

(E2.4.1.) RELATÓRIO DOS PILOTOS

Interreg
Sudoe



Co-funded by
the European Union

Phos4Cycle

0. Introdução

0.1. *Objetivo do documento E2.4.1.*

O objetivo do presente documento (E2.4.1) é compilar, sistematizar e apresentar de forma estruturada os resultados técnicos decorrentes do projeto-piloto de monitorização de fosfatos desenvolvido no âmbito do Grupo de Trabalho 2 (GT2) do projeto Phos4Cycle. O documento inclui a descrição dos projetos-piloto implementados nos diferentes sistemas agro-pecuários representativos da região SUDOE, bem como a conceção e a metodologia aplicada em cada um deles, com o objetivo de garantir a coerência e a comparabilidade da informação gerada.

O relatório integra a informação técnica obtida durante a execução dos projetos-piloto em diferentes formatos, incluindo cartografia associada à delimitação das sub-bacias de estudo, a tipologia dos solos e a localização dos pontos de amostragem de solo, sedimentos e água. Além disso, incorpora séries temporais relativas ao teor inicial e à evolução das principais formas de fósforo no solo, à evolução de variáveis climáticas relevantes e à concentração de fósforo e sólidos em suspensão no meio aquático.

Além disso, o documento inclui representações gráficas e análises que permitem explorar a relação entre a concentração de fósforo na água e a presença de sólidos em suspensão, bem como a interação entre as variáveis edáficas, climáticas e de gestão observadas durante o período de pilotagem. No seu conjunto, a informação apresentada constitui uma base técnica sólida para a compreensão da dinâmica do fósforo nos sistemas agro-pecuários analisados e para a sua posterior utilização no desenvolvimento do modelo de análise de risco e do guia de monitorização do projeto.

0.2. *O que é a fase piloto no Phos4Cycle*

A fase piloto desenvolvida no âmbito do projeto Phos4Cycle constituiu o núcleo técnico-experimental do Grupo de Trabalho 2 (GT2) e teve como objetivo validar, em condições reais e representativas da região SUDOE, um sistema integrado de monitorização do fósforo associado às atividades agro-pecuárias. Os projetos-piloto foram concebidos à escala da bacia hidrográfica e implementados em diferentes sistemas produtivos, com o objetivo de captar a variabilidade edafoclimática, de gestão e de pressão antrópica existente nos territórios de estudo.

Através dos projetos-piloto, o Phos4Cycle gerou informação técnica baseada em dados reais sobre a dinâmica do fósforo no solo, nos sedimentos e na água, bem como sobre a sua relação com as práticas de gestão agrícola e pecuária e as condições climáticas. Essas informações constituíram a base para o desenvolvimento do modelo de análise do risco de contaminação por fosfatos e para a elaboração do guia de monitorização do projeto « », contribuindo para melhorar o conhecimento e a gestão sustentável do fósforo à escala da bacia hidrográfica.

1. Contexto territorial e produtivo

O conjunto de projetos-piloto desenvolvidos no âmbito do projeto está distribuído por diferentes territórios do espaço SUDOE, abrangendo uma ampla diversidade de condições edafoclimáticas, sistemas produtivos e configurações hidrológicas. Esta diversidade constitui um elemento-chave da abordagem metodológica, uma vez que permite analisar a dinâmica do fósforo em contextos representativos dos principais sistemas agro-pecuários do sudoeste europeu.

Os projetos-piloto foram implementados em sistemas produtivos contrastantes, incluindo agricultura extensiva de cereais, sistemas arbóreos (vinha e olival), sistemas agroflorestais de pastagem e sistemas pecuários intensivos e semi-intensivos associados à produção forrageira e à exploração avícola. Além disso, foram considerados tanto sistemas de sequeiro como de regadio, bem como cenários com drenagem natural e sistemas com drenagem artificial, o que permite captar uma ampla variabilidade nos processos de mobilização e transporte de nutrientes.

Do ponto de vista territorial, os projetos-piloto localizam-se em bacias hidrográficas pertencentes a diferentes sistemas fluviais da região SUDOE, caracterizadas por condições topográficas variáveis, que vão desde planícies aluviais com declives muito reduzidos até sistemas com declives moderados e presença de processos erosivos ativos. Esta heterogeneidade influencia diretamente os mecanismos de geração de escoamento, a conectividade hidrológica e a capacidade de transporte de sedimentos.

O contexto edafoclimático abrange desde climas mediterrânicos continentais com sazonalidade acentuada e episódios de precipitação intensa, até climas oceânicos com precipitações mais regulares ao longo do ano. Os solos apresentam também uma elevada variabilidade, incluindo desde solos pouco evoluídos e com baixa disponibilidade de fósforo, até solos agrícolas com maior capacidade de retenção e acumulação deste nutriente.

Neste contexto, a seleção dos projetos-piloto responde à necessidade de analisar a dinâmica do fósforo numa perspetiva integrada, considerando a interação entre a gestão agronómica, as características do solo, a configuração hidrológica das parcelas e as condições climáticas. Esta abordagem permite gerar conhecimento aplicável a todo o espaço SUDOE e estabelece as bases para o desenvolvimento de modelos de análise do risco de contaminação por fósforo e de estratégias de gestão adaptadas a diferentes contextos produtivos.

1.1. Definição dos projetos-piloto

1.1.1. Projeto-piloto 1 – Sistema agrícola extensivo (Castela e Leão, Espanha)

Espanha / Castela e Leão / Bacia hidrográfica do Douro

ITAGRA.CT



Figura 1. Projeto-piloto ITAGRA.CT. Espanha. Palência

Sistema produtivo

O projeto-piloto desenvolve-se num sistema agrícola extensivo de carácter cerealista, baseado no cultivo de herbáceas anuais no âmbito de rotações representativas do centro-sul da província de Palência. O manejo agronómico segue práticas convencionais, incluindo trabalhos de preparação do solo, sementeira e fertilização mineral, com especial destaque para a fertilização fosfatada no estabelecimento e desenvolvimento da cultura.

Este tipo de sistema produtivo condiciona diretamente a dinâmica do fósforo no sistema solo-planta-água, especialmente no que diz respeito à sua acumulação no solo e à sua potencial mobilização associada a processos de escoamento superficial e transporte de sedimentos.

Descrição do ambiente

O projeto-piloto está localizado num ambiente agrícola contínuo, característico de uma zona cerealífera, com predominância de superfícies cultivadas e ausência de descontinuidades significativas no uso do solo. Esta homogeneidade espacial permite analisar de forma representativa os processos de redistribuição do fósforo à escala da parcela e da sub-bacia, minimizando a influência de aportes externos.

A configuração do território favorece a análise da conectividade hidrológica interna do sistema, bem como a identificação de zonas de geração, transporte e acumulação de escoamento.

Características da bacia

Phos4Cycle

A bacia associada ao projeto-piloto apresenta um uso do solo homogêneo e claramente agrícola, com uma configuração hidrológica funcionalmente fechada, na qual os fluxos de escoamento são gerados e concentram-se exclusivamente dentro da própria parcela.

O relevo caracteriza-se por declives suaves mas contínuos, que estruturam a drenagem superficial através de uma rede de linhas de fluxo bem definidas. Estas vias preferenciais canalizam o escoamento para um eixo de drenagem principal situado na parte baixa da parcela, atuando como zonas-chave para o transporte de sedimentos e fósforo particulado durante episódios de precipitação.

Do ponto de vista edafológico, os solos apresentam texturas médias a franco-argilosas, com presença de carbonatos e uma capacidade moderada a elevada de retenção de nutrientes. Estas características favorecem a adsorção do fósforo nas frações finas do solo, condicionando que a sua mobilização ocorra principalmente associada ao transporte de partículas durante processos erosivos.

Contexto edafoclimático

A área de estudo insere-se num clima mediterrânico continentalizado, caracterizado por invernos frios, verões secos e uma sazonalidade acentuada nas precipitações. Embora a pluviometria anual seja moderada, a concentração das precipitações em episódios de alta intensidade aumenta o risco de escoamento superficial e mobilização de fósforo.

Estas condições favorecem a ocorrência de eventos pontuais de exportação de fósforo, especialmente quando coincidem com momentos de baixa cobertura vegetal ou após a aplicação de fertilização.

Importância do sistema produtivo

O sistema agrícola extensivo de cultivo de cereais constitui um dos principais modelos produtivos do centro-sul da província de Palência e, em geral, de vastas zonas de Castela e Leão. A sua elevada extensão territorial e a homogeneidade do seu manejo tornam-no um elemento-chave no balanço regional de nutrientes.

Do ponto de vista ambiental, pequenas variações nas práticas de fertilização e gestão do solo podem traduzir-se em impactos cumulativos significativos sobre a qualidade do solo e da água à escala da bacia hidrográfica.

Problemas associados ao fósforo

Neste tipo de sistemas produtivos, a dinâmica do fósforo é condicionada pela aplicação de fertilização mineral e pelas características edáficas do solo. A elevada capacidade de retenção favorece a acumulação de fósforo no horizonte superficial, enquanto a sua mobilização ocorre principalmente sob a forma de fósforo particulado associado a processos de erosão e escoamento.

A combinação de fertilização, estrutura do solo e eventos de precipitação intensa gera um cenário em que podem ocorrer perdas difusas de fósforo para o meio hídrico. O

projeto-piloto permite analisar estes processos em condições reais, identificando os mecanismos de transporte e as zonas de maior risco dentro da bacia hidrográfica.

1.1.2. Projeto-piloto 2 – Sistema arbóreo (vinha e olival) (La Rioja, Espanha)

Espanha / La Rioja / Bacia hidrográfica do Ebro

Governo de La Rioja – Serviço de Investigação Agrária (ICVV)



Figura 2. Projeto-piloto Governo de La Rioja. Espanha. La Rioja

Sistema produtivo

O projeto-piloto desenvolve-se em sistemas arbóreos representativos da região, fundamentalmente vinhas para vinificação e olivais. Trata-se de culturas permanentes implantadas em encostas, geridas através de práticas agronómicas habituais neste tipo de sistemas, incluindo o manejo do solo, o controlo da vegetação espontânea e a fertilização.

Este tipo de sistemas apresenta particularidades relevantes na dinâmica do fósforo, uma vez que a interação entre a inclinação, o manejo do solo e a cobertura vegetal condiciona os processos de erosão e o transporte de partículas, sendo estes mecanismos fundamentais na mobilização do fósforo.

Descrição do ambiente

O projeto-piloto está localizado numa paisagem caracterizada por encostas estruturadas em socacos ou terraços, onde predominam as culturas lenhosas. Este tipo de configuração geomorfológica gera uma forte diferenciação espacial entre zonas de geração de escoamento nas partes altas e zonas de acumulação nas partes baixas.

A alternância entre vinhas e olivais, juntamente com a disposição em encosta, favorece o aparecimento de processos erosivos e a redistribuição de materiais dentro da própria sub-bacia.

Características da bacia

A bacia apresenta uma topografia variável, com inclinações que oscilam entre moderadas e suaves (aproximadamente entre 2% e 10%), o que condiciona um

escoamento relativamente rápido nas zonas mais elevadas e processos de acumulação nas zonas de menor inclinação.

Identificam-se processos ativos de erosão hídrica, especialmente nas zonas com menor cobertura vegetal ou com um manejo mais intensivo do solo, manifestando-se sob a forma de sulcos e transporte de sedimentos para as partes baixas da encosta.

Do ponto de vista edáfico, os solos são pouco evoluídos e apresentam uma elevada heterogeneidade, condicionada pelo material parental (lutitas e arenitos) e pela dinâmica erosiva. Esta variabilidade edáfica influencia a capacidade de retenção do fósforo e a sua suscetibilidade a ser mobilizado.

A drenagem superficial é fortemente condicionada pela topografia e pela disposição das parcelas, gerando uma conectividade hidrológica significativa entre as zonas altas e baixas da sub-bacia.

Contexto edafoclimático

A área apresenta um clima de transição entre o mediterrânico e o continental, com influência tanto atlântica como mediterrânica. Caracteriza-se por invernos frios, verões quentes e secos e uma distribuição irregular das precipitações, concentradas principalmente no outono e na primavera.

Estas condições favorecem a ocorrência de eventos de precipitação de certa intensidade que, em combinação com a inclinação, aumentam o risco de erosão e transporte de sedimentos, constituindo um dos principais mecanismos de mobilização do fósforo nestes sistemas.

Importância do sistema produtivo

A vinha e o olival constituem sistemas produtivos de elevada relevância económica e territorial em La Rioja, moldando a paisagem agrícola e contribuindo de forma significativa para a atividade agroalimentar da região.

Do ponto de vista ambiental, estes sistemas desempenham um papel fundamental na dinâmica dos nutrientes à escala da bacia hidrográfica, especialmente no que diz respeito aos processos de erosão e redistribuição do solo, que podem ter implicações diretas na qualidade da água.

Problemas associados ao fósforo

Em sistemas arbóreos em encostas, a principal via de mobilização do fósforo está associada ao transporte de sedimentos gerado por processos de erosão hídrica. A combinação de inclinação, eventos de precipitação e manejo do solo favorece a perda de partículas finas, às quais o fósforo se encontra adsorvido.

Phos4Cycle

Neste contexto, o fósforo é mobilizado predominantemente na forma de partículas, sendo as zonas de maior inclinação e menor cobertura vegetal as principais áreas de geração, enquanto as zonas baixas atuam como áreas de acumulação.

O projeto-piloto permite analisar a relação entre o manejo do solo, os processos erosivos e o transporte de fósforo, fornecendo informações essenciais para a identificação de zonas de risco e a definição de estratégias de gestão orientadas para a redução da perda de nutrientes.

1.1.3. Piloto 4 e Piloto 7 – Sistemas agrícolas de regadio e pecuária intensiva (Portugal – Coimbra e Aveiro)

Portugal / Região Centro / Bacias hidrográficas do Mondego (Coimbra) e do Vouga (Aveiro)

Instituto Politécnico de Coimbra (i2A) e Calcob



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

Sistema produtivo

O projeto-piloto integra dois sistemas agrícolas representativos da irrigação intensiva do centro de Portugal, ambos baseados em rotações de culturas com uma presença estrutural do milho, embora com orientações produtivas diferenciadas.

No caso de Coimbra, o sistema orienta-se para a produção de culturas hortícolas e industriais em rotação com milho em grão, enquanto em Aveiro predomina um sistema agro-pecuário ligado à produção de milho forrageiro e culturas associadas destinadas à alimentação de gado bovino leiteiro.

Em ambos os casos, trata-se de sistemas de alta intensidade de gestão, com fertilização, rotações contínuas e forte dependência do controlo hídrico, o que condiciona significativamente a dinâmica do fósforo no sistema solo-água.

Descrição do ambiente

Phos4Cycle

Os projetos-piloto desenvolvem-se em ambientes agrícolas altamente produtivos, caracterizados por solos de elevada fertilidade e pela presença de infraestruturas hidráulicas que permitem o controlo da irrigação e da drenagem.

O projeto-piloto de Coimbra situa-se numa planície aluvial associada ao vale inferior do rio Mondego, com um sistema de rega altamente tecnificado. Por sua vez, o projeto-piloto de Aveiro localiza-se numa zona de transição para sistemas lagunares, com uma estrutura parcelária mais fragmentada e uma densa rede de canais e elementos lineares que condicionam a dinâmica da água.

Características da bacia

Ambos os sistemas apresentam relevos de inclinação muito baixa, com condições topográficas que limitam o escoamento superficial difuso e favorecem a acumulação de água na superfície.

Neste contexto, o comportamento hidrológico é fortemente condicionado pela presença de sistemas de drenagem artificial, que permitem evacuar o excesso de água e regular as condições de humidade do solo. Em Coimbra, este sistema baseia-se numa rede estruturada de canais, estações de bombagem e dispositivos de controlo, enquanto em Aveiro a drenagem combina elementos naturais e artificiais num ambiente mais heterogéneo.

Esta configuração determina um padrão de transporte de fósforo diferente do observado em sistemas em declive, nos quais os fluxos de saída não dependem exclusivamente do escoamento superficial, mas também da circulação da água através de infraestruturas hidráulicas.

