

(E2.4.2.) GUIA DE MONITORIZAÇÃO DE FOSFATOS

Interreg
Sudoe



Co-funded by
the European Union

Phos4Cycle

0. Introdução

0.1. Contexto do projeto.

O projeto Phos4Cycle surge no contexto da crescente preocupação com a poluição difusa por fósforo decorrente das atividades agrícolas e agropecuárias e o seu impacto na qualidade das águas superficiais. A acumulação e mobilização de fosfatos no solo, o seu transporte através de processos de escoamento e erosão, e a sua chegada aos sistemas aquáticos constituem um desafio relevante para a gestão sustentável dos territórios agrícolas e pecuários, especialmente à escala da bacia hidrográfica.

Neste contexto, é necessário dispor de ferramentas técnicas que permitam compreender a dinâmica do fósforo nos sistemas produtivos e avaliar o risco associado à sua mobilização para o meio aquático, considerando de forma integrada as três dimensões solo, sedimentos e água, bem como a influência das práticas agrícolas e agro-pecuárias e das condições climáticas. A monitorização à escala da bacia hidrográfica apresenta-se como uma abordagem adequada para abordar esta problemática numa perspetiva territorial e funcional.

O projeto Phos4Cycle responde a esta necessidade através do desenvolvimento e validação de um sistema integrado de monitorização do fósforo, aplicado em diferentes sistemas agrícolas e agro-pecuários representativos da região SUDOE. Através de uma abordagem baseada em projetos-piloto reais, o projeto gera conhecimento técnico aplicado orientado para melhorar a prevenção da poluição por fosfatos e apoiar a gestão agroambiental numa perspetiva de economia circular e sustentabilidade.

0.2. Objetivo do Guia.

O objetivo do presente Guia é fornecer um quadro técnico e metodológico de referência para a conceção, implementação e interpretação de sistemas de monitorização do fósforo à escala da bacia hidrográfica em sistemas agro-pecuários. O documento estabelece critérios operacionais que permitem integrar informações provenientes do solo, dos sedimentos e da água, facilitando a sua análise conjunta em relação às práticas de gestão e às condições climáticas.

O Guia destina-se a apoiar a avaliação do risco de contaminação por fosfatos e a melhorar a tomada de decisões técnicas em matéria de planeamento e gestão agroambiental, a partir de uma abordagem preventiva e baseada em dados. Pretende, igualmente, servir como ferramenta de apoio à replicabilidade dos sistemas de monitorização, permitindo a sua adaptação a diferentes contextos territoriais e edafoclimáticos.

0.3. Público-alvo.

O presente Guia destina-se principalmente a pessoal técnico e entidades envolvidas na gestão agroambiental e dos recursos hídricos, incluindo administrações públicas, gestores de bacias hidrográficas, serviços de aconselhamento agrícola e pecuário e organizações ligadas ao ordenamento do território. Além disso, o documento é de interesse para centros de investigação e entidades técnicas que desenvolvam atividades relacionadas com a monitorização ambiental e a prevenção da poluição difusa.

O guia foi concebido como uma ferramenta de apoio técnico para profissionais com conhecimentos em gestão agrícola, ambiental ou hidrológica, com o objetivo de facilitar a compreensão, a conceção e a aplicação de sistemas de monitorização do fósforo em contextos reais. O documento não tem carácter normativo nem legal, não substitui a legislação em vigor nem os instrumentos regulamentares aplicáveis, mas oferece critérios técnicos e metodológicos baseados na experiência do projeto para apoiar a tomada de decisões e o planeamento de ações a partir de uma abordagem preventiva.

0.4. Relação com os projetos-piloto do GT2.

O presente Guia baseia-se na experiência adquirida durante o desenvolvimento dos projetos-piloto de monitorização executados no âmbito do Grupo de Trabalho 2 (GT2) do projeto Phos4Cycle. Os conteúdos e recomendações recolhidos no documento derivam diretamente da conceção, implementação e acompanhamento desses projetos-piloto e refletem as lições aprendidas em diferentes contextos agrícolas e agro-pecuários e territoriais.

A informação gerada através dos projetos-piloto permitiu validar, em condições reais, as abordagens metodológicas propostas no guia, bem como identificar os principais pontos fortes, limitações e fatores críticos associados à monitorização do fósforo à escala da bacia hidrográfica. Neste sentido, o Guia não reproduz os resultados específicos dos projetos-piloto, mas sintetiza e generaliza os critérios técnicos e metodológicos que se revelaram mais relevantes para a avaliação do risco de contaminação por fosfatos e a interpretação dos dados obtidos.

Desta forma, o Guia funciona como um elemento de ligação entre o trabalho experimental desenvolvido nos projetos-piloto e a sua possível aplicação noutros territórios, contribuindo para a transferência do conhecimento gerado no GT2 e para a replicabilidade dos sistemas de monitorização desenvolvidos no projeto.

1. Âmbito e campo de aplicação

Esta secção define os contextos territoriais e produtivos em que é aplicável a metodologia de monitorização do fósforo proposta no presente Guia, estabelecendo o quadro geral para a sua utilização em sistemas agro-pecuários.

A metodologia foi aplicada e validada em diferentes sistemas representativos do espaço SUDOE, incluindo explorações agrícolas extensivas, sistemas vitivinícolas, explorações

pecuárias extensivas, sistemas hortícolas e explorações pecuárias intensivas. Esta diversidade de contextos permitiu verificar a sua aplicabilidade em condições edafoclimáticas e de gestão muito diferentes, desde que exista interação entre o solo, os processos de escoamento e o transporte de sedimentos e nutrientes.

1.1. *Sistemas produtivos aos quais se aplica a metodologia.*

A metodologia desenvolvida no âmbito do Phos4Cycle foi concebida com um caráter transversal, podendo ser aplicada a diversos sistemas produtivos representativos do espaço SUDOE. O seu âmbito de aplicação abrange os sistemas em que existe interação entre a gestão do solo, a utilização de fertilizantes ou efluentes e os processos de transporte de nutrientes para o meio aquático.

Neste contexto, a metodologia é aplicável a

- Sistemas de cultivo e regadio, incluindo culturas herbáceas extensivas (cereais) e culturas intensivas (milho, hortícolas), onde a gestão da fertilização mineral e os processos de escoamento superficial constituem fatores determinantes na mobilização do fósforo.
- Culturas permanentes, como vinhas e olivais, frequentemente associadas a terrenos inclinados, nos quais o risco de erosão do solo e o transporte de fósforo particulado ligado a sedimentos assumem especial relevância.
- Sistemas de pecuária intensiva, como explorações de gado leiteiro ou suinícola, nas quais a gestão de efluentes orgânicos e a sua aplicação no solo condicionam a acumulação e mobilização de nutrientes à escala da parcela ou da sub-bacia.
- Sistemas silvopastoris e pecuária extensiva, como pastagens ou sistemas de pastoreio, onde a distribuição espacial do gado e a deposição de dejetos geram padrões heterogêneos de acumulação de fósforo, exigindo uma abordagem específica de monitorização.
- Sistemas avícolas, especialmente em condições de produção extensiva, onde a gestão da cama e dos resíduos orgânicos pode influenciar a dinâmica do fósforo no ambiente imediato e nas sub-bacias associadas.

De um modo geral, a metodologia é aplicável a qualquer sistema agrícola ou agro-pecuário em que seja necessário avaliar a relação entre as práticas de gestão e a transferência de fósforo para as massas de água, desde que a análise seja abordada numa perspetiva funcional à escala da sub-bacia hidrográfica.

1.2. *Escala territorial recomendada.*

A eficácia da monitorização do fósforo depende em grande medida da seleção de uma escala de trabalho que permita captar de forma integrada a interação entre as práticas de gestão e os processos de transporte de nutrientes para o meio aquático.

Neste sentido, a metodologia baseia-se numa abordagem à escala da bacia ou sub-bacia hidrográfica, por ser a unidade mais adequada para compreender as dinâmicas de transferência do fósforo das zonas de produção (agrícolas ou pecuárias) para as massas de água, integrando o conjunto de processos hidrológicos que regem estes fluxos.

Escalas de aplicação

A aplicação da metodologia pode ser adaptada a diferentes níveis territoriais, em função das características do sistema e das problemáticas identificadas:

Zonas vulneráveis à poluição por nutrientes

Nestes contextos, a aplicação da metodologia revela-se especialmente relevante, uma vez que permite avaliar a eficácia das medidas de gestão e o cumprimento dos objetivos ambientais. A monitorização do fósforo funciona como um indicador-chave do funcionamento do sistema e da pressão exercida sobre as massas de água.

Escala local ou de sub-bacia

Constitui a escala prioritária de aplicação. Permite estabelecer uma relação direta entre o uso do solo, as práticas de gestão e a qualidade da água no ponto de saída mensurável, facilitando a interpretação dos processos de escoamento e transporte de nutrientes.

Escala de bacia intermédia ou regional

Em sistemas de maior complexidade, como áreas de regadio ou territórios com redes de drenagem desenvolvidas, pode ser necessário trabalhar em escalas superiores que integrem o funcionamento do sistema hidráulico completo. Nestes casos, a metodologia permite analisar de forma agregada os fluxos de fósforo e apoiar a tomada de decisões a nível territorial.

Dimensão das unidades de análise

A experiência dos projetos-piloto demonstra que a monitorização do fósforo deve ser abordada a partir de uma visão sistémica, evitando a análise isolada de parcelas individuais.

Recomenda-se:

- dar prioridade às unidades hidrológicas funcionais (sub-bacias) em detrimento de parcelas isoladas
- evitar escalas demasiado reduzidas que não captem os processos de transporte
- considerar escalas maiores quando a conectividade hidráulica assim o exigir

A título orientativo, as unidades de trabalho podem variar desde pequenas sub-bacias de poucos hectares em sistemas controlados, até unidades de maior dimensão (dezenas ou centenas de hectares) em sistemas com redes de drenagem complexas.

