo adaptativo.

En el caso del piloto ITAVI, se ha incorporado además información relativa a la alimentación animal, incluyendo la modificación de la ración mediante la incorporación de fitasas, lo que permite analizar su efecto sobre la composición de las deyecciones y la entrada de fósforo al sistema.

e) Relación con la monitorización

El registro de manejos permite interpretar los resultados obtenidos en los análisis de suelo en función de:

- las entradas de fósforo al sistema (fertilización, deyecciones),
- las prácticas que afectan a su retención o movilización (manejo del suelo, cubiertas),
- la distribución espacial de los aportes (especialmente en sistemas ganaderos).

De esta forma, se establece una relación directa entre el manejo aplicado y la evolución de los parámetros analizados, permitiendo identificar los factores que condicionan la dinámica del fósforo en cada piloto.

El conjunto de información recogida relativa a los manejos agronómicos y ganaderos constituye un elemento clave para la interpretación de los resultados analíticos y su integración en el modelo final del proyecto.

La combinación de estos datos con la información obtenida en la monitorización de suelo, sedimentos y agua permitirá establecer relaciones entre prácticas de manejo, condiciones edafoclimáticas y dinámica del fósforo, facilitando la identificación de los factores que condicionan su movilización y acumulación en los distintos sistemas estudiados.

Esta integración resulta fundamental para el desarrollo de herramientas de análisis y modelos predictivos orientados a la gestión sostenible del fósforo a escala de subcuenca.

El conjunto de información recogida relativa a los manejos agronómicos y ganaderos constituye un elemento clave para la interpretación de los resultados analíticos y su integración en el modelo final del proyecto.

La combinación de estos datos con la información obtenida en la monitorización de suelo, sedimentos y agua permitirá establecer relaciones entre prácticas de manejo, condiciones edafoclimáticas y dinámica del fósforo, facilitando la identificación de los factores que condicionan su movilización y acumulación en los distintos sistemas estudiados.

Esta integración resulta fundamental para el desarrollo de herramientas de análisis y modelos predictivos orientados a la gestión sostenible del fósforo a escala de subcuenca.

3.2 Monitorización de sedimentos

La monitorización de sedimentos se ha orientado a la caracterización del transporte de fósforo asociado a partículas del suelo, considerado uno de los principales mecanismos de pérdida de fósforo en sistemas agrícolas y ganaderos.

Dado que una parte significativa del fósforo del suelo se encuentra adsorbida a fracciones finas (limo y arcilla), su movilización está directamente vinculada a procesos de erosión y escorrentía superficial, por lo que el análisis de sedimentos permite evaluar de forma integrada la exportación de fósforo desde las subcuencas.

3.2.1. Localización de puntos de muestreo.

La localización de los puntos de muestreo de sedimentos se ha definido en función de criterios hidrológicos, priorizando aquellas zonas donde se produce la concentración y tránsito de flujos de escorrentía.

En general, los puntos se sitúan en:

- zonas de convergencia de subcuencas,
- tramos de canales naturales de drenaje,
- especialmente en los puntos de salida de cada subcuenca, donde se integran los aportes procedentes de toda la superficie de captación.

Este enfoque permite obtener muestras representativas del material transportado y evaluar el comportamiento del sistema a escala funcional.

La selección de los puntos se ha apoyado en:

- el análisis de la red de drenaje derivada del MDE,
- la identificación de líneas preferentes de flujo,
- la observación directa en campo de zonas con acumulación de sedimentos o evidencia de escorrentía.

La ubicación de los puntos de muestreo se ha georreferenciado e integrado en entorno SIG, permitiendo su representación cartográfica y su relación con las subcuencas y los puntos de muestreo de suelo.

El número de puntos de muestreo definidos en cada piloto (entre uno y tres) responde a la configuración hidrológica del sistema, y en particular al grado de independencia o conectividad entre subcuencas. En aquellos casos en los que las subcuencas convergen en un único punto de salida, se ha establecido un único punto de muestreo representativo del conjunto del sistema. Por el contrario, en pilotos donde las subcuencas presentan salidas diferenciadas o una menor conectividad hidrológica, se han definido varios puntos de muestreo, permitiendo caracterizar de forma independiente el comportamiento de cada unidad.

Este criterio garantiza que la red de muestreo sea coherente con la dinámica real del flujo de agua y sedimentos, evitando redundancias y asegurando la representatividad de las muestras en cada contexto.

Piloto	Nº puntos	Profundidad máxima	Intervalos de muestreo	Observaciones
ITAGRA-Palencia	1 punto	100 cm	0–25, 25–50, 50–75, 75–100	Perfil completo representativo
Gobierno de la Rioja	3 puntos	100 cm	0–25, 25–50, 50–75, 75–100	Variabilidad entre subcuencas
IPC-Calcob Coimbra	3 puntos	100 cm	0–25, 25–50, 50–75, 75–100	Perfil completo en sistema agrícola
IPC-Calcob Aveiro	3 puntos	100 cm	0–25, 25–50, 50–75, 75–100	Suelos con alta variabilidad textural
ITAVI-Francia-	2 puntos	100 cm	0–25, 25–50, 50–75, 75–100	Sistema ganadero
FEDEHESA-Extremadura	3 puntos	50 cm	0–25, 25–50	Profundidad limitada por condiciones del terreno

Tabla 3. Puntos, intervalos y profundidad de muestreo [m] de sedimentos en los pilotos

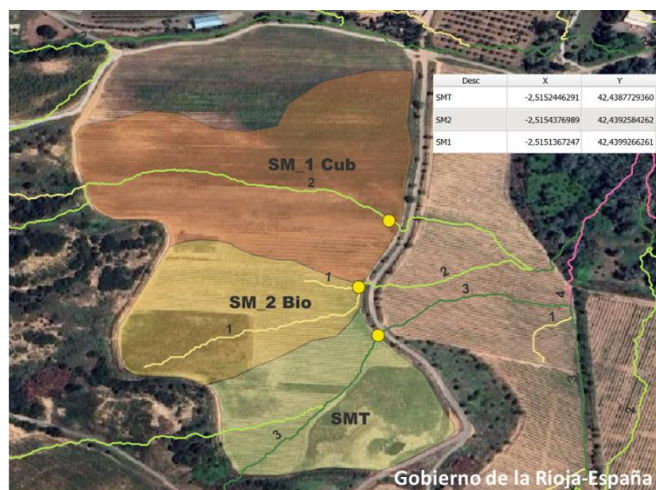
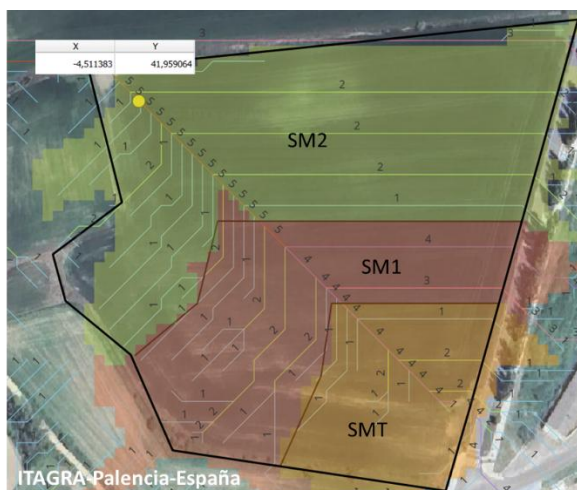


Figura 14. Referencia cartográfica puntos de muestreo de sedimentos en el piloto de ITAGRA CT (izquierda) y en el piloto del Gobierno de la Rioja (derecha), en función a escorrentía de subcuencas