Contexto edafoclimático

A área apresenta um clima de tipo oceânico com influência atlântica, caracterizado por precipitações elevadas e relativamente bem distribuídas ao longo do ano. Estas condições contrastam com outros pilotos do projeto e têm implicações diretas na dinâmica do fósforo.

Os solos são maioritariamente de origem aluvial, com elevada fertilidade e boa capacidade produtiva, mas com suscetibilidade à saturação hídrica. Em determinadas condições, especialmente após episódios de precipitação intensa, podem ocorrer alagamentos ou inundações temporárias que alteram os processos de mobilização e transporte de nutrientes.

A inclusão de dois projetos-piloto no mesmo contexto territorial permite captar a variabilidade associada à interação entre clima húmido, manejo intensivo e diferentes configurações de drenagem, proporcionando uma visão mais completa do comportamento do fósforo em sistemas de regadio.

Importância do sistema produtivo

Phos4Cycle

Os sistemas agrícolas de regadio do centro de Portugal constituem uma das bases produtivas mais relevantes do país, tanto em termos de produção agrícola como de apoio a sistemas pecuários intensivos.

A sua elevada intensidade de gestão, juntamente com a dependência do controlo hídrico, torna-os sistemas especialmente sensíveis à mobilização de nutrientes, com um papel relevante no balanço de fósforo à escala da bacia hidrográfica.

Problemas associados ao fósforo

Nestes sistemas, a dinâmica do fósforo é fortemente condicionada pela interação entre fertilização, gestão da água e características do solo.

A presença de drenagem artificial e a elevada disponibilidade hídrica favorecem a mobilização tanto do fósforo dissolvido como do particulado, através de:

- fluxos de drenagem
- circulação em canais
- episódios de saturação e inundação

Ao contrário dos sistemas em declive, onde predomina o transporte por escoamento superficial, nestes sistemas o fósforo pode ser exportado através de fluxos controlados, o que introduz uma complexidade adicional na sua monitorização e análise.

O projeto-piloto permite analisar estes processos em condições reais de agricultura intensiva, fornecendo informações essenciais para a avaliação do risco de contaminação por fósforo em sistemas de regadio com controlo hidráulico.

1.1.4. Projeto-piloto 5 – Sistema pecuário (sudoeste de França)

França / Nouvelle-Aquitaine (Landas) / Bacia hidrográfica do Adour

Câmara de Agricultura das Landas e entidades colaboradoras



Figura 4. Projeto-piloto ITAVI. França. Landes

Sistema produtivo

O projeto-piloto decorre num sistema pecuário intensivo orientado para a produção de patos, característico do sudoeste de França. A atividade produtiva baseia-se na criação e gestão de animais em explorações especializadas, com uma forte dependência da alimentação externa.

Este tipo de sistema introduz uma dinâmica particular do fósforo, em que a principal entrada do nutriente ocorre através da alimentação animal, sendo posteriormente redistribuído no sistema através dos dejetos gerados.

Descrição do contexto

O projeto-piloto está localizado numa zona rural com presença de explorações pecuárias e superfícies agrícolas associadas. O sistema organiza-se em torno das parcelas onde são geridos os dejetos pecuários, que constituem a principal ligação entre a atividade produtiva e o solo.

A relação entre as explorações pecuárias e as superfícies agrícolas permite analisar a transferência de nutrientes da produção animal para o meio terrestre.

Características da bacia

A bacia apresenta condições de baixa inclinação, com uma drenagem superficial pouco acentuada em comparação com sistemas em encostas. No entanto, a conectividade hidrológica existente permite o transporte de água e nutrientes das parcelas para os sistemas hídricos.

O comportamento hidrológico é condicionado tanto pelas características do solo como pela distribuição espacial das aplicações de dejetos, o que pode gerar variabilidade na mobilização de nutrientes dentro da bacia.

Contexto edafoclimático

A área está inserida num clima oceânico, caracterizado por precipitações relativamente abundantes e bem distribuídas ao longo do ano.

Estas condições favorecem a disponibilidade de água no solo e podem influenciar os processos de mobilização de nutrientes, especialmente em situações de aplicação de dejetos à superfície.

Importância do sistema produtivo

O sistema de produção avícola de patos constitui uma atividade económica relevante na região das Landas, com um papel de destaque no setor agroalimentar local.

A gestão dos dejetos gerados neste tipo de sistemas representa um elemento-chave do ponto de vista ambiental, especialmente no que diz respeito ao balanço de nutrientes e à sua possível transferência para o meio ambiente.

Problemas associados ao fósforo

Neste tipo de sistemas, a dinâmica do fósforo é fortemente condicionada pelas entradas externas de nutrientes através da alimentação animal e pela sua subsequente acumulação nos dejetos.

A aplicação destes dejetos em parcelas agrícolas pode gerar uma acumulação progressiva de fósforo no solo, o que aumenta o potencial de mobilização do nutriente sob determinadas condições.

O projeto-piloto permite analisar a relação entre a gestão dos dejetos, a acumulação de fósforo no solo e a sua possível mobilização para o meio aquático, fornecendo informações relevantes para a avaliação do risco de poluição difusa em sistemas de criação de gado.

Condições sanitárias

O início e o desenvolvimento das atividades foram condicionados pela situação sanitária decorrente da gripe aviária altamente patogénica (IAAP), que afetou significativamente o setor avícola no território durante o período de execução do projeto.

O surgimento de surtos em explorações e o aumento do nível de risco sanitário à escala nacional implicaram a aplicação de medidas rigorosas de biossegurança, incluindo restrições ao acesso às explorações, limitações à circulação de animais e alterações nas condições de gestão.

Estas circunstâncias condicionaram o arranque do projeto-piloto e o planeamento inicial de algumas atividades, embora não tenham comprometido a validade do desenho

experimental, que se adaptou às condições reais do sistema, mantendo a coerência metodológica com os restantes projetos-piloto do projeto.

1.1.5. Projeto-piloto 6 – Sistema agroflorestal de pastagem (Extremadura, Espanha)

Espanha / Extremadura / Sub-bacia do ribeiro de La Rinconada (bacia do Guadiana)

FEDEHESA



Figura 5. Projeto-piloto FEDEHESA. Espanha. La Rinconada

Sistema produtivo

O projeto-piloto decorre num sistema agroflorestal de pastagem, caracterizado pela combinação de árvores dispersas, pastagens naturais e exploração pecuária extensiva, principalmente através do pastoreio de ovinos. Este sistema é gerido com uma baixa intensidade de insumos externos, com pouca ou nenhuma aplicação de fertilização mineral, o que condiciona significativamente a dinâmica do fósforo no sistema solo-planta.

Ao contrário dos sistemas agrícolas intensivos, a dinâmica do fósforo na pastagem está mais ligada aos ciclos naturais de nutrientes, à reciclagem associada ao pastoreio e à distribuição heterogênea de aportes orgânicos.

Descrição do ambiente

O projeto-piloto está localizado num ambiente representativo do ecossistema de pastagem mediterrânica, caracterizado por uma paisagem aberta com árvores dispersas e predominância de pastagens. A estrutura do sistema gera uma elevada

heterogeneidade espacial, tanto na cobertura vegetal como na distribuição de nutrientes.

A baixa intensidade de gestão e a intervenção agronómica limitada permitem analisar a dinâmica do fósforo em condições próximas do funcionamento natural do sistema.

Características da bacia

A bacia apresenta declives suaves e uma drenagem superficial bem definida para um curso de água sazonal, ativado principalmente durante episódios de precipitação intensa. O escoamento é geralmente baixo, mas pode aumentar pontualmente em eventos climáticos extremos.

O uso do solo é predominantemente pastoril, com uma cobertura vegetal que contribui para reduzir os processos erosivos em condições normais. No entanto, a heterogeneidade do sistema pode gerar zonas localizadas com comportamento hidrológico diferente.

Do ponto de vista edafológico, os solos são pouco evoluídos, com texturas argilosas a argilo-arenosas, baixo teor de fósforo disponível e níveis moderados de matéria orgânica. Estas características limitam a disponibilidade de fósforo para as plantas e condicionam a sua dinâmica no sistema.

Contexto edafoclimático

A área insere-se num clima mediterrânico, caracterizado por verões secos e quentes e invernos amenos, com precipitações concentradas no outono e no inverno. Esta distribuição sazonal condiciona tanto a produção de pastagem como os processos de escoamento e transporte de nutrientes.

A combinação de períodos secos prolongados e eventos de precipitação concentrados influencia a mobilização pontual do fósforo, embora em menor grau do que em sistemas agrícolas intensivos.

Importância do sistema produtivo

A pastagem constitui um dos sistemas agro-pecuários mais representativos do sudoeste da Península Ibérica, com elevada importância do ponto de vista ecológico, económico e territorial. Trata-se de um sistema de elevado valor ambiental, fundamental para a conservação da biodiversidade e a manutenção dos serviços ecossistémicos.

Do ponto de vista do fósforo, estes sistemas apresentam um comportamento diferenciado em relação aos sistemas intensivos, o que os torna um cenário relevante para a análise comparativa no âmbito do projeto.

Problemática associada ao fósforo

Ao contrário de outros sistemas produtivos, a problemática do fósforo na dehesa não está associada a processos de acumulação ou contaminação difusa, mas sim a um défice estrutural deste nutriente no solo, que limita a produtividade da pastagem.

A disponibilidade de fósforo é condicionada pela baixa fertilização externa e pela dinâmica natural do sistema, em que a reciclagem de nutrientes através do pastoreio gera uma distribuição espacial heterogênea do fósforo.

Os processos de mobilização do fósforo para o meio hídrico são geralmente limitados, devido à baixa intensidade de manejo e à cobertura vegetal existente, embora possam ocorrer pontualmente em eventos de precipitação intensa.

O projeto-piloto permite analisar a dinâmica do fósforo num sistema de baixa pressão antrópica, fornecendo uma referência fundamental para a comparação com sistemas agrícolas intensivos e para a avaliação de cenários de equilíbrio ou déficit de nutrientes.

1.2. Representatividade territorial do conjunto de projetos-piloto

O conjunto de projetos-piloto definidos no âmbito do projeto configura uma rede de estudo representativa dos principais sistemas agro-pecuários do espaço SUDOE, abrangendo uma ampla diversidade de condições produtivas, edafoclimáticas e de configuração hidrológica.

Do ponto de vista dos sistemas produtivos, os projetos-piloto incluem agricultura extensiva de cereais, culturas lenhosas em encostas (vinha e olival), sistemas agroflorestais de pastagem, sistemas pecuários intensivos e sistemas agrícolas de regadio com elevada intensidade de gestão. Esta diversidade permite abranger um amplo espectro de cenários em que a dinâmica do fósforo apresenta comportamentos diferenciados.

No que diz respeito às condições edafoclimáticas, os projetos-piloto distribuem-se em contextos mediterrânicos continentais, mediterrânicos atlânticos e oceânicos, com regimes de precipitação contrastantes, que vão desde situações de sazonalidade acentuada até contextos com precipitações mais regulares e elevadas. Estas diferenças condicionam os processos de mobilização do fósforo, especialmente no que diz respeito à geração de escoamento, à ocorrência de eventos extremos e à disponibilidade hídrica do solo.

Do ponto de vista hidrológico, os pilotos incluem tanto sistemas com drenagem natural em condições de declive, onde predominam os processos de escoamento superficial e erosão, como sistemas de baixo declive com drenagem artificial, nos quais o transporte de nutrientes é condicionado pela presença de infraestruturas hidráulicas. Além disso, são incorporados sistemas com baixa intervenção antropogénica, como a pastagem, onde os processos de mobilização do fósforo estão mais ligados às dinâmicas naturais.

Esta combinação de condições permite analisar a dinâmica do fósforo num vasto leque de situações representativas do território SUDOE, incluindo cenários de acumulação, déficit, redistribuição e mobilização do nutriente.

A complementaridade entre os diferentes pilotos reforça a solidez do conjunto, permitindo não só a análise individual de cada sistema, mas também a comparação

entre contextos produtivos e ambientais diferentes. Esta abordagem proporciona uma base mente robusta para a identificação de padrões comuns e a geração de conhecimento transferível para outros territórios com características semelhantes no espaço 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

Tabela 1. Resumo das características dos projetos-piloto

2. Conceção do projeto-piloto (Metodologia)

2.1 Delimitação da bacia

2.1.1. Metodologia utilizada (MDE, SIG, GPS).

A definição dos projetos-piloto baseia-se na geração de cartografia hidrológica derivada de modelos digitais do terreno, o que permite identificar e delimitar sub-bacias funcionais dentro de cada zona de execução. Para tal, parte-se da seleção de parcelas ou áreas de estudo que apresentam uma configuração topográfica adequada para a análise dos fluxos de escoamento superficial e a diferenciação das áreas de contribuição, com o objetivo de estabelecer unidades espaciais homogêneas do ponto de vista hidrológico, sobre as quais se definem posteriormente as ações a executar no âmbito do projeto.

A delimitação das sub-bacias é realizada através da análise de Modelos Digitais de Elevação (MDE), representados em formato raster com resoluções espaciais compreendidas entre 10 e 20 metros de tamanho de pixel, integrados em ambientes de Sistemas de Informação Geográfica, fundamentalmente no QGIS. A partir dos MDE, aplica-se uma sequência de algoritmos de análise hidrológica que inclui a correção de depressões, o cálculo das direções de escoamento e a acumulação de caudal, permitindo identificar as áreas de drenagem e estruturar a rede hidrológica do território.

Em função dos limiares de acumulação definidos e da resolução do modelo, são gerados diferentes níveis hierárquicos de delimitação de sub-bacias, desde níveis mais gerais (níveis 1–2), associados a áreas de captação amplas, até níveis de maior detalhe (níveis 4–5), que permitem uma definição precisa de sub-bacias funcionais dentro de cada piloto. Esta abordagem hierárquica facilita a seleção do nível de detalhe mais adequado em função das características topográficas do território e dos objetivos do projeto-piloto, estabelecendo-se, de forma geral, três sub-bacias operacionais por projeto-piloto, adaptadas à escala e à heterogeneidade de cada território.

Nos territórios onde existe cartografia oficial de alta resolução, os MDE utilizados provêm de fontes públicas disponíveis. No entanto, nos casos em que essa informação não atinge a resolução necessária para uma delimitação hidrológica correta, como nos projetos-piloto localizados em Coimbra e Aveiro (Portugal), os Modelos Digitais de Elevação são gerados especificamente através de voos de drones e da geração de modelos digitais de superfície (MDS), posteriormente transformados em MDE, o que permite obter uma representação precisa do relevo e melhorar a definição das sub-bacias.

No caso do projeto-piloto desenvolvido em França, a análise parte da exploração avícola existente como unidade inicial de estudo. A partir da análise hidrológica da exploração, identificam-se duas sub-bacias diferenciadas, em vez das três inicialmente previstas. Neste contexto, durante os primeiros meses de trabalho, considera-se a totalidade da exploração como zona de gestão tradicional e, numa fase posterior, as duas sub-bacias delimitadas são definidas como zonas experimentais sobre as quais se estruturam as ações do projeto.

Esta abordagem metodológica comum de cartografia e delimitação de sub-bacias permite adaptar a conceção dos projetos-piloto às características hidrológicas reais de cada território, garantindo simultaneamente a coerência metodológica necessária para a análise comparativa dos resultados. Além disso, estabelece uma base estruturada para a integração de dados e o desenvolvimento do modelo preditivo do projeto.

2.1.2. Área dos projetos-piloto.

A área de trabalho em cada projeto-piloto não é definida como uma extensão fixa, mas é determinada pela delimitação hidrológica realizada a partir da análise dos Modelos Digitais de Elevação (MDE). Neste sentido, a unidade de estudo corresponde à bacia ou conjunto de sub-bacias funcionais identificadas dentro de cada área-piloto.

Phos4Cycle

Em termos gerais, as superfícies analisadas apresentam uma extensão variável em função das características topográficas e do sistema produtivo, situando-se em intervalos que permitem garantir tanto a representatividade do sistema como a viabilidade operacional da amostragem e da monitorização.