Critérios para a seleção da escala

A escolha da escala de intervenção deve ser feita caso a caso, em função da:

- problemática de poluição identificada
- estrutura do sistema produtivo
- densidade de explorações ou pressão pecuária
- conectividade hidrológica do território

- existência de infraestruturas de drenagem

Este processo deve basear-se num diagnóstico prévio do sistema, combinando análise cartográfica (modelo digital do terreno, rede de drenagem) e verificação no terreno.

Recomendação metodológica

Como critério geral, recomenda-se trabalhar na menor escala possível que permita:

- captar os fluxos reais de água e sedimentos
- identificar a relação entre a gestão e a resposta do sistema
- dispor de um ponto de partida claramente definido

Esta abordagem garante que o sistema de monitorização forneça informações úteis para a gestão do território, evitando tanto a simplificação excessiva como a perda de representatividade.

1.3. Limitações detetadas.

A implementação dos sistemas de monitorização no âmbito do projeto Phos4Cycle permitiu identificar uma série de limitações técnicas, metodológicas e operacionais que devem ser consideradas na conceção e aplicação de futuros sistemas de monitorização do fósforo.

Estas limitações não invalidam a metodologia, mas condicionam a interpretação dos resultados e reforçam a necessidade de uma conceção adaptada a cada contexto.

Limitações associadas à conceção do sistema

Uma das principais dificuldades detetadas é a seleção de unidades de estudo adequadas do ponto de vista hidrológico. Em particular, é complexo identificar parcelas ou sub-bacias em que o ponto de saída capte exclusivamente o fluxo proveniente da área de estudo, sem interferências externas. A presença de contribuições laterais ou ligações não controladas pode comprometer a interpretação dos resultados.

Da mesma forma, a delimitação de sub-bacias requer a disponibilidade de modelos digitais do terreno de alta resolução, que nem sempre estão disponíveis. Na ausência desta informação, pode ser necessário recorrer a levantamentos topográficos específicos ou a técnicas de teledetecção para garantir uma delimitação precisa.

Outra limitação relevante é a necessidade de dispor de várias sub-bacias comparáveis dentro de uma mesma exploração, o que nem sempre é possível em condições reais, dificultando a comparação entre estratégias de gestão.

Limitações associadas à monitorização e ao equipamento

Durante os projetos-piloto, foram identificadas limitações relacionadas com a utilização de sensores e sistemas de monitorização contínua. Em particular, a acumulação de matéria orgânica, sedimentos ou biofilme em sondas óticas pode afetar a qualidade dos dados, especialmente em meios com baixo caudal ou águas estagnadas. A ausência de

planos de manutenção e calibração adequados pode gerar desvios nos parâmetros medidos, como a turbidez ou a condutividade.

Em sistemas com elevada carga de sólidos, como parcelas em declive ou eventos de escoamento intenso, os equipamentos de amostragem podem apresentar problemas de obstrução ou saturação, dificultando a obtenção de amostras representativas.

Limitações associadas a fatores climáticos e hidrológicos

A metodologia apresenta uma forte dependência dos eventos climáticos, especialmente da precipitação. Os períodos prolongados de seca limitam a ocorrência de escoamento e, consequentemente, a obtenção de dados, enquanto os eventos extremos (chuvas intensas ou inundações) podem exceder a capacidade dos equipamentos ou provocar o seu deslocamento ou perda.

Em sistemas de regadio ou com gestão hidráulica ativa, a manipulação dos caudais através de comportas ou bombas introduz uma variabilidade adicional que pode mascarar o efeito direto das práticas de gestão, sendo necessário registar estas operações para uma interpretação correta.

Limitações associadas à gestão e ao sistema produtivo

Em sistemas agrícolas, a aplicação de determinados corretivos, como o biochar, pode interferir na medição do fósforo disponível (P Olsen), devido à sua capacidade de adsorção. Isto pode gerar leituras que não refletem de forma imediata a disponibilidade real do fósforo a curto prazo.

Em sistemas pecuários, especialmente em condições extensivas como a pastagem, a heterogeneidade espacial do solo e dos dejetos, juntamente com a presença de gado, introduz limitações operacionais na recolha de amostras e na representatividade dos dados.

Limitações associadas à escala temporal

Os processos de acumulação, transformação e transferência do fósforo decorrem ao longo de períodos prolongados, o que implica que os resultados obtidos em campanhas curtas devem ser interpretados com cautela.

Um acompanhamento limitado a uma única campanha ou a um único ciclo produtivo não permite captar a variabilidade interanual nem distinguir entre efeitos estruturais da gestão e variações climáticas pontuais. Por isso, recomenda-se dispor de séries temporais de vários anos, bem como de dados de referência iniciais que permitam avaliar a evolução do sistema.

Consideração final

Estas limitações evidenciam a necessidade de abordar a monitorização do fósforo a partir de uma abordagem flexível e adaptada ao contexto, integrando informação técnica, conhecimento do sistema e planeamento a médio prazo. A antecipação destes fatores

permite melhorar a conceção dos sistemas de monitorização e reforçar a fiabilidade dos resultados obtidos.

2. Abordagem metodológica geral

2.1. Abordagem à escala da bacia hidrográfica.

A monitorização do fósforo em sistemas agro-pecuários requer uma abordagem integrada que permita analisar em conjunto os processos que ocorrem no solo, o transporte de partículas e nutrientes através do escoamento superficial e a sua eventual transferência para o meio aquático.

Neste contexto, a metodologia proposta baseia-se na análise do sistema produtivo à escala da bacia ou sub-bacia hidrográfica, considerada a unidade funcional mais adequada para compreender a dinâmica do fósforo. Esta abordagem permite integrar as características do solo, as condições climáticas e as práticas de gestão agronómica ou pecuária num sistema hidrologicamente interligado.

Fundamento da abordagem à escala da bacia hidrográfica

Trabalhar à escala da bacia hidrográfica permite analisar o comportamento do sistema como uma unidade na qual os processos de escoamento superficial e transporte de sedimentos ligam as diferentes zonas do terreno.

O escoamento gerado em cada sub-bacia atua como elemento integrador, mobilizando partículas de solo e nutrientes desde as áreas de contribuição até ao ponto de saída. Desta forma, a análise conjunta da água e dos sedimentos transportados permite estimar a quantidade de fósforo mobilizado e relacioná-la com:

- as características edáficas do sistema
- a distribuição do uso do solo
- as práticas de gestão aplicadas

Vantagens da abordagem à escala da sub-bacia

A experiência dos projetos-piloto demonstrou que o trabalho à escala da sub-bacia apresenta várias vantagens fundamentais:

- permite uma caracterização detalhada do uso do solo e das práticas de fertilização ou de gestão pecuária
- facilita a instalação de pontos de monitorização em linhas de drenagem representativas (valas, fossos, leitos)
- melhora a precisão na avaliação do risco, evitando a diluição dos processos em unidades territoriais demasiado grandes
- permite estabelecer comparações entre diferentes estratégias de gestão dentro de uma mesma exploração
- mantém uma relação direta entre as práticas aplicadas e a resposta observada no sistema

Seleção de unidades de estudo

A seleção das unidades de monitorização deve basear-se numa lógica de bacia hidrográfica, dando prioridade às explorações ou áreas com maior potencial de transferência de fósforo para as massas de água.

Para tal, é recomendável realizar uma análise prévia que tenha em conta:

- a proximidade ao sistema hidrográfico
- a conectividade hidrológica
- a intensidade da prática agrícola (fertilização, carga pecuária, aplicação de efluentes)
- as características do meio recetor

Esta análise permite identificar as áreas mais relevantes do ponto de vista do risco de poluição difusa.

Aplicação em diferentes sistemas produtivos

A abordagem à escala da sub-bacia revelou-se aplicável em diferentes contextos produtivos:

- em sistemas agrícolas, permite relacionar a fertilização e a gestão do solo com a ocorrência de escoamento
- em sistemas de pecuária extensiva, facilita a análise da distribuição espacial dos dejetos e a sua relação com os fluxos de água
- em sistemas intensivos, permite avaliar a contribuição dos efluentes orgânicos para o sistema
- em sistemas com drenagem artificial, integra o funcionamento da rede hidráulica na análise

Em todos os casos, a sub-bacia confirma-se como a unidade mais adequada para captar os fluxos reais de água e nutrientes sem perder a ligação com as práticas de gestão.

Integração da informação

O sistema de monitorização baseia-se na integração de diferentes fontes de informação:

- solo, como reservatório de fósforo
- sedimentos, como principal vetor de transporte de partículas
- água, como meio de transferência para o sistema recetor

A análise conjunta destas matrizes, em relação às condições do território e às práticas de gestão, permite compreender os processos de mobilização do fósforo e avaliar o risco da sua transferência para o meio aquático.

2.2. Integração solo-sedimento-água.

A monitorização do fósforo em sistemas agro-pecuários requer a consideração conjunta dos diferentes compartimentos nos quais ocorrem os processos de armazenamento,

Phos4Cycle

mobilização e transporte do nutriente. O fósforo não se comporta como um elemento isolado, mas circula entre três matrizes interdependentes: solo, sedimentos e água.

O **solo** constitui o principal reservatório de fósforo, sendo o recetor inicial do nutriente através da fertilização mineral ou de aportes orgânicos. A sua capacidade de retenção e disponibilidade depende de fatores como a textura, o pH, o teor de matéria orgânica e a capacidade de adsorção. Quando esta capacidade é ultrapassada, ou quando ocorrem processos de erosão, o fósforo deixa de estar disponível para a cultura e passa a fazer parte dos fluxos de transporte dentro do sistema.

