(E1.4.1) MANUAL DE BUENAS PRÁCTICAS PARA REDUCIR EL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DE LOS FOSFATOS EN LA AGRICULTURA

Interreg Sudoe
Co-funded by the European Union
Phos4Cycle

Índice

1 Introducción..... 5

2. Del Diagnóstico a la Acción - el Manual en la Gestión Sostenible del Fósforo.....6

3 Gestión sostenible del fósforo..... 7

3.1 Contaminación del suelo y del agua por fósforo.....8

3.2 Suelos.....10

3.3 Fertilizantes.....15

3.4 Balance de fósforo en el suelo.....17

3.5 Agua.....18

Ficha técnica: Gestión del fósforo en el cultivo del maíz.....21

Gestión del fósforo en el suelo.....21

1.1 Diagnóstico del estado de fertilidad del suelo.....21

1.2 Protección y conservación del suelo.....24

Tipos de labranza del suelo.....25

1.3 Uso del suelo y gestión de residuos.....28

Fertilización..... 30

2.1 Principios generales:.....30

2.3 Técnica de aplicación e de los fertilizantes.....30

2.4 Tipos de fertilizantes fosfatados.....31

Protección de las masas de agua..... 33

3.1 Gestión del riego.....33

Tipos de riego.....33

Eficiencia del riego *frente* al riesgo de pérdida de P.....37

3.2 Otros factores.....37

Ficha técnica: Gestión del fósforo en el viñedo.....40

Gestión del fósforo en el suelo..... 40

1.3 Diagnóstico del estado de fertilidad del suelo.....40

1.2 Protección y conservación del suelo.....43

Tipos de Labranza del suelo.....43

1.3 Uso del suelo y gestión de residuos.....46

Fertilización..... 47

2.1 Principios generales:.....47

2.2 Época de aplicación de los fertilizantes.....48

2.3 Técnica de aplicación de los fertilizantes....48
2.4 Tipos de fertilizantes fosfatados....48
Fertirrigación....48
Protección de las masas de agua....49
3.1 Gestión del riego....49
Tipos de riego....50
3.2 Otros factores....51
Ficha técnica: Gestión del fósforo en la sucesión de cultivos herbáceos....54
Gestión del fósforo en el suelo....54
1.1 Diagnóstico del estado de fertilidad del suelo....54
1.2 Protección y conservación del suelo....57
Tipos de labranza....58
1.3 Uso del suelo y gestión de residuos....62
Fertilización....64
2.1 - Principios generales:....64
2.2 - Época de aplicación de los fertilizantes....64
2.3 - Técnica de aplicación de los fertilizantes....65
2.4 - Tipos de fertilizantes fosfatados....66
Buenas prácticas recomendadas en la gestión de la fertilización....67
Protección de las masas de agua....67
3.1 - Gestión del riego....67
Tipos de riego....68
Eficiencia del riego frente al riesgo de pérdida de P....72
3.2 – Otros factores....73
Ficha técnica: Gestión del fósforo en el dehesa....75
Gestión del fósforo en el suelo....75
1.1 Diagnóstico del estado de fertilidad del suelo....76
1.2 Protección y conservación del suelo....79
1.3 Uso del suelo y gestión e e de la vegetación (pastos y árboles)....83
Fertilización....90
2.1 Principios generales:....90
2.2 Época de aplicación de los fertilizantes....91
2.3 Técnica de aplicación de los fertilizantes....91

Protección de las masas de agua.....92
3.1 Mantenimiento de las zonas de infiltración y gestión de la vegetación ribereña.....92
3.2 Otros factores.....93
Ficha técnica: Gestión del fósforo en la cría extensiva de aves de corral en pastoreo.....95
Gestión del fósforo en el suelo.....95
1.1 Diagnóstico del estado de fertilidad del suelo.....96
1.2 Protección y conservación del suelo.....99
1.3 Uso del suelo y gestión de residuos.....100
Fertilización.....104
2.1 - Principios generales:.....104
2.2 - Época de aplicación de los fertilizantes.....104
2.3 - Técnica de aplicación de los fertilizantes.....104
Protección de las masas de agua.....106
3.1 - Gestión del riego.....106
3.2 Otros factores.....106
Gestión de la producción avícola.....108
4.1 Gestión del bienestar animal.....108
Buenas prácticas recomendadas en la gestión de la producción avícola.....113
4. Referencias bibliográficas.....114

1 Introducción

La gestión del fósforo en los sistemas agrícolas y ganaderos se basa en un equilibrio riguroso entre dos objetivos: asegurar la productividad de los cultivos y proteger el suelo y los recursos hídricos. El fósforo es un nutriente esencial y un recurso finito, pero su uso ineficiente conduce a la acumulación en el suelo y a la movilización hacia las masas de agua, con consecuencias directas en la eutrofización y en la degradación de la calidad de los recursos hídricos. Por tratarse de contaminación difusa, generada de forma dispersa por el territorio, el fenómeno solo se comprende y se gestiona a escala de la cuenca o de la subcuenca hidrográfica, donde la relación entre las prácticas de gestión y la respuesta del sistema se vuelve observable. El espacio SUDOE, debido a sus características, un fuerte sector primario y actividad ganadera y una extensa superficie agrícola, es particularmente sensible a estos procesos, agravados por la fuerte presión del cambio climático, con la ocurrencia de episodios de inundaciones, sequía y escasez de agua.

A pesar de la existencia de instrumentos amplios para la protección del suelo y del agua, la regulación específica del fósforo sigue siendo frágil en la mayoría de los Estados miembros, en contraste con el marco consolidado aplicable a los nitratos. Es esta ausencia regulatoria la que confiere importancia a Phos4Cycle, centrándose en la prevención de la contaminación en origen, en los propios sistemas agrícolas y ganaderos. Es en este esfuerzo de prevención donde el presente manual reúne las buenas prácticas que permiten conciliar estos objetivos, traduciendo en recomendaciones operativas el conocimiento técnico-científico generado en los estudios de los proyectos piloto.

Este Manual de Buenas Prácticas constituye una de las tres soluciones desarrolladas por el proyecto y presenta las buenas prácticas que permiten reducir el impacto ambiental de los fosfatos sin comprometer la productividad de los cultivos. Las recomendaciones que presenta no derivan de supuestos teóricos, sino de la evaluación, en condiciones reales de campo, de las estrategias de gestión ensayadas en seis proyectos piloto representativos de los sistemas productivos de Portugal, España y Francia. Esta base de evidencia transnacional asegura recomendaciones robustas y una amplitud de aplicación que supera los límites geográficos de los pilotos, alcanzando otros territorios del espacio SUDOE con condiciones edafoclimáticas y productivas similares.

Dirigido a apoyar a una amplia comunidad de técnicos, agricultores y ganaderos en la adopción de prácticas de gestión sostenible del fósforo, el manual traduce el conocimiento del proyecto en orientaciones operativas, organizadas por sistema productivo y estructuradas en torno a tres dimensiones, su gestión en el suelo, la

fertilización y la protección de las masas de agua, proporcionando criterios de decisión que cada agricultor adapta a las condiciones concretas de su explotación. Estas dimensiones se complementan, en el caso del sistema avícola, con una dimensión específica de gestión de la producción. Las fichas técnicas por sistema productivo (maíz, viña, sucesión de cultivos herbáceos, dehesa y producción avícola) reúnen las recomendaciones, los criterios de diagnóstico y las prácticas validadas para cada contexto. Incluye además una herramienta de diagnóstico rápido, común a todos los sistemas, que clasifica el nivel de riesgo de contaminación por fósforo de una parcela a partir de siete factores: la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, el pH, el contenido de P_2O_5 disponible, la pendiente, el tipo de riego y la cubierta del suelo.

Más que un repositorio de principios, pretende ser un instrumento de decisión cercano a quienes actúan sobre el terreno, capaz de orientar elecciones concretas en cada explotación y de aproximar la práctica agrícola y ganadera a los objetivos de economía circular y de protección de los recursos hídricos consagrados en las políticas europeas.

2. Del Diagnóstico a la Acción - el Manual en la Gestión Sostenible del Fósforo

El manual de buenas prácticas no es un documento autónomo, sino una de las tres soluciones complementarias desarrolladas por Phos4Cycle. La *Guía de Monitorización de Fosfatos*, el *Modelo de Predicción del Riesgo de Contaminación* y el presente *Manual de Buenas Prácticas* se articulan en una secuencia que cubre el ciclo completo de la gestión del fósforo: conocer el estado del sistema, anticipar el riesgo y actuar para reducirlo; y el valor de cada solución aumenta cuando se utiliza junto con las demás.

La Guía de Monitorización proporciona la base de conocimiento. Estructura el análisis integrado de tres matrices interdependientes —suelo, sedimentos y agua, a escala de la subcuenca hidrográfica, identificada en los proyectos piloto como la unidad funcional más adecuada para relacionar las prácticas de gestión con la respuesta del sistema. La determinación del fósforo disponible por el método de Olsen, del fósforo total y de los parámetros que condicionan su dinámica, combinada con la monitorización puntual y con la monitorización continua de la calidad del agua mediante estaciones multiespectrales, permite saber dónde se acumula el fósforo, cómo se moviliza y con qué intensidad es exportado hacia las masas de agua. Es este conocimiento el que fundamenta cualquier decisión de gestión y el que alimenta el modelo de predicción.

El Modelo de Predicción del Riesgo de Contaminación convierte ese conocimiento en capacidad de anticipación. Disponible como aplicación web accesible a usuarios sin formación técnica especializada, integra datos edafoclimáticos, de gestión y de monitorización para estimar el riesgo de movilización del fósforo en una región definida por el usuario. A partir del contenido de fósforo en el suelo y del tipo de gestión practicado, el modelo cartografía las zonas críticas, anticipa el efecto de eventos de precipitación intensa y simula escenarios alternativos, como la reducción de las dosis de fertilización, la introducción de cubierta vegetal, la dosificación variable de fósforo o la aplicación de biochar, cuantificando el beneficio esperado de cada opción antes de su aplicación. El resultado, exportable en informe, indica dónde y cuándo intervenir y cuál es la medida con mayor potencial de reducción del riesgo.

Es en este punto donde el manual asume su función. Donde el modelo señala el riesgo, el manual ofrece la respuesta: el conjunto de medidas preventivas y correctivas cuya eficacia se ha demostrado en los proyectos piloto, organizadas en las dimensiones de la gestión del suelo, la racionalización de la fertilización y la protección de las masas de agua. La herramienta de diagnóstico rápido que el manual integra establece la conexión directa con el modelo, al permitir que el técnico o el agricultor clasifique, a partir de siete factores de riesgo, la vulnerabilidad de su parcela y seleccione las buenas prácticas adecuadas. La predicción anticipa el problema y las buenas prácticas lo resuelven. Esta articulación se retroalimenta. Las medidas adoptadas a partir del manual contribuyen a alterar la dinámica del fósforo en el sistema, la monitorización verifica su efecto y realimenta el modelo, y las recomendaciones se ajustan progresivamente a la evidencia acumulada. Esta complementariedad favorece además la integración de las soluciones en los instrumentos de política agroambiental, aproximando la decisión técnica sobre el terreno a las metas europeas de protección de los suelos y de las masas de agua.

3 Gestión sostenible del fósforo

La gestión sostenible del fósforo es esencial para conciliar la producción de alimentos con la protección del medio ambiente y el valor económico, garantizando el uso eficiente de un recurso finito y estratégico cuyas reservas mundiales son escasas y están geográficamente concentradas. Al ajustar la fertilización a las necesidades reales de los cultivos, aprovechar el fósforo ya presente en el suelo y cerrar el ciclo de este nutriente, es posible reducir la dependencia de los fertilizantes, preservar la fertilidad del suelo y prevenir la contaminación de los recursos hídricos.

La gestión sostenible del fósforo es crucial para cumplir los objetivos de la Directiva sobre el seguimiento del suelo (Directiva (UE) 2025/2360, UE, 2025) y de la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE, UE, 2000). Estas dos Directivas permiten reforzar la resiliencia del suelo,

la productividad agrícola y la biodiversidad, así como alcanzar el «buen estado» ecológico y químico de las masas de agua, contribuyendo a los objetivos climáticos y medioambientales para 2050.

3.1 Contaminación del suelo y del agua por fósforo

El fósforo (P) es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas y los animales. En las plantas, el P es fundamental para el enraizamiento, la fotosíntesis y la calidad de los frutos. A nivel industrial, los fertilizantes fosfatados utilizados en la agricultura se sintetizan en diferentes formulaciones a partir del P procedente de rocas fosfatadas. Las reservas de rocas fosfáticas son finitas y están concentradas, y desde 2014 se consideran una materia prima escasa sometida a una gran presión (Comisión Europea, 2014), lo que representa un riesgo significativo para la agricultura a nivel mundial. En la agricultura, el mal uso del fósforo, que se traduce en una baja eficiencia en el aprovechamiento de este nutriente por parte de las plantas, constituye un alto riesgo de contaminación de los suelos y los recursos hídricos por fósforo, ya que es un elemento que se insolubiliza fácilmente en el suelo al formar compuestos con metales y/o con bases. Su acumulación en grandes concentraciones en los suelos agrícolas es crítica, pudiendo incluso adquirir movilidad en el interior del suelo, desplazándose por lixiviación, escorrentía superficial y/o erosión hídrica del suelo, lo que provoca la contaminación de las masas de agua superficiales y/o subterráneas. Los niveles excesivos de fósforo en las masas de agua superficiales provocan eutrofización. La buena gestión del fósforo es determinante para la productividad de los cultivos, para la salud del suelo y para la calidad del agua en las cuencas hidrográficas.

El ciclo del fósforo se caracteriza por el equilibrio entre los procesos abióticos y bióticos (fig. 1). Los procesos abióticos son los procesos físico-químicos relacionados con la disolución/precipitación de las formas de fósforo en el suelo y con la adsorción/desorción del fósforo retenido en la fase sólida del suelo. Estos procesos se denominan abióticos porque tienen lugar sin la intervención de organismos vivos; entre ellos se encuentran la adsorción/desorción del fósforo, la disolución/precipitación, la meteorización, la lixiviación, la escorrentía y la erosión, y la deposición atmosférica (Horta y Torrent, 2010).

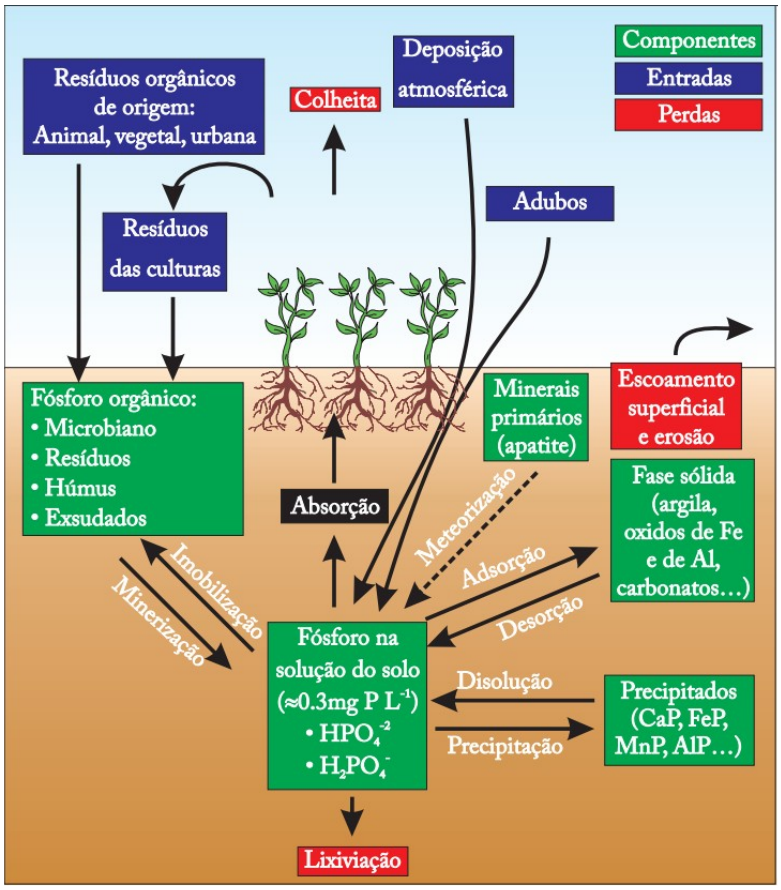


Figura1 - Dinámica del fósforo y su regulación en el sistema suelo-planta. Adaptado de Horta y Torrent, 2010.

Las regulaciones bióticas son los procesos mediados por organismos vivos que regulan la mineralización del fósforo orgánico en formas orgánicas más simples en el suelo. Las regulaciones bióticas se caracterizan por la absorción radicular, la mineralización, la inLabranza temporal en los microorganismos, los exudados radiculares y la retirada de fósforo del sistema en el momento de la cosecha.

El uso excesivo o inadecuado de fertilizantes fosfatados puede provocar pérdidas de fósforo en el sistema suelo-planta, que se producen por erosión, lixiviación o escorrentía (fig. 2). La pérdida de fósforo por erosión hídrica del suelo se produce principalmente en zonas con pendientes pronunciadas y elevada pluviosidad, y de forma más acusada cuando los suelos están removidos y permanecen sin cobertura o con una cubierta vegetal escasa. El fósforo que no es absorbido por las plantas y/o el fósforo que está unido o adsorbido a las partículas del suelo se desplaza en el interior del suelo por lixiviación o es arrastrado junto con el suelo por la fuerza de la escorrentía superficial del agua en el proceso de erosión hídrica, llegando a las aguas subterráneas o a las aguas superficiales, respectivamente.

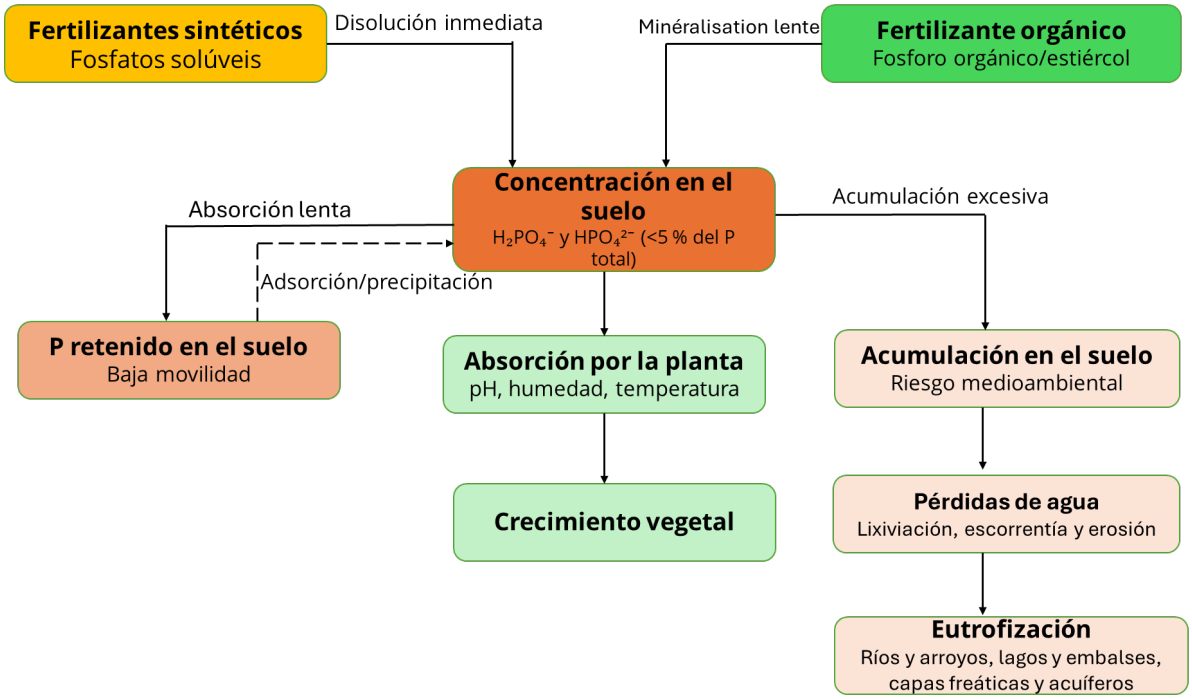


Figura 2 - Fuentes de fósforo y vías de pérdida de fósforo, factores que influyen en el riesgo de contaminación

Cuando se producen precipitaciones y/o riegos tras la aplicación de fósforo, aumenta considerablemente el riesgo de escorrentía y/o lixiviación del fósforo que no ha sido absorbido por la planta. Este riesgo es aún mayor cuando las dosis de fertilización son elevadas y poco fraccionadas.

3.2 Suelos

En el suelo, el fosf e (P) se encuentra en forma orgánica y/o mineral, y su disponibilidad para las plantas depende de la forma en que se presente. La disponibilidad del P para su absorción por las plantas es muy variable y depende de diversos factores (Fig. 3) que interfieren en la absorción de las plantas, lo que reduce considerablemente la eficiencia con la que estas aprovechan el P en comparación con el resto de macronutrientes.

Menos del 5 % del fósforo total del suelo se encuentra en formas inmediatamente disponibles para las plantas, o disponibles a corto plazo. Su disponibilidad en el suelo para las plantas en formas iónicas absorbibles ($H_2PO_4^-$ y HPO_4^{2-}) se debe principalmente a la tasa de mineralización de la materia orgánica y a los procesos posteriores de adsorción en las partículas del suelo, la precipitación de compuestos insolubles y la quelación por ligantes orgánicos.

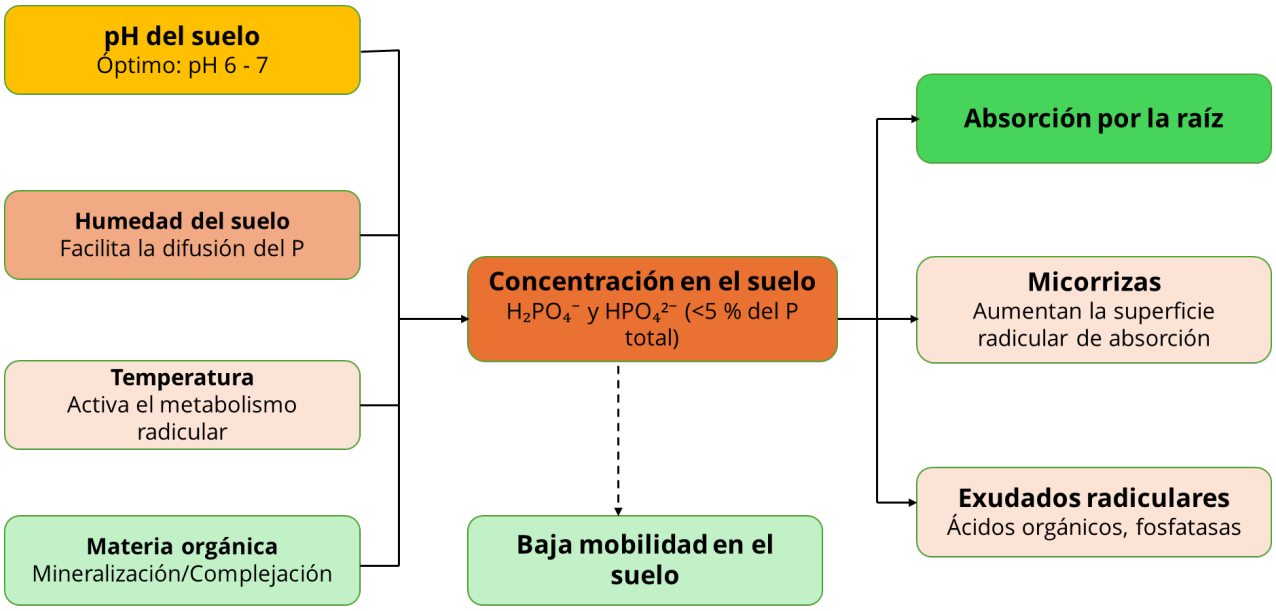


Figura 3 - Factores que condicionan la disponibilidad del fósforo en la solución del suelo y los mecanismos de absorción por parte de la planta.