Na maioria dos projetos-piloto, a superfície total está estruturada em torno de várias sub-bacias operacionais, que constituem a base para a conceção experimental e a implementação das diferentes estratégias de gestão. Estas sub-bacias apresentam dimensões suficientes para captar os processos hidrológicos relevantes, mantendo ao mesmo tempo uma escala adequada para o acompanhamento detalhado das variáveis analisadas.

Esta abordagem permite trabalhar numa escala intermédia, situada entre a parcela convencional e a bacia hidrográfica de maior dimensão, facilitando tanto a análise dos processos como a comparabilidade entre territórios com condições contrastantes.

As superfícies de cada projeto-piloto:

- ◆ ITAGRA

Área total das sub-bacias: 39 130 m² (3,913 ha)

Área de execução: 39 130 m² (3,913 ha)

- ◆ La Rioja

Área total das sub-bacias: 86 000 m² (8,60 ha)

Área de execução: 73 600 m² (7,36 ha)

- ◆ Coimbra (Portugal)

Área total das sub-bacias: 31 290 m² (3,129 ha)

Área de execução: 31 290 m² (3,129 ha)

- ◆ Aveiro (Portugal)

Área total das sub-bacias: 21 000 m² (2,10 ha)

Área de execução: 21 000 m² (2,10 ha)

- ◆ França

Área total das sub-bacias: 50 219 m² (5,022 ha)

Área de execução: 50 219 m² (5,022 ha)

- ◆ FEDEHESA

Área total das sub-bacias: 471.576 m² (47,16 ha)

Área de execução: 158 599 m² (15,86 ha)

Detalhando estas áreas por cada sub-bacia e projeto-piloto:

Projeto-piloto	Sub-bacia	Área total da sub-bacia (m ²)	Área de execução (m ²)
ITAGRA	SMT	7.030	7.030
	SM1	12.820	12.820
	SM2	19.280	19.280
Governo 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

Tabela 2. Superfícies [m²] de cada piloto por sistema de gestão

As superfícies analisadas abrangem um amplo intervalo, o que permite incluir tanto sistemas intensivos de pequena escala como sistemas extensivos de maior dimensão. Esta variabilidade reforça a representatividade do conjunto de parcelas experimentais e permite analisar a dinâmica do fósforo em diferentes escalas dentro do território SUDOE.

2.1.3. Zonamento interno (zonas alta, média, baixa; critérios).

A zonagem interna dos pilotos foi definida, de forma geral, a partir de critérios hidrológicos derivados da análise de Modelos Digitais de Elevação (MDE), permitindo diferenciar áreas funcionais dentro de cada sub-bacia em função da sua posição na inclinação, da acumulação de caudal e do seu papel nos processos de geração, transporte e acumulação de água, sedimentos e fósforo.

Sob esta abordagem comum, distinguem-se três tipos de zonas:

- Zona alta (cabeceira): áreas de maior altitude e menor acumulação de caudal, onde se gera o escoamento inicial.
- Zona média (transição): setores intermédios onde o fluxo superficial se concentra progressivamente e aumenta a conectividade hidrológica.
- Zona baixa (acumulação): áreas de menor altitude, com elevada acumulação de caudal e maior capacidade de receção de contributos provenientes do conjunto da sub-bacia.

Este esquema geral foi aplicado de forma homogênea nos projetos-piloto em que a delimitação hidrológica constituiu a base do desenho experimental, embora apresente adaptações em função das características específicas de cada sistema:

Projeto-piloto ITAGRA (Castela e Leão): a zonagem foi realizada integralmente com base em critérios topográficos derivados do MDT PNOA (resolução de 5 m), através do cálculo das direções e da acumulação do fluxo num ambiente SIG. A parcela apresenta uma inclinação média de 2,24 % e uma ligeira orientação NW–SE, com convergência do fluxo para o setor sudeste. Distinguem-se três zonas funcionais: zona alta (SM_T), zona média (SM_1) e zona baixa (SM_2), todas elas hidrologicamente conectadas. A homogeneidade edáfica da parcela permite atribuir as diferenças observadas principalmente ao manejo aplicado.

Projeto-piloto FEDEHESA (Extremadura): a zonagem interna baseou-se em critérios topográficos e de posição na inclinação, diferenciando zonas alta, média e baixa em cada sub-bacia. Esta classificação foi utilizada como base para a atribuição de diferentes tipos de gestão pecuária (gestão tradicional, gestão holística e zona de exclusão), permitindo analisar gradientes de transporte e acumulação de fósforo em sistemas agroflorestais.

Projeto-piloto ITAVI (França): a zonagem combina critérios topográficos com a intensidade de uso do território pelos animais. São identificadas zonas com diferentes altitudes (aproximadamente entre 109 e 125 m) e diferentes frequências de trânsito dos patos, sendo as áreas próximas dos edifícios as de maior pressão pecuária e, portanto, de maior risco de acumulação de dejetos. Esta abordagem introduz uma componente funcional adicional ligada ao manejo animal, complementando a análise puramente hidrológica.

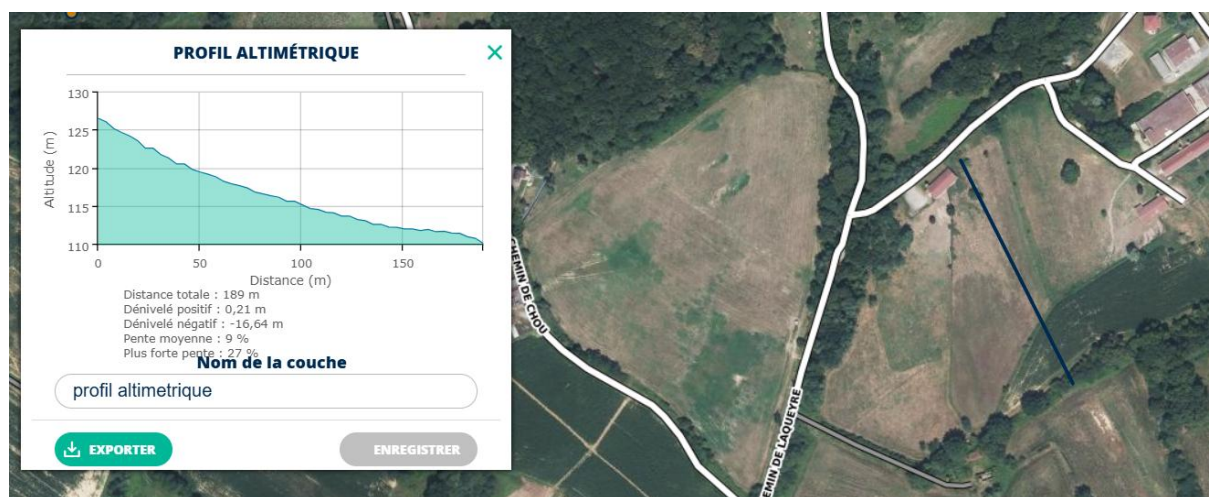


Figura 6. Detalhe altimétrico do projeto-piloto França. Landes. ITAVI

Projeto-piloto em La Rioja (Espanha): não foi estabelecida uma zonagem interna diferenciada dentro de cada sub-bacia, uma vez que a definição dos tratamentos foi realizada diretamente à escala da sub-bacia completa. No entanto, a delimitação hidrológica permite manter a coerência metodológica com os restantes projetos-piloto para a análise dos processos de transporte de fósforo.

Projetos-piloto de Portugal (Coimbra e Aveiro): a zonagem foi estruturada ao nível da sub-bacia, diferenciando três unidades experimentais (gestão tradicional, gestão ajustada ao equilíbrio de nutrientes e gestão com biochar). Embora não tenha sido explicitamente definida uma zonagem interna em zonas alta, média e baixa dentro de cada sub-bacia, a delimitação hidrológica e a distribuição espacial das parcelas permitem integrar estes projetos-piloto na abordagem geral de análise do projeto.

2.2 Parcelas de estudo: sub-bacias

O desenho experimental do projeto baseia-se na utilização de sub-bacias hidrográficas como unidades de estudo, sobre as quais são definidos diferentes cenários de gestão com o objetivo de avaliar o impacto de medidas preventivas na dinâmica do fósforo.

Cada projeto-piloto está estruturado, de forma geral, em várias sub-bacias funcionais delimitadas hidrologicamente, que atuam como unidades experimentais independentes, mas comparáveis. Nestas unidades são implementadas diferentes estratégias de gestão, permitindo analisar o seu efeito sobre os processos de geração, transporte e acumulação de fósforo em condições reais de campo.

2.2.1. Sub-bacia de referência (sem medidas preventivas).

Em cada projeto-piloto, foi definida uma sub-bacia ou parcela de referência caracterizada pela ausência de medidas preventivas específicas, representando o manejo convencional ou habitual de cada sistema produtivo.

Esta parcela de referência constitui o cenário de base em relação ao qual se comparam os restantes tratamentos. Dependendo do contexto de cada projeto-piloto, este manejo corresponde a:

- Sistemas agrícolas (ITAGRA-IPC CALCOP-GOVERNO DA RIOJA): fertilização mineral ou manejo tradicional do agricultor sem incorporação de estratégias específicas de mitigação.
- Sistemas agroflorestais (FEDEHESA): manejo pecuário convencional, sem modificações orientadas para a redução do impacto no solo ou a redistribuição de nutrientes.
- Sistemas de pecuária (ITAVI): zonas de uso habitual pelos animais sem intervenção específica, representando as condições reais de deposição de dejetos.

A definição desta parcela permite estabelecer uma linha de base representativa das condições reais de exploração, essencial para avaliar a eficácia das medidas implementadas.

2.2.2. Sub-bacias com medidas preventivas.

Paralelamente à sub-bacia de referência, em cada projeto-piloto foram definidas uma ou várias sub-bacias nas quais são implementadas medidas preventivas específicas, adaptadas ao contexto agronómico ou pecuário, com o objetivo de reduzir as perdas de fósforo e melhorar a sua retenção e gestão no sistema solo-água.

As medidas aplicadas em cada projeto-piloto são as seguintes:

Projeto-piloto ITAGRA (Castela e Leão):

Estabelecem-se duas sub-bacias com gestão diferenciada em relação ao controlo:

SM1: fertilização mineral ajustada de forma variável em função das características do solo e da cultura. Foi aplicado um fertilizante NPK 8-9-10

SM2: aplicação de biochar combinada com fertilização tradicional. O biochar foi dosado a 100 kg/ha.

Estas estratégias permitem avaliar tanto o efeito da otimização de nutrientes como a capacidade de retenção de fósforo através de corretivos.

Projeto-piloto em La Rioja (Espanha):

São implementadas medidas preventivas à escala da sub-bacia:

SM1: implantação de cobertura vegetal como medida de controlo do escoamento e da erosão.

SM2: aplicação de biochar como corretivo para melhorar a retenção de fósforo. O biochar foi aplicado na dose de 312 kg/ha.

Projeto-piloto FEDEHESA (Extremadura):

São definidas duas estratégias de gestão pecuária diferenciadas no que diz respeito ao controlo:

SM1: gestão pecuária com enfoque holístico.

SM2: zona de exclusão de gado, sem pastoreio nem pisoteio.

Esta última permite avaliar o efeito da ausência de pressão pecuária sobre a dinâmica do fósforo, especialmente em termos de redução de aportes e melhoria da estrutura do solo.

Projeto-piloto ITAVI (França):

É definida uma sub-bacia hidrográfica, o que permite uma abordagem comparativa entre os sistemas de gestão:

SM1: aplicação de um ajuste na alimentação, orientado para modificar a composição dos dejetos e, conseqüentemente, o seu impacto na dinâmica do fósforo.

Além disso, dentro de cada sub-bacia identifica-se uma variabilidade espacial associada à frequência de utilização do terreno pelos animais, com maior pressão pecuária nas zonas próximas dos edifícios e menor nas zonas mais afastadas. Esta distribuição introduz um gradiente funcional que influencia a acumulação de dejetos e o risco de mobilização de fósforo, complementando a análise comparativa entre sub-bacias.

Pilotos de Portugal (Coimbra e Aveiro):

Em cada piloto são estabelecidas três sub-bacias com diferentes formas de gestão:

SM1: fertilização ajustada com base no balanço de nutrientes do solo e da cultura.

SM2: aplicação de biochar combinada com fertilização tradicional.

Estas medidas permitem comparar estratégias de otimização da utilização de nutrientes com soluções de melhoria da retenção no solo.

As medidas preventivas implementadas abrangem tanto estratégias agronómicas (fertilização ajustada, coberturas vegetais), como corretivos do solo (biocarvão) e modificações no manejo pecuário (controlo de carga e exclusão), o que permite avaliar a sua eficácia em diferentes contextos produtivos no território SUDOE.

2.2.3. Justificação do desenho comparativo.

O desenho comparativo adotado nos diferentes projetos-piloto baseia-se na avaliação de estratégias de gestão que, de acordo com a literatura científica, apresentam potencial para reduzir as perdas de fósforo e melhorar a sua retenção e eficiência no sistema solo-água.

As medidas selecionadas respondem a mecanismos específicos de controlo da dinâmica do fósforo, que podem ser agrupadas em três grandes abordagens: retenção no solo, redução da mobilização e controlo das entradas.

a) Aplicação de biochar

O biochar tem sido amplamente estudado como corretivo com capacidade para melhorar a retenção de fósforo no solo. A sua elevada área específica, porosidade e presença de grupos funcionais favorecem:

- a adsorção de fósforo solúvel, especialmente em solos com baixa capacidade de retenção,
- a redução da lixiviação e do transporte por escoamento superficial,
- a interação com catiões (Ca, Fe, Al) que estabilizam o fósforo em formas menos móveis.

Vários estudos (Lehmann & Joseph, 2015; Biederman & Harpole, 2013) demonstraram que o biochar pode aumentar a capacidade de troca do solo e melhorar a retenção de nutrientes, reduzindo a sua perda para corpos de água.

b) Ajuste da fertilização (equilíbrio de nutrientes)

A otimização da fertilização em função das necessidades da cultura e das características do solo é uma das estratégias mais eficazes para reduzir as perdas de fósforo.

Esta abordagem permite:

- evitar excessos de fósforo disponível no solo,
- reduzir a fração suscetível de ser transportada pelo escoamento ou drenagem,
- melhorar a eficiência de utilização do nutriente (PUE).

Segundo Sharpley et al. (2013), o ajuste da fertilização é um elemento-chave na mitigação da poluição difusa por fósforo em sistemas agrícolas intensivos.

c) Implantação de coberturas vegetais

As coberturas vegetais contribuem para a redução das perdas de fósforo através de:

- diminuição do escoamento superficial,
- redução da erosão do solo, principal via de transporte de fósforo particulado,
- aumento da infiltração e estabilização estrutural do solo.

Estudos como os de Blanco-Canqui et al. (2015) evidenciam que as coberturas vegetais podem reduzir significativamente as perdas de sedimentos e nutrientes em sistemas agrícolas.

d) Gestão pecuária e controlo da pressão animal

Nos sistemas de pecuária, a dinâmica do fósforo é fortemente condicionada tanto pela quantidade de fósforo ingerida pelos animais como pela sua distribuição espacial através dos dejetos.

As estratégias avaliadas no projeto abordam ambos os aspetos:

- Exclusão do gado, que elimina a contribuição direta de fósforo e reduz a compactação do solo, favorecendo a infiltração e diminuindo o escoamento superficial.
- Gestão adaptativa da carga pecuária, orientada para uma distribuição mais homogénea dos dejetos no território.
- Modificação da alimentação animal, como no caso do projeto-piloto ITAVI, através da incorporação de fitasas na ração dos patos.

A inclusão de fitasas na alimentação tem um efeito direto sobre a eficiência na utilização do fósforo, uma vez que estas enzimas permitem a hidrólise do fitato (principal forma de fósforo nos alimentos vegetais), aumentando a sua digestibilidade e reduzindo a quantidade de fósforo excretado.

Este mecanismo traduz-se em:

- uma redução do fósforo total nas dejeções,
- uma diminuição do risco de acumulação no solo,

e, conseqüentemente, uma menor probabilidade de mobilização para os sistemas aquáticos.