Os **sedimentos** atuam como o principal vetor de transporte do fósforo particulado. Devido à afinidade do fósforo pelas partículas do solo, os processos de erosão hídrica mobilizam frações finas enriquecidas em fósforo, que são transportadas pelo escoamento superficial. A experiência dos projetos-piloto confirmou que, durante eventos de precipitação, uma parte significativa do fósforo exportado se encontra associada aos sólidos em suspensão.

A **água** constitui o meio de transferência para o sistema recetor, permitindo quantificar a exportação de fósforo para fora da unidade de estudo. No meio hídrico, o fósforo pode apresentar-se na forma dissolvida, diretamente disponível e responsável por processos de eutrofização, ou na forma particulada, ligada a sedimentos, com capacidade de deposição e libertação progressiva.

Abordagem integrada

A análise isolada de cada um destes compartimentos não permite explicar adequadamente a dinâmica do fósforo. A experiência dos diferentes projetos-piloto revelou que apenas através de uma **visão integrada solo-sedimento-água** é possível:

- identificar os mecanismos predominantes de mobilização do fósforo
- diferenciar entre transporte dissolvido e particulado
- relacionar as perdas de fósforo com as práticas de gestão
- interpretar a resposta do sistema a eventos de precipitação

Relação com as condições do sistema

A interpretação correta dos fluxos de fósforo requer complementar a monitorização com uma caracterização detalhada do ambiente físico, incluindo:

- a topografia (inclinação e orientação), que condiciona a geração de escoamento
- a condutividade hidráulica do solo, que determina a infiltração em oposição ao fluxo superficial
- o tipo de solo e a sua capacidade de retenção de fósforo
- as linhas preferenciais de escoamento
- a existência de pontos de saída onde possam ser realizadas medições representativas

Esta informação constitui a base para relacionar os dados obtidos no solo, nos sedimentos e na água com os processos hidrológicos que regem o sistema.

Implicações para a gestão

A integração destas três matrizes permite estabelecer uma abordagem de análise baseada no balanço do fósforo dentro do sistema. Esta abordagem facilita a identificação de pontos críticos e demonstra que as medidas de melhoria aplicadas no solo têm um efeito em cascata:

- a redução da erosão diminui a produção de sedimentos
- a diminuição do transporte de sedimentos reduz a exportação de fósforo
- a redução do fósforo transportado melhora a qualidade da água

2.3. Importância da gestão agro-pecuária.

As práticas de gestão agronómica e pecuária constituem um dos fatores determinantes na dinâmica do fósforo nos sistemas agro-pecuários. Estas práticas influenciam diretamente a disponibilidade do nutriente no solo, os processos de mobilização de sedimentos e o risco de transferência para o meio aquático.

Por este motivo, a interpretação dos dados de monitorização deve ser sempre realizada em relação à gestão aplicada em cada sistema produtivo, sendo imprescindível dispor de um **registo detalhado e sistemático das práticas realizadas**.

Influência da gestão do solo na dinâmica do fósforo

As práticas de gestão condicionam os principais processos que afetam o fósforo:

- a **fertilização** (tipo, dose e momento) determina as entradas de fósforo no sistema
- a **estrutura do solo e a sua cobertura** influenciam a infiltração e a ocorrência de escoamento
- as **práticas de conservação do solo** afetam a erosão e o transporte de partículas
- a **gestão pecuária** condiciona a distribuição espacial dos dejetos e, por conseguinte, das entradas de fósforo

A combinação destes fatores determina se o fósforo permanece retido no solo, disponível para a cultura, ou se passa a fazer parte dos fluxos de perda.

Registo das práticas de gestão

Para uma interpretação correta dos resultados, é necessário documentar de forma exaustiva as práticas de gestão aplicadas, considerando duas dimensões complementares:

◆ Gestão agronómica

Deve incluir informações relativas a:

- tipo de cultura e rotações
- presença e gestão de coberturas vegetais

Phos4Cycle

- trabalhos de preparação do solo
- fertilização mineral e orgânica (tipo, dose, momento)
- outras práticas que possam afetar a estrutura ou a cobertura do solo

A presença de cobertura vegetal, em particular, foi identificada como um fator-chave para reduzir o escoamento superficial e limitar o transporte de sedimentos e fósforo.

◆ Gestão pecuária

Em sistemas com presença de gado, é fundamental registar:

- densidade de gado
- distribuição espacial do pastoreio
- duração e frequência de utilização das parcelas
- existência de sistemas de pastoreio rotativo ou gestão adaptativa
- número de lotes e a sua evolução ao longo do tempo

A experiência dos projetos-piloto revelou que a presença, a intensidade e a distribuição do pastoreio influenciam diretamente a redistribuição do fósforo no solo e a sua possível mobilização.

Em particular, sistemas como o pastoreio rotativo podem alterar significativamente a distribuição dos dejetos, reduzindo a acumulação pontual e contribuindo para uma maior homogeneidade nas entradas de fósforo.

Relação entre gestão e monitorização

A integração do registo das práticas de gestão com os dados de monitorização permite:

- interpretar as variações observadas no solo, nos sedimentos e na água
- identificar os fatores que desencadeiam episódios de perda de fósforo
- avaliar a eficácia de diferentes estratégias de gestão
- estabelecer relações de causa-efeito entre práticas e resultados

Esta abordagem é essencial para passar da simples medição de parâmetros para a **compreensão do funcionamento do sistema**.

Implicações para a gestão

A análise conjunta da gestão e da monitorização permite identificar práticas que contribuem para:

- melhorar a eficiência da utilização do fósforo
- reduzir a erosão do solo
- limitar o transporte de sedimentos
- diminuir o risco de contaminação das massas de água

Entre estas práticas incluem-se a otimização da fertilização, a manutenção da cobertura vegetal, a melhoria da estrutura do solo e a gestão adequada do pastoreio.

2.4. Necessidade de dados comparáveis.

Para garantir a comparabilidade dos resultados entre diferentes territórios e sistemas produtivos, é necessário definir um conjunto comum de variáveis que permita caracterizar de forma homogênea os processos de armazenamento, mobilização e transporte do fósforo.

A dinâmica do fósforo é condicionada pela interação entre o solo, os processos hidrológicos e as condições climáticas, pelo que o sistema de monitorização deve integrar informações provenientes destes três domínios (ver Figura 1). A utilização de um protocolo comum de recolha de dados permite não só interpretar os resultados à escala local, mas também agregá-los e compará-los à escala territorial.

2.4.1 Variáveis edáficas

As variáveis edáficas permitem caracterizar o solo como reservatório de fósforo e avaliar a sua capacidade de retenção ou libertação.

Recomenda-se a determinação sistemática de:

- Fósforo disponível (por exemplo, método de Olsen), como indicador da fração potencialmente mobilizável
- Fósforo total, para avaliar a acumulação a longo prazo
- Textura do solo, fundamental para interpretar a retenção de partículas e o risco de erosão
- pH, que condiciona a solubilidade do fósforo
- Matéria orgânica, relacionada com a estabilidade estrutural e a dinâmica do nutriente
- Carbonatos, especialmente em solos calcários, devido à sua influência na fixação do fósforo
- Condutividade elétrica, como indicador do estado químico do solo

Grau de saturação de fósforo, sempre que possível, para identificar se o solo atua como sumidouro ou fonte de [contaminação para a água](#).

Além disso, é necessário registar as práticas que afetam diretamente o solo:

- fertilização (mineral e orgânica)
- lavoura do solo
- cobertura vegetal
- aplicação de dejetos
- alimentação do gado

2.4.2 Variáveis hidrológicas

As variáveis hidrológicas permitem caracterizar o transporte do fósforo do solo para o meio aquático.

Recomenda-se monitorizar:

Phos4Cycle

- Nível e caudal da água, de preferência de forma contínua, para estimar as cargas de fósforo
- Fósforo total na água, como indicador global do transporte
- Fósforo dissolvido, relacionado com o risco de eutrofização
- Sólidos em suspensão / turbidez, como indicador do fósforo particulado
- Condutividade elétrica da água, útil para identificar diferentes fontes de aporte
- Direção e intensidade do escoamento, associadas a eventos de precipitação
- Estado de saturação do solo, fundamental na geração de escoamento
- Presença de drenagem artificial, como via adicional de transporte

A análise conjunta destas variáveis permite distinguir entre transporte dissolvido e particulado, bem como estimar a carga total de fósforo exportada.

2.4.3 Variáveis climáticas

As variáveis climáticas são determinantes na ativação dos processos de mobilização e transporte do fósforo.

Recomenda-se registar:

- Precipitação acumulada
- Intensidade da precipitação, especialmente em eventos erosivos
- Temperatura (mínima, máxima e média)
- Eventos extremos (tempestades, inundações, secas prolongadas, episódios de gelo/degelo)

A intensidade da precipitação é especialmente relevante, uma vez que é o principal fator desencadeador do escoamento e do transporte de sedimentos.

2.4.4. Importância da integração de dados

A integração destas variáveis permite:

- interpretar os processos de mobilização do fósforo
- distinguir os efeitos da gestão dos efeitos climáticos
- identificar episódios críticos de transporte
- construir modelos de avaliação de risco

Esta abordagem garante que os dados obtidos sejam comparáveis entre sistemas e úteis para a tomada de decisões à escala da exploração ou do território.