La forma de P que absorben preferentemente las plantas es el ortofosfato primario ($H_2PO_4^-$), que se encuentra en mayor concentración en suelos ácidos. El ortofosfato secundario (HPO_4^{2-}) se encuentra en mayor concentración en suelos alcalinos y su absorción por parte de las plantas resulta más difícil, ya que exige un mayor gasto energético por parte de la planta al tener mayor carga negativa (Horta y Torrent, 2010). Las formas orgánicas de fósforo en el suelo constituyen entre el 15 % y el 80 % del fósforo total del suelo, lo que representa una reserva que se va liberando y pasando a formas asimilables, en función de las tasas de mineralización de la materia orgánica del suelo.

En el laboratorio se determina en las muestras de suelo el contenido de fósforo asimilable (P_2O_5) mediante métodos que favorecen la máxima oxidación de todas las formas de fósforo presentes en el suelo que puedan ser asimiladas o absorbidas por las plantas. Los análisis pueden realizarse mediante dos métodos de referencia: el método de Olsen o el método de Egner-Riehm, cuya diferencia radica esencialmente en la solución de extracción; el primer método se recomienda para suelos calcáreos (con altos contenidos de carbonato cálcico) y el segundo, para suelos ácidos a neutros. El método de Egner-Riehm es el método de referencia para los laboratorios en Portugal, ya que la mayoría de los suelos son ácidos. En España y Francia son más abundantes los suelos con pH neutro a alcalino, por lo que el método de Olsen es el método analítico tomado como referencia para la determinación del fósforo asimilable (P_2O_5).

En la práctica, el P_2O_5es la forma molecular universal estandarizada que se utiliza en los resultados de los informes de análisis de suelos, en la información sobre los fertilizantes, en la información relativa a las necesidades de nutrientes de las plantas en función de las producciones esperadas y en cualquier otra información necesaria para realizar los cálculos de la concentración de P en los balances que conforman los planes de fertilización.

Tabla «1 » - Clases de fertilidad del suelo en cuanto al fósforo asimilable (P_2O_5)

Parámetro	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
P_2O_5 - Egner-Riehm (mg/kg)	≤25	25 – 50	51 – 100	101 – 200	> 200
P_2O_5 - (Olsen) (mg/kg)	≤18	18 – 34	35–56	57–115	>115
pH (H_2O)	< 5,5 (ácido)	5,5 – 6,0	6,0 – 6,5 (ideal)	6,5 – 7,5	> 7,5 (alcalino)
Materia orgánica (%)	< 1,0	1,0 – 2,0	2,0 – 3,5	3,5 – 5,0	> 5,0

Adaptado de Calouro et al., (2022). Manual de fertilización de cultivos, INIAV

La disponibilidad del fósforo (P) se ve influida por diversos factores del suelo que pueden medirse, determinarse y/u observarse, tales como el **pH**, la **textura** y **la estructura** del suelo.

El valor del pH del suelo influye mucho en la disponibilidad del fósforo, ya que la mayor o menor abundancia de elementos que pueden unirse a los fosfatos y hacerlos insolubles depende del pH del suelo. Así, la máxima disponibilidad de fósforo asimilable se da en un intervalo de pH muy reducido, entre 6 y 7 (Fig. 4). En suelos ácidos, la fijación por óxidos e hidróxidos de Fe, Al y Mn hace que el fósforo sea inaccesible para las plantas, ya que forma compuestos insolubles que se precipitan en el propio suelo y pueden ser arrastrados posteriormente junto con los sedimentos del suelo en los procesos de erosión hídrica. En suelos alcalinos también se produce la fijación por el calcio y la insolubilización, ya que el fósforo adopta la forma de fosfato tricálcico ($Ca_3(PO_4)_2$). La corrección del pH del suelo (encalado) es fundamental para mejorar la disponibilidad del fósforo en el estrecho intervalo de pH comprendido entre 6 y 7.

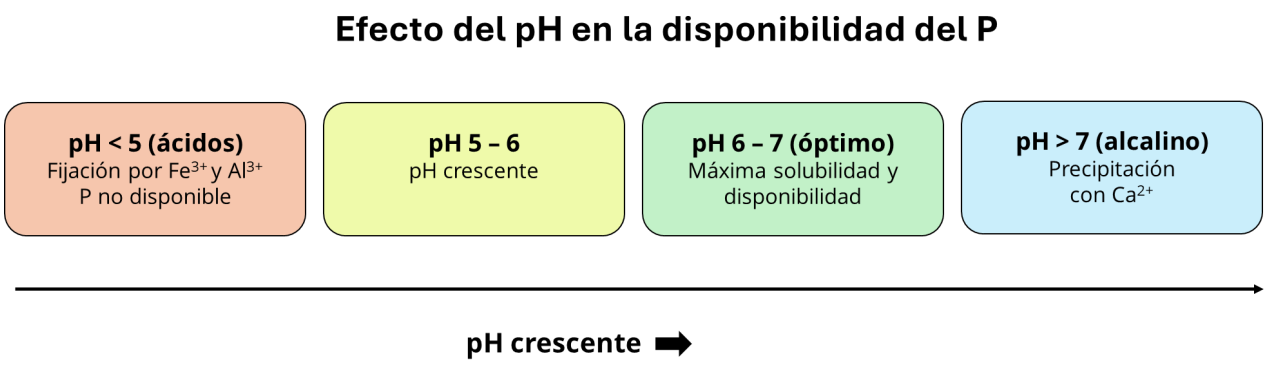


Figura4 - Efecto del pH en la disponibilidad del fósforo.

La textura del suelo también influye en la adsorción del fósforo en el suelo. Los suelos con mayor contenido en arcilla y más alterados por la intemperie tienen una mayor capacidad de adsorción en comparación con los suelos más arenosos. En suelos con un elevado proceso de

intemperismo, la fertilización con fosfatos es poco eficaz, ya que la mayor parte del fósforo aplicado queda inmovilizado, en forma de precipitados y fijado a los coloides del suelo.

La estructura del suelo también influye considerablemente en el riesgo de pérdida de fósforo. Un suelo compactado reduce la absorción de fósforo porque limita la expansión radicular de la planta y las tasas de infiltración del agua en el suelo, lo que facilita las pérdidas por escorrentía superficial. Por otro lado, una buena estructura o una buena agregación del suelo se traduce en mejores tasas de infiltración del agua en el suelo y menores concentraciones de escorrentía superficial, es decir, una menor cantidad de energía para el proceso de arrastre del suelo por erosión hídrica.

Fomentar una buena agregación del suelo mediante la aplicación de buenas prácticas de gestión del mismo, como la reposición de la materia orgánica perdida anualmente para reponer la materia orgánica estable que se ha mineralizado durante el año, o para aumentar su contenido, así como la práctica de rotaciones y/o cultivos asociados, la labranza reducida o nula, mantener el suelo siempre cubierto y protegido del exceso de energía de la lluvia y/o del sol, o mantener un elevado volumen de biomasa radicular, lo que aumenta su funcionalidad y favorece una mayor eficiencia en la captación de todos los nutrientes por parte de las plantas cultivadas. Por lo tanto, todas las prácticas que promuevan una buena agregación del suelo reducen considerablemente el riesgo de pérdidas de fósforo hacia las masas de agua.

La elevada probabilidad de que los compuestos de fósforo sean insolubles o estén fuertemente ligados a la superficie de las partículas del suelo aumenta el riesgo de deficiencia de este nutriente en las plantas. Para aumentar la disponibilidad del fósforo para los cultivos, es necesario aplicar prácticas que retengan el fósforo en el suelo evitando su pérdida, pero que proporcionen condiciones óptimas para que la proporción de fósforo disponible para su absorción sea superior a las formas adsorbidas e insolubilizadas en el suelo.

La adsorción del fósforo en el suelo se entiende como un fenómeno de retención del elemento en el suelo y se debe principalmente a la adsorción del fósforo por las superficies activas del suelo, como las arcillas, los óxidos e hidróxidos de hierro, aluminio y manganeso, los carbonatos y la materia orgánica (Novais et al., 2007).

La materia orgánica desempeña un papel muy amplio en diversas propiedades del suelo y, en lo que respecta al fósforo, destaca especialmente su importancia en la disponibilidad de este elemento:

- **Mineralización**: los microorganismos del suelo descomponen el fósforo orgánico, convirtiéndolo en fósforo mineral disponible para su absorción por las plantas. Este proceso se complementa con **la actividad microbiana**, en la que la materia orgánica sirve de sustrato para los microorganismos que completan el ciclo del fósforo en el suelo, y con **las fosfatasas microbianas** —enzimas producidas por los microorganismos del suelo— que descomponen los ésteres fosfóricos presentes en la materia orgánica y liberan el fósforo inorgánico a la solución del suelo;
- **Reducción de la adsorción**: los ácidos húmicos compiten con el fósforo adsorbido en la fase sólida del suelo (óxidos de Fe, Al, Mn y arcillas), reduciendo la cantidad de fósforo

que queda insolubilizado; de este modo, un e queda adsorbido temporalmente a las moléculas húmicas, quedando disponible para su absorción por las plantas tras la acción microbiológica sobre dichas moléculas;

- **Estabilización del pH óptimo:** la materia orgánica tiene un fuerte efecto **tampón sobre el pH**, lo que permite estabilizarlo en torno a valores de 6–7 tras una corrección del pH del suelo. Este aspecto aumenta considerablemente la disponibilidad del fósforo.

La Tabla 2 muestra el efecto del contenido de materia orgánica sobre la disponibilidad del fósforo, en función de la clase de fertilidad del suelo en fósforo.

Tabla 2 – Clases de fertilidad del suelo según el contenido de materia orgánica y su impacto sobre el fósforo

Clase	M.O. (%)	Impacto sobre el fósforo en el suelo
Muy bajo	< 1,0	Mineralización lenta; fósforo orgánico no disponible
Bajo	1,0-2,0	Baja respuesta a la fertilización
Medio	2,0-3,5	Buena actividad microbiana; mineralización normal
Alta	3,5-5,0	Elevada reserva de fósforo orgánico; menor necesidad de fósforo mineral
Muy alto	> 5,0	Reserva importante; hay que prestar atención a la mineralización del fósforo

La sinergia y el antagonismo entre algunos de los nutrientes del suelo también determinarán la mayor o menor eficiencia en la absorción de P por parte de las plantas. Uno de los ejemplos es la interacción favorable entre el P y el potasio (K). Dado que el K desempeña un papel crucial en el desarrollo de las raíces y en la regulación de la apertura de los estomas, acaba favoreciendo la absorción de P porque aumenta su movilidad hacia las raíces y el volumen de la rizosfera. Cuanto mayor sea el contacto de la raíz con el P, más fácilmente se produce la absorción del nutriente. Por otro lado, existen situaciones de antagonismo, que corresponden a una interacción negativa. Es decir, el exceso de P puede inhibir la absorción de los micronutrientes Zn y Fe, ya que compite por los sitios de adsorción en el suelo.

Las micorrizas son de extrema importancia para aumentar la eficiencia de la absorción de nutrientes por parte de la planta, y muy especialmente para los nutrientes de baja movilidad en el suelo, como es el caso del fósforo, que se desplaza mediante un lento proceso de difusión, el cual depende del mantenimiento de gradientes de concentración de fósforo en la solución del suelo. Se distinguen esencialmente dos tipos de micorrizas**:** las **ectomicorrizas** y las **endomicorrizas**. Las primeras se desarrollan fuera de las células de las raíces; el hongo no penetra en ellas, sino que se desarrolla entre ellas creando una densa red en la superficie de la raíz, creciendo únicamente en los espacios intercelulares. Son más comunes en los ecosistemas forestales. Las segundas se desarrollan en el interior de las paredes celulares de las raíces; el hongo penetra directamente en el interior de las células de la raíz, desarrollando estructuras ramificadas en forma de árbol (arbúsculos), que son los lugares donde tienen lugar los intercambios de nutrientes, de ahí que también se denominen ***micorrizas***

arbusculares. Se encuentran en la mayoría de las plantas cultivadas y desempeñan un papel crucial en el suministro de fósforo y otros nutrientes a las plantas. Las micorrizas arbusculares son más comunes en los cultivos agrícolas.

Además de las micorrizas, existen microorganismos que facilitan la disolución del fósforo precipitado en el suelo. Se trata de los solubilizadores de fosfatos, representados por diversas bacterias —en particular las pertenecientes a los géneros *Pseudomonas y* Bacillus—, así como por hongos de los géneros *Penicillium* y *Aspergillus*. Los solubilizadores de fosfatos tienen la capacidad de solubilizar el fósforo inorgánico, que se encuentra insoluble y precipitado en el suelo, para volver a ponerlo a disposición de las plantas para que lo absorban. Los mecanismos de solubilización consisten en la producción de ácidos o en la quelación de metales por parte de estos organismos, lo que libera de nuevo el fósforo a la solución del suelo (Singh y Kapoor, 1999).

Los mecanismos descritos anteriormente aumentan considerablemente la **eficiencia en el uso del fósforo** por parte de las plantas, correspondiendo al agricultor garantizar las condiciones óptimas de pH, contenido de materia orgánica, agregación del suelo y diversidad microbiológica, mediante la aplicación de las buenas prácticas recomendadas, para reducir sustancialmente el riesgo de contaminación de las masas de agua por fósforo.

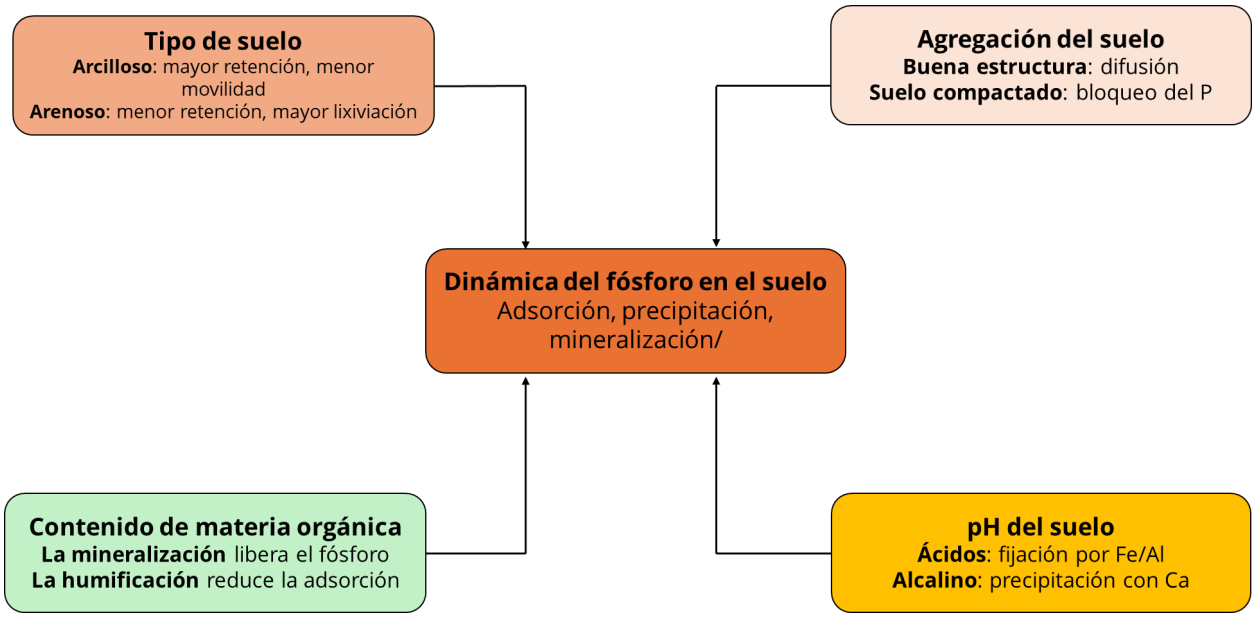


Figura 5 - Dinámica del P en el suelo y los factores que condicionan o favorecen la adsorción, la precipitación y la mineralización del P en el suelo

La figura 5 resume la dinámica y el destino del P en el suelo, en función de los siguientes factores: tipos de suelo, estado de agregación del suelo, contenido de materia orgánica y pH. Estos factores condicionan la adsorción, la precipitación y la mineralización del P en el sistema suelo-planta.

3.3 Fertilizantes

Los fertilizantes son todos aquellos productos que se utilizan con el objetivo de mantener o mejorar la fertilidad del suelo, corrigiendo algunas de sus propiedades para garantizar la nutrición adecuada de los cultivos. Los fertilizantes abarcan una amplia variedad de sustancias que aportan nutrientes al suelo, ya sean de origen orgánico, mineral o correctivos (Calouro et al., 2022).

Los fertilizantes se clasifican en dos grupos: abonos y correctores. Los **abonos** pueden ser naturales o sintéticos, minerales u orgánicos, y son productos que permiten corregir con una mayor precisi e el equilibrio de nutrientes, dando una respuesta más inmediata a las necesidades de las plantas a corto plazo. Los **correctores orgánicos** son sustancias de origen orgánico cuya función principal es corregir el contenido de materia orgánica (MO), lo cual es fundamental para mejorar la agregación y la descompactación del suelo, además de aportar nutrientes, aunque a más largo plazo, en función de las tasas de mineralización de los diferentes tipos de MO. (cuando la relación C/N es baja, la mineralización es más rápida y la disponibilidad de nutrientes es más inmediata). Los correctores minerales son sustancias de origen inorgánico que se utilizan en la agricultura para ajustar las propiedades químicas del suelo. Sirven para corregir el pH, neutralizar elementos tóxicos (como el aluminio, por ejemplo), mejorar la estructura física del suelo y aportar nutrientes esenciales como el calcio, el magnesio o el azufre (Calouro et al., 2022). Normalmente son naturales, más económicos que los fertilizantes y se aplican en grandes cantidades para obtener el efecto corrector deseado.

Los **fertilizantes fosfatados sintéticos** aportan fosfatos de alta solubilidad que las plantas pueden absorber de inmediato. Los **fertilizantes orgánicos** solo liberan las formas iónicas de fosfato tras la mineralización de las moléculas orgánicas. La disponibilidad inmediata y en grandes cantidades de las formas iónicas del fósforo en los fertilizantes sintéticos provoca la acumulación de fósforo en el suelo siempre que se supere la capacidad real de absorción de las plantas y se den las condiciones ideales para su fijación, adsorción o insolubilización.

La diferencia fundamental entre los fertilizantes sintéticos y los orgánicos radica en la solubilidad y en si las formas iónicas del fósforo ($H_2PO_4^-$ y HPO_4^{2-}) están disponibles de forma inmediata en el suelo o no.

Estas formas iónicas llegan a las raíces por difusión, que es un proceso lento de movilidad que depende de los gradientes de concentración de fosfatos en la solución del suelo. La captación por parte de las raíces también puede producirse por interceptación física, pero esto solo es relevante si la rizosfera tiene un gran volumen y si la raíz está bien micorrizada, ya que así aumenta la superficie específica de contacto.

La elevada solubilidad de los fertilizantes, unida a la lenta captación por parte de las plantas, favorece la probabilidad de que los fosfatos se vuelvan insolubles al combinarse con Fe, Al o Mn en suelos ácidos, o con Ca en suelos alcalinos. Estos aspectos pueden reducir considerablemente la eficiencia de los abonos fosfatados sintéticos, ya que la planta solo podrá aprovechar una pequeña parte de los fosfatos aplicados, lo que favorece la acumulación de grandes cantidades de fósforo precipitado en los suelos, con el riesgo de pérdidas por erosión hídrica y/o por lixiviación, aunque con menor importancia en esta última vía.

En general, a falta de información más precisa, se asume un coeficiente de utilización de los fosfatos aportados por los fertilizantes sintéticos de aproximadamente entre el 20 % y el 30 % para el año de aplicación de los fertilizantes. La baja eficiencia se debe a la combinación de la escasa movilidad del elemento en la solución del suelo con su elevada reactividad, lo que da lugar a la formación de compuestos insolubles.

Fertilizantes orgánicos y correctores de la materia orgánica

Los fertilizantes fosfatados se clasifican en:

- **Inorgánicos o minerales** (naturales o sintéticos),
- **orgánicos** y
- **organominerales**,

dependiendo de si el fósforo se presenta en forma mineral, orgánica o en ambas.

Fertilizantes minerales: Los superfosfatos presentan prácticamente todo el fósforo en formas muy solubles en agua. La forma granulada, en comparación con la pulverulenta, permite una mayor homogeneidad en la distribución sobre el terreno, minimizando las reacciones de precipitación del nutriente en el suelo, ya que ofrece una menor superficie específica, lo que confiere una solubilidad más controlada.

Fertilizantes orgánicos y organominerales fosfatados: combinan materiales orgánicos con fuentes naturales de fósforo. Son esenciales para el desarrollo radicular, la floración y la fructificación. A diferencia de los fertilizantes minerales de alta solubilidad, los orgánicos ofrecen una liberación gradual y mejoran la fertilidad del suelo a largo plazo. Las materias naturales que pueden enriquecer estos abonos en fósforo son, por ejemplo, la harina de huesos y los fosfatos naturales de polvo de roca.

Correctores orgánicos: Los correctores orgánicos son productos de origen animal y/o vegetal, con un elevado contenido en carbono, que se aplican para mejorar o conservar las buenas características físicas, químicas y biológicas del suelo, aportando además nutrientes al ritmo de las tasas de mineralización de las sustancias orgánicas que los componen. Algunos ejemplos son los lodos de depuración, los residuos orgánicos domésticos y los lixiviados, como fuentes orgánicas con una relación C/N baja y una tasa de mineralización elevada; el estiércol y los compost agrícolas, como fuentes orgánicas con una relación C/N más elevada, lo que les confiere tasas de mineralización más lentas.

3.4 Balance de fósforo en el suelo

Las principales aportaciones a la nutrición fosfórica del cultivo incluyen el fósforo liberado por el suelo durante el ciclo vegetativo, pudiendo contabilizarse también el fósforo aportado al suelo por el agua de riego y el procedente de los residuos de cultivos anteriores.

Las pérdidas de fósforo del suelo son las que pueden producirse por arrastre en las aguas de escorrentía y de percolación.

La estimación de la cantidad de fósforo que debe aportarse mediante fertilización a un cultivo determinado puede, por tanto, calcularse mediante la siguiente expresión (Orden n.º 1230/2018, de 5 de febrero):

$$F_P = P - (P_s + P_a + P_r) + P_l$$

donde:

F_P : fósforo que debe aportarse mediante la fertilización, en kg ha^{-1} de P_2O_5

P : necesidades de fósforo del cultivo para un nivel determinado de producción, en kg ha^{-1} de P_2O_5

P_s : Fósforo liberado por el suelo durante el ciclo vegetativo del cultivo, en kg ha^{-1} de P_2O_5 **P_a** : Fósforo aportado al suelo a través del agua de riego, en kg ha^{-1} de P_2O5

P_r : Fósforo procedente de los residuos de cultivos anteriores, en kg ha^{-1} de $P2O_5$

P_l : pérdidas de fósforo por arrastre en las aguas de escorrentía y/o por percolación/lixiviación, en kg ha^{-1} de P_2O_5

3.5 Agua

El agua es el principal vector de transferencia del P del suelo hacia el medio hídrico y la dimensión ambiental donde sus efectos se vuelven más visibles y difíciles de revertir. La Figura 7 ilustra los principales factores que conducen a la contaminación por P a escala de la cuenca hidrográfica. El P en exceso en el suelo tiene poca movilidad, quedando retenido por adsorción y precipitación y acumulándose en las capas más superficiales. En presencia de agua, el P gana movilidad y se pierde por lixiviación, por arrastre en la escorrentía superficial y/o por arrastre con el propio suelo en los procesos de erosión hídrica, teniendo como destino las masas de agua superficiales o subterráneas. En este contexto, la gestión del agua asume un papel determinante en la protección de las masas de agua, porque es el contenido de agua en el suelo lo que condiciona la movilización del P. En el riego, factor que el agricultor controla, una elevada eficiencia de aplicación (EA) y una elevada uniformidad de distribución (UD) mantienen el agua en la zona radicular, reduciendo el riesgo de pérdida de P hacia las aguas superficiales y subterráneas. Por el contrario, un riego con dotaciones excesivas, baja uniformidad o aplicado en un suelo ya próximo a la saturación hídrica puede aumentar sustancialmente ese riesgo. La precipitación actúa sobre los mismos mecanismos, pero no es controlable y, con frecuencia, de mayor magnitud. Los eventos de precipitación intensa generan grandes cantidades de agua que exceden la capacidad de infiltración y de retención del suelo, desencadenan la escorrentía superficial y la percolación profunda, y aportan la energía que arrastra las partículas de suelo en la erosión hídrica, la principal vía de pérdida del P particulado. El riesgo se agrava cuando la precipitación ocurre sobre suelos saturados, laboreados, con pendiente o sin cubierta vegetal y en suelos con elevado contenido de P. La

ocurrencia de precipitación o el riego inmediatamente después de la fertilización amplifica fuertemente las pérdidas del nutriente aún no absorbido por la planta, tanto más cuanto más elevadas y menos fraccionadas sean las dosis aplicadas. La gestión del riesgo pasa no solo por un riego eficiente y uniforme, sino también por programar la fertilización en función de la previsión meteorológica.