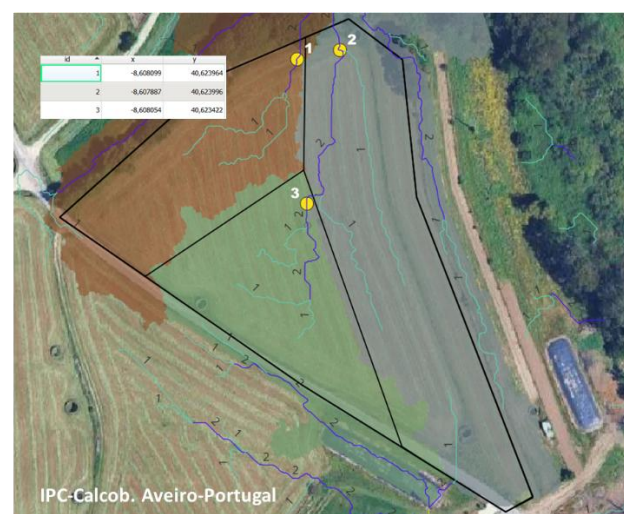
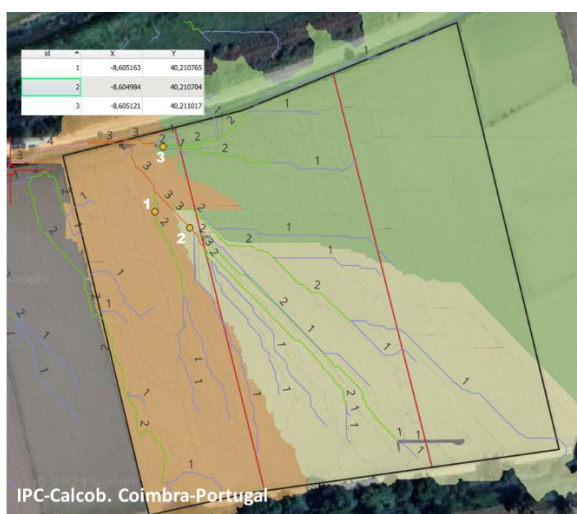


Figura 15. Referencia cartográfica puntos de muestreo de sedimentos en el piloto de IPC-Calcob en Coimbra (izquierda) y en el piloto IPC-Calcob en Aveiro (derecha), en función a escorrentía de subcuencas

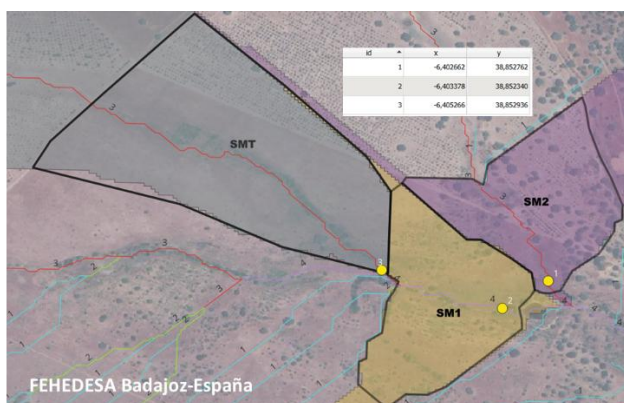


Figura 16. Referencia cartográfica puntos de muestreo de sedimentos en el piloto de ITAVI (izquierda) y en el piloto FEHEDESA (derecha), en función a escorrentía de subcuencas

3.2.2. Frecuencia.

La frecuencia de muestreo de sedimentos se ha definido en función del comportamiento hidrológico del sistema y del enfoque experimental del proyecto.

Con carácter general, se han realizado dos campañas principales de muestreo:

- un muestreo inicial, previo a la aplicación de las medidas correctoras, orientado a caracterizar el estado de partida del sistema,
- un muestreo final, realizado tras la implementación de dichas medidas, con el objetivo de evaluar su efecto sobre el transporte de sedimentos y fósforo asociado.

Este enfoque permite establecer una comparación directa entre la situación inicial y final del sistema, facilitando la evaluación del impacto de las prácticas implementadas en cada piloto.

La combinación de estos enfoques permite analizar tanto la evolución global del sistema como su comportamiento frente a eventos críticos, que constituyen el principal mecanismo de exportación de fósforo en forma particulada.

3.2.3. Tipo de muestra.

La monitorización de sedimentos se ha basado principalmente en la obtención de muestras inalteradas, con el objetivo de preservar la estructura original del material y permitir un análisis más preciso de su composición y distribución vertical.

Las muestras se han extraído mediante dispositivos específicos, como el muestreador de ventana, que permite la recuperación del perfil completo del sedimento con una alteración mínima. Este tipo de muestreo posibilita la obtención de columnas continuas de suelo o sedimento, alcanzando profundidades de hasta 1,5 m, en función de las condiciones del terreno y de la accesibilidad del perfil.

Una vez extraídas, las muestras se procesan en laboratorio, donde se realiza su subdivisión por horizontes o intervalos de profundidad, en función de los objetivos analíticos. Este procedimiento permite:

- analizar la distribución vertical del fósforo,
- diferenciar zonas de acumulación y transporte,
- evaluar la relación entre las distintas fracciones del suelo y el material movilizado.

El uso de muestras inalteradas resulta especialmente relevante en el contexto del proyecto, ya que permite caracterizar no solo la concentración de fósforo, sino también los procesos físicos asociados a su movilización, incluyendo la estructura del sedimento, la proporción de fracciones finas y su potencial de transporte.

Este enfoque proporciona una visión más completa de la dinámica del fósforo en comparación con el uso exclusivo de muestras alteradas, permitiendo interpretar con mayor precisión los procesos de erosión, transporte y deposición dentro de las subcuencas estudiadas.



Figura 17. Obtención de muestras inalteradas mediante muestreador de ventana por ITAGRA, permitiendo la extracción de perfiles completos de sedimento para su análisis vertical en laboratorio.

3.3 Monitorización de agua

La monitorización del agua se ha planteado como un elemento clave para evaluar la exportación de fósforo desde las subcuencas, permitiendo analizar tanto la fracción disuelta como la asociada a sólidos en suspensión en condiciones reales de escorrentía y drenaje.

Para ello, se ha adoptado un enfoque combinado que integra muestreo puntual y monitorización continua, con el objetivo de capturar tanto la variabilidad temporal del sistema como los eventos críticos de movilización de fósforo.

3.3.1. Tipo de monitorización (muestreo puntual / monitorización continuo).

En el marco del proyecto se han empleado dos estrategias complementarias:

- **Muestreo puntual**, mediante la recogida de muestras de agua para su análisis en laboratorio, realizado en momentos representativos del sistema, como episodios de precipitación, periodos de riego o situaciones de baja actividad.
- **Monitorización continua**, mediante la instalación de estaciones automáticas en puntos estratégicos de las subcuencas, permitiendo la obtención de datos con alta frecuencia temporal.

La localización de los puntos de monitorización de agua, tanto en continuo como en discontinuo o puntual, se ha definido en función de criterios hidrológicos, priorizando

aquellas zonas que actúan como puntos de integración de flujos dentro de la subcuenca. En particular, se han seleccionado:

- puntos de salida de las subcuencas o de sistemas de drenaje,
- zonas donde se concentra el flujo superficial o el drenaje artificial,
- localizaciones representativas del comportamiento hidrológico del sistema.

La selección de estos puntos se ha apoyado en el análisis de la red de drenaje derivada del MDE, la identificación de líneas preferentes de flujo y la verificación en campo de la existencia de flujo de agua de forma recurrente o durante eventos de escorrentía.

Asimismo, se ha tenido en cuenta la necesidad de garantizar la representatividad del punto de medida, evitando localizaciones con interferencias externas y asegurando condiciones adecuadas para la instalación y funcionamiento de los equipos de monitorización continua.