Vários estudos demonstraram que a utilização de fitasas pode reduzir significativamente a excreção de fósforo nas aves, melhorando a eficiência nutricional e diminuindo o impacto ambiental (Selle & Ravindran, 2007; Adeola & Cowieson, 2011).

A combinação de estratégias de gestão espacial (pressão pecuária) e nutricional (ajuste da ração) permite abordar de forma integral o controlo do fósforo em sistemas pecuários.

e) Justificação da abordagem à escala da sub-bacia

A utilização de sub-bacias como unidades experimentais permite integrar os efeitos destas medidas à escala funcional, captando:

- a interação entre solo, água e gestão,
- os processos reais de transporte de fósforo (dissolvido e particulado),
- a influência da conectividade hidrológica na exportação de nutrientes.

Esta abordagem está alinhada com metodologias amplamente utilizadas em estudos de poluição difusa (Sharpley et al., 2003), onde a escala da bacia hidrográfica é considerada fundamental para a avaliação de medidas de mitigação.

3. Monitorização realizada

3.1 Monitorização do solo

3.1.1. Tipo de amostragem e localização dos pontos de amostragem

A monitorização do solo baseou-se num desenho de amostragem sistemático-estratificado, distribuído pelas sub-bacias experimentais com o objetivo de captar tanto a variabilidade hidrológica como a variabilidade edáfica interna de cada piloto. A profundidade de amostragem considerada foi, em geral, de 0–30 cm, correspondendo ao horizonte superficial onde se concentra a maior parte da dinâmica do fósforo associada ao manejo agronómico e pecuário.

A localização dos pontos de amostragem foi definida através da integração de dois critérios principais:

Delimitação hidrológica das sub-bacias, obtida a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE), que permite identificar zonas de geração, trânsito e acumulação de fluxos.

Variabilidade edáfica interna, caracterizada por meio de mapas de condutividade elétrica aparente do solo (CEa).

A condutividade elétrica aparente constitui um indicador indireto da heterogeneidade do solo, uma vez que está relacionada com propriedades como a textura, o teor de argila, a humidade e a matéria orgânica. A sua utilização permite identificar unidades relativamente homogêneas dentro de cada sub-bacia e, por conseguinte, otimizar a representatividade da amostragem.

De um modo geral, nos diferentes projetos-piloto, a CEa foi obtida através de equipamentos de medição específicos instalados em veículos (tipo quadriciclo ou plataformas móveis), que permitem realizar uma amostragem contínua do solo e gerar cartografia de alta resolução. Estes sistemas de medição proximal permitem obter mapas detalhados da variabilidade espacial, que posteriormente são integrados em ambientes SIG para a seleção de pontos de amostragem.

No caso do projeto-piloto de Coimbra, devido a limitações operacionais, não foi realizado o mapeamento contínuo através de sensor móvel. Em vez disso, foi realizada uma campanha específica baseada na recolha de pontos discretos georreferenciados, distribuídos de forma sistemática na parcela, a partir dos quais se determinou a condutividade elétrica em laboratório. Esta abordagem permitiu obter uma aproximação da variabilidade edáfica e garantir a representatividade da amostragem, embora com menor resolução espacial do que nos casos com sensor contínuo.

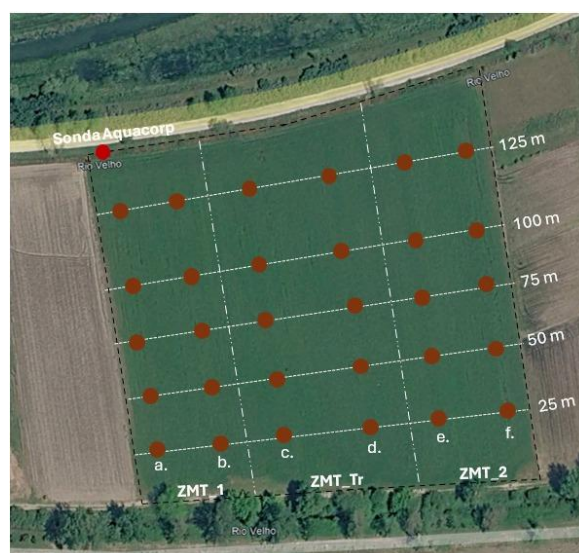


Figura 7. Detalhe da amostragem georreferenciada piloto IPC-Calcob. Portugal. Coimbra. Pontos de amostragem para determinação da condutividade aparente.

A partir da combinação de ambos os critérios (posição hidrológica e variabilidade edáfica), foram definidos os pontos de amostragem dentro de cada sub-bacia. Em termos gerais, trabalhou-se com uma densidade de amostragem de aproximadamente

cinco pontos por sub-bacia, embora este número tenha sido ajustado em função da superfície e da heterogeneidade de cada piloto.

A amostragem do solo foi realizada através da recolha de amostras pontuais ou compostas, em função do objetivo da análise. Nas fases iniciais de caracterização, foram utilizadas, em alguns casos, amostragens compostas em ziguezague, enquanto o acompanhamento temporal se baseou em pontos fixos georreferenciados, permitindo avaliar a evolução das variáveis analisadas ao longo do tempo.

Esta abordagem metodológica garante que a rede de amostragem do solo responda a uma lógica funcional baseada na conectividade hidrológica e na variabilidade edáfica, permitindo interpretar de forma robusta a dinâmica do fósforo dentro de cada sub-bacia.

A rede de amostragem definida para cada piloto foi georreferenciada e integrada num ambiente SIG, tal como se mostra a seguir. Em cada caso, são integrados a rede de drenagem interna e a delimitação das sub-bacias, derivadas da análise hidrológica, juntamente com o mapa da condutividade elétrica aparente do solo (CEa). A combinação de ambos os elementos permite a seleção de pontos representativos de monitorização, nos quais são realizadas amostragens de solo de forma sistemática ao longo do período de execução do projeto-piloto

ITAGRA-Castela e Leão-Espanha (Villamuriel de Cerrato-Palência)

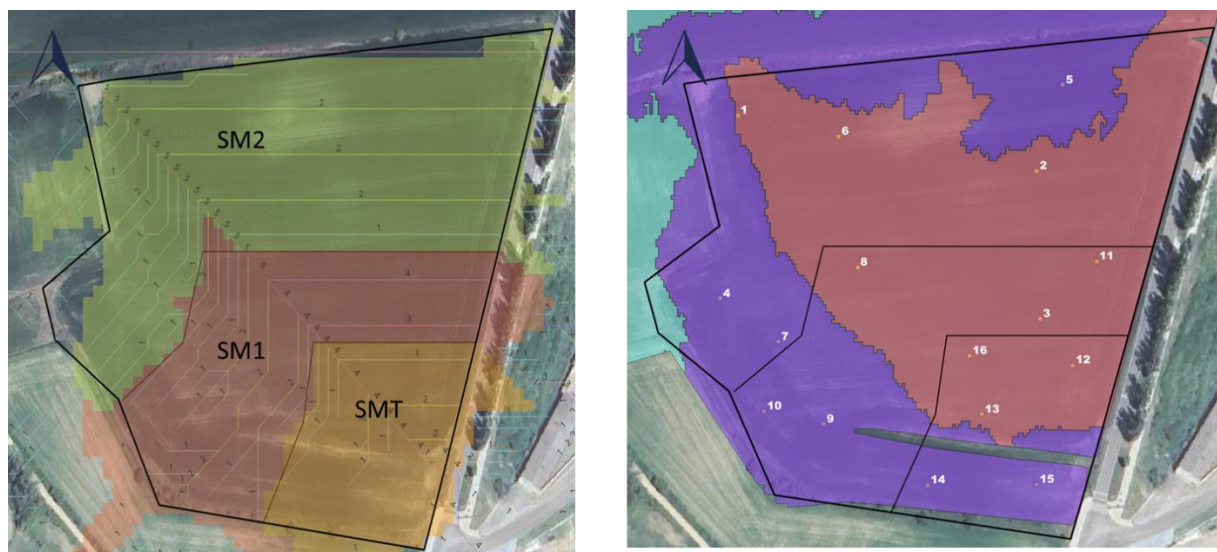


Figura 8. Projeto-piloto da ITAGRA em Villamuriel de Cerrato (Palência, Espanha). Integração da cartografia hidrológica (delimitação de sub-bacias com base na rede de drenagem e acumulação de caudais) e da variabilidade edáfica (mapa da condutividade elétrica aparente do solo, CEa) para a definição da rede de pontos de amostragem do solo.

Governo de La Rioja-La Rioja-Espanha

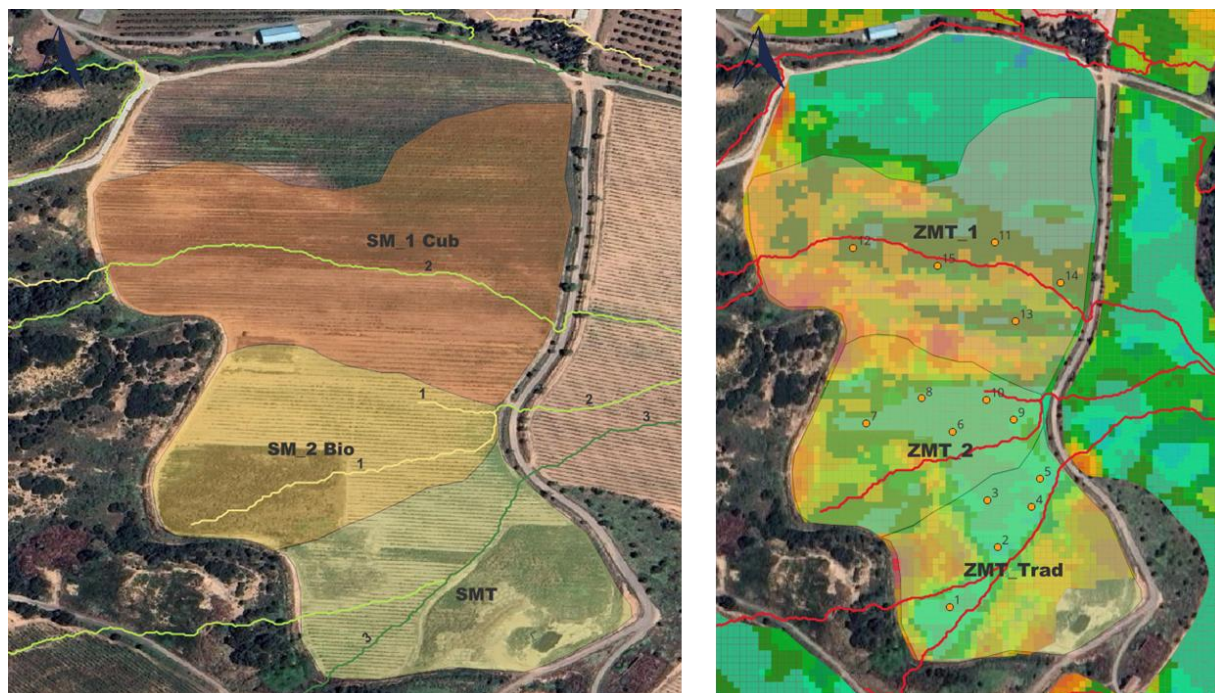


Figura 9. Projeto-piloto do Governo de La Rioja em La Rioja (Espanha). Integração da cartografia hidrológica (delimitação de sub-bacias com base na rede de drenagem e acumulação de caudais) e da variabilidade edáfica (mapa da condutividade elétrica aparente do solo, CEa) para a definição da rede de pontos de amostragem do solo.

IPC-Calcob-Coimbra-Portugal



Figura 10. Projeto-piloto do IPC-Calcob em Coimbra (Portugal). Integração da cartografia hidrológica (delimitação de sub-bacias com base na rede de drenagem e acumulação de caudais) e da variabilidade edáfica (mapa da condutividade elétrica aparente do solo, CEa) para a definição da rede de pontos de amostragem do solo.

IPC-Calcob-Aveiro-Portugal

Figura 11. Projeto-piloto do IPC-Calcob em Aveiro (Portugal). Integração da cartografia hidrológica (delimitação de sub-bacias com base na rede de drenagem e acumulação de caudais) e da variabilidade edáfica (mapa da condutividade elétrica aparente do solo, CEa) para a definição da rede de pontos de amostragem do solo.

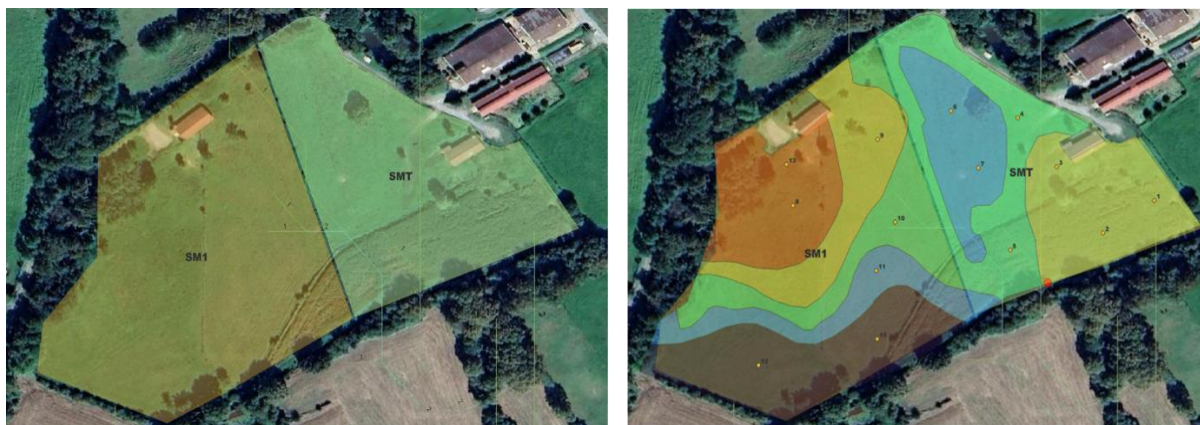
ITAVI-Orthez-França

Figura 12. Projeto-piloto da ITAVI em Landas (Orthez, França). Integração da cartografia hidrológica (delimitação de sub-bacias com base na rede de drenagem e na acumulação de caudais) e da variabilidade edáfica (mapa da condutividade elétrica aparente do solo, CEa) para a definição da rede de pontos de amostragem do solo.

FEHEDESA-La Rinconada-Badajoz-Espanha

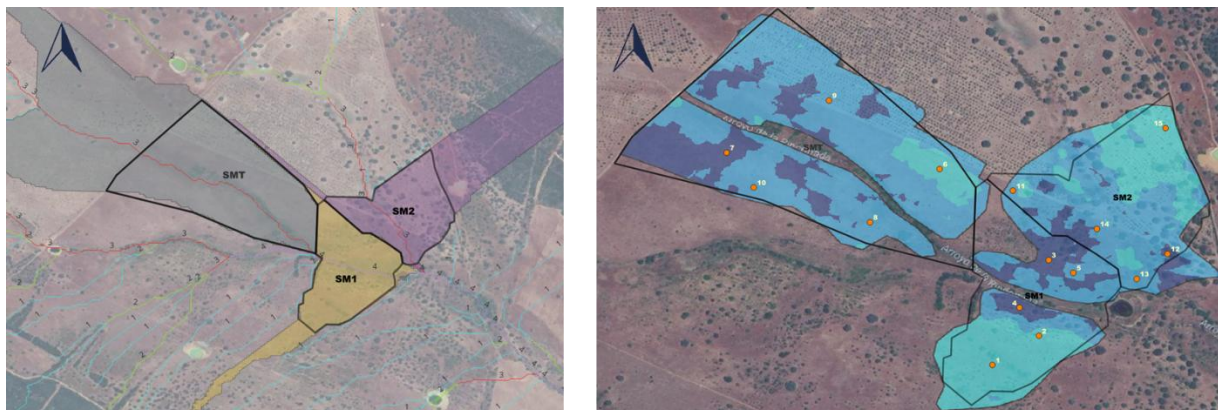


Figura 13. Projeto-piloto da FEHEDESA em Mérida (Badajoz, Espanha). Integração da cartografia hidrológica (delimitação de sub-bacias com base na rede de drenagem e acumulação de caudais) e da variabilidade edáfica (mapa da condutividade elétrica aparente do solo, CEa) para a definição da rede de pontos de amostragem do solo.