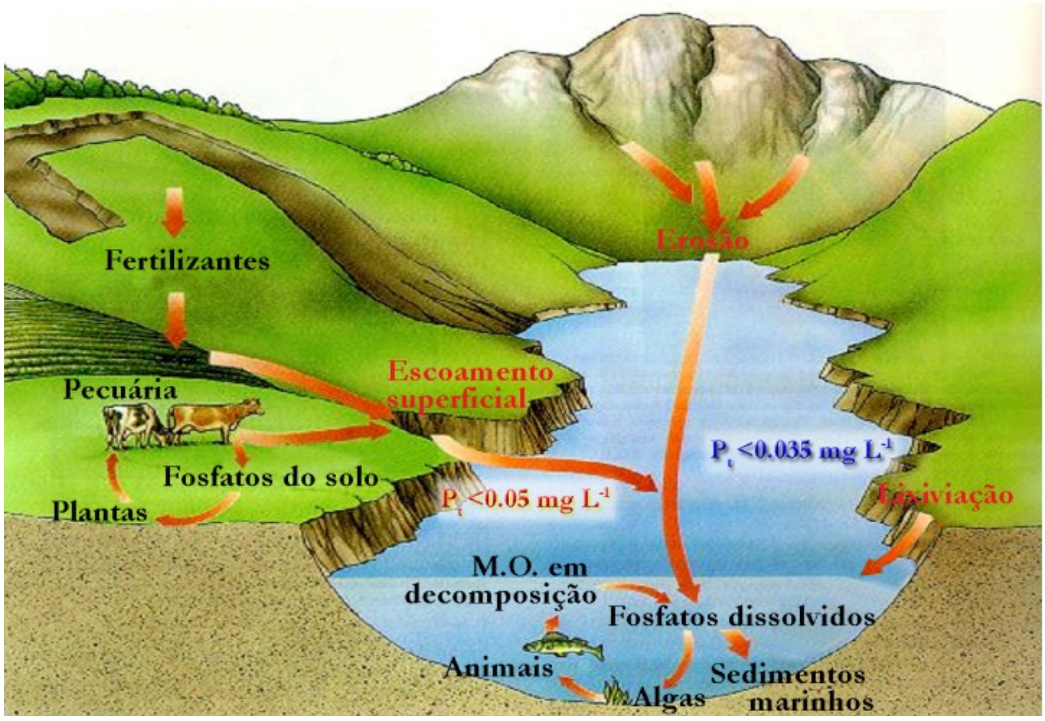


Figura 7: Ciclo del fósforo a nivel de la cuenca hidrográfica, en el que se ilustran las principales vías de contaminación, a saber, la escorrentía superficial, la lixiviación y la erosión, así como los procesos de descomposición de la materia orgánica, la sedimentación y la absorción por parte de algas y animales. (Adaptado de Horta y Torrent, 2010).

El impacto en la calidad del agua se manifiesta en la eutrofización de las aguas superficiales y en la contaminación de los acuíferos. La primera, más inmediata, se traduce en el enriquecimiento de las aguas superficiales en nutrientes y el desarrollo excesivo de microalgas y cianobacterias, con un doble efecto sobre la calidad del agua: la reducción de la penetración de la luz, que limita la fotosíntesis de las comunidades sumergidas, y la depleción del oxígeno disuelto durante la descomposición de la biomasa algal, conduciendo a hipoxia o anoxia. El resultado afecta a todas las formas de vida acuática, dando lugar a la mortalidad de peces y otros macroorganismos, a la producción de gases tóxicos y cianotoxinas y, a plazo, a la pérdida de biodiversidad y a la alteración de los ecosistemas acuáticos. Los principales responsables son el fósforo (P) y el nitrógeno (N); siendo el P, por regla general, el nutriente limitante en las aguas dulces, incluso concentraciones reducidas pueden desencadenar el proceso, lo que refuerza la importancia de controlar las pérdidas a partir del suelo. La segunda, más persistente, ocurre cuando el P alcanza los acuíferos, aunque por mecanismos distintos y, por regla general, menos relevantes, dado que queda fuertemente retenido en el suelo en el complejo de adsorción del suelo, siendo su movilidad vertical naturalmente reducida. La

contaminación ocurre bajo condiciones específicas, en suelos de baja capacidad de fijación (arenosos, pobres en óxidos de hierro y aluminio y en arcilla, u orgánicos), suelos saturados en P, con el agravamiento del P acumulado a lo largo de décadas, y flujos preferenciales (macroporos, canales radiculares y, sobre todo, drenaje subsuperficial) que permiten al agua cortocircuitar la matriz del suelo. Se añaden el transporte coloidal, en el que el P migra adsorbido a coloides móviles, y la disolución reductiva, por la cual, en condiciones anaerobias, los óxidos de hierro (III) que retienen el P se reducen a hierro (II) soluble, liberándolo. Esta contaminación es relevante por la conectividad hidráulica con las aguas superficiales, pues los acuíferos alimentan ríos, manantiales y zonas húmedas, por lo que, una vez contaminados, se convierten en fuente difusa y persistente de P, capaz de mantener la eutrofización durante años incluso después de controladas las entradas en superficie. Como su renovación es muy lenta, la recuperación es lenta, lo que refuerza que, en el caso del P, la prevención es determinante y la remediación poco viable.

La relevancia ambiental del P se refleja en el marco legislativo del agua. La Directiva Marco del Agua (2000/60/CE), transpuesta por cada Estado miembro, identifica los fosfatos entre los contaminantes responsables de la eutrofización y fija el objetivo del «buen estado» de las masas de agua, correspondiendo a cada Estado miembro definir los valores de referencia de P para su territorio. La Directiva sobre Aguas Subterráneas (2006/118/CE) establece normas de calidad comunitarias únicamente para los nitratos (50 mg L^{-1}) y los plaguicidas, remitiendo los restantes contaminantes que puedan representar un riesgo, incluidos los fosfatos, a límites que ha de definir cada Estado miembro en función de la evaluación de riesgo de cada masa de agua. La Directiva sobre Nitratos (91/676/CEE) designa como Zonas Vulnerables a los Nitratos (ZVN) las áreas con concentraciones persistentemente superiores a 50 mg L^{-1} de nitratos (NO_3^-). Las ZVN quedan sujetas a un Programa de Acción, que impone la monitorización anual de nitratos y fosfatos y restringe la fertilización con materia orgánica de origen animal a 170 kg N ha^{-1}. Aunque dirigida al nitrógeno (N), esta limitación restringe indirectamente la entrada de P a través de los efluentes ganaderos, que vehiculan simultáneamente N y P, convirtiendo la Directiva sobre Nitratos en un instrumento de control también del P, aunque por vía indirecta.

Aguas arriba, sobre el origen agrícola de las pérdidas de P, y en el contexto nacional de cada uno de los países, España, Francia y Portugal, el Código de Buenas Prácticas Agrarias reúne un amplio conjunto de medidas de fertilización destinadas a minimizar el riesgo de contaminación de las masas de agua, en particular por fosfatos y nitratos.

Gestionar el fósforo de forma responsable, mediante prácticas agrícolas y ganaderas adecuadas, constituye actualmente un desafío para el espacio SUDOE. Se trata de un nutriente esencial para la producción de alimentos, pero que, en exceso, se convierte en fuente de degradación del suelo y del agua. El presente manual constituye la base técnica que armoniza el trabajo desarrollado en el marco del proyecto Phos4Cycle, traduciendo el conocimiento científico generado en prácticas productivas más sostenibles y en aportaciones a las políticas públicas del sector. El camino hacia la sostenibilidad del espacio SUDOE se construye en cada explotación agrícola y ganadera y en cada decisión de gestión.

Ficha técnica: Gestión del fósforo en el cultivo del maíz

La gestión del fósforo (P) en el suelo es esencial para la productividad del maíz y para prevenir la contaminación de los recursos hídricos. El P desempeña un papel fundamental en el desarrollo de las raíces, en la fotosíntesis y en el vigor vegetativo y productivo. Las prácticas descritas en esta ficha se aplican al cultivo de maíz en grano y de maíz para ensilado.

1 Gestión del fósforo en el suelo

Las buenas prácticas en el manejo del fósforo en el suelo son positivas para:

Aspectos importantes a tener en cuenta en la gestión del fósforo en el cultivo del maíz

- Evaluación del estado de fertilidad del suelo y de las necesidades de corrección;
- Protección y conservación del suelo;
- Uso del suelo (sucesión de cultivos, cultivos asociados, rotación de cultivos, cultivos permanentes, cultivos de cobertura), gestión de residuos e intensidad de la Labranza del suelo;
- e de fertilizantes, dosis, épocas y técnicas de aplicación;
- Condiciones climáticas.

1.1 Diagnóstico del estado de fertilidad del suelo

La evaluación del estado de fertilidad del suelo antes de la siembra es fundamental en el cultivo del maíz, ya que permite conocer la disponibilidad de nutrientes y adaptar las prácticas de fertilización a las necesidades del cultivo. Un seguimiento periódico de los indicadores de fertilidad (pH, materia orgánica, macro y micronutrientes) ayuda a optimizar el uso de los factores de producción, a mantener la productividad del sistema y a prevenir desequilibrios nutricionales. Además, contribuye a la conservación de la

calidad del suelo a largo plazo, favoreciendo una gestión sostenible de los recursos y reduciendo el riesgo de contaminación de las masas de agua asociado a una fertilización inadecuada. El análisis de los suelos debe realizarse antes de la siembra, en el momento oportuno para llevar a cabo el **balance de fósforo**, necesario para elaborar el **plan de fertilización**.
La determinación de la textura del suelo también es importante para comprender el nivel de susceptibilidad a las pérdidas de fósforo. Los suelos de textura gruesa o ligera, pobres en materia orgánica, se erosionan más fácilmente que los suelos de textura fina o pesada y, al tener una elevada permeabilidad al agua, serán más susceptibles a las pérdidas de fósforo por lixiviación. Por lo tanto, los suelos de textura gruesa tenderán a ser menos fértiles en fósforo.

Cómo interpretar los resultados del fósforo en el suelo

Clase	**P_2O_5 - Égner-Riehm (mg/kg)**	**P_2O_5 - (Olsen) (mg/kg)**	**Interpretación**	**Medidas recomendadas**
Muy bajo	≤25	≤18	Disponibilidad de P muy reducida	Aplicar fertilización con fosfatos. Se espera una respuesta muy elevada del cultivo a la fertilización
Bajo	26–50	18–34	Disponibilidad de P reducida	Aplicar fertilización con fosfato. Se espera una respuesta elevada del cultivo a la fertilización
Medio	51–100	35–56	Disponibilidad de P satisfactoria	Aplicar fertilización con fosfato. Se espera una buena respuesta del cultivo a la fertilización
Alta	101–200	57–115	Disponibilidad de P elevada	Reducir o suspender la fertilización con fosfato, según la producción prevista
Muy alto	> 200	>115	Disponibilidad de P muy elevada	Reducir o suspender la fertilización con fosfatos minerales, en función de la producción prevista

Adaptado de Calouro et al. (2022). Manual de fertilización de cultivos, INIAV

Cómo interpretar los resultados del $pH_{(H2O)}$

Clase	$pH_{(H_2O)}$	Interpretación	Medida recomendada
Muy ácido	≤ 4,5	Toxicidad por Al y Mn; bloqueo de P y Mo	Corregir con encalado (aplicación de caliza)
Ácido	4,6 - 5,5		
Ligeramente ácido	5,6 - 6,5	Mayor disponibilidad de P	No es necesario corregir la reacción del suelo
Neutro	6,6 – 7,5	Máxima disponibilidad de P	No es necesario corregir la reacción del suelo
Ligeramente alcalino	7,6 - 8,5	Inicio de la fijación del P en fosfatos de calcio	No es necesario corregir la reacción del suelo
Alcalino	8,6 – 9,5	Fuerte fijación del P; carencias de Fe, Mn y Zn	Corregir con azufre o MO
Muy alcalino	>9,5		

Adaptado de Calouro *et al.,* (2022). Manual de fertilización de cultivos, INIAV

Nota: En suelos con un pH entre 6,0 y 6,8, la disponibilidad de P es máxima y la actividad microbiana es más intensa.

Cómo interpretar los resultados de la MO

Clase	MO (%)	Impacto	Medida recomendada
Muy bajo	< 1,0	Materia orgánica no disponible	Aplicar enmiendas orgánicas para aumentar el contenido de materia orgánica: compost, estiércol, lodos de depuración mezclados con biomasa estructurante (madera forestal, maleza, paja, serrín, etc.) y fósforo mineral, si es necesario
Bajo	1,0-2,0	Fósforo orgánico poco disponible	Aplicar enmiendas orgánicas para aumentar el contenido de materia orgánica y aplicar fósforo mineral, si es necesario
Medio	2,0-3,5	Buena actividad microbiana; disponibilidad media de P orgánico	Aplicar la cantidad necesaria de enmiendas orgánicas para mantener el contenido de materia orgánica y aplicar fósforo mineral, si es necesario
Alto	3,5-5,0	Elevada reserva de fósforo orgánico; la disponibilidad de este nutriente depende de la tasa de mineralización del	Aplicación de cantidades menores de fósforo mineral

		fósforo	
Muy alto	>5,0	Reserva importante de fósforo orgánico; la disponibilidad de este nutriente depende de la tasa de mineralización del fósforo	Controlar los niveles de fósforo asimilable, ya que pueden alcanzar valores elevados, lo que aumenta el riesgo de pérdidas por lixiviación y/o arrastre/erosión. Aplicar solo la cantidad mínima indispensable de fósforo mineral

Adaptado de Calouro et al., (2022). Manual de fertilización de cultivos, INIAV

Ejemplos de combinaciones de factores que condicionan o favorecen la disponibilidad del fósforo

La disponibilidad efectiva del P dependerá de la combinación de tres factores: contenido de P asimilable, pH y contenido de materia orgánica en el suelo

- **pH bajo + P_2O_5 alto** → El P está presente en gran cantidad, pero bloqueado (no está disponible para las plantas porque se vuelve insoluble cuando el pH es bajo). Realizar un encalado antes de la fertilización con fosfatos;
- **baja materia orgánica + P_2O_5medio** → Aumentar el contenido de materia orgánica del suelo y, si es necesario, reforzar la aplicación de P mineral.
- **pH 6,0–6,8 + materia orgánica > 2 %** → Condiciones favorables para una mayor disponibilidad del P para las plantas; máxima eficacia de la fertilización.
- **pH > 7,3 + materia orgánica < 1 % + P_2O_5 medio o bajo** → Condiciones frecuentes en suelos calcáreos, en los que el fósforo queda bloqueado por el calcio procedente de los carbonatos y la reserva de fósforo orgánico es escasa. Aumentar la materia orgánica y complementar con fertilizantes fosfatados al aplicar otros nutrientes, como el nitrógeno o el potasio.

1.2 Protección y conservación del suelo

La protección y la conservación del suelo son aspectos fundamentales para garantizar la sostenibilidad de los sistemas de producción de maíz. La adopción de prácticas de gestión adecuadas permite preservar la estructura, la fertilidad y la actividad biológica del suelo, reduciendo los riesgos de erosión, compactación y pérdida de nutrientes. Además, un suelo bien conservado favorece la productividad agrícola, mejora la eficiencia en el uso de los recursos y contribuye a la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a los efectos del cambio climático.
La Labranza del suelo (nula, mínima o reducida) es fundamental para preservar la agregación, mantener la actividad biológica del suelo y evitar las pérdidas de fósforo (P)

por erosión, escorrentía superficial y/o lixiviación.

Tipos de labranza del suelo

Labranza convencional

Se trata de un sistema de gestión basado en la labranza del suelo a una profundidad de 25-35 cm con volteo de la tierra, seguido de trabajos de preparación del lecho para la siembra. Favorece el control mecánico de las malas hierbas, la incorporación de residuos y la preparación homogénea del terreno. Sin embargo, su aplicación continuada tiende a aumentar el riesgo de erosión, compactación en profundidad, pérdida de materia orgánica y alteración de la estructura y la actividad biológica del suelo.

Ventajas

- Facilita la preparación del lecho de siembra, uniformizando la superficie del terreno;
- Permite un buen control mecánico inmediato de las malas hierbas, aunque no reduce su incidencia;
- Incorpora directamente los residuos y los fertilizantes al suelo;
- Favorece el calentamiento inicial del suelo.

Desventajas

- Riesgo de fragmentación excesiva del suelo por la destrucción de los agregados cuando el contenido en materia orgánica y/o arcilla es bajo;
- Mayor riesgo de erosión y pérdida de suelo;
- Reducción del contenido de materia orgánica, ya que intensifica la mineralización;
- Mayor consumo de combustible y costes operativos;
- Posible compactación de capas profundas y formación de «capa compacta»;
- Alteración y posible reducción de la biota del suelo, con un perjuicio especial para las micorrizas, que son esenciales para la asimilación del fósforo por parte de las plantas.

Labranza reducida o mínima

Este tipo de Labranza consiste en reducir el número, la profundidad o la intensidad de las operaciones de Labranza en comparación con la Labranza convencional. Se trata de un sistema que busca mantener las condiciones adecuadas para el establecimiento del cultivo, minimizando la alteración del suelo. Por ello, evita el volteo de la tierra, dando prioridad a la Labranza vertical (con aperos de dientes que cortan, pero no mezclan las capas del suelo), garantizando el mantenimiento de los residuos del cultivo anterior en la capa superficial del suelo. Esta modalidad de labranza del suelo puede limitarse al mínimo número de pasadas de aperos necesarias para el establecimiento del cultivo, lo que

contribuye a reducir los costes de producción, conservar la humedad y la biota del suelo, disminuir el riesgo de erosión y favorecer la acumulación de materia orgánica y la estabilidad estructural del suelo.

Ventajas

- Reduce los costes de la labranza y el consumo de combustible;
- Conserva la humedad, la estructura y la biota del suelo. Por lo tanto, también preserva los hongos micorrízicos;
- Reduce la erosión. Por lo tanto, también reduce la pérdida de nutrientes, en particular de fósforo (P);
- Favorece la acumulación de materia orgánica, que es esencial para una buena agregación y el mantenimiento de la biodiversidad del suelo.

Desventajas

- Puede requerir un mayor uso de herbicidas para el control de las malas hierbas;
- Posible aumento de la compactación superficial del suelo cuando la cubierta vegetal es escasa o inexistente;
- Necesidad de aperos adaptados y de que el operador de la maquinaria esté especializado.

Labranza nula o o siembra directa

Se trata de un sistema en el que no se realizan trabajos de preparación del suelo antes de la siembra, manteniéndose los residuos del cultivo anterior en la superficie, a modo de mantillo. Las semillas se colocan directamente en hoyos o surcos en la línea, sobre los residuos del cultivo anterior, en la superficie del suelo. Esta práctica preserva totalmente la estructura del suelo, evita la erosión, proporciona un mayor confort térmico e hídrico, reduce la incidencia de malas hierbas, favorece la acumulación de materia orgánica y mejora la actividad biológica. Además, contribuye a aumentar la capacidad de retención de agua y la resiliencia del sistema agrícola frente a condiciones climáticas adversas.

Ventajas

- Máxima protección contra la erosión y reducción de la evaporación directa;
- Aumenta el contenido de materia orgánica y la actividad biológica, esencial para la micorrización de las raíces y una mejor asimilación del fósforo;
- El mantenimiento de la cubierta vegetal aumenta la infiltración y el almacenamiento de agua en el suelo, reduce sustancialmente la escorrentía superficial y minimiza las pérdidas de fósforo hacia los cursos de agua;
- Reduce los costes de la labranza;
- Reduce las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al uso de maquinaria agrícola en la labranza del suelo.

Desventajas

- Mayor dependencia del control químico de las malas hierbas;
- Puede retrasar el calentamiento del suelo en primavera;
- Requiere experiencia técnica y maquinaria adecuada;
- Posible estratificación de nutrientes en la superficie del suelo

Resumen de los efectos de ***los tipos de Labranza*** sobre el fósforo en el suelo y en el agua

Tipo de Labranza	Efecto del fósforo en el suelo	Efecto del fósforo en el agua
Labranza convencional	Favorece la mezcla y la incorporación del fósforo en el perfil del suelo, reduciendo su acumulación en la superficie. Sin embargo, puede acelerar la pérdida de materia orgánica	Aumenta el riesgo de transporte de fósforo particulado debido a la erosión y a la escorrentía superficial, especialmente en parcelas con pendiente o con escasa cobertura vegetal. Produce una mayor cantidad de sedimentos, lo que aumenta la turbidez del agua superficial
Labranza mínima/reducida	Tiende a concentrar el fósforo en los primeros centímetros del suelo debido a una menor mezcla de los horizontes, lo que favorece su disponibilidad para las raíces superficiales. Preserva la agregación del suelo y reduce la perturbación de los organismos del suelo.	Reduce las pérdidas de P asociadas a la erosión, manteniendo una mayor cobertura del suelo, aunque puede aumentar el riesgo de pérdidas de P disuelto en caso de que se produzca una acumulación superficial.
Labranza nula	Favorece la acumulación de fósforo en la capa superficial del suelo; mejora la estabilidad estructural y la actividad biológica, lo que contribuye a una mayor eficiencia en el reciclaje de nutrientes.	Minimiza las pérdidas de fósforo porque favorece la agregación superficial del suelo y la infiltración del agua; menores pérdidas de fósforo particulado (fósforo adsorbido), preservando la calidad original de las masas de agua

1.3 Uso del suelo y gestión de residuos

Rotación de cultivos

La rotación de cultivos constituye una práctica fundamental para la gestión sostenible del suelo y de los residuos agrícolas. La alternancia de especies, con diferentes necesidades nutricionales y diferentes sistemas radiculares, favorece un uso más eficiente de los nutrientes, incluido el fósforo, mejorando su aprovechamiento y reduciendo el riesgo de acumulación o agotamiento en el suelo. Además, la diversidad de residuos vegetales protege la superficie del suelo durante la mayor parte del año y contribuye al reciclaje de nutrientes, favoreciendo la reincorporación del fósforo al sistema. Por ejemplo, la rotación **de maíz y cereales de invierno** (trigo, cebada, triticale) ayuda a mantener la fertilidad del suelo, a reducir las pérdidas de nutrientes y a mejorar la sostenibilidad de los sistemas de producción de maíz.