En particular, se ha implementado un sistema de monitorización continua desarrollado por AQUACORP, que proporciona estimaciones horarias de los parámetros del agua, permitiendo caracterizar la dinámica del fósforo en relación con eventos hidrológicos y condiciones de manejo.

3.3.2. Tecnología empleada mediciones en continuo

La solución propuesta por AQUACORP se trata de un sistema de monitorización continua proporcionando una estimación cada hora. La solución proporciona estimaciones de la cantidad de agua en el punto de monitorización así como de los parámetros de interés que se indicarán a continuación.

La solución propuesta se basa en la estimación de los parámetros fisicoquímicos del agua utilizando información óptica capturada a través de una cámara multiespectral inteligente. Esta solución se basa en un sistema experto IA que, una vez entrenado conjuntamente con datos ópticos y datos fisicoquímicos, es capaz de realizar estimaciones de los diferentes parámetros fisicoquímicos proporcionando una estimación cada vez que se produce una captura de un paquete de datos ópticos.

Las estimaciones realizadas por este sistema experto se proporcionan al cliente a través de una página web en la cual se puede consultar el histórico de las mismas.

Todos los desarrollos experimentales realizados por AQUACORP se basan en un proceso iterativo de optimización incremental (estructurado en 3 iteraciones) cuyos ciclos contienen varias tareas que se dividen en 5 etapas:

- Diseño/optimización de la estación multiespectral inteligente.
- Fabricación y montaje de la estación multiespectral inteligente.
- Instalación de la estación multiespectral inteligente.
- Calibración, personalización y optimización de la tecnología.
- Control de calidad, análisis de resultados y vuelta a empezar.

Las subtareas realizadas en estas 4 etapas durante cada uno de los 3 ciclos iterativos asociadas a la tarea de monitorización de agua son las relacionadas con la etapa de calibración:

- Muestreo de datos ópticos.
- Muestreo de datos fisicoquímicos.
- Análisis y procesado de datos ópticos. Adecuación y optimización de servicios de visión por computador para disponer de datos ópticos de mayor calidad.
- Entrenamiento y optimización del sistema experto IA.

A continuación, se detallan cada una de estas subtareas y todos los desarrollos experimentales realizados en las mismas.

Muestreo de datos ópticos.

Una vez finalizada la instalación de las estaciones en los tres puntos de monitorización:

- Villamuriel: 06/05/2024
- Orthez: 31/07/2024
- Coímbra: 04/09/2024

Se ha realizado la captura continua de datos ópticos en cada uno de los 3 puntos. Esta captura ha servido para tener todo el espectro de situaciones ópticas diseccionadas.

Cada uno de los paquetes ópticos capturados en cada uno de los puntos contiene la siguiente tipología de datos:

- Imagen RGB sin filtro.
- Imagen RGB con filtro polarizador.
- Luminosidad incidente.
- 8 canales espectrales del agua entre los 440 y los 840nm.
- 8 canales espectrales de la bóveda celeste entre los 440 y los 840nm.

A continuación, se muestran los datos capturados durante el 2025 en cada uno de los 3 puntos.

Imágenes RGB-F	Imágenes RGB-SF	Luminosidad					
30.568	19.431	31.211					
440_nm	470_nm	510_nm	550_nm	583_nm	620_nm	670_nm	840_nm
31.211	31.211	31.211	31.211	31.211	31.211	31.211	31.211
440_nm_ci elo	470_nm_c ielo	510_nm_cielo	550_nm _cielo	583_nm _cielo	620_nm_ cielo	670_nm_ci elo	840_nm_c ielo
31.211	31.211	31.211	31.211	31.211	31.211	31.211	31.211

Tabla 4. Datos capturados en el piloto de ITAGRA

Imágenes RGB-F	Imágenes RGB-SF	Luminosidad					
15.275	14.955	16.702					
440_nm	470_nm	510_nm	550_nm	583_nm	620_nm	670_nm	840_nm
16.702	16.702	16.702	16.702	16.702	16.702	16.702	16.702
440_nm_ci elo	470_nm_c ielo	510_nm_cielo	550_nm _cielo	583_nm _cielo	620_nm_c ielo	670_nm_c ielo	840_nm_c ielo
16.702	16.702	16.702	16.702	16.702	16.702	16.702	16.702

Tabla 5. Datos capturados en el piloto de ITAVI

Imágenes RGB-F	Imágenes RGB-SF	Luminosidad					
16.713	8.674	16.911					
440_nm	470_nm	510_nm	550_nm	583_nm	620_nm	670_nm	840_nm
16.911	16.911	16.911	16.911	16.911	16.911	16.911	16.911
440_nm_ci elo	470_nm_c ielo	510_nm_cielo	550_nm _cielo	583_nm _cielo	620_nm_c ielo	670_nm_c ielo	840_nm_c ielo
16.911	16.911	16.911	16.911	16.911	16.911	16.911	16.911

Tabla 6. Datos capturados en el piloto de IPC-Calcob en Coimbra

Muestreo de datos fisicoquímicos.

Una vez capturados datos ópticos representativos para las diferentes tipologías de agua y bajo los diferentes eventos de interés, se diseñó y llevó a cabo un proceso de muestreo para caracterizar fisicoquímicamente las distintas tipologías ópticas. Este proceso se realizó de forma diferente en cada uno de los puntos de monitorización:

- ◆ Villamuriel:
 - Periodos de riego.
 - Periodos con precipitaciones medias.
 - Periodos con alta precipitación.
- ◆ Orthez:
 - Periodos de riego.
 - Periodos sin actividad.
 - Periodos con los patos fuera de la granja.

- ◆ Coímbra:
 - Periodos sin actividad.
 - Periodos de riego.
 - Periodos con precipitaciones medias.
 - Periodos con alta precipitación.

Un análisis de los diferentes parámetros se llevará a cabo en el apartado 3.3.3. de esta misma memoria.

Análisis y procesamiento de datos ópticos.

En el 2025 se han realizado tareas de análisis y procesamiento de las distintas imágenes, a través de servicios de visión por computador. Estas tareas están dirigidas a la limpieza, adecuación y extracción de todas las características relevantes en los dos puntos de control.

A continuación, se describen los tipos de descriptores extraídos de cada una de las imágenes capturadas:

Primer nivel:

Reflectancia canal R, Reflectancia canal G, Reflectancia canal B

Media canal R, Media canal G, Media canal B

Desviación canal R, Desviación canal G, Desviación canal B

Reflectancia canal H, Reflectancia canal S, Reflectancia canal V

Media canal H, Media canal S, Media canal V

Desviación canal H, Desviación canal S, Desviación canal V

Reflectancia canal L, Reflectancia canal a, Reflectancia canal b

Media canal L, Media canal a, Media canal b

Desviación canal L, Desviación canal a, Desviación canal b

Segundo nivel:

Skewness canal R, Skewness canal G, Skewness canal B

Kurtosis canal R, Kurtosis canal G, Kurtosis canal B

Skewness canal H, Skewness canal S, Skewness canal V

Kurtosis canal H, Kurtosis canal S, Kurtosis canal V

Skewness canal L, Skewness canal a, Skewness canal b

Kurtosis canal L, Kurtosis canal a, Kurtosis canal b

Tercer nivel:

Texture canal R, Texture canal G, Texture canal B

RIM canal R, RIM canal G, RIM canal B

GRP canal R, GRP canal G, GRP canal B

Texture canal H, Texture canal S, Texture canal V

RIM canal H, RIM canal S, RIM canal V

GRP canal H, GRP canal S, GRP canal V

Texture canal L, Texture canal a, Texture canal b

RIM canal L, RIM canal a, RIM canal b

GRP canal L, GRP canal a, GRP canal b

Una vez extraídos, analizados y procesados los descriptores las siguientes tareas tienen que ver con:

- Identificar el rango de variabilidad de cada descriptor.
- Determinar cuáles son los más sensibles y los que más información pueden aportar en cada uno de los tres puntos de control.
- Realizar combinaciones de descriptores relevantes para cada punto de control.