DINÁMICA DEL FÓSFORO EN EL SISTEMA SUELO–SEDIMENTO–AGUA

Enfoque a escala de subcuenca – Procesos y compartimentos clave

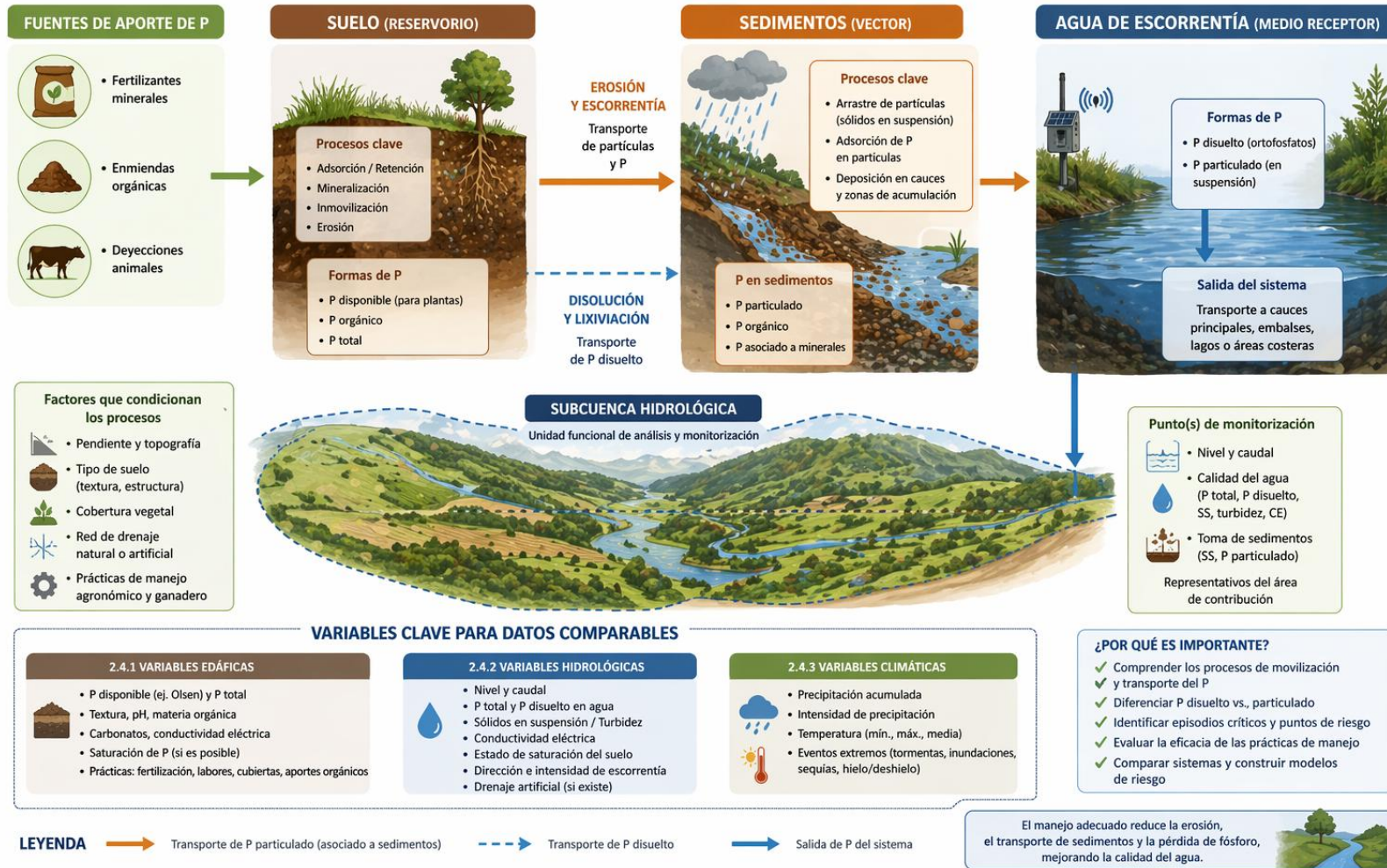


Figura 1 – Dinâmica do fósforo no sistema solo-sedimentos-água

3. Conceção do sistema de monitorização

A conceção do sistema de monitorização constitui uma etapa fundamental para garantir a obtenção de dados representativos que permitam avaliar a dinâmica do fósforo em sistemas agro-pecuários. A seleção adequada da unidade de estudo, a delimitação hidrológica das sub-bacias e a definição dos pontos de amostragem determinam em grande medida a qualidade e a interpretabilidade dos resultados.

A abordagem metodológica adotada baseia-se na análise do sistema produtivo como uma unidade hidrológica interligada, na qual os processos de mobilização do fósforo são estudados desde a sua origem no solo até ao seu transporte através do escoamento superficial, dos sedimentos e da água.

De um modo geral, a conceção do sistema de monitorização estrutura-se em três fases: seleção da unidade de estudo e delimitação da bacia ou sub-bacia, identificação de sub-bacias funcionais e definição da rede de amostragem e monitorização.

3.1 Seleção e delimitação da bacia

A seleção e delimitação da bacia de estudo constituem o ponto de partida do sistema de monitorização. O objetivo é identificar uma unidade hidrológica funcional na qual seja possível analisar de forma coerente os processos de ocorrência de escoamento, mobilização de sedimentos e transporte de fósforo até um ponto de saída mensurável.

Trabalhar a esta escala permite relacionar as concentrações de fósforo detetadas na água com as características do solo, a topografia e as práticas de gestão desenvolvidas na área de estudo. A delimitação deve ser realizada através da análise de modelos digitais do terreno, apoiados, quando necessário, em cartografia complementar e validação no terreno.

3.1.1 Critérios técnicos mínimos

Para que a unidade selecionada seja adequada, deve cumprir uma série de condições mínimas. Em primeiro lugar, deve apresentar uma topografia que permita a geração e concentração de escoamento, seja por meio de declives, vales, linhas naturais de drenagem, valas ou leitos secundários. Em segundo lugar, deve existir um ponto de saída claramente definido para o qual convirja o fluxo proveniente da área monitorizada, facilitando a instalação de estações de controlo ou a recolha de amostras.

É também necessário que o sistema produtivo seja representativo do tipo de exploração que se pretende analisar, seja agrícola, pecuária ou mista, e que as práticas de gestão possam ser documentadas com traçabilidade suficiente. Nos sistemas pecuários, além disso, deve garantir-se que a superfície selecionada seja efetivamente utilizada pelos animais e que se disponha de informação mínima sobre a carga pecuária, o tempo de ocupação, as rotações e a distribuição espacial do pastoreio ou dos dejetos.

Por último, deve garantir-se a acessibilidade à área monitorizada e a viabilidade operacional do sistema, incluindo tanto a recolha de amostras como a instalação e

manutenção dos equipamentos. Em sistemas extensivos ou com presença de gado, isto implica ainda que a delimitação não interfira com o funcionamento normal da exploração e que seja compatível com a utilização de cercas, os movimentos dos animais e as tarefas habituais.

3.1.2 Escala ideal

A escala de trabalho deve permitir captar os processos reais de mobilização do fósforo sem perder a ligação com as práticas de gestão aplicadas. De forma geral, a sub-bacia funcional dentro da exploração é considerada a unidade mais adequada, uma vez que permite analisar a ocorrência de escoamento e o transporte de nutrientes, designadamente fósforo, mantendo uma relação direta com o uso do solo e a gestão agronómica ou pecuária.

Em sistemas comparativos, é recomendável dispor de várias sub-bacias com características semelhantes, de modo a que se possam avaliar diferentes estratégias de gestão em condições comparáveis. Em contextos agrícolas de pequena e média escala, pode ser suficiente trabalhar com superfícies relativamente reduzidas, enquanto em sistemas com redes de drenagem artificial ou maior complexidade hidráulica pode ser necessário ampliar a escala para integrar adequadamente o funcionamento do sistema. Como orientação geral, convém evitar unidades demasiado pequenas, onde a variabilidade espacial domine sobre os processos hidrológicos, bem como unidades excessivamente grandes, onde a relação entre gestão e resposta se dilua.

3.1.3 Erros frequentes e recomendações

Um dos erros mais frequentes consiste em delimitar a bacia apenas com base em ferramentas SIG, sem validação posterior no terreno. Na prática, pequenas irregularidades do terreno, zonas compactadas, caminhos, drenagens artificiais, comportas ou bombas podem alterar significativamente as trajetórias reais da água e dos sedimentos. Por isso, a delimitação teórica deve ser sempre contrastada através da observação direta, de preferência durante ou após episódios de chuva.

Outro problema comum é a seleção de parcelas em que o ponto de saída recebe contribuições provenientes de áreas externas não controladas, o que dificulta enormemente a interpretação dos resultados. Também se detectam dificuldades quando as sub-bacias delimitadas apresentam diferenças excessivas de inclinação, dimensão ou uso do solo, uma vez que isso reduz a comparabilidade entre os tratamentos.

Em sistemas de pecuária intensiva ou avicultura, devem ser considerados também riscos específicos, tais como condicionantes sanitárias, restrições de acesso e a necessidade de aplicar protocolos de biossegurança durante as campanhas de campo.

Como recomendação geral, deve-se combinar a análise topográfica com informações sobre o uso do solo, a rede de drenagem, a gestão hidráulica e o conhecimento prático do gestor da exploração, ajustando o desenho à realidade funcional do terreno.

3.2 Definição dos pontos de amostragem

A definição dos pontos de amostragem deve garantir uma representação adequada da variabilidade espacial do sistema e permitir relacionar as características do solo, o comportamento hidrológico e as práticas de gestão com a dinâmica do fósforo. A localização dos pontos não deve responder apenas a critérios geométricos ou de facilidade de acesso, mas a uma lógica funcional que reflita os processos de geração, acumulação e transporte dentro de cada sub-bacia.

3.2.1 Número mínimo recomendado

O número de pontos de amostragem deve ajustar-se à heterogeneidade do sistema, embora, como referência geral, se recomende um mínimo de cinco pontos de solo por sub-bacia em sistemas agrícolas e agro-pecuários, podendo ser aumentado quando existir uma elevada variabilidade edáfica ou topográfica. Em sistemas pecuários intensivos ou avícolas, onde a distribuição do fósforo depende em grande medida da utilização do espaço pelos animais, pode ser conveniente aumentar a densidade de pontos nas zonas de maior frequência de ocupação.