Cultivos asociados

Los cultivos asociados consisten en el cultivo simultáneo de dos o más especies en una misma parcela para mejorar la eficiencia en el uso del suelo y aprovechar de forma complementaria los recursos disponibles, como el agua, la luz y los nutrientes. En los cultivos herbáceos anuales, la combinación de especies con diferentes arquitecturas radiculares y foliares favorece un aprovechamiento más completo del perfil del suelo y de la radiación solar, mejorando la Labranza y la absorción de nutrientes como el fósforo. Además, contribuyen a aumentar la biodiversidad, reducir la presión de las malas hierbas y mejorar la cobertura y la protección del suelo frente a la erosión. El cultivo asociado debe dar prioridad a la inclusión de leguminosas, que, además de capturar el nitrógeno atmosférico, solubilizan formas de fósforo fijadas en el suelo gracias a su actividad rizosférica, reduciendo así la necesidad de fertilización mineral en el ciclo siguiente. El cultivo asociado **de maíz y leguminosas** (judías, veza, alfalfa) reduce la necesidad de fertilización mineral en el ciclo siguiente. Un cultivo asociado muy popular, conocido como el método ancestral *«Milpa»* y que ofrece una complementariedad perfecta entre los cultivos, es el de **maíz**, **calabaza y judías**, con grandes ventajas para los tres cultivos implicados, ya que maximiza el uso del suelo, mejora la fertilidad natural mediante la fijación de nitrógeno y reduce la necesidad de agua y de deshierbe.

Cultivos de cobertura

Los cultivos de cobertura desempeñan un papel fundamental en la protección y conservación del suelo en los sistemas de cultivos herbáceos. Su implantación entre dos cultivos principales o durante períodos de barbecho ayuda a reducir la erosión, a mejorar la estructura del suelo, a aumentar el contenido de materia orgánica y a favorecer el reciclaje de nutrientes. Además, contribuyen a reducir las pérdidas de nutrientes por

escorrentía superficial, como es el caso del fósforo, y por lixiviación, mejorando la sostenibilidad del sistema productivo. Los cultivos de cobertura deben tener un sistema radicular abundante, que forme rápidamente una cubierta vegetal bien desarrollada, con el fin de garantizar la protección del suelo en el período de mayor riesgo de erosión hídrica (otoño-invierno). Los residuos de estos cultivos deben permanecer en el suelo tras la cosecha, ya sea en la superficie o ligeramente incorporados. Algunos ejemplos de cultivos de cobertura típicos son el nabo forrajero, el centeno, la avena, la haba y la veza.

Buenas prácticas recomendadas para la gestión del suelo
Dar prioridad a la rotación de cultivos que incluya especies con diferentes necesidades nutricionales y sistemas radiculares y, siempre que sea posible, cultivadas en asociación en la parcela, para mejorar el aprovechamiento de los nutrientes y favorecer la estructura y la fertilidad del suelo, evitando las pérdidas de fósforo asimilable residual en el suelo, dejado por el cultivo anterior.
Instalar cultivos de cobertura para proteger el suelo contra la erosión y favorecer el reciclaje de nutrientes.
Reducir la intensidad de las labranzas mediante la labranza mínima, en franjas o la siembra directa, minimizando la degradación estructural del suelo.
Realizar la labranza del suelo únicamente durante la temporada de cultivo para evitar la compactación y la degradación de la estructura del suelo.
Dejar los rastrojos de los cultivos que se suceden en la parcela, en la superficie o ligeramente incorporados al suelo, para aumentar el contenido de materia orgánica del suelo, como fuente de nutrientes para la biodiversidad del suelo y para el cultivo que se va a plantar a continuación, y para retener la humedad.
Aplicar una fertilización variable basada en análisis del suelo y herramientas de agricultura de precisión, ajustando las dosis de nutrientes, como el fósforo (P), a las necesidades específicas de cada zona de la parcela, método probado y validado en el marco del proyecto Phos4Cycle.
Incorporar el biocarbón como enmienda del suelo para mejorar la retención de nutrientes, aumentar la estabilidad de la materia orgánica y favorecer la disponibilidad de fósforo y otros elementos esenciales, lo cual también se ha probado y validado en el marco del proyecto Phos4Cycle.
Gestionar adecuadamente la fertilización con fosfatos, evitando aplicaciones excesivas que puedan aumentar el riesgo de contaminación difusa.

2 Fertilización

2.1 Principios generales:

- Adaptar la fertilización a las necesidades del cultivo para obtener la producción esperada y de acuerdo con la clase de fertilidad del suelo en P, recurriendo a análisis del suelo y a estimaciones de extracción para ajustar las dosis de P que se deben aplicar;
- Aplicar los nutrientes en el momento y de la forma más adecuados para maximizar la eficiencia de su utilización, favoreciendo la disponibilidad de P durante las fases de mayor demanda del cultivo y minimizando las pérdidas al medio ambiente;
- Realizar un balance de fósforo que tenga en cuenta las necesidades del cultivo en función de la producción prevista, la disponibilidad del nutriente en el suelo y las pérdidas de fósforo fuera del sistema suelo-planta. En caso de que los contenidos de fósforo en el suelo sean medios o elevados, reponer únicamente la cantidad de fósforo exportada por el cultivo.
- A menudo, el análisis del suelo va acompañado de recomendaciones de fertilización que tienen en cuenta los aspectos mencionados anteriormente.

2.2 Época de aplicación de los fertilizantes

En el cultivo del maíz, la fertilización debe realizarse de manera que los nutrientes estén disponibles durante los períodos de mayor necesidad del cultivo. En el caso del fósforo, debido a su baja movilidad en el suelo, la aplicación debe realizarse antes o durante la siembra, incorporándolo al suelo o colocándolo junto a la línea de cultivo para favorecer el desarrollo inicial e de las raíces. Esta estrategia mejora la eficiencia de absorción del fósforo y contribuye a un establecimiento más vigoroso del cultivo, especialmente en suelos con baja disponibilidad de este nutriente.
En suelos con pH bajo, la aplicación de fósforo debe ir precedida de un encalado. De este modo, la reacción del suelo resulta más favorable para el cultivo y se reduce la precipitación del fósforo por el aluminio y el manganeso, lo que lo hace más disponible para las plantas.

2.3 Técnica de aplicación e de los fertilizantes

Localizada: La aplicación de P en la hilera es la más recomendada, ya que concentra el nutriente cerca de las raíces, lo cual es especialmente importante en el caso de suelos ácidos o alcalinos que tienden a fijar o insolubilizar el P, o cuando el suelo no se remueve;

A granel: La aplicación de P a granel, con posterior incorporación, puede utilizarse, por ejemplo, cuando es necesario aportar grandes cantidades de P al suelo;

Fertirrigación: Cuando el cultivo se riega, se puede aprovechar esta circunstancia para disolver los fertilizantes fosfatados en el agua de riego y distribuirlos así de forma más uniforme, con la ventaja de una asimilación más rápida por parte del cultivo. Se aplica

fácilmente con sistemas de riego localizado y con sistemas de aspersión.

- En la aplicación superficial o **a voleo**, el fertilizante se distribuye uniformemente sobre la superficie del suelo. Puede reducir la eficiencia en el aprovechamiento del fósforo si no se incorpora posteriormente al suelo.
- En la aplicación **localizada**, el fertilizante se deposita junto a la línea de siembra o a las raíces del cultivo. Se recomienda para el fósforo, ya que mejora su disponibilidad y absorción durante las primeras fases de desarrollo del cultivo.
- Cuando se incorpora al suelo, el fertilizante se mezcla con la tierra mediante la labranza realizada antes o durante la siembra, lo que favorece el contacto con las raíces y reduce las pérdidas por escorrentía superficial.
- La **fertirrigación**, que consiste en la aplicación de nutrientes disueltos en el agua de riego, solo puede utilizarse en sistemas de regadío, por lo que el maíz puede beneficiarse de esta alternativa, ya que la mayor parte de la producción se cultiva en regadío.

2.4 Tipos de fertilizantes fosfatados

Fertilizantes minerales: los superfosfatos presentan prácticamente todo el P en formas fácilmente solubles en agua. La forma granulada permite una mayor homogeneidad en la distribución sobre el terreno, lo que permite minimizar las reacciones de retención del nutriente en el suelo;

Fertilizantes orgánicos y organominerales: la liberación de las formas de fósforo orgánico es relativamente lenta y progresiva, por lo que se recomiendan para aplicaciones de fondo;

Correctores orgánicos: en los planes de fertilización es imprescindible tener en cuenta el aporte de fósforo de los diferentes correctores orgánicos que puedan aplicarse al suelo (por ejemplo, estiércol, purín, lodos de depuración, compost agrícola y otros).

En el cultivo del maíz se utilizan principalmente fertilizantes minerales, que aportan nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio en formas rápidamente disponibles. También se utilizan abonos orgánicos o abonos organominerales, combinando estos últimos con fuentes minerales y orgánicas para mejorar la eficiencia de la fertilización. Además, pueden utilizarse correctores orgánicos, como el estiércol o el compost estabilizado, y el biocarbón, destinados a mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, favoreciendo la retención de agua, los nutrientes y la actividad microbiana.

⚠ Puntos Críticos

- **Dosis máxima de nitrógeno de origen orgánico**: En las zonas vulnerables a la contaminación por nitratos (ZVN), la aplicación máxima permitida de N de origen orgánico es de 170 kg N/ha/año (Directiva 91/676/CEE del Consejo). Este límite condiciona indirectamente la cantidad de P aplicada, ya que, si tomamos como referencia el estiércol bovino, las 170 unidades de N orgánico corresponden a una aplicación máxima de aproximadamente 70 kg de P_2O_5/ha/año a través de los correctores orgánicos.
- **Análisis del efluente**: Conocer la concentración de P total del efluente antes de la aplicación; calcular el balance de P para aplicar solo lo estrictamente necesario para obtener las producciones que se pueden esperar de forma realista.
- **Época y condiciones de aplicación**: Evitar la aplicación de fertilizantes en suelos saturados, con una pendiente superior al 8 % o antes de una precipitación prevista y, en las ZVN, garantizar una franja de protección de 10–50 m con respecto a las líneas de agua.

Buenas prácticas recomendadas en la gestión de la fertilización
Realizar análisis periódicos del suelo para ajustar las aplicaciones de nutrientes a las necesidades reales del sistema de cultivo de acuerdo con la producción esperada.
Planificar la fertilización teniendo en cuenta el balance de nutrientes de toda la rotación de cultivos, especialmente las entradas y salidas de P.
Combinar fertilizantes minerales y orgánicos para optimizar el aporte de nutrientes y mantener la fertilidad del suelo.
Evaluar el uso de biocarbón como enmienda para mejorar la retención de nutrientes, aumentar la eficiencia del fósforo y promover la salud del suelo, de acuerdo con el enfoque aplicado en el proyecto Phos4Cycle.
Implementar la fertilización variable mediante herramientas de agricultura de precisión para adaptar las dosis a la variabilidad espacial de la parcela, de acuerdo con el enfoque aplicado en el proyecto Phos4Cycle.
Elaborar anualmente un «Plan de Fertilización» optimizado y adecuado al contenido de fósforo asimilable en el suelo y a las necesidades estimadas para los niveles de producción previstos, de acuerdo con el enfoque aplicado en el proyecto Phos4Cycle.
Ajustar las aplicaciones de fertilizantes orgánicos a los límites establecidos por la legislación vigente, especialmente en zonas vulnerables a la contaminación por nitratos.
Llevar registros de fertilización y producción para evaluar la eficiencia en el uso de los nutrientes y facilitar la toma de decisiones.
Integrar la fertilización con otras prácticas de conservación del suelo, como la rotación de cultivos y los cultivos de cobertura, para mejorar el reciclaje de nutrientes.

3 Protección de las masas de agua

3.1 Gestión del riego

La protección de las masas de agua superficiales y subterráneas es fundamental para garantizar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y la conservación de los ecosistemas acuáticos. Sin embargo, el agua es el agente de difusión del fósforo (P) por lixiviación o por escorrentía superficial, tanto en el caso del P disuelto en el agua como del P en forma de partículas, tras su insolubilización. Aunque el P presenta una movilidad limitada en el suelo, una acumulación prolongada puede aumentar el riesgo de contaminación difusa. El impacto en la calidad del agua se manifiesta a través de la eutrofización de las masas de agua superficiales y la contaminación de los acuíferos. Por ello, es fundamental proteger las cuencas hidrográficas y garantizar una buena gestión del agua de riego en las parcelas cultivadas. La gestión eficiente del riego minimiza los riesgos de contaminación por fósforo de las masas de agua superficiales y/o subterráneas.
Una buena gestión del riego implica evitar el encharcamiento por exceso de agua, así como evitar regar en las horas de mayor calor. No obstante, es necesario asegurarse de que el suelo se encuentre en pleno equilibrio hídrico para las plantas antes de las horas más calurosas del día.

Tipos de riego

Riego localizado (goteo , microaspersión y subterráneo)

El riego localizado consiste en sistemas que aplican el agua de forma localizada junto a la raíz, a baja presión, minimizando las pérdidas por evaporación, escorrentía superficial y percolación profunda. El riego puede realizarse mediante emisores de gotas (por goteo) situados junto a la planta o a su alrededor (en la zona de distribución radicular), mediante una cinta de microaspersión que permite una línea continua de humectación, mediante microaspersores o mediante difusores enterrados cerca de las raíces, en el caso del riego subterráneo. Cualquiera de estas modalidades limita la zona de humectación a las proximidades de las raíces. En suelos de textura media a pesada, los emisores de agua pueden colocarse más separados, ya que forman una zona húmeda más amplia. Si los suelos son de textura ligera, los emisores deberán estar más próximos y ser más numerosos, ya que la zona húmeda se desarrolla más en profundidad que en anchura. Estos sistemas permiten mejorar la eficiencia en el uso del agua y los fertilizantes mediante el fertirrigado, reduciendo el riesgo de pérdidas de fósforo y otros nutrientes

hacia las masas de agua superficiales y subterráneas. Aunque su uso es más frecuente en cultivos leñosos y hortícolas, su aplicación ha ido aumentando en cultivos herbáceos de alto valor o en condiciones de escasez hídrica, como el maíz o algunas rotaciones de regadío intensivo.

Eficiencia del sistema: 80–95 %

Ventajas

- Elevada eficiencia de riego y menor evaporación directa;
- Mayor eficiencia en el uso del agua y los fertilizantes en la parcela, con un menor consumo energético;
- Menor riesgo de lixiviación y de escorrentía superficial del agua, menor riesgo de arrastre del fósforo;
- Fácil adaptación al fertirrigado;
- Reduce la aparición de malas hierbas entre hileras.

Desventajas

- Mayor coste de instalación y mantenimiento, especialmente en el caso de los sistemas totalmente enterrados;
- Requiere sistemas de filtrado y control;
- Necesita un mantenimiento regular para evitar atascos en los emisores, sobre todo en el caso de aguas ricas en carbonatos y bicarbonatos;
- Requiere mantener una presión mínima de funcionamiento y compensar los caudales a lo largo de la pendiente en terrenos accidentados.

Sistema de riego	Eficiencia (%)	Riesgo de pérdidas de P
Localizada	Elevado a muy elevado (80–95 %)	Bajo
Localizada con fertirrigación	Elevado a muy elevado (80–95 %)	Media

Riego por aspersión

Los sistemas de riego por aspersión se utilizan ampliamente para el cultivo de especies herbáceas de regadío, como el maíz, la alfalfa, los cereales de invierno, la remolacha o los cultivos forrajeros. Estos sistemas distribuyen el agua en forma de lluvia a través de aspersores fijos o móviles, incluyendo modalidades como la de cobertura total (aspersores dehesas en rampas), las rampas giratorias (conocidas como pivotes centrales) y los equipos de avance frontal (rampas lineales frontales y cañones de riego). El riego por

aspersión en el maíz y en la mayoría de los cultivos herbáceos de regadío deberá garantizar una cobertura completa de la superficie regada para lograr una mayor uniformidad de la producción en la parcela. Es decir, tanto en el riego mediante aspersores dehesas en rampas, como en el realizado mediante una rampa giratoria o lineal/frontal, o incluso en el realizado mediante un cañón de riego con desenrollador, será necesario garantizar la misma dotación de riego en todos los puntos de la parcela para que el sistema tenga una elevada Eficiencia de Aplicación (EA) y una elevada uniformidad de distribución (UD), lo que garantiza un frente de agua infiltrada uniforme, con una progresión descendente en el interior del suelo. Este tipo de riego es bastante habitual en cultivos de cereales anuales y/o hortalizas, y funciona con alta presión y caudal. Se trata de cultivos más bajos, anuales y en hileras, características que facilitan la adaptación de los sistemas de riego por aspersión de cobertura completa. La superposición perfecta para el riego deseado se consigue instalando los aspersores en las rampas, con una separación igual a su alcance. Por otra parte, una gestión inadecuada o unos proyectos mal dimensionados de estos sistemas de riego pueden favorecer elevadas pérdidas de agua por evaporación, escorrentía superficial y arrastre de nutrientes. Por ello, es fundamental ajustar las dosis y la frecuencia de riego a las necesidades del cultivo y a las condiciones edafoclimáticas, contribuyendo así a reducir el riesgo de transporte de fósforo a las masas de agua superficiales y subterráneas.

Eficiencia del sistema: 65–85 %

Ventajas

- Adecuado para extensas superficies de cultivos de tamaño pequeño a mediano (cultivos herbáceos, hortalizas, jardines, etc.);
- Una vez garantizada la distancia adecuada entre los aspersores, la cobertura completa asegura una buena uniformidad en la distribución del frente de humectación;
- La buena uniformidad en la distribución del frente de humectación lineal garantiza un buen desarrollo lateral de las raíces en todo el volumen de suelo humedecido, incluso entre hileras, lo que aumenta la cantidad de nutrientes que la planta puede absorber;
- Gran diversidad de sistemas que permiten una fácil adaptación a diversas geometrías y topografías de las parcelas;
- Se adapta a diferentes tipos de suelo y cultivos;
- Permite la mecanización y la automatización de las operaciones de riego.

Desventajas

- Sistemas de riego que funcionan a presión media y alta, lo que supone un mayor

consumo energético;
- Mayores pérdidas por evaporación directa en días calurosos y ventosos;
- Distorsión del modelo ideal de superposición a partir de velocidades de viento bajas (a partir de 5 m/s o 18 km/h);
- Puede favorecer el desarrollo de una mayor cantidad de malas hierbas;
- Dificultad para adaptarse a cultivos permanentes, como huertos frutales y viñedos;
- Riesgo de escorrentía superficial si la pluviometría no se ajusta a las tasas de infiltración del suelo, lo que puede favorecer el transporte de nutrientes, incluido el fósforo (P), hacia las masas de agua.

Riego por gravedad (o riego de superficie)

El riego por gravedad, también conocido como riego de superficie, es la práctica más antigua de riego de cultivos agrícolas y consiste en distribuir el agua por la parcela, aprovechando la pendiente natural del terreno o la inclinación que se puede dar con precisión a la superficie de la parcela, lo que permite que el agua avance por inundación o a través de surcos que la conducen. Aprovecha al máximo la gravedad para reducir la dependencia de la energía. Es uno de los sistemas de riego más antiguos para los cultivos herbáceos, entre los que se encuentra el maíz, especialmente en zonas con disponibilidad de agua y regadíos tradicionales. En sus formas más o menos automatizadas, existen varios tipos de riego por gravedad, que varían según el principio o la técnica utilizada para hacer que el agua fluya superficialmente por la parcela que se va a regar. Puede realizarse mediante surcos, en bancales, en franjas, en cuencas o incluso mediante el riego de lima, que consiste en una fina lámina de agua que discurre por las terrazas de las laderas para evitar las heladas y garantizar un pastoreo permanente a lo largo del año. La eficiencia del riego y la uniformidad de la distribución pueden presentar grandes variaciones, ya que dependen en gran medida del nivel de automatización y de la adecuación del sistema de riego al tipo de suelos y cultivos.

Eficiencia del sistema: del 40-60 % (sistemas tradicionales) al **65-85 %** (sistemas automatizados con nivelación de la parcela)

Ventajas
- Bajo coste de instalación y mantenimiento;
- Tecnología accesible y de fácil adaptación, con un consumo energético reducido;
- Humedece un gran volumen de suelo, maximizando el aprovechamiento de los nutrientes del suelo cuando la EA y la UD son elevadas;
- Adecuado para grandes superficies y zonas con infraestructuras de riego tradicionales

- Más adecuado para suelos de textura fina o suelos pesados, lo que permite establecer intervalos más largos entre riegos, ya que los suelos de textura más fina almacenan más agua y pueden admitir dotaciones de riego más elevadas, reduciendo así la frecuencia de los riegos.

Desventajas

- La eficiencia del riego y la uniformidad de la distribución pueden ser bajas si la parcela no está nivelada, los surcos y las zanjas no están correctamente formados y el sistema no está automatizado;
- Los sistemas automatizados se adaptan con dificultad a parcelas accidentadas, por lo que requieren terrenos con una pendiente suave o llanos;
- Si la EA y la UD son bajas, el riesgo potencial de pérdida de nutrientes y, en particular, de contaminación de las masas de agua superficiales y subterráneas con fósforo (P) es muy elevado, ya que las dosis de riego de cada aplicación son necesariamente elevadas para que el escurrimiento del agua pueda progresar adecuadamente en la parcela.

Eficiencia del riego *frente* al riesgo de pérdida de P

Sistema de riego	Eficiencia (%)	Riesgo de pérdidas de P
Localizada	Elevada a muy elevada (80–95 %)	Bajo
Localizada con fertirrigación	Elevado a muy elevado (80–95 %)	Medio
Riego por aspersión	De medio a alto (65–85 %)	Media
Gravedad	Baja a media (40–70 %)	Elevada

3.2 Otros factores

El riesgo potencial de contaminación de las masas de agua por P puede aumentar exponencialmente cuando se combinan varios de los factores mencionados en las secciones anteriores. La tabla que figura a continuación ayuda a realizar un diagnóstico rápido en el que se puede identificar la presencia o la concurrencia de un conjunto de factores de riesgo. En función del número de factores de riesgo identificados y combinados, el nivel de riesgo de contaminación por P puede clasificarse de ***bajo*** a ***muy alto***.

Factores de riesgo	Factores identificados	Riesgo de contaminación
Suelo de textura gruesa/ligera o fina/pesada (arenoso o arcilloso/limoso-arcilloso)	X	***Elevado***
MO igual o inferior al 2%	X	
pH igual o inferior 6		
P_2O_5 (Égner-Riehm-AL) igual o superior a 200 ppm o P2 O5 (Olsen) igual o superior a 115 ppm	X	
Nivel freático superficial: profundidad igual o inferior a 2 m durante la temporada estival (estación seca)		
Pendiente de la parcela igual o superior al 8 %		
Riego por inundación o escorrentía superficial identificada del agua de riego	X	
Solo compactado: macroporosidade inferior 10%		
Cobertura del suelo: nula o escasa		
Clima con elevadas precipitaciones: con episodios frecuentes de lluvias intensas y concentradas		

Escala del nivel de «Riesgo de contaminación por fósforo»	
Reducido: hasta **2** factores	***Medio:*** **3** factores
Elevado: **4** factores	***Muy elevado:*** Más **5** factores

Nota: Tabla utilizada a modo de ejemplo, que debe adaptarse a la realidad de cada sistema para el autodiagnóstico del riesgo de contaminación de las masas de agua con P.

Buenas prácticas recomendadas para la protección de las masas de agua
Optimizar el riego asegurándose de que el agua se aplique en la parcela con una EA y una UD elevadas
Garantizar que la tasa de infiltración del agua de riego en el suelo sea superior a la tasa de aplicación del agua
El método de riego, el equipo elegido, así como la programación y la gestión del riego, deben adaptarse a las condiciones de la parcela en cuestión (topografía, superficie de la parcela, tipo de suelo, clima de la región y cultivo)
Ajustar las dosis de fertilización, especialmente de fósforo (P), a las necesidades reales de los cultivos, mediante análisis de suelo y planes de fertilización.
Aprovechar las posibilidades que ofrece el fertirrigado para fraccionar la aplicación de los fertilizantes a lo largo del ciclo del cultivo, ajustando las soluciones al estado de fertilidad del suelo y a las necesidades estacionales del cultivo
Mantener franjas de protección o zonas de amortiguación con vegetación junto a los cursos de agua para reducir la arrastre de sedimentos y nutrientes
Implementar cultivos de cobertura y rotaciones o sucesiones adecuadas que favorezcan la protección del suelo y reduzcan las pérdidas de fósforo por erosión y escorrentía superficial.
Evitar la aplicación de fertilizantes antes de episodios de lluvias intensas o en suelos saturados, reduciendo así el riesgo de pérdidas de fósforo y de contaminación difusa.