Estos últimos pasos nos han permitido llevar a cabo una selección de aquella información óptica con una mayor capacidad discriminativa. Este ejercicio se ha llevado a cabo de forma independiente para cada uno de los parámetros fisicoquímicos a estimar en cada uno de los tres puntos de monitorización.

Entrenamiento y optimización del sistema experto IA.

Una vez obtenidos, analizados y procesados tanto los datos ópticos como los datos fisicoquímicos, se lleva a cabo un proceso iterativo de entrenamiento y optimización de sistemas expertos capaces de estimar los distintos parámetros fisicoquímicos de interés.

Este proceso se considera iterativo debido a que es un sistema de mejora continua el cual es reforzado con la captura de nuevos datos ópticos.

Este sistema está compuesto de dos etapas:

- a) Identificación y selección de la solución óptima para la estimación de los diferentes parámetros fisicoquímicos.
- b) Optimización del modelo con nuevos datos.

En la primera etapa se han realizado pruebas utilizando diferentes alternativas presentes en el estado del arte que permiten la estimación de parámetros fisicoquímicos. En el caso concreto de este proyecto, se han utilizado estas alternativas:

Modelos de clústering como K-means o Random Forest.

Soluciones de clasificación basadas en SVM (Support Vector Machine).

Soluciones de clasificación y regresión basadas en redes neuronales:

Redes neuronales convolucionales.

Redes recurrentes.

Autoencoders.

Dependiendo del punto y el parámetro a estimar la solución adoptada ha sido diferente:

- En el caso de la distinción de las diferentes tipologías de agua la solución más adoptada es el uso de redes convolucionales.
- Para la estimación de parámetros fisicoquímicos se han utilizado redes recurrentes pero dependiendo del punto de monitorización se han utilizado redes independientes para estimar cada uno de los parámetros o bien una única red capaz de estimar de forma simultánea los diferentes parámetros fisicoquímicos.
- En el caso de detección de ausencia de agua o anomalías en la superficie del agua se han utilizado soluciones basadas en autoencoders.

Para el caso del sistema de optimización iterativo se ha comenzado con el mismo tras la captura de nuevos datos tras el entrenamiento inicial utilizando sistemas de aprendizaje supervisado. El trabajo a desarrollar en el año 2026 va orientado principalmente a mejorar este proceso iterativo con la captura de nuevos datos.

3.3.3. Parámetros monitorizados.

La monitorización del agua se ha centrado en los parámetros clave relacionados con la dinámica del fósforo:

- **Fósforo en agua**, como indicador directo del riesgo de contaminación y de la fracción disuelta potencialmente transportable.
- **Sólidos en suspensión**, estrechamente relacionados con el transporte de fósforo particulado, al actuar como vector de movilización del nutriente.

Para la obtención de estos parámetros se han empleado dos enfoques complementarios: muestreo puntual y monitorización continua, cada uno con una función específica dentro del sistema de seguimiento.

◆ Muestreo puntual o discontinuo

El muestreo puntual se ha basado en la recogida de muestras de agua en campo para su análisis en laboratorio, proporcionando medidas directas y de alta precisión de los parámetros fisicoquímicos.

Estas campañas se han realizado en momentos representativos del sistema, incluyendo:

- periodos de riego,
- episodios de precipitación capaces de generar escorrentía,

Phos4Cycle

- fases sin actividad o con cambios en el manejo, especialmente en sistemas ganaderos.

Este tipo de muestreo permite:

- obtener valores reales de referencia de fósforo y sólidos en suspensión,
- caracterizar condiciones específicas del sistema,
- generar datos de alta calidad para la calibración de otros sistemas de monitorización.

No obstante, su carácter puntual implica una limitación en la resolución temporal, ya que no permite capturar de forma continua la variabilidad del sistema ni eventos de corta duración.

◆ Monitorización continua

La monitorización continua se ha realizado mediante estaciones automáticas equipadas con tecnología multiespectral, capaces de generar estimaciones horarias de los parámetros del agua.

Este sistema permite:

- registrar la evolución temporal del sistema con alta frecuencia,
- identificar picos de concentración asociados a eventos de escorrentía,
- analizar la dinámica del fósforo en relación con condiciones climáticas y de manejo.

El funcionamiento del sistema se basa en la captura de datos ópticos del agua y su procesamiento mediante modelos de inteligencia artificial previamente calibrados con datos fisicoquímicos obtenidos en laboratorio.

Frente al muestreo puntual, la monitorización continua presenta como principal ventaja su alta resolución temporal, aunque requiere un proceso previo de calibración y validación para garantizar la fiabilidad de las estimaciones.

3.4 Monitorización complementaria en sistemas ganaderos

En el piloto desarrollado por ITAVI, se ha incorporado un conjunto de medidas adicionales orientadas a caracterizar la dinámica del fósforo desde su origen en el sistema productivo.

Este enfoque complementa la monitorización ambiental (suelo, sedimentos y agua), permitiendo analizar el fósforo desde una perspectiva integrada que incluye su ingestión, transformación y excreción.

3.4.1 Indicadores de producción y manejo

Se han registrado distintos indicadores zootécnicos con el objetivo de caracterizar el funcionamiento del sistema y su relación con los flujos de fósforo, incluyendo:

Phos4Cycle

- mortalidad diaria,
- peso de los animales,
- consumo de alimento,
- consumo de agua,
- gestión de la cama (peso inicial y reposiciones),
- condiciones climáticas (precipitación).

Estos parámetros permiten contextualizar la producción de deyecciones y su potencial impacto en la acumulación y movilización del fósforo en el sistema.

3.4.2 Seguimiento experimental y calendario de actuaciones

Se ha establecido un calendario de actuaciones que incluye distintas fases del ciclo productivo, tales como:

- entrada de animales,
- transferencia entre fases de producción,
- periodos de alimentación controlada,
- recogida de deyecciones (frescas y compostadas),
- salida de animales.

Durante estas fases se han realizado muestreos y mediciones orientadas a caracterizar tanto el estado de los animales como la generación de residuos orgánicos.

3.4.3 Análisis de fósforo en el sistema productivo

Se han llevado a cabo distintos análisis para caracterizar el comportamiento del fósforo en el sistema ganadero:

♦ Alimentación

- fósforo total
- proteínas
- materia grasa
- calcio
- sodio

♦ Deyecciones (fientes y estiércol)

Se ha evaluado el fósforo móvil mediante ensayos de percolación que simulan condiciones de precipitación, permitiendo estimar la fracción susceptible de ser lixiviada o movilizada.

♦ Balance de masa

Se ha realizado un balance de fósforo a escala de sistema, considerando:

- fósforo ingerido (alimentación),
- fósforo retenido (crecimiento animal),
- fósforo excretado (deyecciones),

lo que permite estimar la fracción potencialmente transferida al suelo y al medio.

◆ Ensayos complementarios

Se han realizado ensayos adicionales, como pruebas de mineralización en muestras biológicas, con el objetivo de evaluar la eficiencia en la utilización del fósforo por parte de los animales.

3.4.4 Integración con la monitorización ambiental

La información generada en este bloque permite complementar la interpretación de los resultados obtenidos en suelo, sedimentos y agua, estableciendo una relación directa entre:

- la alimentación animal,
- la producción de deyecciones,
- la entrada de fósforo al sistema.

Este enfoque resulta especialmente relevante para comprender la dinámica del fósforo en sistemas ganaderos, donde las fuentes de aporte están directamente ligadas a la gestión de los animales.