3.1.2. Frequência.

A monitorização dos solos foi realizada através de campanhas de amostragem periódicas ao longo do ciclo de cultivo e do período de execução dos projetos-piloto, com o objetivo de captar a evolução temporal das diferentes frações de fósforo em relação aos manejamentos aplicados e às condições climáticas.

De um modo geral, o protocolo comum do projeto estabelece uma sequência de amostragem estruturada em seis campanhas, que incluem:

- 1 amostragem inicial de referência, antes da aplicação das medidas, para a caracterização inicial do solo.
- 4 amostragens intermédias, distribuídas em momentos-chave do ciclo de cultivo ou do sistema (desenvolvimento vegetativo, períodos de fertilização ou eventos relevantes).
- 1 amostragem final, destinada a avaliar o efeito acumulado das práticas implementadas.

Esta frequência permite analisar tanto a variabilidade sazonal como a resposta do sistema às práticas agronómicas e pecuárias, bem como a sua interação com episódios climáticos (precipitações, períodos de seca, etc.), que podem influenciar significativamente a mobilização do fósforo.

No entanto, a frequência exata e o calendário de amostragem podem apresentar ligeiras variações entre os projetos-piloto, em função de:

- do sistema produtivo (cultivo anual, sistema pecuário, etc.),
- das condições climáticas locais,
- das limitações operacionais de cada zona.

Phos4Cycle

Durante o período de execução das campanhas de amostragem, registaram-se episódios de precipitações intensas e persistentes na Península Ibérica e no sul de França, especialmente durante o período de inverno e início da primavera, o que condicionou a operacionalidade no terreno em vários projetos-piloto.

Estas condições provocaram situações de saturação do solo, alagamentos e limitações de acesso às parcelas, impedindo a execução de uma das campanhas de amostragem intermédia previstas no protocolo inicial.

Consequentemente, em alguns projetos-piloto, dispõe-se de três amostragens intermédias em vez de quatro, mantendo-se, em todo o caso, a amostragem inicial e a amostragem final, bem como a coerência temporal do acompanhamento. Esta circunstância não compromete a validade da análise, uma vez que as restantes campanhas permitem captar adequadamente a evolução das variáveis monitorizadas e a resposta do sistema às práticas de gestão aplicadas.

É de salientar que os episódios de precipitação registados constituem, por si só, eventos de interesse para a análise da dinâmica do fósforo, uma vez que estão associados a processos de escoamento e mobilização de nutrientes.

3.1.3. Parâmetros analisados relacionados com o fósforo.

A monitorização do solo centrou-se na determinação de diferentes parâmetros relacionados com a disponibilidade, acumulação e mobilidade do fósforo, com o objetivo de caracterizar a sua dinâmica em função dos manejamentos aplicados e das condições edafoclimáticas de cada piloto.

De um modo geral, as análises realizadas incluem tanto as formas disponíveis como as formas totais de fósforo, bem como parâmetros edafológicos que influenciam diretamente o seu comportamento.

a) Fósforo disponível (P Olsen)

O fósforo disponível foi determinado através do método Olsen, amplamente utilizado em solos de carácter calcário ou neutro, predominantes em vários dos pilotos do projeto.

Este parâmetro representa a fração de fósforo potencialmente assimilável pelas plantas e constitui um indicador-chave para:

- avaliar o estado nutricional do solo,
- analisar a eficiência da fertilização,
- detectar possíveis situações de excesso que possam resultar em perdas por escoamento.

b) Fósforo total

O fósforo total permite quantificar o teor global de fósforo presente no solo, incluindo tanto as frações disponíveis como as formas não disponíveis.

A sua determinação é fundamental para:

- avaliar processos de acumulação a longo prazo,
- analisar o impacto de práticas como a fertilização ou a deposição de dejetos,
- contextualizar os valores de fósforo disponível.

c) Determinação da incerteza analítica

Permite garantir a rastreabilidade e a robustez dos dados obtidos, especialmente em análises comparativas multitemporais entre sub-bacias e tratamentos.

d) Parâmetros edáficos relacionados

De forma complementar, são analisados parâmetros edáficos que influenciam diretamente a dinâmica do fósforo:

- pH: fator determinante na solubilidade do fósforo. Em solos alcalinos, o fósforo tende a precipitar em formas menos disponíveis, especialmente na presença de cálcio.
- Carbonatos totais: condicionam a fixação do fósforo em formas cálcicas pouco solúveis, influenciando a sua disponibilidade e imobilização.
- Matéria orgânica: pode favorecer tanto a retenção do fósforo por complexação como a sua libertação progressiva através de processos de mineralização.
- Condutividade elétrica: fornece informações sobre o estado químico geral do solo e possíveis condições que alterem a mobilidade do fósforo em solução.
- Textura (determinada na amostragem inicial): incluindo as percentagens de areia, limo e argila. A fração argilosa é especialmente relevante, uma vez que aumenta a capacidade de adsorção do fósforo e pode influenciar o transporte de partículas em episódios de escoamento superficial.

e) Relação com o manejo

O conjunto de parâmetros analisados permite avaliar o efeito das diferentes estratégias implementadas nos projetos-piloto, incluindo:

- ajuste da fertilização,
- aplicação de biochar,
- implantação de coberturas vegetais,
- gestão pecuária e controlo da carga animal,
- modificação da alimentação animal (fitases).

Desta forma, é possível analisar a evolução do fósforo tanto do ponto de vista agronómico (disponibilidade para a cultura) como ambiental (risco de mobilização e perda).

3.1.4. Registo das práticas agronómicas.

O acompanhamento dos parâmetros do solo foi complementado com um registo sistemático dos manejos agronómicos e pecuários aplicados em cada piloto, com o

Phos4Cycle

objetivo de contextualizar a evolução das variáveis analisadas e facilitar a interpretação da dinâmica do fósforo no sistema.

Este registo inclui informações relativas às práticas realizadas em cada sub-bacia, permitindo estabelecer relações diretas entre o manejo aplicado e os resultados obtidos nas análises de solo.

a) Gestão da fertilização

Nos projetos-piloto agrícolas, foram registadas informações relativas à fertilização, incluindo:

- tipo de fertilizante (mineral ou orgânico),
- dose aplicada,
- momento da aplicação,
- quando aplicável, estratégia de ajuste em função do equilíbrio de nutrientes.

Em particular, foram documentadas práticas como:

- fertilização convencional do agricultor (parcelas de referência),
- fertilização ajustada em função das características do solo e da cultura,
- combinação de fertilização com corretivos como o biochar.

Este registo é fundamental para interpretar a evolução do fósforo disponível e total em relação às entradas de nutrientes no sistema.

b) Manejo do solo e da cultura

Foram recolhidas informações sobre as operações agronómicas realizadas em cada projeto-piloto, incluindo:

- preparação do solo,
- implantação e desenvolvimento da cultura,
- estabelecimento de coberturas vegetais (quando aplicável),
- datas de sementeira, desenvolvimento e colheita.

No caso de La Rioja, este acompanhamento assume especial relevância por estar diretamente ligado aos momentos fenológicos utilizados como referência para a amostragem do solo.

c) Aplicação de medidas preventivas

O registo inclui a identificação e caracterização das medidas implementadas em cada sub-bacia, tais como:

- aplicação de biochar,
- implantação de coberturas vegetais,
- ajuste da fertilização,
- outras práticas destinadas a melhorar a retenção de nutrientes.

Em cada caso, foi documentado o momento da aplicação e as condições em que foram realizadas, permitindo avaliar o seu efeito sobre a dinâmica do fósforo.

d) Gestão pecuária

Nos projetos-piloto com componente pecuária (FEDEHESA e ITAVI), foram registadas informações específicas sobre:

- carga pecuária,
- distribuição espacial do pastoreio ou uso do terreno,
- zonas de exclusão de gado (quando aplicável),
- práticas de gestão adaptativa.

No caso do projeto-piloto ITAVI, foram também incorporadas informações relativas à alimentação animal, incluindo a modificação da ração através da incorporação de fitasas, o que permite analisar o seu efeito sobre a composição dos dejetos e a entrada de fósforo no sistema.

e) Relação com a monitorização

O registo das práticas de gestão permite interpretar os resultados obtidos nas análises de solo em função de:

- das entradas de fósforo no sistema (fertilização, dejetos),
- das práticas que afetam a sua retenção ou mobilização (manejo do solo, coberturas),
- a distribuição espacial dos aportes (especialmente em sistemas de pecuária).

Desta forma, estabelece-se uma relação direta entre o manejo aplicado e a evolução dos parâmetros analisados, permitindo identificar os fatores que condicionam a dinâmica do fósforo em cada piloto.

O conjunto de informações recolhidas relativas aos manejos agronómicos e pecuários constitui um elemento-chave para a interpretação dos resultados analíticos e a sua integração no modelo final do projeto.

A combinação destes dados com a informação obtida na monitorização do solo, sedimentos e água permitirá estabelecer relações entre práticas de gestão, condições edafoclimáticas e dinâmica do fósforo, facilitando a identificação dos fatores que condicionam a sua mobilização e acumulação nos diferentes sistemas estudados.

Esta integração é fundamental para o desenvolvimento de ferramentas de análise e modelos preditivos orientados para a gestão sustentável do fósforo à escala da sub-bacia hidrográfica.

O conjunto de informações recolhidas relativas aos manejos agronómicos e pecuários constitui um elemento-chave para a interpretação dos resultados analíticos e a sua integração no modelo final do projeto.

A combinação destes dados com a informação obtida na monitorização do solo, dos sedimentos e da água permitirá estabelecer relações entre práticas de gestão, condições edafoclimáticas e dinâmica do fósforo, facilitando a identificação dos fatores que condicionam a sua mobilização e acumulação nos diferentes sistemas estudados.

Esta integração é fundamental para o desenvolvimento de ferramentas de análise e modelos preditivos orientados para a gestão sustentável do fósforo à escala da sub-bacia hidrográfica.

3.2 Monitorização de sedimentos

A monitorização de sedimentos tem-se orientado para a caracterização do transporte de fósforo associado a partículas do solo, considerado um dos principais mecanismos de perda de fósforo em sistemas agrícolas e pecuários.

Dado que uma parte significativa do fósforo do solo se encontra adsorvida a frações finas (limo e argila), a sua mobilização está diretamente ligada a processos de erosão e escoamento superficial, pelo que a análise de sedimentos permite avaliar de forma integrada a exportação de fósforo das sub-bacias.

3.2.1. Localização dos pontos de amostragem.

A localização dos pontos de amostragem de sedimentos foi definida com base em critérios hidrológicos, dando prioridade às zonas onde se verifica a concentração e o trânsito de fluxos de escoamento.

Em geral, os pontos situam-se em:

- zonas de convergência de sub-bacias,
- trechos de canais naturais de drenagem,
- especialmente nos pontos de saída de cada sub-bacia, onde se integram os contributos provenientes de toda a superfície de captação.

Esta abordagem permite obter amostras representativas do material transportado e avaliar o comportamento do sistema à escala funcional.

A seleção dos pontos baseou-se em:

- na análise da rede de drenagem derivada do MDE,
- a identificação de linhas de fluxo preferenciais,
- a observação direta no terreno de zonas com acumulação de sedimentos ou sinais de escoamento superficial.

A localização dos pontos de amostragem foi georreferenciada e integrada num ambiente SIG, permitindo a sua representação cartográfica e a sua relação com as sub-bacias hidrográficas e os pontos de amostragem do solo.

O número de pontos de amostragem definidos em cada piloto (entre um e três) responde à configuração hidrológica do sistema e, em particular, ao grau de independência ou

conectividade entre sub-bacias. Nos casos em que as sub-bacias convergem num único ponto de saída, foi estabelecido um único ponto de amostragem representativo do conjunto do sistema. Por outro lado, nos projetos-piloto em que as sub-bacias apresentam saídas diferenciadas ou uma menor conectividade hidrológica, foram definidos vários pontos de amostragem, permitindo caracterizar de forma independente o comportamento de cada unidade.

Este critério garante que a rede de amostragem seja coerente com a dinâmica real do fluxo de água e sedimentos, evitando redundâncias e assegurando a representatividade das amostras em cada contexto.

Piloto	N.º de pontos	Profundidade máxima	Intervalos de amostragem	Observações
ITAGRA-Palencia	1 ponto	100 cm	0–25, 25–50, 50–75, 75–100	Perfil completo representativo
Governo de La Rioja	3 pontos	100 cm	0–25, 25–50, 50–75, 75–100	Variabilidade entre sub-bacias
IPC-Calcob Coimbra	3 pontos	100 cm	0–25, 25–50, 50–75, 75–100	Perfil completo no sistema agrícola
IPC-Calcob Aveiro	3 pontos	100 cm	0–25, 25–50, 50–75, 75–100	Solos com elevada variabilidade textural
ITAVI-França-	2 pontos	100 cm	0–25, 25–50, 50–75, 75–100	Sistema de criação
FEDEHESA-Extremadura	3 pontos	50 cm	0–25, 25–50	Profundidade limitada pelas condições do terreno

Tabela 3. Pontos, intervalos e profundidade de amostragem [m] de sedimentos nos projetos-piloto

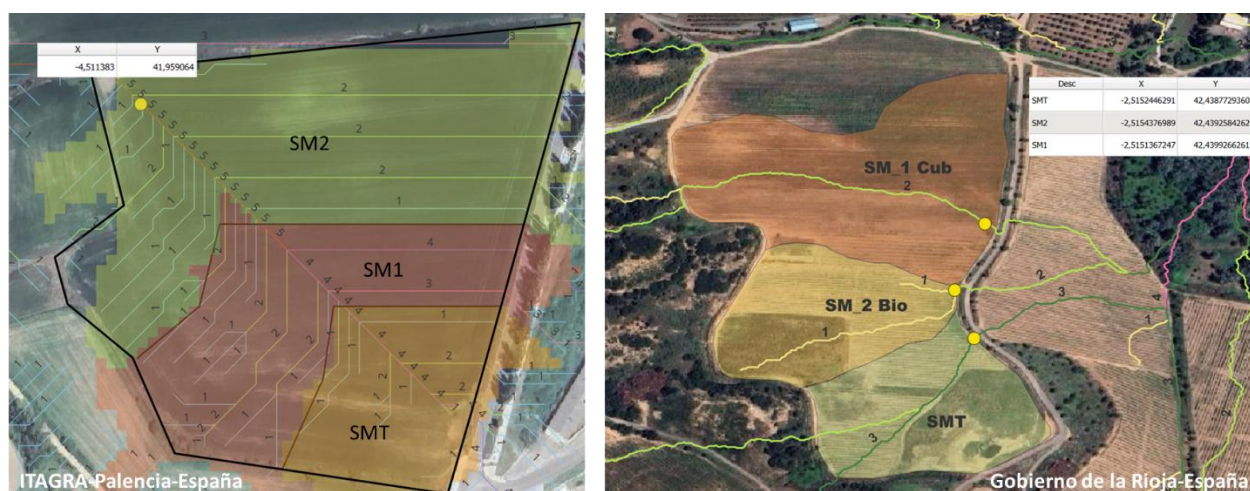


Figura 14. Referência cartográfica dos pontos de amostragem de sedimentos no piloto da ITAGRA CT (à esquerda) e no piloto do Governo de La Rioja (à direita), em função do escoamento das sub-bacias



Figura 15. Referência cartográfica dos pontos de amostragem de sedimentos no projeto-piloto do IPC-Calcob em Coimbra (à esquerda) e no projeto-piloto do IPC-Calcob em Aveiro (à direita), em função do escoamento das sub-bacias



Figura 16. Referência cartográfica dos pontos de amostragem de sedimentos no projeto-piloto da ITAVI (à esquerda) e no projeto-piloto da FEHEDESA (à direita), em função do escoamento das sub-bacias

3.2.2. Frequência.

A frequência de amostragem de sedimentos foi definida em função do comportamento hidrológico do sistema e da abordagem experimental do projeto.