Ficha técnica: Gestión del fósforo en el viñedo

El fósforo (P) es esencial para la productividad del viñedo y su correcta gestión contribuye a reducir las fuentes de contaminación de los recursos hídricos. El P, como elemento esencial, es fundamental para el desarrollo de las raíces, para la fotosíntesis y para el vigor vegetativo y productivo. Sin embargo, debido a las moderadas necesidades de P en el viñedo, puede que no sea necesario aplicar este elemento en las fertilizaciones anuales.

1 Gestión del fósforo en el suelo

Las buenas prácticas en el manejo del fósforo en el suelo son positivas para:

Aspectos importantes de la gestión del fósforo en el viñedo

- Evaluación del estado de fertilidad del suelo y de las necesidades de corrección;
- Protección y conservación del suelo;
- Uso del suelo (sucesión de cultivos, cultivos asociados, rotación de cultivos, cultivos permanentes, cultivos de cobertura), gestión de residuos e intensidad de la labranza;
- Tipo de fertilizantes, dosis, épocas y técnicas de aplicación;
- Condiciones climáticas.

1.3 Diagnóstico del estado de fertilidad del suelo

En lo que respecta al fósforo (P), la evaluación del estado de fertilidad del suelo antes de la siembra es esencial para evitar limitaciones en los contenidos de P disponible/asimilable (P_2O_5), en el valor del pH y en el contenido de materia orgánica (MO), anticipando las necesidades de corrección mediante una fertilización fosfatada adecuada, para el correcto establecimiento del cultivo y su posterior desarrollo.

En el caso de la fertilización de mantenimiento, el análisis del suelo debe realizarse, preferiblemente, en otoño o en invierno, para poder calcular el **balance de P** y elaborar el **plan de fertilización** correspondiente antes de las fertilizaciones necesarias que preceden a la brotación.

Cómo interpretar los resultados del P en el suelo

Clase	**P_2O_5 - Égner-Riehm (mg/kg)**	**P_2O_5 - (Olsen) (mg/kg)**	**Interpretación**	**Medidas recomendadas**
Muy bajo	≤25	≤18	Disponibilidad de P muy reducida	Aplicar fertilización con fosfatos. Se espera una respuesta muy elevada del cultivo a la fertilización
Bajo	26–50	18–34	Disponibilidad reducida de fósforo	Aplicar fertilización con fosfato. Se espera una respuesta elevada del cultivo a la fertilización
Media	51–100	35–56	Disponibilidad de P satisfactoria	Aplicar fertilización con fosfato. Se espera una buena respuesta del cultivo a la fertilización
Alta	101–200	57–115	Disponibilidad de P elevada	Reducir o suspender la fertilización con fosfato, según la producción prevista
Muy alto	> 200	>115	Disponibilidad de P muy elevada	Reducir o suspender la fertilización con fosfatos minerales, en función de la producción prevista

Adaptado de Calouro et al. (2022). Manual de fertilización de cultivos, INIAV

Cómo interpretar los resultados del pH($_{H_2O}$)

Clase	**pH ($_{H_2O}$)**	**Interpretación**	**Medida recomendada**
Muy ácido	≤ 4,5	Toxicidad por Al y Mn; bloqueo de P y Mo	Corregir con encalado (aplicación de caliza)
Ácido	4,6 - 5,5		
Ligeramente ácido	5,6 - 6,5	Mayor disponibilidad de P	No es necesario corregir la reacción del suelo
Neutro	6,6 – 7,5	Máxima disponibilidad de P	No es necesario corregir la reacción del suelo
Ligeramente alcalino	7,6 - 8,5	Inicio de la fijación del P en fosfatos de calcio	No es necesario corregir la reacción del suelo
Alcalino	8,6 – 9,5	Fuerte fijación del P;	Corregir con azufre o MO

Muy alcalino	>9,5	carencias de Fe, Mn y Zn	

Adaptado de Calouro et al., (2022). Manual de fertilización de cultivos, INIAV

Nota: En suelos con un pH entre 6,0 y 6,8, la disponibilidad de P es máxima y la actividad microbiana es más intensa.

Cómo interpretar los resultados del análisis de materia orgánica

Clase	MO (%)	Impacto	Medida recomendada
Muy bajo	< 1,0	Fósforo orgánico no disponible	Aplicar enmiendas orgánicas para aumentar el contenido de materia orgánica: compost, estiércol, lodos de depuración mezclados con biomasa estructurante (madera forestal, maleza, paja, serrín, etc.) y fósforo mineral, si es necesario
Bajo	1,0-2,0	Fósforo orgánico poco disponible	Aplicar enmiendas orgánicas para aumentar el contenido de materia orgánica y aplicar fósforo mineral, si es necesario
Medio	2,0-3,5	Buena actividad microbiana; disponibilidad media de P orgánico	Aplicar la cantidad necesaria de enmiendas orgánicas para mantener el contenido de materia orgánica y aplicar fósforo mineral, si es necesario
Alto	3,5-5,0	Elevada reserva de fósforo orgánico; la disponibilidad de este nutriente depende de la tasa de mineralización del fósforo	Aplicación de cantidades menores de fósforo mineral
Muy alto	>5,0	Reserva importante de fósforo orgánico; la disponibilidad de este nutriente depende de la tasa de mineralización del fósforo	Controlar los niveles de fósforo asimilable, ya que pueden alcanzar valores elevados, lo que aumenta el riesgo de pérdidas por lixiviación y/o arrastre/erosión. Aplicar únicamente la cantidad

			mínima indispensable de fósforo mineral

Adaptado de Calouro et al., (2022). Manual de fertilización de cultivos, INIAV

Ejemplos de combinaciones de factores que condicionan o favorecen la disponibilidad del P

La disponibilidad efectiva del P dependerá de la combinación de tres factores: contenido de P asimilable, pH y contenido de materia orgánica en el suelo

- **pH bajo + P_2O_5 alto** → El P está presente en gran cantidad, pero bloqueado (no está disponible para las plantas porque se vuelve insoluble cuando el pH es bajo). Realizar un encalado antes de la fertilización con fosfatos;
- **Baja materia orgánica + P_2O_5medio** → Aumentar el contenido de materia orgánica del suelo y, si es necesario, reforzar la aplicación de P mineral.
- **pH 6,0–6,8 + materia orgánica > 2 %** → Condiciones favorables para una mayor disponibilidad del P para las plantas; máxima eficiencia de la fertilización.
- **pH > 7,3 + materia orgánica < 1 % + P_2O_5medio o bajo** → Condiciones frecuentes en suelos calcáreos, con el P bloqueado por el calcio procedente de los carbonatos y una escasa reserva de P orgánico. Aumentar la materia orgánica y complementar con fertilizantes fosfatados cuando se apliquen otros nutrientes, como nitrógeno o potasio.

1.2 Protección y conservación del suelo

La protección y la conservación del suelo son aspectos fundamentales para garantizar la sostenibilidad de la viticultura. La adopción de prácticas de gestión adecuadas permite preservar la estructura, la fertilidad y la actividad biológica del suelo, reduciendo los riesgos de erosión, compactación y pérdida de nutrientes. Además, un suelo bien conservado favorece la productividad agrícola, mejora la eficiencia en el uso de los recursos y contribuye a la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a los efectos del cambio climático.
La Labranza del suelo (nula, mínima o reducida) es fundamental para preservar la agregación, mantener la actividad biológica del suelo y evitar las pérdidas de fósforo (P) por erosión, escorrentía superficial y/o lixiviación.

Tipos de Labranza del suelo

Labranza convencional

La Labranza convencional consiste en la Labranza del suelo a una profundidad de 25–35

cm, utilizando aperos como arados, escarificadores, gradas de discos y otros, en una larga secuencia de pasadas. Está indicada en situaciones de compactación severa del suelo, para la incorporación de estiércol, paja, siduración y para el control de malas hierbas perennes.

Ventajas

- Mejora la estructura del suelo solo a corto plazo, facilita la incorporación de materia orgánica y fertilizantes y, en algunos casos, permite un cierto control mecánico de las malas hierbas en el año en que se lleva a cabo.

Desventajas

- Mayor riesgo de erosión hídrica y de destrucción de los agregados del suelo, lo que favorece el desplazamiento de la fauna del suelo a mayor profundidad y perturba la actividad de los hongos micorrízicos, esenciales para la absorción de fósforo.

Labranza reducida o mínima

La labranza reducida (o mínima) evita el removido de la tierra, dando prioridad a la labranza vertical (con aperos de dientes que cortan, pero no mezclan las capas del suelo), lo que garantiza que los residuos del cultivo anterior permanezcan en la capa superficial del suelo. Esta modalidad de labranza puede limitarse al número mínimo de pasadas de los aperos necesarias para la siembra y/o la plantación.

Ventajas

- Reducción de la fragmentación de los agregados del suelo, lo que disminuye los riesgos de erosión y de pérdidas de fósforo por escorrentía superficial; preservación de los hongos micorrízicos esenciales para la absorción de fósforo; y menor alteración del ciclo natural de la biodiversidad y del ciclo del fósforo en el suelo.

- ***Desventajas***
- Menor incorporación del fósforo en profundidad, lo que puede provocar la acumulación de fósforo únicamente en la capa superficial (0–10 cm), aumentando el riesgo de pérdidas de este nutriente por erosión hídrica.

Cubierta vegetal

Las cubiertas vegetales son sistemas de protección y conservación del suelo. En general, se utilizan cubiertas vivas cuando se pretende conservar la fertilidad del suelo, mejorar las condiciones de infiltración y drenaje del agua, favoreciendo la entrada de agua en el suelo o reduciendo el exceso de agua, respectivamente. Se distingue entre cubiertas **sembradas** y **espontáneas**, siendo estas últimas más persistentes y con mayor capacidad de competir

con el cultivo. En ambos casos, las cubiertas cortadas o secas se mantienen en el suelo para reducir la insolación y la evaporación directa del suelo durante el verano, en zonas con escasas precipitaciones y mayor necesidad de agua.
Algunos ejemplos de **cultivos de cobertura** son las mezclas de gramíneas con leguminosas, de ciclo corto, y especies floríferas.

Ventajas

- Mejora la estructura del suelo, la porosidad y la aireación, reduciendo la erosión y la escorrentía superficial;
- Aumenta el contenido de materia orgánica y la reserva de nutrientes;
- Controla el vigor de la viña en zonas de elevado desarrollo vegetativo;
- Aumenta la biodiversidad y controla las plagas.

Desventajas

- Posible competencia por el agua y/o los nutrientes con el cultivo existente, cuando las condiciones puedan ser limitantes, especialmente en plantaciones jóvenes;
- Aumento de los costes de gestión;
- Aumento del riesgo de daños causados por las heladas;
- También puede servir de refugio para organismos no deseados (plagas).

Resumen de los efectos de ***los tipos de cobertura*** sobre el fósforo (P) en el suelo y en el agua

Tipo de cobertura	**Efecto del fósforo en el suelo**	**Efecto del fósforo en el agua**
Labranza convencional	Incorpora el fósforo en profundidad; altera la estratificación del fósforo; mejora su contacto con las raíces	Al provocar una mayor desagregación del suelo superficial, aumenta el riesgo de pérdidas de P particulado por erosión eólica o hídrica del suelo, lo que genera una mayor cantidad de sedimentos; contaminación del agua con P y mayor turbidez del agua
Labranza mínima/reducida	Preserva mejor la agregación del suelo; menor perturbación de los organismos del suelo que n contribuir a aumentar la disponibilidad de fósforo asimilable	Reduce la erosión en comparación con el sistema convencional; riesgo medio de pérdidas de fósforo en forma de partículas.
Cubierta vegetal viva	Posible competencia con el	Menor erosión hídrica, ya que

	cultivo y cierto riesgo de reducción de las reservas minerales de fósforo. Por otro lado, reduce las pérdidas de suelo y, en consecuencia, reduce las pérdidas de fósforo en forma de partículas	favorece la agregación superficial del suelo y mejora las tasas de infiltración del agua en el suelo; menores pérdidas de fósforo particulado (fósforo adsorbido), lo que garantiza la calidad original de las masas de agua
Cubierta vegetal muerta	Reducción de la pérdida de suelo por erosión hídrica, lo que reduce el riesgo de pérdidas de fósforo; aumento del contenido de materia orgánica, estímulo de la actividad biológica del suelo, lo que también puede aumentar la disponibilidad de fósforo para las plantas	Reducción de las pérdidas de fósforo particulado por escorrentía superficial, ya que reduce la velocidad de la escorrentía del agua, lo que disminuye el riesgo de erosión hídrica del suelo
Otros (residuos de poda, paja, etc.)	Aumento de la reserva de materia orgánica del suelo, con el consiguiente incremento de la actividad biológica del suelo, lo que favorece la disponibilidad de fósforo para su absorción por parte de las plantas.	Fomento de una mejor agregación del suelo gracias al aumento del contenido de materia orgánica, mayor infiltración de agua y nutrientes en el suelo, lo que contribuye a un uso y aprovechamiento más eficaz de los nutrientes.

1.3 Uso del suelo y gestión de residuos

Cultivos permanentes

Los cultivos permanentes reducen la remoción del suelo y permiten la implantación de diversos cultivos de cobertura entre hileras, lo que contribuye a una mayor fijación del nitrógeno atmosférico, sirve de refugio para organismos auxiliares y polinizadores, regula las temperaturas y la evaporación directa del suelo, y constituye una fuente permanente de materia orgánica y nutrientes (ya que los cultivos de cobertura se cortan y se mantienen entre hileras). Además, son sistemas más estables en los que la rizosfera ocupa un mayor volumen de suelo, pudiendo albergar una gran diversidad de microorganismos que favorecen la micorrización y disuelven el fósforo insoluble y precipitado, lo que aumenta la eficiencia en el aprovechamiento del fósforo y reduce los posibles riesgos de pérdidas.

Residuos de poda

Los residuos de poda son una fuente de materia orgánica que puede incorporarse al suelo y cuyo origen es la propia parcela de producción, por lo que no implican costes de transporte; sin embargo, presentan la desventaja de que es necesario triturar las partes leñosas para poder incorporarlas al suelo o esparcirlas entre hileras como mantillo. También pueden constituir una vía de propagación de enfermedades del madera, por lo que esta práctica no se recomienda siempre que ya se hayan identificado enfermedades en algunas plantas de la parcela.

Buenas prácticas recomendadas para la gestión del suelo
Dejar los residuos de la cosecha del cultivo de cobertura en la superficie del suelo durante el verano y aprovechar para incorporarlos al suelo cuando se apliquen enmiendas o abonos durante el otoño-invierno, como reserva de carbono orgánico y de nutrientes en el suelo.
Realizar las labranzas únicamente durante el periodo de preparación del suelo para la siembra de cultivos de cobertura o para la incorporación de enmiendas, con el fin de evitar la compactación.
Se recomienda la aplicación al suelo de biocarbón de origen vegetal, probado y validado, para aumentar la cantidad de carbono estable y mejorar la estructura del suelo, así como para aumentar la CTC (capacidad de intercambio catiónico), lo que contribuye a la retención de fósforo y a la reducción de sus pérdidas hacia las masas de agua.
Plantación de cultivos permanentes según el *diseño* ***«keyline»*** (línea clave): el objetivo de los sistemas implantados según este diseño es optimizar el aprovechamiento del agua de lluvia, reducir la erosión y regenerar la fertilidad del suelo.

2 Fertilización

2.1 Principios generales:

- Análisis anual del suelo para determinar la disponibilidad de nutrientes y realizar un balance de nutrientes, incluido el fósforo (P), que permita definir las correcciones y abonaciones necesarias. - Balance de P que tenga en cuenta las necesidades del cultivo en función de la producción prevista, la disponibilidad del nutriente en el suelo y las pérdidas de P fuera del sistema suelo-planta. Puede ser necesario ajustar otros nutrientes y evaluar la reposición de P en años posteriores; - Complementar los análisis del suelo con la información proporcionada por el análisis

foliar. En el caso del viñedo, la recogida de hojas debe realizarse durante la floración, hasta la fase de «guisante», y al inicio de la fase de «pintor».

2.2 Época de aplicación de los fertilizantes

El período recomendado para la aplicación de fósforo en el viñedo es durante el letargo invernal o a principios de primavera. Del mismo modo, si se aplica algún fertilizante nitrogenado o potásico antes de la brotación, el fosfato puede aplicarse junto con ellos para equilibrar o reponer el consumo del año anterior.
En suelos con pH bajo, la aplicación de P debe ir precedida de un encalado. De este modo, la reacción del suelo se vuelve más favorable para el cultivo y disminuye la precipitación del P por el aluminio y/o el manganeso, lo que lo hace más disponible para las plantas.

2.3 Técnica de aplicación de los fertilizantes

Localizada: La aplicación de P en la hilera es una buena opción cuando el viñedo se cultiva en «espaldera» o en régimen superintensivo.
Sin embargo, para los viñedos en «vaso», se recomienda aplicar el abono en la zona de desarrollo radicular, alrededor de cada planta, que corresponde a la superficie de proyección de la copa.

A granel: La aplicación se realiza con un esparcidor de abono por toda la superficie de la parcela.

2.4 Tipos de fertilizantes fosfatados

Fertilizantes minerales: los superfosfatos presentan prácticamente todo el P en formas fácilmente solubles en agua. La forma granulada permite una mayor homogeneidad en la distribución sobre el terreno, lo que permite minimizar las reacciones de retención del nutriente en el suelo;

Fertilizantes orgánicos y organominerales: la liberación de las formas de fósforo orgánico es relativamente lenta y progresiva, por lo que se recomiendan para aplicaciones de fondo;

Correctores orgánicos: en los planes de fertilización, es imprescindible tener en cuenta el aporte de fósforo de los diferentes correctores orgánicos que puedan aplicarse al suelo (por ejemplo, estiércol, purín, lodos de depuración, compost agrícola y otros).

Fertirrigación

Los fertilizantes para fertirrigación a base de fósforo se caracterizan por su total solubilidad, y están compuestos por sales combinadas con otro nutriente o por soluciones de ácido fosfórico con la concentración adecuada.

Puntos Críticos

- **Dosis máxima de nitrógeno de origen orgánico**: En las zonas vulnerables a la contaminación por nitratos (ZVN), la aplicación máxima permitida de N de origen orgánico es de 170 kg N/ha/año (Directiva 91/676/CEE del Consejo). Este límite condiciona indirectamente la cantidad de P aplicada, ya que, si tomamos como referencia el estiércol bovino, las 170 unidades de N orgánico corresponden a una aplicación máxima de aproximadamente 70 kg de P_2O_5/ha/año a través de los abonos orgánicos.
- **Análisis del efluente**: Conocer la concentración de P total del efluente antes de la aplicación; calcular el balance de P para aplicar solo lo estrictamente necesario para obtener las producciones que se pueden esperar de forma realista.
- **Época y condiciones de aplicación**: Evitar la aplicación de fertilizantes en suelos saturados, con una pendiente superior al 8 % o antes de una precipitación prevista y, en las ZVN, garantizar una franja de protección de 10–50 m con respecto a las líneas de agua.

Buenas prácticas recomendadas en la gestión de la fertilización
Conocer la concentración de P total de los fertilizantes y de P asimilable (P_2O_5) en el suelo, antes de su aplicación
Calcular el «balance de P», integrado en el plan de fertilización y ajustado al resto de nutrientes para garantizar los objetivos de producción y calidad previstos
Evitar la aplicación de fertilizantes en suelos saturados de agua
Evitar la aplicación de fertilizantes en parcelas con una pendiente superior al 8 %
Evitar la aplicación de fertilizantes antes de que se produzcan precipitaciones previstas
En las ZVN, determinar la franja de protección de 10–50 m con respecto a las líneas de agua, que deberá estar cubierta de vegetación
Los correctores orgánicos deberán aplicarse unas semanas antes de los períodos de mayor necesidad de nutrientes por parte del cultivo
Elaborar anualmente un «Plan de Fertilización» optimizado y adecuado al contenido de P asimilable en el suelo y a las necesidades estimadas para los niveles de producción esperados, de acuerdo con el enfoque aplicado en el proyecto Phos4Cycle

3.1 Gestión del riego

La protección de las masas de agua superficiales y subterráneas es fundamental para garantizar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y la conservación de los ecosistemas acuáticos. Sin embargo, el agua es el agente de difusión del fósforo (P) por lixiviación o por escorrentía superficial, tanto para el P disuelto en el agua como para el P en forma de partículas, tras su insolubilización. Aunque el P presenta una movilidad limitada en el suelo, una acumulación prolongada puede aumentar el riesgo de contaminación difusa. El impacto en la calidad del agua se manifiesta a través de la e e eutrofización de las masas de agua superficiales y de la contaminación de los acuíferos. Por ello, es fundamental proteger las cuencas hidrográficas y garantizar una buena gestión del agua de riego en las parcelas cultivadas. La gestión eficiente del riego minimiza los riesgos de contaminación por fósforo de las masas de agua superficiales y/o subterráneas.
Una buena gestión del riego implica evitar el encharcamiento por exceso de agua, así como evitar regar en las horas de mayor calor. No obstante, es necesario asegurarse de que el suelo se encuentre en un estado de confort hídrico adecuado para las plantas antes de que lleguen las horas más calurosas del día.

Tipos de riego

Riego localizado (goteo, microaspersión y subterráneo)

El riego localizado consiste en sistemas que aplican el agua de forma localizada junto a la raíz, a baja presión, minimizando las pérdidas por evaporación, escorrentía superficial y percolación profunda. La aplicación de agua puede realizarse mediante emisores de gotas (por goteo) situados junto a la planta o a su alrededor (en la zona de distribución radicular), mediante una cinta de microaspersión que permite una línea continua humedecida, mediante microaspersores o mediante difusores enterrados cerca de las raíces, en el riego subterráneo. Cualquiera de estas modalidades limita la zona de humectación a las proximidades de las raíces. En suelos de textura media a pesada, los emisores de agua pueden colocarse más separados, ya que forman una zona húmeda más amplia. Si los suelos son de textura ligera, los emisores deberán estar más próximos y ser más numerosos, ya que la zona húmeda se desarrolla más en profundidad que en anchura. Estos sistemas permiten mejorar la eficiencia en el uso del agua y los fertilizantes mediante el fertirrigado, reduciendo el riesgo de pérdidas de fósforo y otros nutrientes hacia las masas de agua superficiales y subterráneas.

Eficiencia de riego: 80-95 %

Ventajas

- Alta eficiencia de riego y menor evaporación directa;
- Mayor eficiencia en el uso del agua y los fertilizantes en la parcela con un menor consumo energético;
- Menor potencial de lixiviación y escorrentía superficial del agua, menor riesgo de

arrastre del fósforo;
- Fácil adaptación al fertirrigado;
- Reduce la aparición de malas hierbas entre las hileras.

Desventajas
- Alto coste de instalación y complejidad de montaje, especialmente en el caso de los sistemas totalmente enterrados;
- Necesidad de un mantenimiento regular para evitar obstrucciones en los emisores, especialmente en el caso de aguas ricas en carbonatos y bicarbonatos.
- Necesidad de mantener la presión mínima de funcionamiento y compensar los caudales a lo largo de la pendiente en terrenos accidentados.