Na monitorização da água, a lógica é diferente. Para sistemas de monitorização contínua, recomenda-se selecionar pelo menos um ponto na saída ou na confluência principal das sub-bacias, podendo estabelecer-se pontos adicionais a montante quando existam afluentes significativos ou possíveis interferências externas. Para amostragem pontual ou discreta, pode ser necessário instalar vários pontos no sentido do fluxo, incluindo dispositivos de recolha de escoamento superficial ou lisímetros, de acordo com o objetivo do acompanhamento.

No caso dos sedimentos, o número de pontos dependerá da configuração do sistema e do padrão de convergência dos fluxos. Em geral, recomenda-se selecionar pontos em zonas de concentração do escoamento, linhas de drenagem e áreas de deposição.

A georreferenciação precisa de todos os pontos selecionados é imprescindível para repetir a amostragem em campanhas sucessivas e analisar a evolução temporal dos parâmetros observados.

3.2.2 Localização estratégica

A localização dos pontos deve ser definida a partir da integração entre a análise hidrológica e a caracterização espacial do solo. Para tal, é especialmente útil combinar o modelo digital do terreno com mapas de condutividade elétrica aparente, uma vez que esta última permite identificar diferenças na textura, humidade, estrutura ou salinidade do solo e delimitar zonas relativamente homogêneas do ponto de vista edáfico.

A partir desta informação, os pontos de solo devem ser distribuídos de forma a representarem adequadamente os gradientes topográficos e as diferentes unidades funcionais dentro de cada sub-bacia, incluindo zonas altas, médias e baixas, bem como áreas de acumulação onde o fósforo se possa concentrar por transporte interno.

No caso da água, os pontos devem ser localizados nas zonas em que o fluxo sai da unidade de estudo ou em trechos representativos da drenagem, de preferência retilíneos e estáveis, evitando áreas com erosão lateral intensa ou deposição excessiva de materiais que possam alterar as medições. Em sistemas com drenagem artificial, deve ser dada especial atenção à localização de valas, canais, comportas e bombas.

Em sistemas pecuários, a localização dos pontos deve refletir também o padrão de ocupação do espaço pelos animais. É importante incluir tanto zonas de alta pressão, próximas de edifícios, pontos de água, zonas de sombra ou de alimentação, como áreas menos frequentadas que possam servir de referência comparativa.

A experiência dos projetos-piloto confirma que uma localização estratégica correta dos pontos é mais determinante para a qualidade do sistema do que um aumento indiscriminado do número de amostras (ver Figura 2).

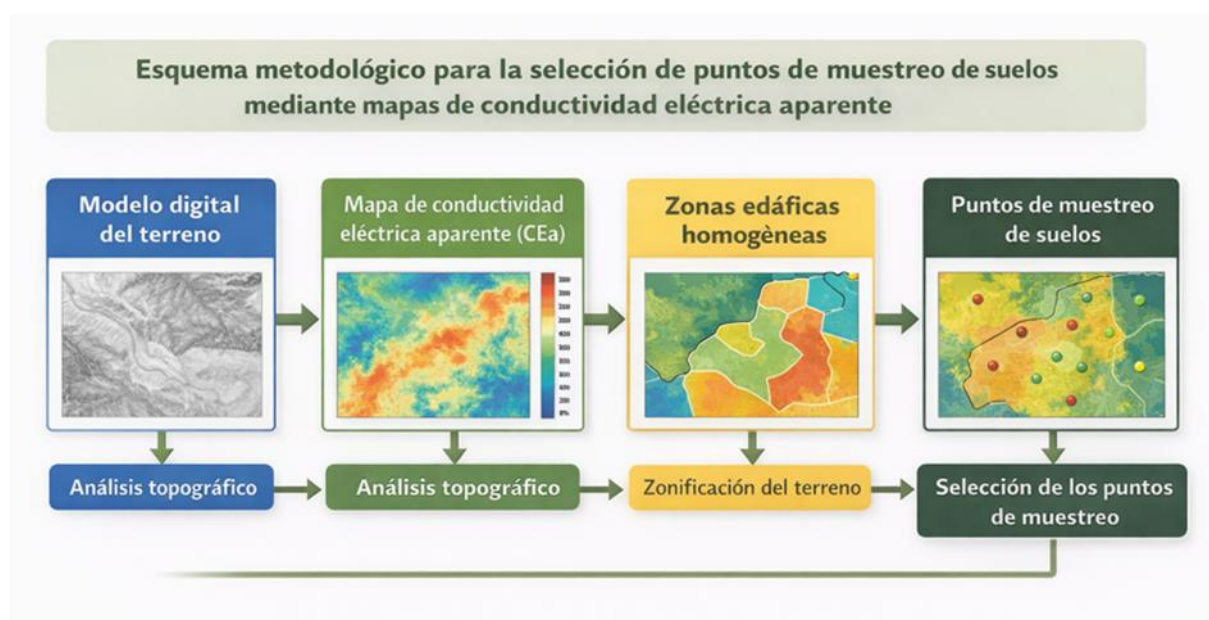


Figura 2 – Esquema metodológico para a selecção dos pontos de amostragem.

3.2.3 Relação com os usos do solo

A rede de amostragem deve ser concebida tendo em conta os usos do solo presentes na bacia ou sub-bacia e a diferenciação funcional gerada pela gestão. Em sistemas agrícolas, isto implica representar diferentes estratégias de fertilização, lavoura, coberturas vegetais ou rotações. Em sistemas pecuários, devem ser consideradas a intensidade do pastoreio, a distribuição do gado, as áreas de acumulação de dejetos e a existência de zonas de exclusão ou de gestão diferenciada.

Sempre que possível, é recomendável incluir pontos em áreas de menor intensidade de uso ou com função de referência, como pastagens permanentes, zonas florestais ou áreas com baixa intervenção, a fim de dispor de um valor de referência com o qual comparar a resposta das zonas sujeitas a maior pressão.

A integração entre usos do solo, topografia, hidrologia e propriedades edáficas permite interpretar com maior precisão os mecanismos que controlam a acumulação, mobilização e transporte do fósforo dentro do sistema monitorizado.

4. Monitorização do fósforo

A monitorização do fósforo em sistemas agro-pecuários deve ser abordada de forma integrada, considerando os diferentes compartimentos nos quais o nutriente é armazenado, transformado e mobilizado. Neste sentido, o acompanhamento deve incluir a análise do fósforo presente no solo, a sua possível mobilização através de sedimentos e o seu transporte pela água de escoamento ou drenagem.

A combinação destes três níveis de monitorização permite compreender os processos que determinam a perda de fósforo dos sistemas produtivos para o meio aquático, bem como avaliar o efeito das práticas de gestão aplicadas no território. Esta visão integrada é especialmente importante porque a perda de fósforo não depende de um único fator, mas da interação entre a disponibilidade no solo, a capacidade de mobilização, a conectividade hidrológica e as condições climáticas.

4.1 Monitorização no solo

4.1.1 Parâmetros-chave

A análise do solo constitui a base para compreender a dinâmica do fósforo no sistema produtivo, uma vez que o solo atua como principal reservatório deste nutriente. Os parâmetros a monitorizar devem permitir caracterizar tanto a disponibilidade imediata do fósforo como a capacidade do solo para o reter ou libertar a médio e longo prazo.

Como variáveis mínimas recomendadas, devem ser incluídos o **fósforo disponível**, de preferência através de métodos normalizados como o Olsen em solos neutros ou alcalinos e o Bray em solos ácidos, e o **fósforo total**, que permite estimar a acumulação global de fósforo resultante da fertilização mineral, de aportes orgânicos ou de dejetos diretos. A combinação de ambos os parâmetros resulta especialmente útil para diferenciar entre a fração potencialmente mobilizável a curto prazo e o stock acumulado que pode representar um risco difuso a mais longo prazo.

Estas determinações devem ser complementadas com uma caracterização físico-química do solo, que inclua, no mínimo, **textura e granulometria**, **pH**, **matéria orgânica**, **carbonatos** em solos calcários e, sempre que possível, **condutividade elétrica** e **capacidade de adsorção ou saturação de fósforo**. Em determinados contextos, pode ser útil complementar com outros nutrientes principais para contextualizar a fertilidade global do sistema. Em sistemas extensivos, como a pastagem, parâmetros como o pH e a matéria orgânica são especialmente relevantes para interpretar a resposta do solo face a diferentes práticas de gestão pecuária.

4.1.2 Frequência recomendada

A frequência da monitorização do solo deve adaptar-se ao tipo de sistema produtivo e à dinâmica esperada dos processos edáficos.

Em sistemas agrícolas, recomenda-se uma **caracterização inicial de referência** no início do ciclo ou antes de implementar alterações nas práticas agrícolas, seguida de **amostragens intermédias em momentos-chave**, como fases posteriores à fertilização, desenvolvimento vegetativo ou períodos de maior risco de mobilização, e uma **amostragem final** após a campanha ou no início do período chuvoso, com o objetivo de avaliar o fósforo residual exposto ao transporte. Em termos gerais, pelo menos duas campanhas por ano são normalmente recomendadas em sistemas com fertilização ou gestão intensiva do solo.

Em sistemas de pecuária, especialmente quando existe ocupação por lotes sucessivos de animais, o protocolo ideal deve permitir acompanhar a evolução do fósforo **antes, durante e após o período de ocupação**, de modo a poder estimar o impacto direto da presença animal nos níveis de fósforo do solo. Em sistemas mais extensivos e de dinâmica lenta, como a pastagem, pode ser suficiente manter uma **frequência mínima anual**, complementada com amostragens adicionais quando ocorrerem mudanças significativas nas práticas de gestão do solo ou condições climáticas excecionais.