De um modo geral, foram realizadas duas campanhas principais de amostragem:

- uma amostragem inicial, antes da aplicação das medidas corretivas, destinada a caracterizar o estado inicial do sistema,
- uma amostragem final, realizada após a implementação dessas medidas, com o objetivo de avaliar o seu efeito sobre o transporte de sedimentos e do fósforo associado.

Phos4Cycle

Esta abordagem permite estabelecer uma comparação direta entre a situação inicial e final do sistema, facilitando a avaliação do impacto das práticas implementadas em cada projeto-piloto.

A combinação destas abordagens permite analisar tanto a evolução global do sistema como o seu comportamento face a eventos críticos, que constituem o principal mecanismo de exportação de fósforo na forma particulada.

3.2.3. Tipo de amostra.

A monitorização dos sedimentos baseou-se principalmente na obtenção de amostras inalteradas, com o objetivo de preservar a estrutura original do material e permitir uma análise mais precisa da sua composição e distribuição vertical.

As amostras foram extraídas através de dispositivos específicos, como o amostrador de janela, que permite a recuperação do perfil completo do sedimento com uma alteração mínima. Este tipo de amostragem possibilita a obtenção de colunas contínuas de solo ou sedimento, atingindo profundidades de até 1,5 m, em função das condições do terreno e da acessibilidade do perfil.

Uma vez extraídas, as amostras são processadas em laboratório, onde são subdivididas por horizontes ou intervalos de profundidade, em função dos objetivos analíticos. Este procedimento permite:

- analisar a distribuição vertical do fósforo,
- diferenciar zonas de acumulação e transporte,
- avaliar a relação entre as diferentes frações do solo e o material mobilizado.

A utilização de amostras inalteradas é especialmente relevante no contexto do projeto, uma vez que permite caracterizar não só a concentração de fósforo, mas também os processos físicos associados à sua mobilização, incluindo a estrutura do sedimento, a proporção de frações finas e o seu potencial de transporte.

Esta abordagem proporciona uma visão mais completa da dinâmica do fósforo em comparação com a utilização exclusiva de amostras alteradas, permitindo interpretar com maior precisão os processos de erosão, transporte e deposição nas sub-bacias estudadas.



Figura 17. Obtenção de amostras inalteradas através do amostrador de janela da ITAGRA, permitindo a extração de perfis completos de sedimentos para análise vertical em laboratório.

3.3 Monitorização da água

A monitorização da água foi considerada um elemento-chave para avaliar a exportação de fósforo das sub-bacias, permitindo analisar tanto a fração dissolvida como a associada a sólidos em suspensão em condições reais de escoamento e drenagem.

Para tal, foi adotada uma abordagem combinada que integra amostragem pontual e monitorização contínua, com o objetivo de captar tanto a variabilidade temporal do sistema como os eventos críticos de mobilização de fósforo.

3.3.1. Tipo de monitorização (amostragem pontual / monitorização contínua).

No âmbito do projeto, foram utilizadas duas estratégias complementares:

- **Amostragem pontual**, através da recolha de amostras de água para análise em laboratório, realizada em momentos representativos do sistema, tais como episódios de precipitação, períodos de rega ou situações de baixa atividade.
- **Monitorização contínua**, através da instalação de estações automáticas em pontos estratégicos das sub-bacias, permitindo a obtenção de dados com elevada frequência temporal.

A localização dos pontos de monitorização da água, tanto contínua como descontínua ou pontual, foi definida com base em critérios hidrológicos, dando prioridade às zonas que funcionam como pontos de integração de caudais dentro da sub-bacia. Em particular, foram selecionados:

- pontos de saída das sub-bacias ou de sistemas de drenagem,
- zonas onde se concentra o escoamento superficial ou a drenagem artificial,
- localizações representativas do comportamento hidrológico do sistema.

Phos4Cycle

A seleção destes pontos baseou-se na análise da rede de drenagem derivada do MDE, na identificação de linhas de escoamento preferenciais e na verificação no terreno da existência de escoamento de água de forma recorrente ou durante eventos de escoamento.

Da mesma forma, foi tida em conta a necessidade de garantir a representatividade do ponto de medição, evitando localizações com interferências externas e assegurando condições adequadas para a instalação e funcionamento dos equipamentos de monitorização contínua.

Em particular, foi implementado um sistema de monitorização contínua desenvolvido pela AQUACORP, que fornece estimativas horárias dos parâmetros da água, permitindo caracterizar a dinâmica do fósforo em relação a eventos hidrológicos e condições de gestão.

3.3.2. Tecnologia utilizada para medições contínuas

A solução proposta pela AQUACORP consiste num sistema de monitorização contínua que fornece uma estimativa de hora a hora. A solução fornece estimativas da quantidade de água no ponto de monitorização, bem como dos parâmetros de interesse que serão indicados a seguir.

A solução proposta baseia-se na estimativa dos parâmetros físico-químicos da água utilizando informação ótica captada através de uma câmara multiespectral inteligente. Esta solução baseia-se num sistema especialista de IA que, uma vez treinado em conjunto com dados óticos e físico-químicos, é capaz de realizar estimativas dos diferentes parâmetros físico-químicos, fornecendo uma estimativa sempre que ocorre a captura de um pacote de dados óticos.

As estimativas realizadas por este sistema especialista são fornecidas ao cliente através de uma página web na qual é possível consultar o histórico das mesmas.

Todos os desenvolvimentos experimentais realizados pela AQUACORP baseiam-se num processo iterativo de otimização incremental (estruturado em 3 iterações), cujos ciclos contêm várias tarefas que se dividem em 5 etapas:

- Conceção/otimização da estação multiespectral inteligente.
- Fabrico e montagem da estação multiespectral inteligente.
- Instalação da estação multiespectral inteligente.
- Calibração, personalização e otimização da tecnologia.
- Controlo de qualidade, análise de resultados e recomeço.

As subtarefas realizadas nestas 4 etapas durante cada um dos 3 ciclos iterativos associados à tarefa de monitorização da água são as relacionadas com a etapa de calibração:

- Amostragem de dados óticos.
- Amostragem de dados físico-químicos.

- Análise e processamento de dados óticos. Adequação e otimização de serviços de visão computacional para dispor de dados óticos de maior qualidade.
- Treinamento e otimização do sistema especialista de IA.

A seguir, detalham-se cada uma destas subtarefas e todos os desenvolvimentos experimentais realizados nas mesmas.

Amostragem de dados óticos.

Uma vez concluída a instalação das estações nos três pontos de monitorização:

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

Foi realizada a captura contínua de dados óticos em cada um dos 3 pontos. Esta captura serviu para obter todo o espectro de situações óticas analisadas.

Cada um dos pacotes óticos capturados em cada um dos pontos contém o seguinte tipo de dados:

- Imagem RGB sem filtro.
- Imagem RGB com filtro polarizador.
- Luminância incidente.
- 8 canais espectrais da água entre 440 e 840 nm.
- 8 canais espectrais da abóbada celeste entre 440 e 840 nm.

A seguir, são apresentados os dados capturados durante o ano de 2025 em cada um dos 3 pontos.

/

Imagens RGB-F	Imagens RGB-SF	Luminosidade					
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_céu	470_nm_céu	510_nm_céu	550_nm_céu	583_nm_céu	620_nm_céu	670_nm_céu	840_nm_céu
31.211	31.211	31.211	31.211	31.211	31.211	31.211	31.211

Tabela 4. Dados recolhidos no projeto-piloto ITAGRA

Imagens RGB-F	Imagens RGB-SF	Luminosidade					
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_c éu	470_nm_c éu	510_nm_céu	550_nm _céu	583_nm _céu	620_nm_c éu	670_nm_c éu	840_nm_c éu
16.702	16.702	16,702	16,702	16.702	16.702	16.702	16.702

Tabela 5. Dados recolhidos no projeto-piloto da ITAVI

Imagens RGB-F	Imagens RGB-SF	Luminosidade					
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_c éu	470_nm_c éu	510_nm_céu	550_nm _céu	583_nm _céu	620_nm_c éu	670_nm_c éu	840_nm_c éu
16.911	16.911	16,911	16.911	16.911	16.911	16.911	16.911

Tabela 6. Dados recolhidos no projeto-piloto do IPC-Calcob em Coimbra

Amostragem de dados físico-químicos.

Após a recolha de dados óticos representativos para os diferentes tipos de água e sob os diferentes eventos de interesse, foi concebido e realizado um processo de amostragem para caracterizar físico-quimicamente os diferentes tipos óticos. Este processo foi realizado de forma diferente em cada um dos pontos de monitorização:

- ◆ Villamuriel:
 - Períodos de rega.
 - Períodos com precipitação média.
 - Períodos com precipitação elevada.
- ◆ Orthez:
 - Períodos de rega.
 - Períodos sem atividade.
 - Períodos em que os patos estão fora da exploração.
- ◆ Coimbra:
 - Períodos sem atividade.
 - Períodos de rega.
 - Períodos com precipitação média.

- Períodos com precipitação elevada.

Uma análise dos diferentes parâmetros será realizada na secção 3.3.3. deste mesmo relatório.

Análise e processamento de dados óticos.

Em 2025, foram realizadas tarefas de análise e processamento das diferentes imagens, através de serviços de visão computacional. Estas tarefas visam a limpeza, adaptação e extração de todas as características relevantes nos dois pontos de controlo.

A seguir, descrevem-se os tipos de descritores extraídos de cada uma das imagens captadas:

Primeiro nível:

Refletância do canal R, Refletância do canal G, Refletância do canal B

Média do canal R, Média do canal G, Média do canal B

Desvio do canal R, Desvio do canal G, Desvio do canal B

Refletância do canal H, Refletância do canal S, Refletância do canal V

Média do canal H, Média do canal S, Média do canal V

Desvio do canal H, Desvio do canal S, Desvio do canal V

Refletância do canal L, Refletância do canal a, Refletância do canal b

Média do canal L, Média do canal a, Média do canal b

Desvio do canal L, Desvio do canal a, Desvio do canal b

Segundo nível:

Assimetria do canal R, Asimetria do canal G, Asimetria do canal B

Curtoese do canal R, Curtoese do canal G, Curtoese do canal B

Assimetria do canal H, Asimetria do canal S, Asimetria do canal V

Curtoese do canal H, Curtoese do canal S, Curtoese do canal V

Assimetria do canal L, Asimetria do canal a, Asimetria do canal b

Curvatura canal L, Curvatura canal a, Curvatura canal b

Terceiro nível:

Textura do canal R, Textura do canal G, Textura do canal B

RIM canal R, RIM canal G, RIM canal B

GRP canal R, GRP canal G, GRP canal B

Textura canal H, Textura canal S, Textura canal V

RIM canal H, RIM canal S, RIM canal V

GRP canal H, GRP canal S, GRP canal V

Canal de textura L, canal de textura a, canal de textura b

RIM canal L, RIM canal a, RIM canal b

Canal GRP L, Canal GRP a, Canal GRP b

Uma vez extraídos, analisados e processados os descritores, as tarefas seguintes dizem respeito a:

- Identificar o intervalo de variabilidade de cada descritor.
- Determinar quais são os mais sensíveis e os que podem fornecer mais informação em cada um dos três pontos de controlo.
- Realizar combinações de descritores relevantes para cada ponto de controlo.

Estas últimas etapas permitiram-nos efetuar uma seleção da informação ótica com maior capacidade discriminatória. Este exercício foi realizado de forma independente para cada um dos parâmetros físico-químicos a estimar em cada um dos três pontos de monitorização.

Treino e otimização do sistema especialista de IA.

Uma vez obtidos, analisados e processados tanto os dados óticos como os dados físico-químicos, é realizado um processo iterativo de treino e otimização de sistemas especialistas capazes de estimar os diferentes parâmetros físico-químicos de interesse.

Este processo é considerado iterativo, uma vez que se trata de um sistema de melhoria contínua, reforçado pela recolha de novos dados óticos.

Este sistema é composto por duas etapas:

- a) Identificação e seleção da solução ótima para a estimativa dos diferentes parâmetros físico-químicos.
- b) Otimização do modelo com novos dados.

Na primeira etapa, foram realizados testes utilizando diferentes alternativas do estado da arte que permitem a estimativa de parâmetros físico-químicos. No caso concreto deste projeto, foram utilizadas as seguintes alternativas:

Modelos de agrupamento como K-means ou Random Forest.

Soluções de classificação baseadas em SVM (Support Vector Machine).

Soluções de classificação e regressão baseadas em redes neurais:

Redes neurais convolucionais.

Redes recorrentes.

Autoencoders.

Dependendo do ponto e do parâmetro a estimar, a solução adotada tem sido diferente:

- No caso da distinção entre os diferentes tipos de água, a solução mais adotada é a utilização de redes convolucionais.
- Para a estimativa de parâmetros físico-químicos, foram utilizadas redes recorrentes, mas, dependendo do ponto de monitorização, foram utilizadas redes independentes para estimar cada um dos parâmetros ou uma única rede capaz de estimar simultaneamente os diferentes parâmetros físico-químicos.
- No caso da deteção de ausência de água ou anomalias na superfície da água, foram utilizadas soluções baseadas em autoencoders.

No caso do sistema de otimização iterativa, este foi iniciado após a captura de novos dados, na sequência do treino inicial utilizando sistemas de aprendizagem supervisionada. O trabalho a desenvolver em 2026 visa principalmente melhorar este processo iterativo com a captura de novos dados.

3.3.3. Parâmetros monitorizados.

A monitorização da água centrou-se nos parâmetros-chave relacionados com a dinâmica do fósforo:

- **Fósforo na água**, como indicador direto do risco de contaminação e da fração dissolvida potencialmente transportável.
- **Sólidos em suspensão**, intimamente relacionados com o transporte de fósforo particulado, ao atuarem como vetor de mobilização do nutriente.

Para a obtenção destes parâmetros, foram utilizadas duas abordagens complementares: amostragem pontual e monitorização contínua, cada uma com uma função específica no âmbito do sistema de acompanhamento.

◆ Amostragem pontual ou descontínua

A amostragem pontual baseou-se na recolha de amostras de água no terreno para análise em laboratório, fornecendo medições diretas e de alta precisão dos parâmetros físico-químicos.

Estas campanhas foram realizadas em momentos representativos do sistema, incluindo:

- períodos de rega,
- episódios de precipitação capazes de gerar escoamento,
- fases sem atividade ou com alterações na gestão, especialmente em sistemas de pecuária.

Este tipo de amostragem permite:

- obter valores reais de referência de fósforo e sólidos em suspensão,
- caracterizar condições específicas do sistema,
- gerar dados de alta qualidade para a calibração de outros sistemas de monitorização.

Phos4Cycle

No entanto, o seu carácter pontual implica uma limitação na resolução temporal, uma vez que não permite captar de forma contínua a variabilidade do sistema nem eventos de curta duração.

◆ Monitorização contínua

A monitorização contínua foi realizada através de estações automáticas equipadas com tecnologia multiespectral, capazes de gerar estimativas horárias dos parâmetros da água.

Este sistema permite:

- registar a evolução temporal do sistema com alta frequência,
- identificar picos de concentração associados a eventos de escoamento,
- analisar a dinâmica do fósforo em relação às condições climáticas e de gestão.

O funcionamento do sistema baseia-se na captura de dados óticos da água e no seu processamento através de modelos de inteligência artificial previamente calibrados com dados físico-químicos obtidos em laboratório.

Em comparação com a amostragem pontual, a monitorização contínua apresenta como principal vantagem a sua elevada resolução temporal, embora requeira um processo prévio de calibração e validação para garantir a fiabilidade das estimativas.

3.4 Monitorização complementar em sistemas pecuários

No projeto-piloto desenvolvido pela ITAVI, foi incorporado um conjunto de medidas adicionais destinadas a caracterizar a dinâmica do fósforo desde a sua origem no sistema produtivo.

Esta abordagem complementa a monitorização ambiental (solo, sedimentos e água), permitindo analisar o fósforo a partir de uma perspetiva integrada que inclui a sua ingestão, transformação e excreção.