Sistema de riego	Eficiencia (%)	Riesgo de pérdidas de P
Localizada	Elevado a muy elevado (80–95 %)	Bajo
Localizada con fertirrigación	Elevado a muy elevado (80–95 %)	Media

3.2 Otros factores

El riesgo potencial de contaminación de las masas de agua por P puede aumentar exponencialmente cuando se combinan varios de los factores mencionados en las secciones anteriores. La tabla siguiente ayuda a realizar un diagnóstico rápido en el que se puede identificar la presencia o la concurrencia de un conjunto de factores de riesgo. En función del número de factores de riesgo identificados y combinados, el nivel de riesgo de contaminación por P puede clasificarse de ***bajo*** a ***muy alto***.

Factores de riesgo	Factores identificados	Riesgo de contaminación
Suelo de textura gruesa/ligera o fina/pesada (arenoso o arcilloso/limoso-arcilloso)	X	***Elevado***
MO igual o inferior al 2%	X	
pH igual o inferior 6		
P_2O_5 (Égner-Riehm-AL) igual o superior a 200 ppm o P2 O5 (Olsen) igual o superior a 115 ppm	X	
Nivel freático superficial: profundidad igual o inferior a 2 m durante la temporada estival (estación seca)		
Pendiente de la parcela igual o superior al 8 %		
Riego por inundación o escorrentía superficial identificada del agua de riego	X	
Solo compactado: macroporosidade inferior 10%		
Cobertura del suelo: nula o escasa		
Clima con elevadas precipitaciones: con episodios frecuentes de lluvias intensas y concentradas		

Escala del nivel de «Riesgo de contaminación por fósforo»	
Reducido: hasta **2** factores	***Medio:*** **3** factores
Elevado: **4** factores	***Muy elevado:*** Más **5** factores

Nota: La tabla se utiliza a modo de ejemplo y debe adaptarse a la realidad de cada sistema para el autodiagnóstico del riesgo de contaminación de las masas de agua con P.

Buenas prácticas para la protección de las masas de agua
Asegurarse de que el agua de riego se aplique en la parcela con una EA y una UD elevadas
Garantizar que la tasa de infiltración del agua de riego en el suelo sea superior a la tasa de aplicación del agua
El método de riego, el equipo elegido, así como la programación y la gestión del riego, deben adaptarse a las condiciones de la parcela en cuestión (topografía, superficie de la parcela, tipo de suelo, clima de la región y cultivo)
Prever zonas de amortiguación cubiertas de vegetación, que rodeen las líneas de riego, para evitar el vertido de fosfatos en las masas de agua superficiales
Aprovechar las posibilidades que ofrece el fertirrigado para fraccionar la aplicación de los fertilizantes a lo largo del ciclo del cultivo, ajustando las soluciones al estado de fertilidad del suelo y a las necesidades estacionales del cultivo
Utilizar agua de baja salinidad (de calidad considerada satisfactoria para el riego)

Ficha técnica: Gestión del fósforo en la sucesión de cultivos herbáceos

La gestión del fósforo (P) en el suelo es esencial para la productividad de los cultivos herbáceos
y para prevenir la contaminación de los recursos hídricos. El P desempeña un papel fundamental en el desarrollo de las raíces, en la fotosíntesis y en el vigor vegetativo y productivo. Las prácticas descritas en esta ficha se aplican a los cultivos herbáceos en sistemas de rotación de cultivos.

1 Gestión del fósforo en el suelo

Las buenas prácticas en el manejo del fósforo en el suelo son positivas para:

Aspectos importantes a tener en cuenta en la gestión del fósforo en la sucesión de cultivos herbáceos

- Evaluación del estado de fertilidad del suelo y de las necesidades de corrección;
- Protección y conservación del suelo;
- Uso del suelo (sucesión de cultivos, cultivos asociados, rotación de cultivos, cultivos permanentes, cultivos de cobertura), gestión de residuos e intensidad de la Labranza del suelo;
- Tipo de fertilizantes, dosis, épocas y técnicas de aplicación;
- Condiciones climáticas.

1.1 Diagnóstico del estado de fertilidad del suelo

La evaluación del estado de fertilidad del suelo antes de la siembra es fundamental en la sucesión de cultivos herbáceos, ya que permite conocer la disponibilidad de nutrientes y adaptar las prácticas de fertilización a las necesidades de cada cultivo. Un

seguimiento periódico de los indicadores de fertilidad (pH, materia orgánica, macro y micronutrientes) ayuda a optimizar el uso de los factores de producción, a mantener la productividad del sistema y a prevenir desequilibrios nutricionales. Además, contribuye a la conservación de la calidad del suelo a largo plazo, favoreciendo una gestión sostenible de los recursos y reduciendo el riesgo de contaminación de las masas de agua asociado a una fertilización inadecuada. El análisis de los suelos debe realizarse antes de la siembra, en el momento oportuno para llevar a cabo el «balance de fósforo», necesario para elaborar el Plan de Fertilización.
La determinación de la textura del suelo también es importante para comprender el nivel de susceptibilidad a las pérdidas de P. Los suelos de textura gruesa/ligera, pobres en materia orgánica, se erosionan más fácilmente que los suelos de textura fina/pesada y, al tener una elevada permeabilidad al agua, serán más susceptibles a las pérdidas de P por lixiviación. Por lo tanto, los suelos de textura gruesa tenderán a ser menos fértiles en fósforo.

Cómo interpretar los resultados del fósforo en el suelo

Clase	**P_2O_5 - Égner-Riehm (mg/kg)**	**P_2O_5 - (Olsen) (mg/kg)**	**Interpretación**	**Medidas recomendadas**
Muy bajo	≤25	≤18	Disponibilidad de P muy reducida	Aplicar fertilización con fosfatos. Se espera una respuesta muy elevada del cultivo a la fertilización
Bajo	26–50	18–34	Disponibilidad de P reducida	Aplicar fertilización con fosfato. Se espera una respuesta elevada del cultivo a la fertilización
Medio	51–100	35–56	Disponibilidad de P satisfactoria	Aplicar fertilización con fosfato. Se espera una buena respuesta del cultivo a la fertilización
Alta	101–200	57–115	Disponibilidad de P elevada	Reducir o suspender la fertilización con fosfatos, en función de la producción prevista
Muy alto	> 200	>115	Disponibilidad de P muy elevada	Reducir o suspender la fertilización con fosfatos minerales, en función de la producción prevista

Adaptado de Calouro et al. (2022). Manual de fertilización de cultivos, INIAV

Cómo interpretar los resultados del pH($_{H2}$O)

Clase	pH ($_{H2}$O)	Interpretación	Medida recomendada
Muy ácido	≤ 4,5	Toxicidad por Al y Mn; bloqueo de P y Mo	Corregir con encalado (aplicación de caliza)
Ácido	4,6 - 5,5		
Ligeramente ácido	5,6 - 6,5	Mayor disponibilidad de P	No es necesario corregir la reacción del suelo
Neutro	6,6 – 7,5	Máxima disponibilidad de P	No es necesario corregir la reacción del suelo
Ligeramente alcalino	7,6 - 8,5	Inicio de la fijación del P en fosfatos de calcio	No es necesario corregir la reacción del suelo
Alcalino	8,6 – 9,5	Fuerte fijación del P; carencias de Fe, Mn y Zn	Corregir con azufre o MO
Muy alcalino	>9,5		

Adaptado de Calouro *et al*., (2022). Manual de fertilización de cultivos, INIAV

Nota: En suelos con un pH entre 6,0 y 6,8, la disponibilidad de P es máxima y la actividad microbiana es más intensa.

Cómo interpretar los resultados del análisis de materia orgánica ( )

Clase	MO (%)	Impacto	Medida recomendada
Muy bajo	< 1,0	Fósforo orgánico no disponible	Aplicar enmiendas orgánicas para aumentar el contenido de materia orgánica, compuestos, estiércol y lodos mezclados con biomasa estructurante (forestal, maleza, paja, serrín, etc.) y fósforo mineral, si es necesario
Bajo	1,0-2,0	Fósforo orgánico poco disponible	Aplicar correctores orgánicos para aumentar el contenido de materia orgánica y aplicar P mineral, si es necesario
Medio	2,0-3,5	Buena actividad microbiana; disponibilidad media de P orgánico	Aplicar la cantidad necesaria de enmiendas orgánicas para mantener el contenido de materia orgánica y aplicar fósforo mineral, si es necesario
Alto	3,5-5,0	Elevada reserva de fósforo orgánico; la disponibilidad de este nutriente depende de la tasa de mineralización del	Aplicación de cantidades menores de fósforo mineral

		fósforo	
Muy alto	>5,0	Reserva importante de fósforo orgánico; la disponibilidad de este nutriente depende de la tasa de mineralización del fósforo	Controlar los niveles de fósforo asimilable, ya que pueden alcanzar valores elevados, lo que aumenta el riesgo de pérdidas por lixiviación y/o arrastre/erosión. Aplicar únicamente la cantidad mínima indispensable de fósforo mineral.

Adaptado de Calouro et al. (2022). Manual de fertilización de cultivos, INIAV

Ejemplos de combinaciones de factores que condicionan o favorecen la disponibilidad del P

La disponibilidad efectiva del fósforo dependerá de la combinación de tres factores: contenido de fósforo asimilable, pH y contenido de materia orgánica en el suelo

- **pH bajo + P_2O_5 alto** → El P está presente en grandes cantidades, pero bloqueado (no está disponible para las plantas porque se vuelve insoluble cuando el pH es bajo). Realizar un encalado antes de la fertilización con fosfatos;
- **Baja materia orgánica + P_2O_5medio** → Aumentar el contenido de materia orgánica del suelo y, si es necesario, reforzar la aplicación de fósforo mineral.
- **pH 6,0–6,8 + materia orgánica > 2 %** → Condiciones favorables para una mayor disponibilidad del P para las plantas; máxima eficiencia de la fertilización.
- **pH > 7,3 + MO < 1 % + P_2O_5medio o bajo** → Condiciones frecuentes en suelos calcáreos, con el P bloqueado por el calcio procedente de los carbonatos y una escasa reserva de P orgánico. Aumentar la MO y complementar con fertilizantes fosfatados cuando se apliquen otros nutrientes, como nitrógeno o potasio.

1.2 Protección y conservación del suelo

La protección y la conservación del suelo son aspectos fundamentales para garantizar la sostenibilidad de los sistemas de cultivos herbáceos. La adopción de prácticas de gestión adecuadas permite preservar la estructura, la fertilidad y la actividad biológica del suelo, reduciendo los riesgos de erosión, compactación y pérdida de nutrientes. Además, un suelo bien conservado favorece la productividad agrícola, mejora la eficiencia en el uso de los recursos y contribuye a la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a los efectos del cambio climático.

La Labranza del suelo (nula, mínima o reducida) es fundamental para preservar la agregación, mantener la actividad biológica del suelo y evitar las pérdidas de fósforo (P) por erosión, escorrentía superficial y/o lixiviación.

Tipos de labranza

Labranza convencional

Se trata de un sistema de gestión basado en la labranza del suelo a una profundidad de 25-35 cm con volteo de la tierra, seguida de trabajos de preparación del lecho de siembra. Favorece el control mecánico de las malas hierbas, la incorporación de residuos y la preparación homogénea del terreno. Sin embargo, su aplicación continuada puede aumentar el riesgo de erosión, compactación en profundidad, pérdida de materia orgánica y alteración de la estructura y la actividad biológica del suelo.

Ventajas

- Facilita la preparación del lecho de siembra, uniformizando la superficie del terreno;
- Permite un buen control mecánico inmediato de las malas hierbas, aunque no reduce su incidencia;
- Incorpora directamente los residuos y los fertilizantes al suelo;
- Favorece el calentamiento inicial del suelo.

Desventajas

- Riesgo de fragmentación excesiva del suelo por la destrucción de los agregados cuando el contenido en materia orgánica y/o arcilla es bajo;
- Mayor riesgo de erosión y pérdida de suelo;
- Reducción del contenido de materia orgánica, ya que intensifica la mineralización;
- Mayor consumo de combustible y costes operativos;
- Posible compactación de capas profundas y formación de «capa compacta»;
- Alteración y posible reducción de la biota del suelo, con un perjuicio especial para las micorrizas, que son esenciales para la asimilación del fósforo por parte de las plantas.

Labranza reducida o mínima

Este tipo de Labranza consiste en reducir el número, la profundidad o la intensidad de las operaciones de Labranza en comparación con la Labranza convencional. Se trata de un sistema que busca mantener las condiciones adecuadas para el establecimiento del cultivo, minimizando la alteración del suelo. Por ello, evita el volteo de la tierra, dando prioridad a la Labranza vertical (con aperos de dientes que cortan, pero no mezclan las capas del suelo), garantizando el mantenimiento de los residuos del cultivo anterior en la capa superficial del suelo. Esta modalidad de labranza del suelo puede limitarse al mínimo

número de pasadas de aperos necesarias para el establecimiento del cultivo, lo que contribuye a reducir los costes de producción, conservar la humedad y la biota del suelo, disminuir el riesgo de erosión y favorecer la acumulación de materia orgánica y la estabilidad estructural del suelo.

Ventajas

- Reduce los costes de la labranza y el consumo de combustible;
- Conserva la humedad, la estructura y la biota del suelo. Por lo tanto, también preserva los hongos micorrízicos;
- Reduce la erosión. Por lo tanto, también reduce la pérdida de nutrientes, en particular de fósforo (P);
- Favorece la acumulación de materia orgánica, que es esencial para una buena agregación y el mantenimiento de la biodiversidad del suelo.

Desventajas

- Puede requerir un mayor uso de herbicidas para el control de las malas hierbas;
- Posible aumento de la compactación superficial del suelo cuando la cubierta vegetal es escasa o inexistente;
- Necesidad de aperos adaptados y de que el operador de la maquinaria esté especializado.

Labranza en franjas

Esta técnica consiste en labrar únicamente la franja o línea en la que se va a plantar el cultivo. Permite reducir el número, la profundidad o la intensidad de las operaciones de labranza en comparación con la labranza convencional, manteniendo en el suelo gran parte de los residuos del cultivo anterior. Su objetivo es mantener las condiciones adecuadas para el establecimiento del cultivo, minimizando la alteración del suelo. Contribuye a reducir los costes de producción, conservar la humedad, disminuir el riesgo de erosión y favorecer la acumulación de materia orgánica y la estabilidad estructural del suelo.

Ventajas

- Combina la conservación del suelo con la creación de buenas condiciones para la siembra;
- Reduce la erosión, las pérdidas de agua y de nutrientes como el fósforo;
- Preserva la estructura y la biota del suelo;
- Permite la aplicación localizada de fertilizantes;
- Mantiene una elevada cobertura vegetal en la superficie, lo que favorece la acumulación de materia orgánica.

Desventajas

- Requiere maquinaria específica y una mayor precisión en las operaciones. Por lo tanto, los operadores de maquinaria deben contar con formación especializada;
- El manejo y el mantenimiento de la maquinaria son más complejos;
- Puede verse limitado en suelos muy húmedos o con abundantes residuos.

Labranza cero o siembra directa

Se trata de un sistema en el que no se realizan trabajos de preparación del suelo antes de la siembra, manteniendo los residuos del cultivo anterior en la superficie, a modo de cubr muerta. Las semillas se colocan directamente en hoyos o surcos en la línea, sobre los residuos del cultivo anterior, en la superficie del suelo. Esta práctica preserva totalmente la estructura del suelo, evita la erosión, proporciona un mayor confort térmico e hídrico, reduce la incidencia de malas hierbas, favorece la acumulación de materia orgánica y mejora la actividad biológica. Además, contribuye a aumentar la capacidad de retención de agua y la resiliencia del sistema agrícola frente a condiciones climáticas adversas.

Ventajas

- Máxima protección contra la erosión y reducción de la evaporación directa;
- Aumenta el contenido de materia orgánica y la actividad biológica, esencial para la micorrización de las raíces y una mejor asimilación del fósforo;
- El mantenimiento de la cubierta vegetal aumenta la infiltración y el almacenamiento de agua en el suelo, reduce sustancialmente la escorrentía superficial y minimiza las pérdidas de fósforo hacia los cursos de agua;
- Reduce los costes de la labranza;
- Reduce las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al uso de maquinaria agrícola en la labranza del suelo.

Desventajas

- Mayor dependencia del control químico de las malas hierbas;
- Puede retrasar el calentamiento del suelo en primavera;
- Requiere experiencia técnica y maquinaria adecuada;
- Posible estratificación de nutrientes en la superficie del suelo

Labranza mínima/reducida

Labranza en franjas

Labranza cero o siembra directa

Resumen de los efectos de ***los tipos de Labranza*** sobre el fósforo en el suelo y en el agua

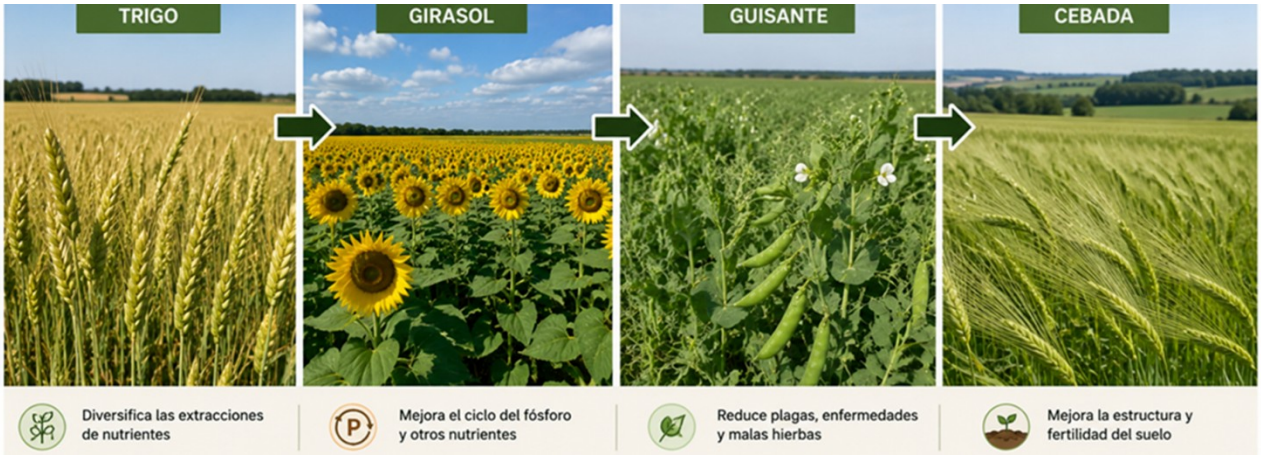
Tipo de Labranza	Efecto del fósforo en el suelo	Efecto del fósforo en el agua
Labranza convencional	Favorece la mezcla y la incorporación del fósforo en el perfil del suelo, reduciendo su acumulación en la superficie. Sin embargo, puede acelerar la pérdida de materia orgánica	Aumenta el riesgo de transporte de fósforo particulado debido a la erosión y a la escorrentía superficial, especialmente en parcelas con pendiente o con escasa cobertura vegetal. Produce una mayor cantidad de sedimentos, lo que aumenta la turbidez del agua superficial
Labranza mínima/reducida	Tiende a concentrar el P en los primeros centímetros del suelo debido a una menor mezcla de los horizontes, lo que favorece su disponibilidad para las raíces superficiales. Preserva la agregación del suelo y reduce la perturbación de los organismos del suelo.	Reduce las pérdidas de P asociadas a la erosión, manteniendo una mayor cobertura del suelo, aunque puede aumentar el riesgo de pérdidas de P disuelto en caso de que se produzca una acumulación superficial.
Labranza en franjas	Permite una distribución localizada del fósforo en la línea de cultivo, mejorando su aprovechamiento por parte de las plantas y manteniendo la estructura del suelo en las zonas no labradas.	Reduce significativamente las pérdidas de fósforo por erosión, al conservar la cubierta vegetal en gran parte de la superficie, lo que disminuye el transporte de sedimentos hacia las masas de agua.
Labranza nula	Favorece la acumulación de P en la capa superficial del	Minimiza las pérdidas de fósforo porque favorece la agregación superficial del

	suelo; mejora la estabilidad estructural y la actividad biológica, lo que contribuye a una mayor eficiencia en el reciclaje de nutrientes.	suelo y la infiltración del agua; menores pérdidas de fósforo particulado (fósforo adsorbido), preservando la calidad original de las masas de agua

1.3 Uso del suelo y gestión de residuos

Rotación de cultivos

La rotación de cultivos constituye una práctica fundamental para la gestión sostenible del suelo y de los residuos agrícolas. La alternancia de especies, con diferentes necesidades nutricionales y diferentes sistemas radiculares, favorece un uso más eficiente de los nutrientes, incluido el fósforo, mejorando su aprovechamiento y reduciendo el riesgo de acumulación o agotamiento en el suelo. Además, la diversidad de residuos vegetales protege la superficie del suelo durante la mayor parte del año y contribuye al reciclaje de nutrientes, favoreciendo la reincorporación del fósforo al sistema. Por ejemplo, la rotación **trigo – cebada – girasol** ayuda a mantener la fertilidad del suelo, a reducir las pérdidas de nutrientes y a mejorar la sostenibilidad de los sistemas de cultivos herbáceos.



Cultivos asociados

Los cultivos asociados consisten en el cultivo simultáneo de dos o más especies en una misma parcela para mejorar la eficiencia en el uso del suelo y aprovechar de forma complementaria los recursos disponibles, como el agua, la luz y los nutrientes. En los sistemas herbáceos, la combinación de especies con diferentes arquitecturas radiculares y foliares favorece un aprovechamiento más completo del perfil del suelo y de la radiación solar, mejorando la Labranza y la absorción de nutrientes como el fósforo. Además, contribuyen a aumentar la biodiversidad, reducir la presión de las malas hierbas y mejorar la cobertura y la protección del suelo frente a la erosión. El cultivo asociado debe dar prioridad a la inclusión de leguminosas, que, además de capturar el nitrógeno

atmosférico, solubilizan formas de fósforo fijadas en el suelo gracias a su actividad rizosférica, reduciendo así la necesidad de fertilización mineral en el ciclo siguiente. A modo de ejemplo, cabe citar la asociación de una leguminosa con un cereal (soja/cebada, alfalfa/avena, entre otros).

Cultivos de cobertura

Los cultivos de cobertura desempeñan un papel fundamental en la protección y conservación del suelo en los sistemas de cultivos herbáceos. Su implantación entre dos cultivos principales o durante períodos de barbecho ayuda a reducir la erosión, a mejorar la estructura del suelo, a aumentar el contenido de materia orgánica y a favorecer el reciclaje de nutrientes. Además, contribuyen a reducir las pérdidas de nutrientes por escorrentía superficial —como es el caso del fósforo— y por lixiviación, mejorando la sostenibilidad del sistema productivo. Los cultivos de cobertura deben tener un sistema radicular abundante que forme rápidamente una cubierta vegetal bien desarrollada, con el fin de garantizar la protección del suelo durante el período de mayor riesgo de erosión hídrica (otoño-invierno). Los residuos de estos cultivos deben permanecer en el suelo tras la cosecha, ya sea en la superficie o ligeramente incorporados. Algunos ejemplos de cultivos de cobertura típicos son el nabo forrajero, el centeno, la avena, la haba y la veza.

Buenas prácticas recomendadas para la gestión del suelo
Dar prioridad a la rotación de cultivos que incluya especies con diferentes necesidades nutricionales y sistemas radiculares y, siempre que sea posible, cultivadas en asociación en la parcela, para mejorar el aprovechamiento de los nutrientes y favorecer la estructura y la fertilidad del suelo, evitando las pérdidas de fósforo asimilable residual en el suelo, dejado por el cultivo anterior.
Instalar cultivos de cobertura para proteger el suelo contra la erosión y favorecer el reciclaje de nutrientes.