4. Medidas de manejo evaluadas

4.1 Enfoque funcional de las medidas sobre la dinámica del fósforo

Las medidas de manejo implementadas en los distintos pilotos, descritas en el apartado 2.2, han sido diseñadas con el objetivo de actuar de forma directa sobre los principales procesos que controlan la dinámica del fósforo en sistemas agrícolas y ganaderos.

El fósforo en el sistema suelo-agua se comporta como un elemento fuertemente condicionado por interacciones fisicoquímicas y procesos hidrológicos, donde su disponibilidad, acumulación y movilización dependen tanto de las entradas al sistema como de las condiciones del medio y del manejo aplicado.

Desde un punto de vista funcional, las medidas evaluadas pueden agruparse en tres grandes categorías:

a) Medidas orientadas a la reducción de las entradas de fósforo

Estas medidas buscan minimizar la incorporación de fósforo al sistema, actuando sobre las fuentes primarias de aporte:

- ajuste de la fertilización en función de las necesidades reales del cultivo y del estado del suelo,
- optimización del uso de nutrientes mediante estrategias de balance,
- mejora de la eficiencia de utilización del fósforo en alimentación animal mediante el uso de fitasas.

Estas actuaciones permiten reducir el riesgo de acumulación progresiva de fósforo en el suelo, evitando situaciones de saturación que incrementan la probabilidad de pérdidas por escorrentía o lixiviación.

b) Medidas orientadas a la mejora de la retención del fósforo en el suelo

Este grupo de medidas actúa sobre la capacidad del suelo para retener el fósforo y limitar su disponibilidad para procesos de movilización:

- aplicación de enmiendas como biochar, con alta capacidad de adsorción,
- incremento del contenido de materia orgánica,
- mejora de la estructura del suelo.

Estas prácticas favorecen la inmovilización del fósforo en formas menos móviles, incrementando la capacidad tampón del suelo y reduciendo su transferencia hacia el agua.

c) Medidas orientadas a la reducción de la movilización del fósforo

Estas medidas se centran en limitar los procesos físicos que favorecen el transporte del fósforo, especialmente en su fracción particulada:

- implantación de cubiertas vegetales,
- reducción de la erosión y mejora de la infiltración,
- control de la escorrentía superficial,
- gestión de la carga ganadera y distribución espacial de deyecciones.

Su objetivo es disminuir la conectividad hidrológica y la capacidad del sistema para exportar sedimentos, reduciendo así el transporte de fósforo asociado a partículas.

4.2 Relación entre medidas y procesos de transporte del fósforo

Las medidas implementadas han sido diseñadas para actuar de forma específica sobre los principales mecanismos de transporte del fósforo identificados en el sistema:

- Transporte en fase disuelta, relacionado con la concentración de fósforo disponible en el suelo y su interacción con el agua, especialmente en condiciones de saturación o drenaje.
- Transporte en fase particulada, asociado a procesos de erosión, escorrentía y movilización de sedimentos.

Las estrategias aplicadas permiten actuar sobre ambos mecanismos de forma complementaria:

- reduciendo la disponibilidad de fósforo susceptible de disolución,
- incrementando su retención en el suelo,
- limitando los procesos físicos responsables de su transporte.

Este enfoque integrado permite abordar la problemática del fósforo desde una perspectiva sistémica, considerando tanto las fuentes como los mecanismos de transferencia.

4.3 Coherencia del diseño experimental

El diseño experimental basado en la delimitación de subcuencas con diferentes manejos permite evaluar la eficacia de las medidas en condiciones reales, manteniendo la comparabilidad entre tratamientos y asegurando la coherencia metodológica del conjunto del proyecto.

La utilización de subcuencas como unidades funcionales de análisis permite integrar procesos hidrológicos, edáficos y de manejo, analizar la respuesta del sistema a escala real y evaluar el impacto de las medidas sobre la exportación de fósforo.

Este enfoque facilita la interpretación conjunta de los resultados obtenidos en los distintos bloques de monitorización (suelo, sedimentos y agua), permitiendo establecer relaciones directas entre prácticas de manejo, condiciones del medio y respuesta del sistema.

4.4 Contribución al análisis integrado y a la modelización

El conjunto de medidas evaluadas constituye la base para el análisis integrado del proyecto, permitiendo generar conocimiento sobre la eficacia de distintas estrategias de manejo en la reducción del riesgo de contaminación por fósforo.

La información derivada de su aplicación, combinada con los datos de monitorización, permite:

identificar los factores que controlan la dinámica del fósforo,

evaluar la eficiencia de las medidas en distintos contextos edafoclimáticos,

y establecer relaciones causa–efecto entre manejo y respuesta ambiental.

Este conocimiento será fundamental para el desarrollo de modelos de análisis y herramientas de apoyo a la toma de decisiones, orientadas a la gestión sostenible del fósforo a escala de subcuenca y su extrapolación a otros territorios.

5. Observaciones técnicas y cualitativas

Este apartado recoge observaciones técnicas, incidencias y lecciones aprendidas no directamente reflejadas en los resultados gráficos del apartado 6

5.1. Tendencias observadas.

De forma general, los resultados obtenidos en los distintos pilotos confirman que la dinámica del fósforo está fuertemente condicionada por los procesos hidrológicos, siendo los episodios de precipitación y escorrentía los principales responsables de su movilización, especialmente en forma particulada. En este sentido, los ensayos realizados en sistemas agrícolas, como el piloto de La Rioja, muestran que la turbidez del agua de escorrentía y, por tanto, el transporte de sólidos en suspensión, depende en gran medida del momento de muestreo dentro del evento de precipitación. Así, cuando el muestreo se realiza en fases activas del flujo, se detectan diferencias claras entre manejos, mientras que en condiciones de acumulación y decantación dichas diferencias tienden a atenuarse.

En sistemas con menor pendiente y mayor estabilidad estructural, como el caso de ITAGRA, no se observan cambios significativos a corto plazo en los niveles de fósforo disponible, lo que resulta coherente con suelos agrícolas con historial prolongado de manejo y con una dinámica dominada por procesos lentos de equilibrio. En estos contextos, el transporte de fósforo parece estar más asociado a eventos puntuales que a procesos continuos de pérdida de suelo.

En sistemas ganaderos, como el piloto de ITAVI, se evidencia que la gestión en origen, particularmente la alimentación animal, tiene un impacto directo en los flujos de fósforo. La incorporación de fitasas en la dieta reduce de forma significativa los niveles de fósforo soluble en las deyecciones, sin afectar de manera relevante a los parámetros productivos, lo que confirma el potencial de estas estrategias para disminuir la carga de fósforo en el sistema.

Los resultados ponen de manifiesto la importancia de considerar simultáneamente la variabilidad espacial (subcuencas, zonas de uso) y temporal (eventos hidrológicos), así como la necesidad de combinar técnicas de monitorización para captar adecuadamente la dinámica del fósforo.

5.2. Incidencias relevantes.

Durante la ejecución de los pilotos se han registrado diversas incidencias que han condicionado parcialmente el desarrollo de las actividades, principalmente relacionadas con factores climáticos y operativos. En varios territorios, los episodios de precipitaciones intensas han dificultado la realización de campañas de muestreo, tanto por problemas de accesibilidad como por la imposibilidad de capturar determinados eventos en condiciones óptimas.

En la Península Ibérica y el sur de Francia, se registró un periodo de elevada pluviometría entre septiembre de 2025 y febrero de 2026, que afectó especialmente a los pilotos de ITAGRA (Castilla y León), FEDEHESA (Extremadura) y Portugal (Coimbra y Aveiro), impidiendo la realización de algunos muestreos intermedios y condicionando la planificación de campo.