4.1.3 Relação com as práticas agrícolas

Os resultados do solo devem ser sempre interpretados à luz das práticas agrícolas aplicadas. Isto exige a disponibilidade de um registo detalhado da fertilização mineral e orgânica, aplicação de corretivos, coberturas vegetais, trabalhos no solo, carga pecuária, duração do pastoreio, rotação de parcelas ou usos intermédios do terreno.

Em sistemas agrícolas, esta interpretação permite ajustar o **balanço de nutrientes**, rever doses e momentos de aplicação, decidir se convém incorporar o fertilizante no solo ou mantê-lo na superfície e avaliar o efeito de medidas como a aplicação de biochar ou a manutenção de coberturas vegetais. Em parcelas com inclinação, por exemplo, a incorporação do fertilizante ou a presença de cobertura pode revelar-se crítica para reduzir o arrastamento pelas primeiras chuvas. Nos sistemas pecuários, a ligação entre análises e gestão permite relacionar a evolução do fósforo com a carga animal, a duração da ocupação, a rotação entre parcelas e a distribuição espacial dos dejetos.

4.2 Monitorização de sedimentos

4.2.1 Quando é relevante

A monitorização de sedimentos é especialmente relevante em sistemas onde o transporte de fósforo é dominado pela erosão e pelo arrastamento de partículas. Isto ocorre com maior intensidade em parcelas com inclinação moderada ou elevada, solos com baixa estabilidade estrutural, ausência de cobertura vegetal, episódios de chuva intensa ou presença de canais de drenagem onde se concentram e depositam materiais finos.

É também particularmente útil quando se pretende avaliar a eficácia de práticas de conservação do solo, como coberturas, sementeira direta, faixas vegetadas ou alterações na gestão do escoamento. Em sistemas extensivos como a pastagem, embora os eventos sejam mais pontuais, os episódios de chuva intensa podem ter uma contribuição relevante para o transporte de fósforo, pelo que a monitorização de sedimentos deve ser planeada de forma seletiva nos momentos de maior interesse.

4.2.2 Informação que fornece

A análise de sedimentos permite identificar a **fração particulada do fósforo** e avaliar o papel da erosão como mecanismo de perda de nutrientes. Fornece informação sobre a intensidade dos processos erosivos, a granulometria do material transportado e a composição do fósforo associado às diferentes frações.

Em sistemas avançados de monitorização, pode ser interessante analisar não só o fósforo total nos sedimentos, mas também outras variáveis como a **textura do sedimento**, a **matéria orgânica**, o **teor de água**, o **potencial redox** ou a **condutividade da fase intersticial**, especialmente em meios onde o fósforo retido possa ser posteriormente libertado para a coluna de água. Neste sentido, os sedimentos atuam não só como vetor de transporte, mas também como um «arquivo» de acumulação de fósforo a médio e longo prazo.

4.2.3 Recomendações práticas

A amostragem de sedimentos deve ser planeada com especial atenção à hidrologia do sistema e às condições de acessibilidade. Como critério geral, recomenda-se selecionar **pontos de convergência do fluxo**, linhas naturais de drenagem ou saídas de sub-bacias, onde o material transportado se integre de forma representativa. Ao recolher amostras de sólidos em suspensão na água, convém dar prioridade à **fase ascendente do hidrograma**, uma vez que é nesse momento que geralmente ocorre a maior mobilização de partículas.

Em sistemas com elevada carga orgânica ou presença de gado, deve distinguir-se entre sedimentos de origem mineral e materiais orgânicos ou efluentes. Em campanhas realizadas em explorações pecuárias ou avícolas, além disso, devem ser sempre respeitadas as medidas de biossegurança e de acesso estabelecidas pela exploração. Dada a logística associada a este tipo de amostragem, costuma ser mais eficaz dar prioridade à representatividade e qualidade das amostras do que aumentar indiscriminadamente o seu número.

4.3 Monitorização na água

4.3.1 Inclui amostragem clássica e/ou monitorização remota

A monitorização da água pode ser realizada através de **amostragem pontual ou clássica** e através de **monitorização contínua ou remota**, sendo ambas as abordagens complementares.

A amostragem clássica consiste na recolha manual de amostras de água para posterior análise em laboratório. Este método permite analisar com precisão parâmetros complexos, incluindo diferentes formas de fósforo, e continua a ser indispensável para a calibração dos sistemas automáticos e para as determinações de referência.

A monitorização contínua ou remota baseia-se na instalação de sensores ou sistemas de imagem em pontos de controlo que permitem registar, com elevada frequência temporal, variáveis como nível, caudal, turbidez, condutividade ou sólidos em suspensão, e até estimar a dinâmica do fósforo a partir de relações calibradas. No projeto, utilizou-se esta abordagem através de sistemas automáticos, incluindo câmaras e plataformas de transmissão de dados.

No que diz respeito à amostragem manual, a experiência de La Rioja põe em evidência uma questão importante: **a amostragem manual sem dispositivos de recolha de escoamento não é o sistema mais adequado quando se pretende captar episódios rápidos de escoamento superficial**. Nestes casos, é recomendável instalar dispositivos específicos de recolha, como pequenos reservatórios ou coletores situados em canais de escoamento, concebidos para recolher exclusivamente a água que circula durante o evento, minimizando o desfaseamento entre a precipitação e a amostragem.

4.3.2 Vantagens e limitações de cada abordagem

A **amostragem clássica** apresenta como principais vantagens a sua robustez, a sua flexibilidade analítica e a possibilidade de obter resultados laboratoriais com elevada precisão. Além disso, é o método de referência para muitos parâmetros utilizados em contextos regulamentares. Como limitações, oferece uma baixa resolução temporal e pode perder eventos de transferência muito breves, especialmente durante tempestades ou episódios de escoamento rápido. Requer ainda uma elevada mobilização humana precisamente nos momentos mais críticos.

A **monitorização remota ou contínua** permite captar eventos de curta duração, acompanhar a evolução temporal do sistema e dispor de alertas ou informações quase em tempo real. Entre as suas vantagens destacam-se a aquisição contínua de dados e a possibilidade de documentar visualmente o comportamento hidrológico do ponto de controlo. Como limitações, exige calibração prévia, manutenção recorrente, fornecimento de energia, verificação operacional frequente e um custo superior de instalação e exploração. Também pode ser afetada por condições meteorológicas adversas, deposição de resíduos, problemas de comunicação ou limitações de transmissão de dados.

4.3.3 Condições ótimas de utilização

As condições ótimas para a monitorização da água dependem do regime hidrológico do sistema e do objetivo do acompanhamento.

Na amostragem pontual, a captação deve ser planeada antes, durante e após os episódios de chuva, especialmente quando se espera escoamento suficiente para mobilizar fósforo e sedimentos. Em sistemas como a pastagem, onde o escoamento é

sazonal e os caudais contínuos são escassos, a flexibilidade operacional e a capacidade de reação rápida são fatores decisivos para aproveitar as janelas de amostragem.

Na monitorização contínua, é imprescindível selecionar pontos que mantenham presença de água suficiente durante o período de acompanhamento ou, pelo menos, nas fases hidrológicamente ativas. Devem também ser escolhidos troços estáveis, com bom acesso e condições adequadas para a instalação e manutenção do equipamento. O planeamento deve antecipar uma fase de calibração antes dos períodos críticos.

4.3.4 Aspetos críticos detetados

A experiência acumulada nos projetos-piloto permitiu identificar vários aspetos críticos. Em primeiro lugar, a necessidade de estabelecer **curvas de calibração específicas para cada localização**, dado que a relação entre turbidez, sólidos em suspensão e fósforo pode variar significativamente entre sistemas. Em segundo lugar, a dependência das condições meteorológicas e hidrológicas, que pode dificultar tanto a recolha de imagens como a obtenção de amostras representativas. Em terceiro lugar, a necessidade de garantir o funcionamento contínuo da transmissão de dados, o fornecimento de energia e a manutenção preventiva dos equipamentos.

A isto acrescenta-se, no caso da amostragem pontual, a dificuldade de sincronizar a recolha da amostra com o evento real de escoamento. Este desfasamento pode alterar significativamente a concentração de sólidos em suspensão e, conseqüentemente, a interpretação do fósforo particulado transportado. Por esse motivo, quando não for possível implementar uma monitorização contínua, convém, pelo menos, dispor de sistemas passivos ou semiautomáticos de recolha que reduzam a dependência da presença física no terreno.

5. Integração de dados e análise de risco

A análise do risco de mobilização do fósforo requer a integração de informações provenientes de diferentes fontes e escalas, combinando dados edafológicos, hidrológicos, climáticos e de gestão. Esta integração permite passar de uma monitorização descritiva para uma **interpretação funcional do sistema**, orientada para identificar situações de risco e apoiar a tomada de decisões.

Nenhuma das variáveis consideradas isoladamente permite explicar o comportamento do fósforo. É a interação entre elas que determina se o nutriente permanece no sistema ou é mobilizado para o meio aquático.

5.1 Tipologia dos dados considerados

A avaliação do risco deve basear-se num conjunto de dados estruturado que permita caracterizar tanto o estado do sistema como os processos que controlam a mobilização do fósforo.

Phos4Cycle

Em primeiro lugar, são considerados **dados edáficos**, que incluem o fósforo disponível e total, bem como as propriedades físico-químicas do solo (textura, pH, matéria orgânica, carbonatos, etc.), que determinam a capacidade de retenção e libertação do nutriente.