Reducir la intensidad de las labranzas mediante la labranza mínima, la labranza en franjas o la siembra directa, minimizando así la degradación estructural del suelo.
Realizar la labranza del suelo únicamente durante la temporada de cultivo para evitar la compactación y la degradación de la estructura del suelo.
Dejar los rastrojos de los cultivos sucesivos en la parcela, en la superficie o ligeramente incorporados al suelo, para aumentar el contenido de materia orgánica del suelo, como fuente de nutrientes para la biodiversidad del suelo y para el cultivo que se vaya a plantar a continuación, y para retener la humedad.
Aplicar una fertilización variable basada en análisis del suelo y herramientas de agricultura de precisión, ajustando las dosis de nutrientes, como el fósforo (P), a las necesidades específicas de cada zona de la parcela, método probado y validado en el marco del proyecto Phos4Cycle.
Incorporar el biocarbón como enmienda del suelo para mejorar la retención de nutrientes, aumentar la estabilidad de la materia orgánica y favorecer la disponibilidad de fósforo y otros elementos esenciales, lo cual también se ha probado y validado en el marco del proyecto Phos4Cycle.
Gestionar adecuadamente la fertilización con fosfatos, evitando aplicaciones excesivas que puedan aumentar el riesgo de contaminación difusa.

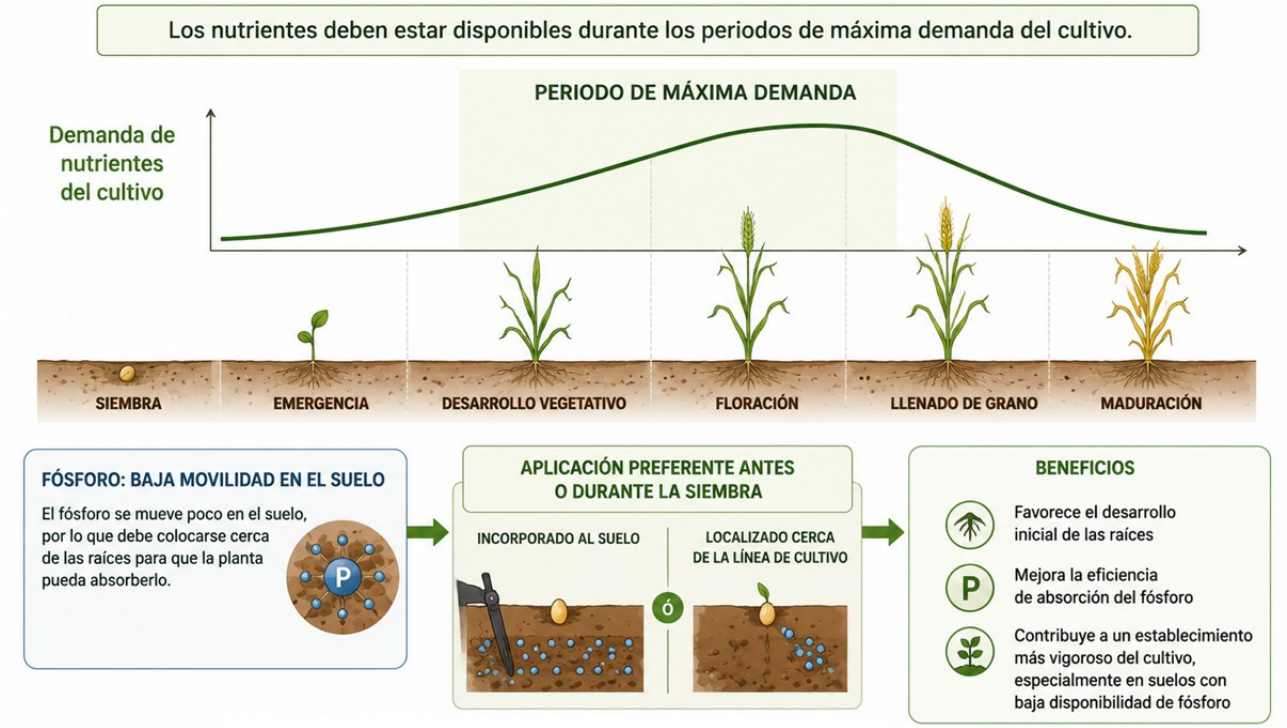
2 Fertilización

2.1 - Principios generales:

- Adaptar la fertilización a las necesidades del cultivo para obtener la producción esperada y de acuerdo con la clase de fertilidad del suelo en P, recurriendo a análisis del suelo y a estimaciones de extracción para ajustar las dosis de P que se deben aplicar;
- Aplicar los nutrientes en el momento y de la forma más adecuados para maximizar la eficiencia de su utilización, favoreciendo la disponibilidad de P durante las fases de mayor demanda del cultivo y minimizando las pérdidas al medio ambiente.
- Realizar un balance de fósforo que tenga en cuenta las necesidades del cultivo en función de la producción prevista, la disponibilidad del nutriente en el suelo y las pérdidas de fósforo fuera del sistema suelo-planta. En caso de que los contenidos de fósforo en el suelo sean medios o elevados, reponer únicamente la cantidad de fósforo exportada por el cultivo.
- A menudo, el análisis del suelo va acompañado de recomendaciones de fertilización que tienen en cuenta los aspectos mencionados anteriormente.

2.2 - Época de aplicación de los fertilizantes

En la sucesión de cultivos herbáceos, la fertilización debe realizarse de manera que los nutrientes estén disponibles durante los períodos de mayor necesidad del cultivo. En el caso del fósforo, debido a su baja movilidad en el suelo, la aplicación debe realizarse antes o durante la siembra, incorporándolo al suelo o colocándolo junto a la línea de cultivo para favorecer el desarrollo inicial de las raíces. Esta estrategia mejora la eficiencia de absorción del fósforo y contribuye a un establecimiento más vigoroso del cultivo, especialmente en suelos con baja disponibilidad de este nutriente.



2.3 - Técnica de aplicación de los fertilizantes

Localizada: La aplicación de P en la hilera es la más recomendada, ya que concentra el nutriente cerca de las raíces, lo cual es especialmente importante en el caso de suelos ácidos o alcalinos que tienden a fijar o insolubilizar el P, o cuando el suelo no se remueve;

A granel: La aplicación de fósforo a granel, con posterior incorporación, puede utilizarse, por ejemplo, cuando es necesario aportar grandes cantidades de fósforo al suelo;

Fertirrigación: Cuando el cultivo se riega, se puede aprovechar esta circunstancia para disolver los fertilizantes fosfatados en el agua de riego y distribuirlos así de forma más uniforme, con la ventaja de una asimilación más rápida por parte del cultivo. Se aplica fácilmente con sistemas de riego localizado y con sistemas de aspersión.

- En la aplicación superficial (a voleo), el fertilizante se distribuye uniformemente sobre la superficie del suelo. Puede reducir la eficiencia en el aprovechamiento del fósforo si no se incorpora posteriormente al suelo.
- En la aplicación localizada, el fertilizante se deposita junto a la línea de siembra o a las raíces del cultivo. Se recomienda para el fósforo, ya que mejora su disponibilidad y absorción durante las primeras fases de desarrollo del cultivo.
- Cuando se incorpora al suelo, el fertilizante se mezcla con la tierra gracias a las labranzas realizadas antes o durante la siembra, lo que favorece el contacto con las raíces y reduce las pérdidas por escorrentía superficial.
- La fertirrigación, que consiste en la aplicación de nutrientes disueltos en el agua de riego, se utiliza normalmente en determinados sistemas de cultivos herbáceos de regadío.

2.4 - Tipos de fertilizantes fosfatados

Fertilizantes minerales: los superfosfatos presentan prácticamente todo el P en formas fácilmente solubles en agua. La forma granulada permite una mayor homogeneidad en la distribución sobre el terreno, lo que permite minimizar las reacciones de retención del nutriente en el suelo;

Fertilizantes orgánicos y organominerales: la liberación de las formas de fósforo orgánico es relativamente lenta y progresiva, por lo que se recomiendan para aplicaciones de fondo;

Correctores orgánicos: en los planes de fertilización es imprescindible tener en cuenta el aporte de fósforo de los diferentes correctores orgánicos que puedan aplicarse al suelo (por ejemplo, estiércol, purín, lodos de depuración, compost agrícola y otros).

En los cultivos herbáceos se utilizan principalmente abonos minerales, que aportan nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio en formas rápidamente disponibles. También se utilizan abonos orgánicos o abonos organominerales, combinando estos últimos con fuentes minerales y orgánicas para mejorar la eficiencia de la fertilización. Además, pueden utilizarse correctores orgánicos, como el estiércol o el compost estabilizado, y el biocarbón, destinados a mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, favoreciendo la retención de agua, los nutrientes y la actividad microbiana.

⚠ Puntos Críticos

- **Dosis máxima de nitrógeno de origen orgánico**: En las zonas vulnerables a la contaminación por nitratos (ZVN), la aplicación máxima permitida de N de origen orgánico es de 170 kg N/ha/año (Directiva 91/676/CEE del Consejo). Este límite condiciona

indirectamente la cantidad de P aplicada, ya que, si tomamos como referencia el estiércol bovino, las 170 unidades de N orgánico corresponden a una aplicación máxima de aproximadamente 70 kg de P_2O_5/ha/año a través de los correctores orgánicos.

- **Análisis del efluente**: Conocer la concentración de P total del efluente antes de la aplicación; calcular el balance de P para aplicar solo lo estrictamente necesario para obtener las producciones que se pueden esperar de forma realista.
- **Época y condiciones de aplicación**: Evitar la aplicación de fertilizantes en suelos saturados, con una pendiente superior al 8 % o antes de una precipitación prevista y, en las ZVN, garantizar una franja de protección de 10–50 m con respecto a las líneas de agua.

Buenas prácticas recomendadas en la gestión de la fertilización
Realizar análisis periódicos del suelo para ajustar las aplicaciones de nutrientes a las necesidades reales del sistema de cultivo.
Planificar la fertilización teniendo en cuenta el balance de nutrientes de toda la rotación de cultivos, especialmente las entradas y salidas de P.
Combinar fertilizantes minerales y orgánicos para optimizar el aporte de nutrientes y mantener la fertilidad del suelo.
Evaluar el uso de biocarbón como enmienda para mejorar la retención de nutrientes, aumentar la eficiencia del fósforo y promover la salud del suelo, de acuerdo con el enfoque aplicado en el proyecto Phos4Cycle.
Implementar la fertilización variable mediante herramientas de agricultura de precisión para adaptar las dosis a la variabilidad espacial de la parcela, de acuerdo con el enfoque aplicado en el proyecto Phos4Cycle.
Ajustar las aplicaciones de fertilizantes orgánicos a los límites establecidos por la legislación vigente, especialmente en zonas vulnerables a la contaminación por nitratos.
Llevar registros de fertilización y producción para evaluar la eficiencia en el uso de los nutrientes y facilitar la toma de decisiones.
Integrar la fertilización con otras prácticas de conservación del suelo, como la rotación de cultivos y los cultivos de cobertura, para mejorar el reciclaje de nutrientes.

3 Protección de las masas de agua

3.1 - Gestión del riego

La protección de las masas de agua superficiales y subterráneas es fundamental para garantizar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y la conservación de los ecosistemas acuáticos. Sin embargo, el agua es el agente de difusión del fósforo (P) por lixiviación o por escorrentía superficial, tanto para el P disuelto en el agua como para el P en forma de partículas, tras su insolubilización. Aunque el P presenta una movilidad limitada en el

suelo, una acumulación prolongada puede aumentar el riesgo de contaminación difusa. El impacto en la calidad del agua se manifiesta a través de la eutrofización de las masas de agua superficiales y la contaminación de los acuíferos. Por ello, es fundamental proteger los cursos de agua y garantizar una buena gestión del agua de riego en las parcelas cultivadas. La gestión eficiente del riego minimiza los riesgos de contaminación por fósforo de las masas de agua superficiales y/o subterráneas.
Una buena gestión del riego implica evitar el encharcamiento por exceso de agua, así como evitar regar durante las horas de mayor calor. Sin embargo, es necesario asegurarse de que el suelo se encuentre en condiciones óptimas de humedad para las plantas antes de que lleguen las horas más calurosas del día.

Tipos de riego

Riego localizado (goteo, microaspersión y subterráneo)

El riego localizado consiste en sistemas que aplican el agua de forma localizada junto a la raíz, a baja presión, minimizando las pérdidas por evaporación, escorrentía superficial y percolación profunda. El riego puede realizarse mediante emisores de gotas (por goteo) situados junto a la planta o a su alrededor (en la zona de distribución radicular), mediante una cinta de microaspersión que permite una línea continua humedecida, mediante microaspersores o mediante difusores enterrados cerca de las raíces, en el caso del riego subterráneo. Cualquiera de estas modalidades limita la zona de humectación cercana a las raíces. En suelos de textura media a pesada, los emisores de agua pueden colocarse más separados, ya que forman una zona húmeda más amplia. Si los suelos son de textura ligera, los emisores deberán estar más próximos y ser más numerosos, ya que la zona húmeda se desarrolla más en profundidad que en anchura. Estos sistemas permiten mejorar la eficiencia en el uso del agua y los fertilizantes mediante el fertirrigado, reduciendo el riesgo de pérdidas de fósforo (P) y otros nutrientes hacia las masas de agua superficiales y subterráneas. Aunque su uso es más frecuente en cultivos leñosos y hortícolas, su aplicación ha ido aumentando en cultivos herbáceos de alto valor o en condiciones de escasez hídrica, como el maíz o algunas rotaciones de regadío intensivo.

Eficiencia de riego: 80–95 %

Ventajas

- Elevada eficiencia de riego y menor evaporación directa;
- Mayor eficiencia en el uso del agua y los fertilizantes en la parcela, con un menor consumo energético;
- Menor riesgo de lixiviación y de escorrentía superficial del agua, menor riesgo de arrastre del fósforo;
- Fácil adaptación al fertirrigado;
- Reduce la aparición de malas hierbas entre hileras.

Desventajas

- Mayor coste de instalación y mantenimiento, especialmente en el caso de los sistemas totalmente enterrados;
- Requiere sistemas de filtrado y control;
- Necesita un mantenimiento regular para evitar atascos en los emisores, sobre todo en el caso de aguas ricas en carbonatos y bicarbonatos;
- Requiere mantener una presión mínima de funcionamiento y compensar los caudales a lo largo de la pendiente en terrenos accidentados;
- Menor adaptación a algunas explotaciones extensivas de cultivos herbáceos.

Riego por aspersión

Los sistemas de riego por aspersión se utilizan ampliamente para el cultivo de especies herbáceas de regadío, como el maíz, la alfalfa, los cereales de invierno, la remolacha o los cultivos forrajeros. Estos sistemas distribuyen el agua en forma de lluvia a través de aspersores fijos o móviles, incluyendo modalidades como la de cobertura total (aspersores dehesas en rampas), las rampas giratorias (conocidas como pivotes centrales) y los equipos de avance frontal (rampas lineales frontales y cañones de riego). El riego por aspersión en el maíz y en la mayoría de los cultivos herbáceos de regadío deberá garantizar una cobertura completa de la sup e regada para lograr una mayor uniformidad de la producción en la parcela. Es decir, tanto en el riego realizado mediante aspersores dehesas en rampas, como en el realizado mediante una rampa giratoria o lineal/frontal, o incluso en el realizado mediante un cañón de riego con desenrollador, será necesario garantizar la misma dotación de riego en todos los puntos de la parcela para que el sistema tenga una elevada Eficiencia de Aplicación (EA) y una elevada uniformidad de distribución (UD), lo que garantiza un frente de agua infiltrada uniforme, con una progresión descendente en el interior del suelo. Este tipo de riego es bastante habitual en cultivos de cereales anuales y/o hortalizas, y funciona con alta presión y caudal. Se trata de

cultivos más bajos, anuales y en hileras, características que facilitan la adaptación de los sistemas de riego por aspersión de cobertura completa. La superposición perfecta para el riego deseado se consigue instalando los aspersores en las rampas, con una separación igual a su alcance. Por otra parte, una gestión inadecuada o unos proyectos mal dimensionados de estos sistemas de riego pueden favorecer elevadas pérdidas de agua por evaporación, escorrentía superficial y arrastre de nutrientes. Por ello, es fundamental ajustar las dosis y la frecuencia de riego a las necesidades del cultivo y a las condiciones edafoclimáticas, contribuyendo así a reducir el riesgo de transporte de fósforo a las masas de agua superficiales y subterráneas.

Eficiencia de riego: 65–85 %

Ventajas

- Adecuado para extensas superficies de cultivos de tamaño pequeño a mediano (cultivos herbáceos, hortalizas, jardines, etc.);
- Una vez garantizada la distancia adecuada entre los aspersores, la cobertura completa garantiza una buena uniformidad en la distribución del frente de humectación;
- La buena uniformidad en la distribución del frente de humectación lineal garantiza un buen desarrollo lateral de las raíces en todo el volumen de suelo humedecido también en el espacio entre hileras, lo que aumenta la cantidad de nutrientes que la planta puede absorber;
- Gran diversidad de sistemas que permiten una fácil adaptación a diversas geometrías y topografías de las parcelas;
- Se adapta a diferentes tipos de suelo y cultivos;
- Permite la mecanización y la automatización de las operaciones de riego.

Desventajas

- Sistemas de riego que funcionan a presión media y alta, lo que supone un mayor consumo energético;
- Mayores pérdidas por evaporación directa en días calurosos y ventosos;
- Distorsión del modelo ideal de superposición a partir de velocidades de viento bajas (a partir de 5 m/s o 18 km/h);
- Puede favorecer el desarrollo de una mayor cantidad de malas hierbas;
- Dificultad para adaptarse a cultivos permanentes, como huertos frutales y viñedos;
- Riesgo de escorrentía superficial si la pluviometría no se ajusta a las tasas de infiltración del suelo, lo que puede favorecer el transporte de nutrientes, incluido el fósforo (P), hacia las masas de agua.

Riego por gravedad (o riego de superficie)

El riego por gravedad, también conocido como riego de superficie, es la práctica más antigua de riego de cultivos agrícolas y consiste en distribuir el agua por la parcela, aprovechando la pendiente natural del terreno o la inclinación que se puede dar con precisión a la superficie de la parcela, lo que permite que el agua avance por inundación o a través de surcos que la conducen. Aprovecha al máximo la gravedad para reducir la dependencia de la energía. Es uno de los sistemas de riego más antiguos para los cultivos herbáceos, especialmente en zonas con disponibilidad de agua y regadíos tradicionales. En sus formas más o menos automatizadas, existen varios tipos de riego por gravedad, que varían según el principio o la técnica utilizada para hacer que el agua fluya superficialmente por la parcela que se va a regar. Puede realizarse mediante surcos, en bancales, en franjas, en cuencas o incluso mediante el riego de lima, que consiste en una fina lámina de agua que discurre por las terrazas de las laderas para evitar las heladas y garantizar un pastoreo permanente a lo largo del año. La eficiencia del riego y la uniformidad de la distribución pueden presentar grandes variaciones, ya que dependen en gran medida del nivel de automatización y de la adecuación del sistema de riego al tipo de suelos y cultivos.

Eficiencia del riego: 40-70 %

Ventajas

- Bajo coste de instalación y mantenimiento;
- Tecnología accesible y fácil de adaptar, con un bajo consumo energético;
- Humedece un gran volumen de suelo, maximizando el aprovechamiento de los nutrientes del suelo cuando la EA y la UD son elevadas;
- Adecuado para grandes superficies y zonas con infraestructuras de riego tradicionales
- Más adecuado para suelos de textura fina o suelos pesados, lo que permite establecer intervalos más largos entre riegos, ya que los suelos de textura más fina almacenan más agua y pueden admitir mayores dosis de riego, reduciendo así la frecuencia de los mismos.

Desventajas

- La eficiencia del riego y la uniformidad de la distribución pueden ser bajas si la parcela no está nivelada, los surcos y las zanjas no están correctamente formados y el sistema no está automatizado;
- Los sistemas automatizados se adaptan con dificultad a parcelas accidentadas, por lo que requieren terrenos con una pendiente suave o llanos;
- Si la EA y la UD son bajas, el riesgo potencial de pérdida de nutrientes y, en particular, de contaminación de las masas de agua superficiales y subterráneas con P, es muy elevado, ya que las dosis de cada riego son necesariamente elevadas para que el escurrimiento del agua pueda progresar favorablemente hasta el final de la parcela;
- Dificultad para lograr una distribución uniforme del agua;
- Alto riesgo de arrastre de suelo, fósforo y otros nutrientes hacia las masas de agua.

Eficiencia del riego frente al riesgo de pérdida de P

Sistema de riego	Eficiencia (%)	Riesgo de pérdidas de fósforo
Localizada	Elevada a muy elevada (80–95 %)	Bajo
Localizada con fertirrigación	Elevado a muy elevado (80–95 %)	Medio
Riego por aspersión	De medio a alto (65–85 %)	Media
Gravedad	Baja a media (40–70 %)	Elevada

3.2 – Otros factores

El riesgo potencial de contaminación de las masas de agua por P puede aumentar exponencialmente cuando se combinan varios de los factores mencionados en las secciones anteriores. La tabla siguiente ayuda a realizar un diagnóstico rápido en el que se puede identificar la presencia o la concurrencia de un conjunto de factores de riesgo. En función del número de factores de riesgo identificados y combinados, el nivel de riesgo de contaminación por P puede clasificarse de ***bajo*** a ***muy alto***.

Factores de riesgo	Factores identificados	Riesgo de contaminación
Suelo de textura gruesa/ligera o fina/pesada (arenoso o arcilloso/limoso-arcilloso)	X	***Elevado***
MO igual o inferior al 2%	X	
pH igual o inferior 6		
P_2O_5 (Égner-Riehm-AL) igual o superior a 200 ppm o P2 O5 (Olsen) igual o superior a 115 ppm	X	
Nivel freático superficial: profundidad igual o inferior a 2 m durante la temporada estival (estación seca)		
Pendiente de la parcela igual o superior al 8 %		
Riego por inundación o escorrentía superficial identificada del agua de riego	X	
Solo compactado: macroporosidade inferior 10%		
Cobertura del suelo: nula o escasa		
Clima con elevadas precipitaciones: con episodios frecuentes de lluvias intensas y concentradas		

Escala del nivel de «Riesgo de contaminación por fósforo»	
Reducido: hasta **2** factores	***Medio:*** **3** factores
Elevado: **4** factores	***Muy elevado:*** Más **5** factores

Nota: La tabla se utiliza a modo de ejemplo y debe adaptarse a la realidad de cada sistema para el autodiagnóstico del riesgo de contaminación de las masas de agua con P.

Buenas prácticas recomendadas para la protección de las masas de agua
Optimizar el riego asegurándose de que el agua se aplique en la parcela con una EA y una UD elevadas
Garantizar que la tasa de infiltración del agua de riego en el suelo sea superior a la tasa de aplicación del agua
El método de riego, el equipo elegido, así como la programación y la gestión del riego, deben adaptarse a las condiciones de la parcela en cuestión (topografía, superficie de la parcela, tipo de suelo, clima de la región y cultivo)
Ajustar las dosis de fertilización, especialmente de fósforo (P), a las necesidades reales de los cultivos, mediante análisis de suelo y planes de fertilización.
Aprovechar las posibilidades que ofrece el fertirrigado para fraccionar la aplicación de los fertilizantes a lo largo del ciclo del cultivo, ajustando las soluciones al estado de fertilidad del suelo y a las necesidades estacionales del cultivo
Mantener franjas de protección o zonas de amortiguación con vegetación junto a los cursos de agua para reducir la arrastre de sedimentos y nutrientes
Implementar cultivos de cobertura y rotaciones o sucesiones adecuadas que favorezcan la protección del suelo y reduzcan las pérdidas de fósforo por erosión y escorrentía superficial.
Evitar la aplicación de fertilizantes antes de episodios de lluvias intensas o en suelos saturados, reduciendo así el riesgo de pérdidas de fósforo y de contaminación difusa.

Ficha técnica: Gestión del fósforo en el dehesa

El dehesa mediterráneo presenta un déficit estructural de fósforo asimilable (P_2O_5). Las buenas prácticas de gestión del suelo son cruciales para optimizar este recurso limitante, minimizando la escorrentía superficial y la contaminación difusa en la subcuenca funcional. Una gestión regenerativa aumenta la materia orgánica, estabiliza los agregados del suelo y maximiza la infiltración y el almacenamiento de agua en el suelo. Esto no solo atenúa la erosión, sino que también activa los ciclos biogeoquímicos, mejorando la resiliencia productiva del binomio «pastizal-encina» en el marco del pastoreo extensivo de ovejas, lo que garantiza la viabilidad económica y la sostenibilidad de este ecosistema protegido.