En el caso de Portugal, las incidencias fueron especialmente relevantes. Entre finales de enero y principios de febrero de 2026 se produjeron episodios de lluvias intensas e inundaciones, particularmente en el piloto de Coimbra, que provocaron el anegamiento de la parcela experimental y pudieron afectar a la representatividad de algunos resultados. En el piloto de Aveiro, la localización inicial del ensayo presentó una elevada susceptibilidad a inundaciones invernales, lo que obligó a reubicar parcialmente el piloto y retrasar su inicio. Adicionalmente, la falta de flujo en la red de drenaje en determinados periodos limitó la recogida de muestras de agua, que solo pudo realizarse tras episodios de lluvia intensa en febrero de 2026.

En otros pilotos, como La Rioja, la principal incidencia estuvo asociada a la dificultad de sincronizar el muestreo con los eventos de escorrentía, especialmente cuando estos se producían en horario nocturno, lo que generó desfases temporales en la recogida de muestras. En FEDEHESA, las condiciones meteorológicas excepcionales y la accesibilidad al terreno en episodios de lluvia intensa condicionaron la ejecución de los trabajos de campo.

A pesar de estas incidencias, en ningún caso se ha visto comprometida la validez global del diseño experimental, si bien ha sido necesario introducir ajustes operativos para garantizar la continuidad del proyecto.

5.3. Limitaciones detectadas.

El desarrollo de los pilotos ha puesto de manifiesto una serie de limitaciones asociadas a la implementación y seguimiento de este tipo de actuaciones en condiciones reales de explotación, donde la variabilidad del sistema y los condicionantes externos influyen de manera directa en la obtención de datos.

Una de las principales limitaciones identificadas está relacionada con la **dependencia del momento de muestreo**, especialmente en el caso de las aguas de escorrentía. La naturaleza episódica de estos procesos implica que la representatividad de las muestras puede verse condicionada por el desfase temporal entre el evento de precipitación y la toma de muestra, lo que puede afectar a la estimación de sólidos en suspensión y del fósforo asociado.

Asimismo, la **ausencia o limitación de sistemas automáticos de recogida de escorrentía** en algunos pilotos ha requerido la realización de muestreos manuales, condicionados por la disponibilidad operativa y la accesibilidad a las parcelas, lo que ha dificultado la captura de determinados eventos en condiciones óptimas.

En determinados contextos, como los sistemas con drenaje artificial en Portugal, la **complejidad del comportamiento hidrológico** ha introducido dificultades adicionales en la interpretación de los flujos de agua y en la identificación de puntos representativos de muestreo, al no depender exclusivamente de procesos de escorrentía superficial.

En sistemas ganaderos, la **heterogeneidad espacial de las deyecciones y de los materiales orgánicos** ha dificultado en algunos casos la obtención de muestras plenamente representativas, debido a la variabilidad en la distribución y acumulación dentro de las instalaciones.

Por otra parte, factores externos como **episodios climáticos excepcionales, inundaciones o cambios en la disponibilidad de parcelas** han condicionado el desarrollo de algunos pilotos, obligando a adaptar la planificación inicial y a ajustar el calendario de actuaciones.

En sistemas con baja pendiente y limitada dinámica erosiva, como el piloto de ITAGRA, la **baja intensidad de los procesos de movilización** puede dificultar la observación de diferencias claras a corto plazo, siendo necesario considerar horizontes temporales más amplios para una adecuada interpretación del comportamiento del sistema.

5.4. Lecciones aprendidas en la implantación del piloto.

El desarrollo de los pilotos ha permitido identificar una serie de lecciones clave para la implementación de estrategias de gestión del fósforo en condiciones reales, tanto desde el punto de vista técnico como operativo, con un claro enfoque hacia su aplicabilidad y replicabilidad en otros contextos.

En primer lugar, se confirma la importancia de disponer de un **diseño previo basado en unidades funcionales**, como las subcuencas, que permita integrar los procesos hidrológicos y estructurar de forma coherente la monitorización. La combinación de herramientas SIG con el conocimiento del terreno ha resultado esencial para validar en campo las delimitaciones teóricas y asegurar la representatividad de los puntos de muestreo.

Asimismo, se ha puesto de manifiesto que la monitorización de procesos asociados al fósforo requiere la **combinación de diferentes metodologías**, siendo especialmente relevante integrar muestreo puntual con sistemas de monitorización continua. Este enfoque permite capturar tanto la precisión analítica como la dinámica temporal del sistema, especialmente en procesos dominados por eventos de corta duración.

Desde el punto de vista operativo, se evidencia la necesidad de **incorporar sistemas de muestreo adaptados a eventos**, capaces de recoger muestras de forma autónoma y representativa, reduciendo la dependencia de la presencia en campo y mejorando la calidad de los datos obtenidos en episodios de escorrentía.

En sistemas ganaderos, la experiencia demuestra que la **gestión en origen**, particularmente a través de la alimentación animal, constituye una herramienta eficaz

para reducir las cargas de fósforo en el sistema, con un impacto directo sobre las deyecciones y sin afectar negativamente a los parámetros productivos. Este enfoque se posiciona como una estrategia de alto potencial para su aplicación en otros sistemas similares.

Por otro lado, se ha constatado que la implementación de medidas de manejo en condiciones reales requiere una **adaptación continua a las condiciones del sistema**, incluyendo factores climáticos, edáficos y operativos. La flexibilidad en la planificación y la capacidad de ajuste ante incidencias resultan elementos clave para garantizar la viabilidad de los pilotos.

Finalmente, se pone de manifiesto que los procesos de mejora del comportamiento del fósforo en el suelo y su reducción en la exportación hacia el agua presentan, en muchos casos, un **carácter progresivo**, por lo que la interpretación de los resultados debe realizarse en un contexto temporal adecuado. Esto refuerza la necesidad de mantener sistemas de monitorización en el tiempo y de plantear estos enfoques desde una perspectiva de continuidad.

En conjunto, las lecciones aprendidas evidencian la importancia de abordar la gestión del fósforo desde un enfoque integrado, combinando conocimiento técnico, monitorización adaptada y prácticas de manejo ajustadas a las condiciones reales de cada sistema, como base para el desarrollo de estrategias transferibles y sostenibles.

6. Modelización de las pérdidas de fósforo en sistemas agropecuarios

En el marco del proyecto, se está implementando el modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) (Ecuación 1) como base metodológica para la estimación de pérdidas de suelo y su posterior traducción en pérdidas de fósforo en distintos sistemas agroganaderos. Este enfoque permite modelizar el comportamiento del fósforo asociado a procesos de erosión hídrica, integrando variables climáticas, edáficas, topográficas y de manejo del cultivo o de explotaciones ganaderas.

$$A(RUSLE) = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Ecuación 1. Modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)

La parametrización del modelo se realiza a partir de fuentes de datos abiertas y estandarizadas. En concreto, como se observa en la Figura 1, se emplean modelos digitales del terreno (MDT) para la derivación del factor topográfico (LS), datos de ocupación del suelo procedentes del SIOSE para la caracterización del factor de cobertura (C), información edafológica (contenido de arena, limo, arcilla y carbono orgánico del suelo) para la estimación del factor de erodabilidad (K), y series de precipitación media anual para el cálculo del factor de erosividad de la lluvia (R). El factor de prácticas de conservación (P) se define a partir de información específica de manejo

recopilada en el proyecto, incluyendo tipo de cultivo o explotación, labores realizadas y estrategias de gestión aplicadas en cada caso.