Em segundo lugar, são integrados **dados hidrológicos**, especialmente aqueles relacionados com a geração de escoamento e o transporte de sedimentos, como a presença de escoamento superficial, os sólidos em suspensão, a turbidez, o nível ou caudal da água e, quando possível, a concentração de fósforo na água.

A estes juntam-se os **dados climáticos**, fundamentalmente precipitação, intensidade da chuva, temperatura e ocorrência de eventos extremos, que atuam como principal motor dos processos de mobilização.

Por fim, são incorporados **dados de gestão agronómica e pecuária**, que se revelam determinantes para interpretar a origem do fósforo e a sua distribuição no sistema. Estes incluem fertilização mineral e orgânica, gestão do solo, presença de cobertura vegetal, rotações, bem como, em sistemas de pecuária, carga animal, duração do pastoreio, distribuição espacial dos dejetos ou, em sistemas intensivos, características da alimentação e gestão de estrume.

Em sistemas específicos, como a produção avícola, podem ser incorporados também dados complementares, tais como consumos, composição da ração, produção de dejetos ou balanços de massa, que permitem estimar com maior precisão os fluxos de fósforo dentro do sistema.

5.2 Variáveis determinantes do risco

O risco de mobilização do fósforo não depende apenas da sua concentração, mas da combinação de fatores que favorecem o seu transporte para fora do sistema.

De forma geral, este risco pode ser interpretado a partir de três componentes principais:

- **Fonte de fósforo**, associada à quantidade de fósforo disponível no solo ou recentemente introduzida, seja através de fertilização, corretivos orgânicos ou dejetos animais.
- **Capacidade de mobilização**, determinada pelas características do solo e do terreno, tais como a inclinação, a estabilidade estrutural, a cobertura vegetal ou a suscetibilidade à erosão.
- **Conectividade hidrológica**, ou seja, a facilidade com que o fósforo mobilizado pode atingir um ponto de drenagem ou uma massa de água, em função da rede de escoamento, da presença de canais ou da distância até ao ponto de saída.

Em sistemas de criação de gado, especialmente naqueles com acesso a parcelas exteriores, a **distribuição espacial dos dejetos** assume relevância. A fração de fósforo depositada em zonas diretamente expostas à água de escoamento constitui o principal vetor de risco, em comparação com a fração que permanece controlada em instalações ou armazéns.

Phos4Cycle

Da mesma forma, em sistemas intensivos, a **qualidade da alimentação** e a digestibilidade do fósforo condicionam diretamente a quantidade de fósforo excretado, o que introduz um fator adicional de controlo do risco desde a origem.

Estes três componentes permitem estruturar o risco de forma operacional, facilitando a sua interpretação em termos de probabilidade de mobilização e priorização de medidas de gestão.

5.3 Relação gestão–clima–resposta

A análise do risco deve centrar-se na interação entre as práticas de gestão e as condições climáticas, uma vez que é esta combinação que determina a resposta do sistema.

Os episódios de maior risco ocorrem geralmente quando coincidem:

- **níveis elevados de fósforo disponível na superfície** (após fertilização, aplicação de estrume ou acumulação de dejetos),
- com **eventos de precipitação intensos ou concentrados**,
- especialmente quando o solo apresenta condições favoráveis ao escoamento (saturação, baixa cobertura, compactação).

Exemplos típicos incluem as primeiras chuvas após períodos de seca, onde se verifica um efeito de «lavagem» do fósforo acumulado na superfície, ou precipitações intensas após períodos de pastoreio concentrado ou aplicação recente de fertilizantes.

Em contrapartida, determinadas práticas de gestão podem reduzir significativamente este risco, como a presença de cobertura vegetal, a incorporação do fertilizante no solo, a redução da carga pecuária em períodos críticos ou a adaptação do calendário de gestão às condições meteorológicas.

Em sistemas com maior capacidade de controlo operacional, como explorações em estábulo parcial, a gestão da presença de animais em função das condições climáticas pode funcionar como uma ferramenta direta de mitigação do risco.

5.4 Importância da dimensão temporal

A dimensão temporal é um elemento-chave na interpretação do risco de contaminação por fósforo.

Por um lado, os processos edáficos apresentam uma **dinâmica lenta**, em que a acumulação ou redução do fósforo no solo ocorre de forma progressiva ao longo de campanhas ou anos. Isto implica que os efeitos das práticas de gestão nem sempre são imediatos e requerem acompanhamento a médio e longo prazo.

Por outro lado, os processos de mobilização e transporte do fósforo estão associados a **eventos pontuais**, principalmente episódios de chuva, que podem gerar picos de exportação de nutrientes em períodos muito curtos de tempo.

Esta dualidade torna necessário combinar:

- uma abordagem de **acompanhamento contínuo ou a longo prazo**, que permita detetar tendências e acumulações,
- com uma abordagem de **análise por eventos**, orientada para identificar os momentos de maior risco e quantificar o seu impacto.

Neste contexto, a monitorização ao longo de vários ciclos produtivos ou anos é fundamental para diferenciar entre efeitos estruturais do sistema e variabilidade interanual associada ao clima.

Além disso, a comparação entre períodos (regadio vs. inverno, seco vs. húmido) permite compreender melhor os mecanismos dominantes de transporte e ajustar as estratégias de gestão em função do calendário de risco.

6. Utilização dos resultados para a tomada de decisões

6.1. Aplicação prática e modelo de apoio à decisão

Os resultados obtidos nos diferentes projetos-piloto permitiram desenvolver um modelo integrado de interpretação da dinâmica do fósforo em sistemas agro-pecuários, baseado na combinação de variáveis edáficas, hidrológicas, climáticas e de gestão. Este modelo permite identificar as condições sob as quais o fósforo passa de retido no sistema para mobilizado para o meio aquático, estabelecendo relações de causa-efeito entre práticas de gestão e resposta do sistema.

O modelo desenvolvido constitui a base de um sistema de apoio à decisão que será implementado numa ferramenta digital acessível através de uma plataforma web. Esta ferramenta permitirá introduzir informações básicas do sistema (caracterização do solo, uso do solo, gestão aplicada, condições climáticas, etc.) e obter uma avaliação do risco de mobilização do fósforo, juntamente com orientações técnicas para a sua mitigação.

De um ponto de vista operacional, o modelo permite:

- avaliar o estado inicial do sistema em termos de disponibilidade e acumulação de fósforo,
- identificar situações de risco associadas a eventos de precipitação ou práticas de gestão do solo,
- antecipar episódios de mobilização em função da interação solo-clima-práticas,
- priorizar zonas dentro da parcela ou sub-bacia onde intervir,
- validar o efeito das alterações nas práticas agrícolas através do acompanhamento temporal.

Desta forma, passa-se de uma monitorização descritiva para uma abordagem preditiva e operacional, na qual os dados gerados no terreno se transformam em informação útil para a tomada de decisões.

6.2. Aplicação na gestão e noutros domínios

O sistema desenvolvido permite a sua aplicação direta na gestão agrícola e agro-pecuária, facilitando a tomada de decisões ao nível da exploração com base em critérios objetivos.

Em sistemas agrícolas, o modelo permite otimizar a fertilização, ajustando as doses à capacidade real do solo e evitando aplicações em momentos de alto risco, bem como orientar a implementação de práticas de conservação do solo em zonas críticas de escoamento.

Em sistemas pecuários, facilita a gestão da carga e distribuição do gado, o planeamento dos períodos de ocupação e descanso e a identificação de zonas sensíveis à acumulação de dejetos.

Em sistemas intensivos, o modelo permite agir na origem através da melhoria da eficiência alimentar, reduzindo a excreção de fósforo e a sua potencial mobilização posterior.

Para além da exploração, o modelo apresenta um elevado potencial de aplicação em diferentes domínios:

- **Assessoria técnica**, permitindo desenvolver recomendações específicas com base em dados reais do sistema.
- **Planeamento territorial**, através da identificação de sub-bacias hidrográficas ou zonas com maior risco de exportação de fósforo.
- **Gestão de infraestruturas hidráulicas**, em sistemas de regadio ou drenagem, onde o controlo do caudal influencia o transporte de sedimentos.
- **Indústria agroalimentar**, orientando o desenvolvimento de estratégias de redução de impactos na origem.
- **Sistemas de digitalização agrícola**, integrando-se em plataformas de gestão ou ferramentas de agricultura de precisão.

6.3. Contribuição para a estratégia do projeto

O presente Guia funciona como um elemento de ligação entre os resultados experimentais obtidos nos projetos-piloto e a estratégia global do projeto, permitindo traduzir a evidência técnica em critérios operacionais aplicáveis a diferentes territórios.

Uma das principais contribuições é a definição de um quadro metodológico comum que facilita a homogeneização da monitorização do fósforo no espaço SUDOE, permitindo trabalhar com uma base técnica partilhada entre regiões com sistemas produtivos diversos.

O Guia contribui para:

- estruturar o conhecimento gerado nos projetos-piloto,
- estabelecer critérios comparáveis entre territórios,
- identificar práticas de gestão prioritárias em função do risco,

- servir de base para o desenvolvimento de ferramentas de apoio à decisão.

Esta abordagem permite avançar para uma gestão do fósforo baseada na integração de dados e na compreensão funcional do sistema, superando abordagens parciais centradas apenas no solo ou na água.

6.4. Valor para as políticas públicas

Os resultados obtidos fornecem evidências técnicas diretamente utilizáveis na conceção, implementação e avaliação de políticas públicas relacionadas com a gestão de nutrientes, a proteção da água e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Ao contrário das abordagens tradicionais centradas principalmente no azoto, a metodologia desenvolvida permite integrar de forma operacional a dinâmica do fósforo na tomada de decisões, fornecendo informações essenciais sobre os processos de mobilização, transporte e acumulação do nutriente à escala da bacia hidrográfica.