3.4.1 Indicadores de produção e gestão

Foram registados diversos indicadores zootécnicos com o objetivo de caracterizar o funcionamento do sistema e a sua relação com os fluxos de fósforo, incluindo:

- mortalidade diária,
- peso dos animais,
- consumo de ração,
- consumo de água,
- gestão da cama (peso inicial e reposições),
- condições climáticas (precipitação).

Estes parâmetros permitem contextualizar a produção de dejetos e o seu potencial impacto na acumulação e mobilização do fósforo no sistema.

3.4.2 Acompanhamento experimental e calendário de ações

Foi estabelecido um calendário de ações que inclui diferentes fases do ciclo produtivo, tais como:

- entrada de animais,
- transferência entre fases de produção,
- períodos de alimentação controlada,
- recolha de dejetos (frescos e compostados),
- saída dos animais.

Durante estas fases, foram realizadas amostragens e medições destinadas a caracterizar tanto o estado dos animais como a geração de resíduos orgânicos.

3.4.3 Análise do fósforo no sistema produtivo

Foram realizadas várias análises para caracterizar o comportamento do fósforo no sistema pecuário:

♦ Alimentação

- fósforo total
- proteínas
- matéria gorda
- cálcio
- sódio

♦ Dejetos (excrementos e estrume)

O fósforo móvel foi avaliado através de ensaios de percolação que simulam condições de precipitação, permitindo estimar a fração suscetível de ser lixiviada ou mobilizada.

♦ Balanço de massa

Foi realizado um balanço de fósforo à escala do sistema, considerando:

- fósforo ingerido (alimentação),
- fósforo retido (crescimento animal),
- fósforo excretado (dejetos),

o que permite estimar a fração potencialmente transferida para o solo e para o meio ambiente.

♦ Ensaios complementares

Foram realizados ensaios adicionais, tais como testes de mineralização em amostras biológicas, com o objetivo de avaliar a eficiência na utilização do fósforo pelos animais.

3.4.4 Integração com a monitorização ambiental

A informação gerada neste bloco permite complementar a interpretação dos resultados obtidos no solo, nos sedimentos e na água, estabelecendo uma relação direta entre:

Phos4Cycle

- a alimentação animal,
- a produção de dejetos,
- a entrada de fósforo no sistema.

Esta abordagem é especialmente relevante para compreender a dinâmica do fósforo em sistemas de pecuária, onde as fontes de aporte estão diretamente ligadas à gestão dos animais.

4. Medidas de gestão avaliadas

4.1 Abordagem funcional das medidas sobre a dinâmica do fósforo

As medidas de gestão implementadas nos diferentes projetos-piloto, descritas na secção 2.2, foram concebidas com o objetivo de atuar diretamente sobre os principais processos que controlam a dinâmica do fósforo em sistemas agrícolas e pecuários.

O fósforo no sistema solo-água comporta-se como um elemento fortemente condicionado por interações físico-químicas e processos hidrológicos, em que a sua disponibilidade, acumulação e mobilização dependem tanto das entradas no sistema como das condições do meio e da gestão aplicada.

De um ponto de vista funcional, as medidas avaliadas podem ser agrupadas em três grandes categorias:

a) Medidas orientadas para a redução das entradas de fósforo

Estas medidas procuram minimizar a incorporação de fósforo no sistema, atuando sobre as fontes primárias de aporte:

- ajuste da fertilização em função das necessidades reais da cultura e do estado do solo,
- otimização do uso de nutrientes por meio de estratégias de equilíbrio,
- melhoria da eficiência da utilização do fósforo na alimentação animal através do uso de fitasas.

Estas ações permitem reduzir o risco de acumulação progressiva de fósforo no solo, evitando situações de saturação que aumentam a probabilidade de perdas por escoamento ou lixiviação.

b) Medidas orientadas para a melhoria da retenção de fósforo no solo

Este grupo de medidas atua sobre a capacidade do solo para reter o fósforo e limitar a sua disponibilidade para processos de mobilização:

- aplicação de corretivos como o biochar, com elevada capacidade de adsorção,
- aumento do teor de matéria orgânica,
- melhoria da estrutura do solo.

Estas práticas favorecem a imobilização do fósforo em formas menos móveis, aumentando a capacidade tampão do solo e reduzindo a sua transferência para a água.

c) Medidas orientadas para a redução da mobilização do fósforo

Estas medidas centram-se em limitar os processos físicos que favorecem o transporte do fósforo, especialmente na sua fração particulada:

- implantação de coberturas vegetais,
- redução da erosão e melhoria da infiltração,
- controlo do escoamento superficial,
- gestão da carga pecuária e distribuição espacial dos dejetos.

O seu objetivo é diminuir a conectividade hidrológica e a capacidade do sistema para exportar sedimentos, reduzindo assim o transporte de fósforo associado a partículas.

4.2 Relação entre medidas e processos de transporte de fósforo

As medidas implementadas foram concebidas para atuar especificamente sobre os principais mecanismos de transporte de fósforo identificados no sistema:

- Transporte em fase dissolvida, relacionado com a concentração de fósforo disponível no solo e a sua interação com a água, especialmente em condições de saturação ou drenagem.
- Transporte em fase particulada, associado a processos de erosão, escoamento superficial e mobilização de sedimentos.

As estratégias aplicadas permitem atuar sobre ambos os mecanismos de forma complementar:

- reduzindo a disponibilidade de fósforo suscetível de dissolução,
- aumentando a sua retenção no solo,
- limitando os processos físicos responsáveis pelo seu transporte.

Esta abordagem integrada permite abordar a problemática do fósforo de uma perspetiva sistémica, considerando tanto as fontes como os mecanismos de transferência.

4.3 Coerência do desenho experimental

O desenho experimental baseado na delimitação de sub-bacias com diferentes regimes de gestão permite avaliar a eficácia das medidas em condições reais, mantendo a comparabilidade entre os tratamentos e garantindo a coerência metodológica do conjunto do projeto.

A utilização de sub-bacias hidrográficas como unidades funcionais de análise permite integrar processos hidrológicos, edáficos e de gestão, analisar a resposta do sistema à escala real e avaliar o impacto das medidas na exportação de fósforo.

Esta abordagem facilita a interpretação conjunta dos resultados obtidos nos diferentes blocos de monitorização (solo, sedimentos e água), permitindo estabelecer relações diretas entre práticas de gestão, condições ambientais e resposta do sistema.

4.4 Contribuição para a análise integrada e a modelização

O conjunto de medidas avaliadas constitui a base para a análise integrada do projeto, permitindo gerar conhecimento sobre a eficácia de diferentes estratégias de gestão na redução do risco de contaminação por fósforo.

A informação derivada da sua aplicação, combinada com os dados de monitorização, permite:

identificar os fatores que controlam a dinâmica do fósforo,

avaliar a eficiência das medidas em diferentes contextos edafoclimáticos,

e estabelecer relações de causa-efeito entre a gestão e a resposta ambiental.

Este conhecimento será fundamental para o desenvolvimento de modelos de análise e ferramentas de apoio à tomada de decisões, orientadas para a gestão sustentável do fósforo à escala da sub-bacia hidrográfica e a sua extrapolação para outros territórios.

5. Observações técnicas e qualitativas

Esta secção reúne observações técnicas, incidentes e lições aprendidas que não se refletem diretamente nos resultados gráficos da secção 6

5.1. Tendências observadas.

De um modo geral, os resultados obtidos nos diferentes projetos-piloto confirmam que a dinâmica do fósforo é fortemente condicionada pelos processos hidrológicos, sendo os episódios de precipitação e escoamento os principais responsáveis pela sua mobilização, especialmente na forma de partículas. Neste sentido, os ensaios realizados em sistemas agrícolas, como o projeto-piloto de La Rioja, mostram que a turbidez da água de escoamento e, por conseguinte, o transporte de sólidos em suspensão, depende em grande medida do momento da amostragem durante o evento de precipitação. Assim, quando a amostragem é realizada em fases ativas do fluxo, detectam-se diferenças

claras entre os sistemas de gestão, enquanto que em condições de acumulação e decantação essas diferenças tendem a atenuar-se.

Em sistemas com menor inclinação e maior estabilidade estrutural, como é o caso do ITAGRA, não se observam alterações significativas a curto prazo nos níveis de fósforo disponível, o que é coerente com solos agrícolas com um longo historial de gestão e com uma dinâmica dominada por processos lentos de equilíbrio. Nestes contextos, o transporte de fósforo parece estar mais associado a eventos pontuais do que a processos contínuos de perda de solo.

Em sistemas pecuários, como o piloto do ITAVI, fica evidente que a gestão na origem, particularmente a alimentação animal, tem um impacto direto nos fluxos de fósforo. A incorporação de fitasas na dieta reduz significativamente os níveis de fósforo solúvel nas dejeções, sem afetar de forma relevante os parâmetros produtivos, o que confirma o potencial destas estratégias para diminuir a carga de fósforo no sistema.

Os resultados evidenciam a importância de considerar simultaneamente a variabilidade espacial (sub-bacias, zonas de uso) e temporal (eventos hidrológicos), bem como a necessidade de combinar técnicas de monitorização para captar adequadamente a dinâmica do fósforo.

5.2. Incidentes relevantes.

Durante a execução dos projetos-piloto, registaram-se diversas incidências que condicionaram parcialmente o desenvolvimento das atividades, principalmente relacionadas com fatores climáticos e operacionais. Em vários territórios, os episódios de precipitação intensa dificultaram a realização de campanhas de amostragem, tanto por problemas de acessibilidade como pela impossibilidade de captar determinados eventos em condições ótimas.

Na Península Ibérica e no sul de França, registou-se um período de elevada pluviosidade entre setembro de 2025 e fevereiro de 2026, que afetou especialmente os projetos-piloto da ITAGRA (Castela e Leão), FEDEHESA (Extremadura) e Portugal (Coimbra e Aveiro), impedindo a realização de algumas amostragens intermédias e condicionando o planeamento de campo.

No caso de Portugal, os incidentes foram especialmente relevantes. Entre o final de janeiro e o início de fevereiro de 2026, ocorreram episódios de chuvas intensas e inundações, particularmente no piloto de Coimbra, que provocaram o alagamento da parcela experimental e puderam afetar a representatividade de alguns resultados. No projeto-piloto de Aveiro, a localização inicial do ensaio apresentava uma elevada suscetibilidade a inundações inverniais, o que obrigou a realojar parcialmente o projeto-piloto e a adiar o seu início. Além disso, a falta de caudal na rede de drenagem em determinados períodos limitou a recolha de amostras de água, que só pôde ser realizada após episódios de chuva intensa em fevereiro de 2026.

Noutros projetos-piloto, como o de La Rioja, a principal dificuldade esteve associada à dificuldade de sincronizar a amostragem com os eventos de escoamento, especialmente quando estes ocorriam durante a noite, o que gerou atrasos na recolha de amostras. Na FEDEHESA, as condições meteorológicas excecionais e a acessibilidade ao terreno durante episódios de chuva intensa condicionaram a execução dos trabalhos de campo.

Apesar destas incidências, em nenhum caso foi comprometida a validade global do desenho experimental, embora tenha sido necessário introduzir ajustes operacionais para garantir a continuidade do projeto.

5.3. Limitações detetadas.

O desenvolvimento dos projetos-piloto revelou uma série de limitações associadas à implementação e acompanhamento deste tipo de ações em condições reais de exploração, onde a variabilidade do sistema e os fatores externos influenciam diretamente a obtenção de dados.

Uma das principais limitações identificadas está relacionada com a **dependência do momento da amostragem**, especialmente no caso das águas de escoamento. A natureza episódica destes processos implica que a representatividade das amostras pode ser condicionada pelo desfaseamento temporal entre o evento de precipitação e a recolha da amostra, o que pode afetar a estimativa de sólidos em suspensão e do fósforo associado.

Da mesma forma, a **ausência ou limitação de sistemas automáticos de recolha de escoamento** em alguns projetos-piloto exigiu a realização de amostragens manuais, condicionadas pela disponibilidade operacional e pela acessibilidade às parcelas, o que dificultou a captura de determinados eventos em condições ótimas.

Em determinados contextos, como os sistemas com drenagem artificial em Portugal, a **complexidade do comportamento hidrológico** introduziu dificuldades adicionais na interpretação dos fluxos de água e na identificação de pontos de amostragem representativos, uma vez que não dependem exclusivamente de processos de escoamento superficial.

Nos sistemas pecuários, a **heterogeneidade espacial dos dejetos e dos materiais orgânicos** dificultou, em alguns casos, a obtenção de amostras plenamente representativas, devido à variabilidade na distribuição e acumulação dentro das instalações.

Por outro lado, fatores externos como **episódios climáticos excecionais, inundações ou alterações na disponibilidade de parcelas** condicionaram o desenvolvimento de alguns projetos-piloto, obrigando a adaptar o planeamento inicial e a ajustar o calendário de ações.

Em sistemas com baixa inclinação e dinâmica erosiva limitada, como o projeto-piloto da ITAGRA, a **baixa intensidade dos processos de mobilização** pode dificultar a

observação de diferenças claras a curto prazo, sendo necessário considerar horizontes temporais mais amplos para uma interpretação adequada do comportamento do sistema.

5.4. Lições aprendidas com a implementação do projeto-piloto.

O desenvolvimento dos projetos-piloto permitiu identificar uma série de lições fundamentais para a implementação de estratégias de gestão do fósforo em condições reais, tanto do ponto de vista técnico como operacional, com um claro enfoque na sua aplicabilidade e replicabilidade noutros contextos.

Em primeiro lugar, confirma-se a importância de dispor de um **desenho prévio baseado em unidades funcionais**, como as sub-bacias, que permita integrar os processos hidrológicos e estruturar de forma coerente a monitorização. A combinação de ferramentas SIG com o conhecimento do terreno revelou-se essencial para validar no terreno as delimitações teóricas e garantir a representatividade dos pontos de amostragem.

Da mesma forma, ficou evidente que a monitorização de processos associados ao fósforo requer a **combinação de diferentes metodologias**, sendo especialmente relevante integrar a amostragem pontual com sistemas de monitorização contínua. Esta abordagem permite captar tanto a precisão analítica como a dinâmica temporal do sistema, especialmente em processos dominados por eventos de curta duração.

Do ponto de vista operacional, evidencia-se a necessidade de **incorporar sistemas de amostragem adaptados a eventos**, capazes de recolher amostras de forma autónoma e representativa, reduzindo a dependência da presença no terreno e melhorando a qualidade dos dados obtidos em episódios de escoamento.

Em sistemas pecuários, a experiência demonstra que a **gestão na origem**, particularmente através da alimentação animal, constitui uma ferramenta eficaz para reduzir as cargas de fósforo no sistema, com um impacto direto sobre os dejetos e sem afetar negativamente os parâmetros produtivos. Esta abordagem posiciona-se como uma estratégia de elevado potencial para a sua aplicação noutros sistemas semelhantes.

Por outro lado, verificou-se que a implementação de medidas de gestão em condições reais requer uma **adaptação contínua às condições do sistema**, incluindo fatores climáticos, edáficos e operacionais. A flexibilidade no planeamento e a capacidade de ajuste face a incidentes revelam-se elementos-chave para garantir a viabilidade dos projetos-piloto.

Por fim, fica patente que os processos de melhoria do comportamento do fósforo no solo e a redução da sua exportação para a água apresentam, em muitos casos, um **caráter progressivo**, pelo que a interpretação dos resultados deve ser feita num contexto

temporal adequado. Isto reforça a necessidade de manter sistemas de monitorização ao longo do tempo e de abordar estas abordagens numa perspetiva de continuidade.

Em conjunto, as lições aprendidas evidenciam a importância de abordar a gestão do fósforo a partir de uma abordagem integrada, combinando conhecimento técnico, monitorização adaptada e práticas de gestão ajustadas às condições reais de cada sistema, como base para o desenvolvimento de estratégias transferíveis e sustentáveis.