Estimación de factores del RUSLE

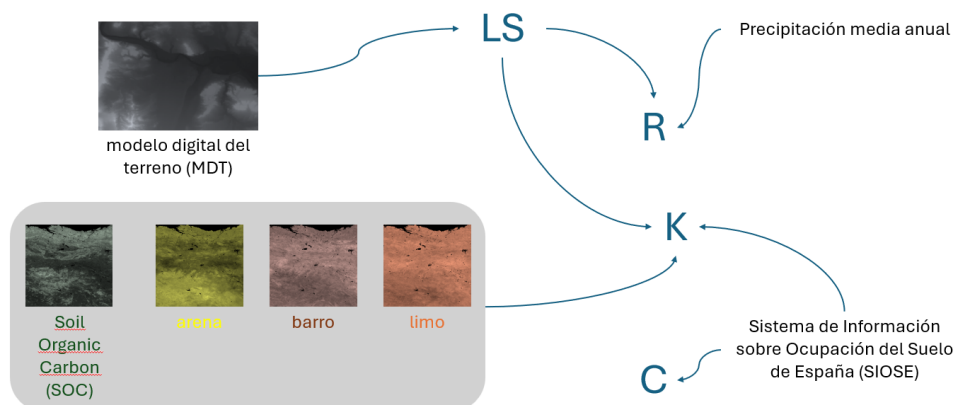


Figura 18. Fuentes de información para la estimación de los factores que componen el cálculo de la pérdida de suelos según el modelo RUSLE

El modelo permite obtener la pérdida de suelo anual (A , t/ha/año), que posteriormente se transforma en pérdida de fósforo ($A_{\text{fósforo}}$) mediante la incorporación del contenido de fósforo en el suelo (P_{content}). De este modo, se cuantifica la exportación potencial de fósforo asociada a la erosión, lo que resulta clave tanto para evaluar la degradación de la fertilidad del suelo como para estimar riesgos de contaminación difusa en masas de agua, lo que puede causar eutrofización.

La aplicación inicial del modelo se realiza en los seis pilotos adoptados en el proyecto Phos4cycle, representativos de distintos sistemas productivos: cereales, hortícolas, viñedo, forrajes, ganado ovino y producción de patos. Estos casos permiten calibrar y validar el modelo bajo condiciones reales de manejo. No obstante, el alcance del trabajo se ampliará mediante la integración de datos de acceso abierto adicionales, con el fin de generar escenarios simulados que abarquen una mayor diversidad de condiciones agroclimáticas y prácticas de gestión (Figura 19).

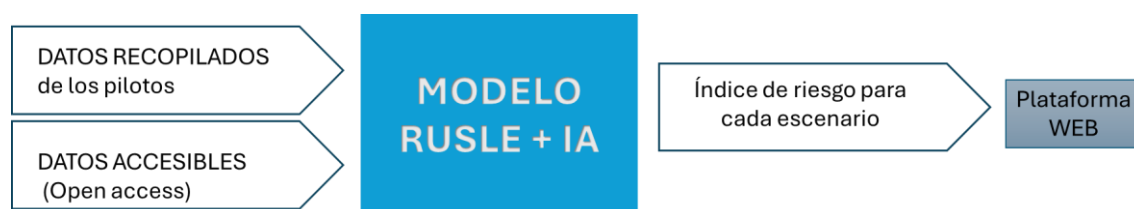


Figura 19. Diagrama simplificado de la modelización de los datos para la obtención de escenarios de riesgo para la pérdida de fósforo.

Asimismo, se está haciendo uso de técnicas de inteligencia artificial, como redes neuronales, para el ajuste y mejora del modelo, mediante el recalibrado global del RUSLE y la optimización de factores específicos, especialmente el factor P , que es altamente dependiente de las prácticas

de manejo. La incorporación de estos enfoques permite procesar grandes volúmenes de datos heterogéneos procedentes tanto de los pilotos del proyecto como de fuentes externas (datos climáticos históricos, propiedades del suelo, usos del territorio, prácticas agronómicas, etc.), identificando patrones no lineales y relaciones complejas que no son fácilmente capturadas mediante formulaciones empíricas tradicionales.

En este contexto, las redes neuronales actúan como modelos de aprendizaje supervisado que, a partir de datos observados de pérdidas de suelo y fósforo, son capaces de ajustar los parámetros del RUSLE para reducir desviaciones entre valores estimados y reales. Esto se traduce en una mejora significativa de la capacidad predictiva del modelo, especialmente en escenarios con alta variabilidad espacial y temporal. Además, permiten incorporar de forma dinámica nuevas variables o condiciones de manejo, facilitando la adaptación del modelo a distintos sistemas productivos y contextos agroclimáticos.

El uso de inteligencia artificial también posibilita la actualización continua del modelo conforme se incorporan nuevos datos, generando un sistema más robusto y escalable. De esta manera, no solo se optimiza el factor P en función de prácticas como la aplicación de biochar, el uso de cubiertas vegetales o la fertilización variable, sino que se mejora el comportamiento global del modelo, reduciendo la incertidumbre en la estimación de pérdidas de fósforo y aumentando su utilidad como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en el marco del proyecto Phos4Cycle.

Como resultado de la modelización, tal como se indica en la figura 19, se prevé el desarrollo de una plataforma digital orientada a usuarios finales (agricultores, ganaderos, cooperativas, empresas de gestión, administraciones públicas, etc.), que permitirá estimar las pérdidas de fósforo bajo distintos escenarios y evaluar el impacto de la adopción de prácticas de manejo sostenible. Entre estas prácticas se incluyen las propuestas en Phos4Cycle, como la aplicación de biochar, el uso de cubiertas vegetales, la fertilización variable o la implementación de técnicas de conservación del suelo, entre otras. Esta herramienta facilitará la toma de decisiones basada en evidencia, contribuyendo a la reducción de pérdidas de fósforo y a una gestión más eficiente y sostenible de los sistemas agroganaderos.

7. Contribución de los pilotos al proyecto

Los pilotos desarrollados en el marco del proyecto han permitido generar un conocimiento aplicado sobre la dinámica del fósforo en distintos sistemas productivos del espacio SUDOE, integrando condiciones edafoclimáticas, modelos de manejo y configuraciones hidrológicas diversas.

La combinación de enfoques —agrícola, ganadero e intensivo de regadío— junto con la aplicación de metodologías comunes de delimitación de subcuencas y monitorización integrada, ha permitido avanzar hacia una comprensión sistémica del comportamiento del fósforo, tanto en su fase disuelta como particulada.

Este enfoque ha facilitado la identificación de factores clave que condicionan la movilización del fósforo, así como la evaluación de distintas estrategias de manejo en condiciones reales, aportando una base sólida para la construcción de un modelo común de análisis y gestión.

7.1 Valor de los pilotos para el modelo común

Los distintos pilotos han aportado información complementaria que resulta clave para el desarrollo del modelo común del proyecto, permitiendo integrar la variabilidad asociada a distintos contextos territoriales y productivos.

En sistemas agrícolas extensivos, como ITAGRA, se ha contribuido a definir el comportamiento del fósforo en condiciones de baja pendiente y limitada erosión, donde los procesos están dominados por eventos puntuales y la dinámica edáfica presenta una elevada estabilidad. En el caso de La Rioja, el piloto ha permitido profundizar en la relación entre manejo del suelo, escorrentía y transporte de sedimentos, destacando la importancia del momento de muestreo y de la gestión de la cobertura del suelo.

Los pilotos ganaderos, como FEDEHESA e ITAVI, han aportado una visión complementaria centrada en la generación y distribución del fósforo en origen. En particular, el enfoque de ITAVI ha permitido cuantificar el efecto de la alimentación animal sobre la reducción de los aportes de fósforo al sistema, mientras que FEDEHESA ha evidenciado la complejidad de estos procesos en sistemas extensivos, donde la distribución espacial del ganado condiciona los patrones de acumulación.

Por su parte, los pilotos de Portugal han contribuido a incorporar al modelo la complejidad de los sistemas de regadío con drenaje artificial, donde la dinámica del fósforo está fuertemente influenciada por la gestión del agua y la conectividad hidráulica.

La diversidad de situaciones analizadas ha permitido construir un modelo común robusto, capaz de integrar diferentes mecanismos de transporte y contextos de manejo.