No contexto da região SUDOE, esta contribuição revela-se especialmente relevante para o desenvolvimento e a melhoria dos quadros normativos e estratégicos existentes:

- ❖ **Espanha**, onde a metodologia pode complementar a aplicação do Real Decreto 47/2022 e reforçar a gestão em **zonas vulneráveis**, incorporando o fósforo como elemento-chave na poluição difusa. Além disso, fornece ferramentas objetivas para a conceção e acompanhamento de **regimes ecológicos da PAC**, especialmente aqueles relacionados com coberturas vegetais, gestão do solo ou fertilização sustentável.
- ❖ **França**, onde a abordagem contribui para reforçar programas como os Programmes d'Actions Nitrates e as estratégias de gestão de bacias hidrográficas (SDAGE), fornecendo critérios técnicos para integrar o fósforo na avaliação do risco de eutrofização e no ordenamento do território à escala da bacia hidrográfica.
- ❖ **Portugal**, onde a metodologia pode ser integrada em instrumentos como o Plano de Ação para as Zonas Vulneráveis e na gestão dos recursos hídricos em regiões como o Baixo Mondego ou o Baixo Vouga, melhorando a capacidade de diagnóstico e priorização de medidas em sistemas agrícolas intensivos e de regadio.

A nível europeu, os resultados contribuem diretamente para os objetivos estratégicos definidos na:

- Diretiva-Quadro da Água (2000/60/CE), ao melhorar a caracterização das pressões difusas,
- a Diretiva dos Nitratos (91/676/CEE), alargando a sua abordagem ao fósforo,
- a Estratégia para os Solos até 2030, através de indicadores operacionais de perda de nutrientes,
- a Estratégia «Do Campo à Mesa», no que diz respeito à redução das perdas de nutrientes.

- La Directiva 2025/2360 del Parlamento Europeo y el Consejero, de 12 de noviembre de 2025 relativa a la vigilancia y la resiliencia del suelo

Além disso, a disponibilidade de dados comparáveis e de metodologias harmonizadas permite:

- melhorar a coerência entre territórios,
- reduzir a incerteza na avaliação das medidas,
- facilitar o acompanhamento de políticas públicas com base empírica.

Neste sentido, o principal valor do sistema não reside apenas na geração de dados, mas na sua capacidade de **transformar a monitorização num instrumento de apoio real à governação ambiental**.

6.5. Potencial de transferência e capitalização

O sistema desenvolvido apresenta um elevado potencial de transferência, uma vez que se baseia em princípios metodológicos replicáveis e numa estrutura de monitorização adaptável a diferentes sistemas produtivos e contextos territoriais.

O Guia funciona como elemento-chave desta transferência, ao traduzir a experiência dos projetos-piloto num quadro operacional que permite a sua aplicação direta por parte de técnicos, administrações e entidades do setor.

Em particular, o sistema facilita:

- a conceção estruturada de redes de monitorização à escala da bacia hidrográfica,
- a aplicação de protocolos harmonizados de amostragem e análise,
- a interpretação integrada de dados de solo, água e sedimentos,
- a identificação operacional de zonas de risco (hotspots) de perda de fósforo.

Um dos principais elementos de valor acrescentado é a integração do modelo conceptual numa ferramenta digital, que permite:

- processar dados de entrada (solo, clima, gestão),
- gerar indicadores de risco de forma automatizada,
- apoiar a tomada de decisões sem necessidade de reproduzir todo o esforço experimental.

Esta abordagem transforma os resultados dos projetos-piloto numa **solução operacional, escalável e replicável**, facilitando:

- a sua aplicação em novos territórios,
- a sua integração em serviços de consultoria agronómica,
- a sua utilização por parte das administrações públicas em processos de planeamento e avaliação.

À escala do espaço SUDOE, esta capacidade de transferência contribui diretamente para a capitalização do conhecimento gerado, permitindo construir uma base comum para a

gestão do fósforo em sistemas agro-pecuários e favorecendo a coerência entre políticas, territórios e atores.

7. Recomendações técnicas para a replicabilidade

Esta secção reúne as condições técnicas, operacionais e organizacionais necessárias para reproduzir o sistema de monitorização desenvolvido, garantindo a obtenção de dados representativos e comparáveis em diferentes contextos agro-pecuários.

7.1. Requisitos mínimos

A replicabilidade do sistema de monitorização requer a garantia de uma série de condições básicas que permitam manter a coerência metodológica e a qualidade dos dados obtidos.

Em primeiro lugar, é imprescindível dispor de uma delimitação hidrológica clara da área de estudo, baseada na análise de modelos digitais do terreno e validada no terreno. A identificação de sub-bacias funcionais e de um ponto de saída bem definido, onde converja exclusivamente o fluxo proveniente da área analisada, é um requisito fundamental para interpretar corretamente os processos de transporte de fósforo.

Da mesma forma, é necessário estabelecer uma rede de amostragem representativa que integre os diferentes compartimentos do sistema (solo, sedimentos e água). Isto implica definir um número suficiente de pontos de amostragem por sub-bacia, distribuídos em função do gradiente topográfico, da variabilidade edáfica e dos usos do solo, bem como incluir pontos estratégicos em zonas de convergência do escoamento.

Do ponto de vista analítico, é necessário dispor de uma caracterização inicial do sistema, incluindo parâmetros edáficos-chave (fósforo disponível, fósforo total, pH, matéria orgânica, textura), que sirva de referência para a interpretação da evolução temporal. Da mesma forma, é imprescindível ter acesso a laboratórios capazes de realizar análises normalizadas tanto no solo como na água.

Outro requisito fundamental é a disponibilidade de informação detalhada sobre as práticas agronómicas ou agro-pecuárias, incluindo fertilização, rotações, carga pecuária ou distribuição do pastoreio. Sem este registo, a interpretação dos dados perde grande parte do seu valor explicativo.

Por fim, a implementação do sistema requer garantir o acesso regular à parcela e aos pontos de amostragem, bem como dispor de capacidade técnica para realizar campanhas de amostragem em condições variáveis de campo. Em sistemas específicos, como os pecuários e es intensivos, devem ser consideradas também as restrições de acesso decorrentes de protocolos de biossegurança.

7.2. Fatores críticos de sucesso

A experiência acumulada nos diferentes projetos-piloto permitiu identificar uma série de fatores-chave que condicionam o sucesso do sistema de monitorização para além dos requisitos técnicos mínimos.

Um dos aspetos mais relevantes é o conhecimento prático do território, que permite interpretar corretamente os fluxos de escoamento, validar a delimitação hidrológica e ajustar a localização dos pontos de amostragem à realidade funcional do sistema. Este conhecimento deve ser combinado com ferramentas SIG e análises técnicas para garantir um desenho robusto.

O envolvimento do agricultor ou criador de gado constitui outro fator determinante, uma vez que facilita o acesso à informação de gestão e à parcela, e permite uma melhor interpretação dos resultados. A coordenação entre a equipa técnica e o gestor da exploração é fundamental para garantir a continuidade do acompanhamento.

Do ponto de vista operacional, o planeamento flexível da amostragem é essencial. A capacidade de adaptar o calendário a eventos climáticos, especialmente precipitações, determina em grande medida a possibilidade de captar episódios representativos de mobilização de fósforo.

Em sistemas com monitorização contínua, a calibração correta dos equipamentos e a manutenção regular dos sensores são elementos críticos para garantir a fiabilidade dos dados. A acumulação de sedimentos, matéria orgânica ou falhas na transmissão podem introduzir erros se não forem geridos adequadamente.

Da mesma forma, a existência de uma rede de colaboração (laboratórios, técnicos, consultores, entidades locais) facilita tanto a execução da amostragem como a interpretação e valorização dos resultados.

Por último, a integração de uma abordagem multidisciplinar, combinando conhecimentos em edafologia, agronomia, hidrologia e produção animal, é fundamental para interpretar de forma rigorosa a dinâmica do fósforo.

7.3. Riscos e limitações

A replicação do sistema de monitorização deve ter em conta uma série de riscos e limitações que podem afetar tanto a qualidade dos dados como a continuidade do acompanhamento.

Os fatores climáticos constituem o principal elemento de incerteza. Episódios de precipitação intensa podem dificultar o acesso aos pontos de amostragem ou mesmo impedir a recolha de amostras, enquanto períodos de seca limitam a geração de escoamento superficial e a obtenção de dados hidrológicos. Além disso, eventos extremos podem danificar equipamentos ou alterar as condições de medição.

Outro aspeto relevante é a variabilidade entre locais. As diferenças no solo, na topografia, no clima ou na gestão implicam que os resultados não são diretamente extrapoláveis,

Phos4Cycle

sendo necessário adaptar a conceção do sistema às condições específicas de cada local.

Do ponto de vista operacional, existem riscos associados à disponibilidade de recursos humanos e económicos. A monitorização requer continuidade ao longo do tempo, capacidade de resposta e a eventos pontuais e manutenção periódica dos equipamentos, aspetos que podem ser limitados se não forem devidamente planeados.

Em sistemas com instrumentação no terreno, devem ser considerados riscos adicionais, tais como danos físicos, vandalismo, acumulação de sedimentos nos sensores, falhas de bateria ou interrupções na transmissão de dados, que podem gerar lacunas nas séries temporais, especialmente em momentos críticos.

Da mesma forma, em determinados contextos produtivos, como a pecuária intensiva, as restrições de acesso decorrentes de protocolos sanitários (por exemplo, em situações de risco de doenças como a gripe aviária) podem limitar ou interromper temporariamente o acompanhamento.

Por fim, deve ter-se em conta que os processos associados à dinâmica do fósforo apresentam uma componente temporal relevante. As alterações no solo são progressivas e podem não ser detetáveis a curto prazo, o que reforça a necessidade de conceber sistemas de monitorização a médio e longo prazo para obter resultados robustos.