6. Modelização das perdas de fósforo em sistemas agrícolas

No âmbito do projeto, está a ser implementado o modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) (Equação 1) como base metodológica para a estimativa das perdas de solo e a sua posterior tradução em perdas de fósforo em diferentes sistemas agro-pecuários. Esta abordagem permite modelar o comportamento do fósforo associado a processos de erosão hídrica, integrando variáveis climáticas, edáficas, topográficas e de gestão das culturas ou das explorações pecuárias.

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

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

A parametrização do modelo é realizada a partir de fontes de dados abertas e padronizadas. Concretamente, como se observa na Figura 1, são utilizados modelos digitais do terreno (MDT) para a derivação do fator topográfico (LS), dados de ocupação do solo provenientes do SIOSE para a caracterização do fator de cobertura (C), informação edafológica (teor de areia, limo, argila e carbono orgânico do solo) para a estimativa do fator de erodibilidade (K), e séries de precipitação média anual para o cálculo do fator de erosividade da chuva (R). O fator de práticas de conservação (P) é definido a partir de informações específicas de gestão recolhidas no projeto, incluindo o tipo de cultura ou exploração, trabalhos realizados e estratégias de gestão aplicadas em cada caso.

Estimación de factores del RUSLE

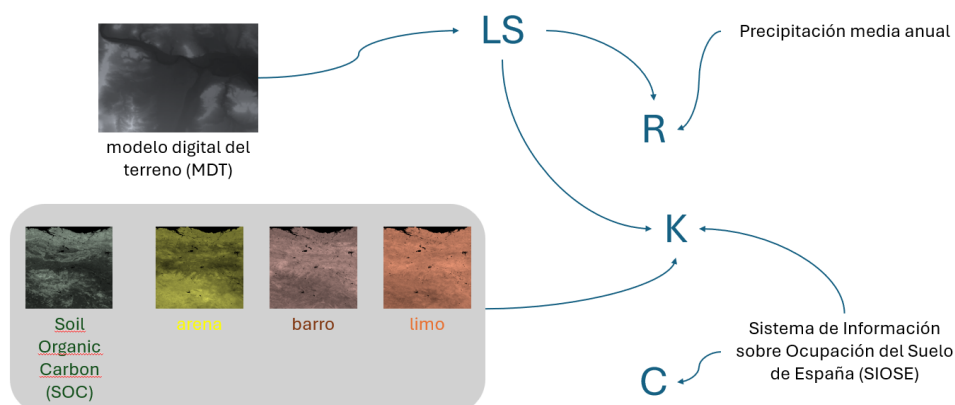


Figura 18. Fontes de informação para a estimativa dos fatores que compõem o cálculo da perda de solo de acordo com o modelo RUSLE

O modelo permite obter a perda anual de solo (A, t/ha/ano), que posteriormente é transformada em perda de fósforo (A_fósforo) através da incorporação do teor de fósforo no solo (P_content). Desta forma, quantifica-se a exportação potencial de fósforo associada à erosão, o que é fundamental tanto para avaliar a degradação da fertilidade do solo como para estimar os riscos de poluição difusa em massas de água, o que pode causar eutrofização.

A aplicação inicial do modelo é realizada nos seis projetos-piloto adotados no projeto Phos4cycle, representativos de diferentes sistemas produtivos: cereais, hortícolas, vinha, forragens, gado ovino e produção de patos. Estes casos permitem calibrar e validar o modelo em condições reais de gestão. No entanto, o âmbito do trabalho será alargado através da integração de dados de acesso aberto adicionais, com o objetivo de gerar cenários simulados que abranjam uma maior diversidade de condições agroclimáticas e práticas de gestão (Figura 19).



Figura 19. Diagrama simplificado da modelização dos dados para a obtenção de cenários de risco de perda de fósforo.

Além disso, estão a ser utilizadas técnicas de inteligência artificial, como redes neurais, para o ajuste e melhoria do modelo, através da recalibração global do RUSLE e da otimização de fatores específicos, especialmente o fator P, que é altamente dependente das práticas de gestão e d . A incorporação destas abordagens permite processar grandes volumes de dados heterogêneos provenientes tanto dos projetos-piloto como de fontes externas (dados climáticos históricos, propriedades do solo, usos do território, práticas agronómicas, etc.), identificando padrões não lineares e relações complexas que não são facilmente captadas por meio de formulações empíricas tradicionais.

Neste contexto, as redes neurais atuam como modelos de aprendizagem supervisionada que, a partir de dados observados de perdas de solo e fósforo, são capazes de ajustar os parâmetros do RUSLE para reduzir desvios entre valores estimados e reais. Isto traduz-se numa melhoria significativa da capacidade preditiva do modelo, especialmente em cenários com elevada variabilidade espacial e temporal. Além disso, permitem incorporar de forma dinâmica novas variáveis ou condições de gestão, facilitando a adaptação do modelo a diferentes sistemas produtivos e contextos agroclimáticos.

O uso da inteligência artificial também possibilita a atualização contínua do modelo à medida que novos dados são incorporados, gerando um sistema mais robusto e escalável. Desta forma, não só se otimiza o fator P em função de práticas como a aplicação de biochar, o uso de coberturas vegetais ou a fertilização variável, como também se melhora o comportamento global do modelo, reduzindo a incerteza na estimativa das perdas de fósforo e aumentando a sua utilidade como ferramenta de apoio à tomada de decisões no âmbito do projeto Phos4Cycle.

Como resultado da modelização, tal como indicado na figura 19, prevê-se o desenvolvimento de uma plataforma digital orientada para os utilizadores finais (agricultores, criadores de gado, cooperativas, empresas de gestão, administrações públicas, etc.), que permitirá estimar as perdas de fósforo em diferentes cenários e avaliar o impacto da adoção de práticas de gestão sustentável. Entre estas práticas incluem-se as propostas no Phos4Cycle, como a aplicação de biochar, o uso de coberturas vegetais, a fertilização variável ou a implementação de técnicas de conservação do solo, entre outras. Esta ferramenta facilitará a tomada de decisões baseadas em evidências, contribuindo para a redução das perdas de fósforo e para uma gestão mais eficiente e sustentável dos sistemas agro-pecuários.

7. Contribuição dos projetos-piloto para o projeto

Os projetos-piloto desenvolvidos no âmbito do projeto permitiram gerar conhecimento aplicado sobre a dinâmica do fósforo em diferentes sistemas produtivos da região SUDOE, integrando condições edafoclimáticas, modelos de gestão e diversas configurações hidrológicas.

A combinação de abordagens — agrícola, pecuária e de regadio intensivo — juntamente com a aplicação de metodologias comuns de delimitação de sub-bacias e monitorização integrada, permitiu avançar para uma compreensão sistémica do comportamento do fósforo, tanto na sua fase dissolvida como particulada.

Esta abordagem facilitou a identificação de fatores-chave que condicionam a mobilização do fósforo, bem como a avaliação de diferentes estratégias de gestão em condições reais, proporcionando uma base sólida para a construção de um modelo comum de análise e gestão.

7.1 Valor dos projetos-piloto para o modelo comum

Os diferentes projetos-piloto forneceram informações complementares que se revelaram fundamentais para o desenvolvimento do modelo comum do projeto, permitindo integrar a variabilidade associada a diferentes contextos territoriais e produtivos.

Em sistemas agrícolas extensivos, como o ITAGRA, contribuiu-se para definir o comportamento do fósforo em condições de baixa inclinação e erosão limitada, onde os processos são dominados por eventos pontuais e a dinâmica edáfica apresenta uma elevada estabilidade. No caso de La Rioja, o projeto-piloto permitiu aprofundar a relação entre o manejo do solo, o escoamento e o transporte de sedimentos, destacando a importância do momento da amostragem e da gestão da cobertura do solo.

Os projetos-piloto pecuários, como o FEDEHESA e o ITAVI, trouxeram uma visão complementar centrada na geração e distribuição do fósforo na origem. Em particular, a abordagem da ITAVI permitiu quantificar o efeito da alimentação animal na redução das entradas de fósforo no sistema, enquanto a FEDEHESA evidenciou a complexidade

destes processos em sistemas extensivos, onde a distribuição espacial do gado condiciona os padrões de acumulação.

Por seu lado, os projetos-piloto de Portugal contribuíram para incorporar no modelo a complexidade dos sistemas de regadio com drenagem artificial, onde a dinâmica do fósforo é fortemente influenciada pela gestão da água e pela conectividade hidráulica.

A diversidade de situações analisadas permitiu construir um modelo comum robusto, capaz de integrar diferentes mecanismos de transporte e contextos de gestão.

7.2 Transferibilidade para outros territórios

Os resultados obtidos nos diferentes projetos-piloto apresentam um elevado potencial de transferibilidade, uma vez que foram desenvolvidos em condições reais de exploração e em sistemas representativos do espaço SUDOE.

A metodologia baseada na delimitação de sub-bacias, na combinação de monitorização pontual e contínua e na integração de informação de gestão constitui uma abordagem replicável noutros territórios, independentemente do tipo de sistema produtivo.

Da mesma forma, as medidas avaliadas, tanto em sistemas agrícolas como pecuários, são aplicáveis em contextos semelhantes, embora a sua eficácia dependa de fatores locais como o clima, a tipologia do solo ou a estrutura do sistema produtivo.

Especialmente relevante é a transferibilidade de estratégias que atuam na origem, como a otimização da fertilização ou a melhoria da eficiência na alimentação animal, bem como aquelas orientadas para reduzir a mobilização do fósforo através do controlo do escoamento.

Neste sentido, os projetos-piloto permitiram identificar soluções práticas e adaptáveis, que podem ser incorporadas em políticas de gestão ou em ferramentas de apoio à tomada de decisões.

7.3 Aspetos-chave a considerar na estratégia e no guia

Com base na experiência adquirida nos diferentes projetos-piloto, identificam-se uma série de aspetos-chave que devem ser considerados no desenvolvimento da estratégia e do guia de gestão do fósforo:

A necessidade de abordar o fósforo a partir de uma abordagem integrada, considerando simultaneamente as entradas no sistema, os processos de retenção no solo e os mecanismos de transporte para a água.

A importância de adaptar as medidas de gestão às condições específicas de cada sistema, evitando abordagens generalistas e considerando fatores como a inclinação, a conectividade hidrológica ou o tipo de uso do solo.

A relevância de incorporar sistemas de monitorização adequados, capazes de captar a dinâmica temporal do sistema e de identificar eventos críticos de mobilização.

O papel fundamental da gestão na origem, especialmente em sistemas pecuários, como ferramenta para reduzir as cargas de fósforo antes da sua incorporação no meio.

E, finalmente, a necessidade de integrar o conhecimento técnico com a viabilidade operacional, garantindo que as soluções propostas sejam aplicáveis em condições reais de exploração.

8. Necessidades ou recomendações

Com base na experiência adquirida durante a implementação dos projetos-piloto, identificam-se uma série de necessidades e recomendações orientadas para melhorar tanto a conceção metodológica como a aplicação prática deste tipo de estudos em desenvolvimentos futuros.

8.1 Ajustes metodológicos

O desenvolvimento dos projetos-piloto revelou a necessidade de reforçar determinados aspetos metodológicos para melhorar a qualidade e a representatividade da informação obtida, especialmente no que diz respeito à captura de eventos hidrológicos e à variabilidade espacial dos sistemas.

Um dos principais ajustes identificados é a necessidade de incorporar **sistemas automáticos de recolha de escoamento**, que permitam obter amostras representativas no momento exato em que ocorrem os eventos de precipitação. Neste sentido, recomenda-se a instalação de dispositivos passivos ou ativos em pontos e es de saída de sub-bacias, tais como sistemas de recolha com depósito ou amostradores automáticos ativados por nível ou caudal, que permitam armazenar amostras sem necessidade de presença física no terreno. Esta solução revela-se especialmente relevante em contextos como La Rioja ou Portugal, onde a sincronização da amostragem tem constituído uma limitação significativa.

No que diz respeito à monitorização contínua, propõe-se como melhoria a **ampliação e densificação dos pontos instrumentados**, dando prioridade aos nós-chave do sistema (saídas de sub-bacias, pontos de drenagem, zonas de convergência). Da mesma forma, recomenda-se reforçar os processos de calibração através de campanhas sistemáticas de amostragem pontual em condições contrastadas (eventos de chuva, períodos de base, fases de gestão), com o objetivo de melhorar a fiabilidade dos modelos de estimativa.

Para a monitorização dos solos, propõe-se manter a abordagem baseada na integração da cartografia da condutividade elétrica e da análise hidrológica, incorporando como melhoria a **estratificação da amostragem em função de zonas funcionais** (alta, média,

baixa) e o reforço do número de pontos em áreas de maior heterogeneidade. Isto permitiria melhorar a interpretação dos gradientes de fósforo dentro de cada sub-bacia.

Nos sistemas de criação de gado, recomenda-se avançar para protocolos mais robustos de amostragem de dejetos e estrume, através da **definição de percursos de amostragem estruturados dentro das instalações**, combinando subamostras de diferentes zonas (alimentação, descanso, trânsito) e garantindo a sua correta homogeneização. Isto permitiria melhorar a representatividade das análises em materiais altamente heterogéneos.

Em sistemas de regadio com drenagem artificial, como os projetos-piloto em Portugal, considera-se necessário integrar de forma mais explícita a análise da **infraestrutura hidráulica (canais, válvulas, bombas)** na conceção metodológica. Como melhoria, propõe-se a incorporação de esquemas funcionais do sistema de drenagem e, sempre que possível, pontos de controlo adicionais na rede, o que facilitaria a interpretação dos fluxos de fósforo.

Como ponto final, recomenda-se incorporar no desenho inicial do projeto-piloto **cenários de contingência climática**, definindo protocolos alternativos de amostragem ou monitorização que permitam manter a coerência do estudo em caso de eventos extremos (inundações, impossibilidade de acesso, alterações na cultura), como os registados durante o período de execução.

8.2 Propostas de melhoria

De uma perspetiva operacional, a experiência adquirida nos diferentes projetos-piloto revela uma série de aspetos que devem ser considerados para melhorar a aplicabilidade das soluções avaliadas e facilitar a sua implementação em condições reais.

No âmbito da gestão agronómica, os resultados evidenciam a importância de basear a fertilização no conhecimento detalhado do solo e da cultura. A utilização combinada de análises edafológicas e ferramentas de caracterização espacial, como os mapas de condutividade elétrica, permitiu interpretar a variabilidade interna das parcelas e orientar a gestão de forma mais adequada. Neste sentido, torna-se evidente a necessidade de este tipo de informação ser integrado de forma operacional nas recomendações técnicas, facilitando a sua utilização prática por parte dos agricultores e técnicos.

No que diz respeito às medidas orientadas para a retenção de fósforo, como a aplicação de corretivos, a experiência no terreno demonstrou que a sua viabilidade depende em grande medida da sua compatibilidade com as condições de exploração. Aspetos como a forma de apresentação do material, a sua facilidade de aplicação e a sua adaptação à maquinaria disponível condicionam diretamente a sua adoção, pelo que devem ser considerados em qualquer abordagem técnica.

Phos4Cycle

Nos sistemas pecuários, os resultados obtidos mostram que as estratégias de ação na origem, particularmente através da otimização da alimentação animal, podem contribuir significativamente para a redução das cargas de fósforo no sistema. Da mesma forma, a gestão espacial dos dejetos é identificada como um elemento-chave, sendo necessário considerar práticas que permitam melhorar a sua distribuição e reduzir a acumulação em zonas específicas.

Por outro lado, a experiência dos projetos-piloto evidencia a importância de melhorar a integração da informação gerada nos diferentes blocos de monitorização. A combinação de dados relativos ao solo, sedimentos, água e gestão requer abordagens que permitam a sua interpretação conjunta, facilitando a identificação de relações entre práticas de gestão e resposta do sistema.

É evidente a necessidade de que as soluções propostas mantenham um equilíbrio entre o rigor técnico e a sua viabilidade operacional, garantindo a sua adaptação às condições reais de cada sistema produtivo. Neste sentido, a transferência de resultados deverá considerar não só a eficácia das medidas, mas também a sua aplicabilidade prática e a sua integração na gestão habitual das explorações.