7.2 Transferibilidad a otros territorios

Los resultados obtenidos en los distintos pilotos presentan un alto potencial de transferibilidad, al haberse desarrollado en condiciones reales de explotación y en sistemas representativos del espacio SUDOE.

La metodología basada en la delimitación de subcuencas, la combinación de monitorización puntual y continua, y la integración de información de manejo, constituye un enfoque replicable en otros territorios, independientemente del tipo de sistema productivo.

Asimismo, las medidas evaluadas, tanto en sistemas agrícolas como ganaderos, son aplicables en contextos similares, si bien su eficacia dependerá de factores locales como el clima, la tipología de suelo o la estructura del sistema productivo.

Especialmente relevante es la transferibilidad de estrategias que actúan en origen, como la optimización de la fertilización o la mejora de la eficiencia en la alimentación animal, así como aquellas orientadas a reducir la movilización del fósforo mediante el control de la escorrentía.

En este sentido, los pilotos han permitido identificar soluciones prácticas y adaptables, que pueden ser incorporadas en políticas de gestión o en herramientas de apoyo a la toma de decisiones.

7.3 Aspectos clave a considerar en la estrategia y guía

A partir de la experiencia adquirida en los distintos pilotos, se identifican una serie de aspectos clave que deben ser considerados en el desarrollo de la estrategia y la guía de gestión del fósforo:

La necesidad de abordar el fósforo desde un enfoque integrado, considerando simultáneamente las entradas al sistema, los procesos de retención en el suelo y los mecanismos de transporte hacia el agua.

La importancia de adaptar las medidas de manejo a las condiciones específicas de cada sistema, evitando enfoques generalistas y considerando factores como la pendiente, la conectividad hidrológica o el tipo de uso del suelo.

La relevancia de incorporar sistemas de monitorización adecuados, capaces de capturar la dinámica temporal del sistema y de identificar eventos críticos de movilización.

El papel fundamental de la gestión en origen, especialmente en sistemas ganaderos, como herramienta para reducir las cargas de fósforo antes de su incorporación al medio.

Y, finalmente, la necesidad de integrar el conocimiento técnico con la viabilidad operativa, asegurando que las soluciones propuestas sean aplicables en condiciones reales de explotación.

8. Necesidades o recomendaciones

A partir de la experiencia adquirida durante la implementación de los pilotos, se identifican una serie de necesidades y recomendaciones orientadas a mejorar tanto el diseño metodológico como la aplicación práctica de este tipo de estudios en futuros desarrollos.

8.1 Ajustes metodológicos

El desarrollo de los pilotos ha puesto de manifiesto la necesidad de reforzar determinados aspectos metodológicos para mejorar la calidad y representatividad de la información obtenida, especialmente en relación con la captura de eventos hidrológicos y la variabilidad espacial de los sistemas.

Uno de los principales ajustes identificados es la necesidad de incorporar **sistemas automáticos de recogida de escorrentía**, que permitan obtener muestras representativas en el momento exacto en que se producen los eventos de precipitación. En este sentido, se recomienda la instalación de dispositivos pasivos o activos en puntos

de salida de subcuenca, como sistemas de recogida con depósito o muestreadores automáticos activados por nivel o caudal, que permitan almacenar muestras sin necesidad de presencia física en campo. Esta solución resulta especialmente relevante en contextos como La Rioja o Portugal, donde la sincronización del muestreo ha sido una limitación significativa.

En relación con la monitorización continua, se plantea como mejora la **ampliación y densificación de los puntos instrumentados**, priorizando aquellos nodos clave del sistema (salidas de subcuenca, puntos de drenaje, zonas de convergencia). Asimismo, se recomienda reforzar los procesos de calibración mediante campañas sistemáticas de muestreo puntual en condiciones contrastadas (eventos de lluvia, periodos de base, fases de manejo), con el fin de mejorar la fiabilidad de los modelos de estimación.

Para la monitorización de suelos, se propone mantener el enfoque basado en la integración de cartografía de conductividad eléctrica y análisis hidrológico, incorporando como mejora la **estratificación del muestreo en función de zonas funcionales** (alta, media, baja) y el refuerzo del número de puntos en áreas de mayor heterogeneidad. Esto permitiría mejorar la interpretación de los gradientes de fósforo dentro de cada subcuenca.

En sistemas ganaderos, se recomienda avanzar hacia protocolos más robustos de muestreo de deyecciones y estiércoles, mediante la **definición de recorridos de muestreo estructurados dentro de las instalaciones**, combinando submuestras de distintas zonas (alimentación, descanso, tránsito) y asegurando su correcta homogeneización. Esto permitiría mejorar la representatividad de los análisis en materiales altamente heterogéneos.

En sistemas de regadío con drenaje artificial, como los pilotos de Portugal, se considera necesario integrar de forma más explícita el análisis de la **infraestructura hidráulica (canales, válvulas, bombeos)** en el diseño metodológico. Como mejora, se propone incorporar esquemas funcionales del sistema de drenaje y, cuando sea posible, puntos de control adicionales en la red, lo que facilitaría la interpretación de los flujos de fósforo.

Como punto final, se recomienda incorporar en el diseño inicial del piloto **escenarios de contingencia climática**, definiendo protocolos alternativos de muestreo o seguimiento que permitan mantener la coherencia del estudio en caso de eventos extremos (inundaciones, imposibilidad de acceso, cambios en el cultivo), como los registrados durante el periodo de ejecución.

8.2 Propuestas de mejora

Desde una perspectiva operativa, la experiencia adquirida en los distintos pilotos pone de manifiesto una serie de aspectos que deben ser considerados para mejorar la aplicabilidad de las soluciones evaluadas y facilitar su implementación en condiciones reales.

En el ámbito de la gestión agronómica, los resultados evidencian la importancia de basar la fertilización en el conocimiento detallado del suelo y del cultivo. El uso combinado de análisis edáficos y herramientas de caracterización espacial, como los mapas de conductividad eléctrica, ha permitido interpretar la variabilidad interna de las parcelas y orientar el manejo de forma más ajustada. En este sentido, se pone de manifiesto la necesidad de que este tipo de información se integre de forma operativa en las recomendaciones técnicas, facilitando su utilización práctica por parte de agricultores y técnicos.

En relación con las medidas orientadas a la retención del fósforo, como la aplicación de enmiendas, la experiencia en campo ha evidenciado que su viabilidad depende en gran medida de su compatibilidad con las condiciones de explotación. Aspectos como la forma de presentación del material, su facilidad de aplicación y su adaptación a la maquinaria disponible condicionan de manera directa su adopción, por lo que deben ser considerados en cualquier planteamiento técnico.

En sistemas ganaderos, los resultados obtenidos muestran que las estrategias de actuación en origen, particularmente a través de la optimización de la alimentación animal, pueden contribuir de forma significativa a la reducción de las cargas de fósforo en el sistema. Asimismo, la gestión espacial de las deyecciones se identifica como un elemento clave, siendo necesario considerar prácticas que permitan mejorar su distribución y reducir la acumulación en zonas concretas.

Por otro lado, la experiencia de los pilotos pone de manifiesto la importancia de mejorar la integración de la información generada en los distintos bloques de monitorización. La combinación de datos de suelo, sedimentos, agua y manejo requiere enfoques que permitan su interpretación conjunta, facilitando la identificación de relaciones entre prácticas de manejo y respuesta del sistema.

Se evidencia la necesidad de que las soluciones propuestas mantengan un equilibrio entre el rigor técnico y su viabilidad operativa, asegurando su adaptación a las condiciones reales de cada sistema productivo. En este sentido, la transferencia de resultados deberá considerar no solo la eficacia de las medidas, sino también su aplicabilidad práctica y su integración en la gestión habitual de las explotaciones.