1 Gestión del fósforo en el suelo

Las buenas prácticas en el manejo del fósforo en el suelo son positivas para:

Aspectos importantes a tener en cuenta en la gestión del fósforo en los dehesas

- Evaluación del estado de fertilidad del suelo y de las necesidades de corrección;
- Cartografía de la conductividad eléctrica del suelo para la delimitación técnica de los 15 puntos de muestreo homogéneo del suelo y del agua;
- Identificación y delimitación de subcuencas funcionales como unidades de escala hidrológica y topográfica para monitorizar la dinámica del fósforo asociada a la escorrentía superficial;
- Delimitación de subparcelas, para garantizar una distribución homogénea de los excrementos ovinos y evitar lugares de reposo fijos;
- Ajuste dinámico de la carga ganadera instantánea y de los períodos de descanso del pastizal, para preservar una cubierta vegetal permanente que reduzca la erosión en las laderas.

1.1 Diagnóstico del estado de fertilidad del suelo

La evaluación de la fertilidad del suelo mediante análisis químicos y mapas de conductividad eléctrica constituye la base científica para una fertilización de precisión en áreas tan extensas como las del sistema de dehesa. Permite identificar la diversidad de parcelas de suelo y las diferencias de fertilidad entre ellas, cuantificar el fósforo asimilable y los factores que pueden limitar la eficiencia en el aprovechamiento del fósforo por parte de los pastos, tales como el pH y el contenido en materia orgánica. Este diagnóstico es esencial como base para la elaboración de los planes de fertilización y para aumentar la eficiencia en el uso de los fertilizantes fosfatados. La reducida eficacia en la absorción del fósforo por parte de los pastos se debe a la precipitación del fósforo en el suelo en formas insolubilizadas con metales, cuando el pH del suelo es bajo, o con calcio, cuando el pH del suelo es elevado. La acumulación concomitante de P en el suelo que no ha sido absorbido por las plantas favorece la contaminación difusa de este nutriente a través del arrastre por la erosión hídrica del suelo y/o la lixiviación. Conocer el estado real del suelo optimiza los costes de los factores de producción, garantiza la viabilidad de la cría extensiva de ovinos y evita desequilibrios ecológicos transnacionales.

Cómo interpretar los resultados del fósforo en el suelo

Clase	P_2O_5 - Égner-Riehm (mg/kg)	P_2O_5 - (Olsen) (mg/kg)	Interpretación	Medidas recomendadas
Muy bajo	≤25	≤18	Deficiencia crítica. El contenido de fósforo en el suelo limita la productividad del pastizal.	Concentrar el ganado bajo un sistema de gestión holística (alta carga instantánea) para aportar fósforo orgánico lábil a través de la orina y las heces depositadas.
Bajo	26–50	18–34	Déficit moderado típico de los pastos de Extremadura.	Dividir en subparcelas para favorecer un pastoreo uniforme y una deposición homogénea de nutrientes sin tener que recurrir a fertilizantes sintéticos.
Medio	51–100	35–56	Nivel óptimo y en equilibrio para el ecosistema del	Aplicar el plan de rotación holístico estándar, respetando los períodos de descanso para

			dehesa.	mantener este estado biológico.
Alto	101–200	57–115	Nivel elevado. Riesgo de erosión en las laderas si hay suelo al descubierto.	Reducir el tiempo de permanencia del ganado en la subparcela y aumentar la densidad de pastoreo mediante períodos de descanso del pastoreo.
Muy alto	> 200	>115	Saturación local de fósforo. Es probable que se produzca en antiguos lugares de pastoreo de la «gestión tradicional»	Exclusión temporal del ganado y recuperación del exceso de P mediante una cubierta vegetal que extraiga o acumule P de forma especial.

¿Cómo interpretar los resultados del $pH_{(H2(O))}$?

Clase	**pH (H_2 O)**	**Interpretación**	**Medida recomendada**
Muy ácido	≤ 4,5	El fósforo está fuertemente fijado por el aluminio y el hierro. Suelos graníticos típicos con elevada toxicidad potencial y bloqueo de los fosfatos.	Estimular la biología del suelo mediante el pastoreo rotativo con una carga instantánea elevada. La capa de mantilla generada y el pisoteo atenúan la acidez y liberan fósforo. Complementar con correctores dolomíticos para aumentar el contenido en magnesio.
Ácido	4,6 - 5,5		
Poco ácido	5,6 - 6,5	Intervalo ideal para el pastoreo; buena disponibilidad de P.	Potenciar las leguminosas espontáneas mediante períodos rigurosos de reposo del pastizal, que fijen nitrógeno y acidifiquen la rizosfera de forma controlada.
Neutro	6,6 – 7,5	Máxima disponibilidad de P y elevada actividad microbiana.	Condiciones ideales para maximizar la rotación del ganado y el crecimiento vigoroso de las especies más apetecibles.
Ligeramente	7,6 - 8,5	Inicio de la fijación de	El pisoteo holístico incorpora

alcalino		fosfatos por el calcio.	ácidos orgánicos de la capa muerta, que ayudan a contrarrestar la tendencia alcalina local.
Alcalino	8,6 – 9,5	Fosfato fuertemente fijado en forma de fosfato cálcico insoluble. Degradación estructural.	Favorecer el reposo nocturno controlado y móvil en estas subparcelas, para que los excrementos frescos de ovejas acidifiquen biológicamente el perfil edáfico.
Muy alcalino	>9,5		

Nota: En suelos con un pH entre 6,0 y 6,8, la disponibilidad de P es máxima y la actividad microbiana es más intensa.

Cómo interpretar los resultados de la MO

Clase	**MO (%)**	**Impacto**	**Medida recomendada**
Muy bajo	< 1,0	Protección nula del fósforo; riesgo máximo de erosión.	Aplicar el «pastoreo de impacto» (alta densidad de ovejas durante unas pocas horas) para triturar e incorporar los restos vegetales muertos al perfil del suelo.
Bajo	1,0-2,0	Actividad biológica insuficiente para solubilizar el P.	Poner en marcha un plan de «pastoreo holístico» por subparcelas, forzando la rotación para iniciar la acumulación de materia orgánica.
Medio	2,0-3,5	Estabilidad estructural moderada	Consolidar los períodos de reposo en invierno y primavera para permitir que las raíces fijen carbono orgánico estable.
Alta	3,5-5,0	Excelente. Alto grado de complejación de los cationes bloqueantes del P.	Mantener la gestión holística; es el único sistema capaz de estabilizar y mantener estos niveles en la ganadería extensiva.
Muy alto	>5,0	Máxima funcionalidad microbiana y liberación de P soluble.	Utilizarlo como parcela de control para evaluar el límite máximo del potencial

			bioclimático de la explotación bajo gestión regenerativa.

Ejemplos de combinaciones de factores que condicionan o favorecen la disponibilidad del fósforo

La disponibilidad efectiva del P dependerá de la combinación de tres factores: contenido de P asimilable, pH y contenido de materia orgánica en el suelo

- **pH bajo + P_2O_5 alto** → El P está presente en gran cantidad, pero bloqueado (no está disponible para las plantas porque se vuelve insoluble cuando el pH es bajo). Realizar un encalado antes de la fertilización con fosfatos;
- **baja materia orgánica + P_2O_5medio** → Aumentar el contenido de materia orgánica del suelo y, si es necesario, reforzar la aplicación de P mineral.
- **pH 6,0–6,8 + materia orgánica > 2 %** → Condiciones favorables para una mayor disponibilidad del P para las plantas; máxima eficiencia de la fertilización.
- **pH > 7,3 + materia orgánica < 1 % + P_2O_5medio o bajo** → Condiciones frecuentes en suelos calcáreos, con el P bloqueado por el calcio procedente de los carbonatos y una escasa reserva de P orgánico. Aumentar la materia orgánica y complementar con fertilizantes fosfatados cuando se apliquen otros nutrientes, como nitrógeno o potasio.

1.2 Protección y conservación del suelo

La conservación del suelo en el dehesa se logra mediante una gestión holística como motor biológico. La regulación rigurosa de la relación entre la carga ganadera y el tiempo de reposo evita que el suelo quede al descubierto y estimula la regeneración natural. Esta práctica rompe con la degradación histórica del pastoreo tradicional continuo, aumentando la porosidad del suelo, estabilizando los agregados y potenciando la microbiota simbiótica de la rizosfera, responsable de solubilizar el fósforo mineral inaccesible.

Protección contra la erosión

En el marco de la gestión holística, se minimiza la destrucción estructural del suelo mediante una elevada carga ganadera instantánea y períodos de descanso prolongados. Esto genera una capa de mantillo permanente, optimiza la agregación y mantiene elevadas tasas de infiltración.

Prácticas habituales:

- Pastoreo rotativo planificado;

- Siembra directa de pastos polifíticos (biodiversos);
- Limpieza selectiva por franjas.

Fomento de microorganismos beneficiosos

El aumento de la biodiversidad microbiana activa la solubilización del fósforo inorgánico retenido. En el marco de la gestión holística, los períodos prolongados de descanso del pastizal nutren la rizosfera, lo que favorece el aumento de dicha biodiversidad.

Prácticas habituales:
- pastoreo rotativo planificado;
- inoculación de hongos micorrízicos;
- adición de residuos leñosos triturados.

Ventajas
- Reduce las pérdidas de suelo por erosión hídrica;
- Aumenta la eficiencia de absorción del fósforo asimilable;
- Aumenta la resiliencia del pastizal en la estación seca, ya que aumenta el almacenamiento de agua en el suelo;
- Estimula la cadena trófica de la biota del suelo y la micorrización;
- Reduce la dependencia de los fertilizantes minerales sintéticos.

Desventajas
- Exige un estricto cumplimiento de los períodos de barbecho rotativo;
- Los resultados de la recuperación biológica solo son visibles a medio plazo;
- Elevada sensibilidad inicial al estrés hídrico extremo;
- Incompatible con los fertilizantes sintéticos de alta solubilidad.

Fomento del aumento de la biodiversidad de los pastos y de las zonas de refugio natural en el dehesa

La biodiversidad vegetal enriquece la rizosfera con diversos exudados que alimentan una

cadena trófica extensa y diversa, responsable de la producción de diversas enzimas necesarias para volver a hacer disponible el fósforo insoluble en formas asimilables por las plantas. De este modo, se optimiza el reciclaje vertical del fósforo del suelo.

Prácticas habituales:
- Siembra de pastos polifíticos con leguminosas;
- Mantenimiento de los límites de las parcelas arbolados;
- Protección para la regeneración florística natural.

Ventajas
- Optimiza el reciclaje vertical del fósforo del suelo;
- Aumenta la estabilidad estructural frente a la erosión hídrica;
- Diversifica las cadenas tróficas biológicas en la rizosfera;
- Proporciona un mosaico forrajero con mayor resiliencia climática.

Desventajas
- Alto coste del uso de semillas polifíticas (para el pastizal biodiverso);
- Complejidad en la gestión ganadera extensiva tradicional;
- Necesidad de proteger la regeneración natural de la vegetación frente al ganado ovino;
- El retorno de la inversión productiva solo es visible a largo plazo.

Resumen de los efectos de la mejora del estado del suelo sobre el fósforo (P) en el suelo y en el agua

Práctica	Efecto del fósforo en el suelo	Efecto del fósforo en el agua
Protección contra la erosión gracias al aumento de la materia orgánica, que favorece la agregación del suelo	Fija mecánicamente los fosfatos en el horizonte superficial, al evitarse la pérdida de suelo. Aumenta los niveles de materia orgánica estable, que competirá por los puntos de fijación del fósforo, aumentando la disponibilidad del fósforo orgánico lábil.	Reduce drásticamente el transporte de partículas finas de suelo cargadas de fósforo hacia las cuencas hidrográficas de la subcuenca funcional, debido al efecto de la escorrentía superficial del agua de lluvia.
Fomento de microorganismos beneficiosos	Estimula la secreción de ácidos orgánicos y enzimas fosfatasas que solubilizan las fracciones de fósforo inorgánico bloqueado. La red de micorrizas aumenta la tasa de absorción biológica del fósforo en la rizosfera.	La retención y estabilización del fósforo libre en la biomasa microbiana del suelo reduce significativamente el riesgo de lixiviación de fosfatos solubles hacia las aguas subterráneas.
Fomento del aumento de la biodiversidad vegetal	Diversifica los nichos radiculares a diferentes profundidades, optimizando el reciclaje vertical de nutrientes. Las leguminosas espontáneas aportan nitrógeno y liberan exudados que desbloquean el fósforo cálcico.	La red radicular, densa y rica en biodiversidad, actúa como una esponja biológica de absorción, captando los excedentes de fósforo disueltos en el perfil del suelo antes de que alcancen el nivel freático.

1.3 Uso del suelo y gestión e e de la vegetación (pastos y árboles)

Biodiversidad y mejora del mosaico

El diseño en mosaico del dehesa combina estratégicamente los pastos biodiversos, que actúan como cubierta de protección física del suelo contra la escorrentía y las pérdidas de suelo por erosión hídrica, mientras que el estrato arbóreo y arbustivo proporciona la protección de regulación bioclimática esencial para la cría extensiva de ovinos, ya que estos animales permanecen largos periodos al aire libre. Esta heterogeneidad vegetal atenúa la degradación de los suelos al diversificar el sistema radicular y los nichos microbiológicos de la rizosfera. Las copas de los árboles reducen el impacto erosivo de las lluvias torrenciales, mientras que las raíces profundas transportan el fósforo de los horizontes inferiores hacia la superficie, a través de la capa de materia orgánica, enriqueciendo biológicamente el suelo y optimizando el ciclo de los nutrientes en la subcuenca hidrográfica.

Ventajas

- Equilibra los niveles de fósforo entre las zonas abiertas y bajo la copa de los árboles;
- Mejora el confort térmico y el bienestar del ganado ovino;
- Diversifica la aportación de materia orgánica al suelo y estimula la presencia de raíces a diferentes profundidades.

Desventajas

- La gestión tradicional continua, si se lleva a cabo de forma inadecuada, puede provocar los efectos negativos del pastoreo excesivo, que son la compactación del suelo y la hiperacumulación de fósforo bajo la copa de los árboles;
- La solución holística exige planificar rotaciones con vallas móviles para diversificar los lugares de descanso fijos y proteger los robles.

Mantenimiento de pastos biodiversos como cobertura física permanente del suelo
(equivalente al pastoreo permanente en otros sistemas)

A diferencia del mantenimiento del suelo desnudo, la «gestión holística» es la estrategia principal de un monte regenerativo que pretende ser resiliente al cambio climático. Al concentrar una elevada presión ganadera instantánea durante breves períodos en subparcelas de la subcuenca, el ganado ovino consume el pastizal de manera uniforme, sin seleccionar especies preferentes, lo que estimula una reanudación del crecimiento vigoroso y biodiverso durante el período de reposo del pastizal. El pisoteo controlado tritura e incorpora la biomasa seca como cubierta orgánica, lo que aumenta exponencialmente la

rugosidad superficial. Esta cubierta física permanente actúa como un escudo hidrológico: reduce el impacto de las lluvias torrenciales, optimiza las tasas de infiltración del suelo y disminuye drásticamente la velocidad de la escorrentía superficial en las laderas de las subcuencas de la explotación.

Ventajas

- Reduce el riesgo de suelo desnudo, sin vegetación o con escasa vegetación, en las laderas;
- Distribuye el fósforo, procedente de los excrementos de los animales, de forma homogénea;
- Maximiza la infiltración y la retención del agua de lluvia en el suelo;
- Fomenta la regeneración natural y la biodiversidad del pastizal.

Desventajas

- Requiere una elevada inversión inicial en vallas móviles;
- Requiere la instalación de infraestructuras de agua portátiles;
- Requiere una planificación diaria y especializada de la alimentación con forraje.

Mejora del mosaico

Deforestación en franjas

La deforestación en franjas consiste en la eliminación mecánica selectiva de la vegetación invasora en franjas alternas, siguiendo las curvas de nivel. La práctica recomendada es mantener intactas las franjas densas e s que actúan como barreras físicas de retención de sedimentos y fósforo, reduciendo así la escorrentía superficial.

Ventajas

- Aumenta la superficie útil para el pastoreo;
- Las franjas restantes frenan físicamente la escorrentía superficial;
- Retiene sedimentos y partículas de fósforo en las laderas;
- Preserva los refugios de biodiversidad arbustiva autóctona.

Desventajas

- Requiere maquinaria específica que evite la compactación del suelo;
- Exige un mantenimiento bienal para controlar la reaparición de brotes agresivos;
- Alto coste operativo por hectárea tratada.

Cómo llevarlo a cabo:

Se lleva a cabo con un triturador de cadenas acoplado a un tractor ligero en épocas de

suelo seco, para evitar la compactación. Se abren franjas de cultivo de entre 5 y 10 metros de ancho, siguiendo las curvas de nivel, intercalando y respetando franjas de matorral maduro y árboles aislados de alcornoques y encinas autóctonas, para consolidar la ladera contra la escorrentía superficial.

Tala selectiva

La tala selectiva consiste en la poda planificada y dirigida del estrato arbóreo para eliminar la madera muerta, airear la copa y regular la entrada de luz solar, optimizando así la productividad y la densidad del pastizal y combatiendo la erosión hídrica.

Ventajas

- Aumenta la radiación solar en el sotobosque, estimulando el crecimiento de la hierba;
- Aporta biomasa leñosa triturada que aumenta el carbono orgánico superficial, lo que contribuye al aumento de la materia orgánica estable del suelo;
- Elimina los focos de agentes patógenos y mejora la arquitectura de la copa de los árboles.

Desventajas

- Alto coste económico debido a la necesidad de mano de obra cualificada;
- Riesgo de propagación de enfermedades fúngicas si las herramientas están contaminadas y no se desinfectan;
- Una poda excesiva puede reducir la producción estacional de bellotas, lo que pone en riesgo la alimentación de los cerdos.

Cómo llevarlo a cabo:

Se lleva a cabo durante el letargo invernal mediante cortes con motosierra manual, eliminando las ramas secas o bajas para airear la copa. Las herramientas deben desinfectarse cuidadosamente antes y después de cada árbol. Por último, los residuos leñosos se procesan inmediatamente in situ con una trituradora o desmenuzadora, incorporando las virutas al suelo para evitar incendios.

Gestión de pastos y/o pastoreo integrado

Establecimiento y conservación de pastos

La instalación de mezclas polifíticas ricas en leguminosas perennes (como el *Trifolium subterraneum*) mejora radicalmente la utilización del fósforo del suelo. Estas especies exudan ácidos orgánicos y enzimas fosfatasas a través de sus raíces, rompiendo los enlaces insolubles del fosfato cálcico e inorgánico en suelos poco ácidos. Esta Labranza biológica transforma el fósforo bloqueado en formas orgánicas asimilables. Además, el mantenimiento de este tapiz biodiverso garantiza una cobertura física permanente que aumenta la materia orgánica activa en el pastizal, estabilizando los agregados superficiales y evitando la pérdida de nutrientes por lixiviación o escorrentía en las zonas inclinadas.

Ventajas

- Moviliza y solubiliza el fósforo fijado a través de los exudados radiculares;
- Mejora la calidad nutricional y proteica del forraje disponible;
- Ofrece protección física permanente contra la escorrentía superficial;
- Aumenta el contenido de materia orgánica estable del suelo a largo plazo, lo que contribuye a una mejor agregación y a la resistencia del suelo a la erosión hídrica.

Desventajas

- Elevado coste inicial de las semillas polifíticas certificadas (para el pastizal biodiverso);

- Gran dependencia de unas condiciones climáticas favorables (lluvias y temperaturas) para el éxito de su implantación;
- El pastoreo extensivo deberá limitarse durante la fase inicial de enraizamiento;
- Riesgo de pérdida debido a la competencia con matorrales o especies invasoras.

Cómo ponerlo en práctica:

Se lleva a cabo mediante siembra directa a principios de otoño, tras las primeras lluvias, aplicando una dosis de semilla de 20 kg/ha con una sembradora de discos que entierra la semilla superficialmente sin remover los horizontes del suelo. Es obligatorio excluir la parcela del pastoreo extensivo durante los primeros meses para garantizar el enraizamiento y la buena nodulación de las leguminosas por parte del rizobio.

Plan de pastoreo

Los períodos de reposo prolongados son la principal herramienta de gestión del pastoreo en el dehesa, ya que activan la micorrización y la biodiversidad edáfica.
Esto optimiza la solubilización del fósforo y equilibra los nutrientes del pastizal, maximizando la eficiencia biológica del suelo sin necesidad de aportes externos.

Ventajas

- Elimina el pastoreo excesivo localizado y homogeneiza los excrementos de las ovejas;
- Optimiza la absorción del fósforo, activando las micorrizas de la rizosfera;
- Mejora la descompactación biológica y la porosidad estructural del suelo;
- Aumenta la estabilidad y la resiliencia de la cubierta vegetal frente a las sequías.

Desventajas

- Elevada necesidad de mano de obra para mover las vallas móviles;
- Exige una planificación diaria y rigurosa basada en las tasas de crecimiento de la hierba;
- Elevada inversión inicial en infraestructuras de agua distribuidas por subparcelas;
- Gran sensibilidad a las variaciones meteorológicas extremas e imprevistas.

Cómo implementarlo:

Se lleva a cabo dividiendo las subcuencas experimentales mediante cercas eléctricas solares móviles. El tiempo de permanencia ideal del rebaño ovino (unas horas o días) se calcula mediante un modelo matemático basado en la biomasa forrajera disponible, garantizando períodos prolongados de reposo que respeten los ritmos biológicos de recuperación y rebrote del pastizal mediterráneo.

Resumen de los efectos **de *la mejora del estado del suelo*** *y* ***del pastizal*** sobre el fósforo (P) en el suelo y en el agua

Práctica	Efecto del fósforo en el suelo	Efecto del P en el agua
Mantenimiento de pastos biodiversos	El pastoreo concentrado durante un breve periodo de tiempo contribuye a la retención del fósforo, procedente de los excrementos de las ovejas, en la capa superficial del suelo, acelerando el reciclaje natural del nutriente gracias a las raíces de la hierba del pastizal.	Un manto de hierba denso y activo absorbe más eficazmente el fósforo directamente del suelo e impide que la energía de la lluvia arrastre las partículas del suelo hacia las cuencas hidrográficas.
Poda selectiva	Al triturar las ramas finas de la poda en el propio terreno, se crea una capa de protección física (cubierta morta) que enriquece el suelo en materia orgánica, lo que ayuda a retener el fósforo en el suelo.	Las copas de los alcornoques, cuando están bien gestionadas y son densas, rompen eficazmente la energía de la lluvia, lo que hace que gran parte del agua se escurra por los troncos y se infiltre en el suelo, reduciendo drásticamente la erosión hídrica del suelo y evitando las pérdidas de fósforo hacia los cursos de agua.
Tala selectiva	Al limpiar mecánicamente la maleza más antigua, la biomasa se incorpora al suelo, estimulando la formación de humus y liberando el fósforo que estaba retenido en las plantas leñosas.	Las franjas de matorral que se dejan estratégicamente intactas en las laderas actúan como barreras naturales, reteniendo la tierra y los nutrientes que el agua de lluvia pueda arrastrar a lo largo de la ladera, amortiguando gran parte de

		la energía erosiva del agua de lluvia.
Gestión de pastos o pastoreo integrado	Las raíces de las leguminosas (como los tréboles, por ejemplo) liberan sustancias naturales (exudados) que disuelven el fósforo retenido en el suelo, transformándolo en un nutriente asimilable por las plantas.	Una mayor asimilación del fósforo por parte del pastizal reduce el riesgo de arrastre por erosión hídrica, protegiendo los cursos de agua de la contaminación por fósforo.
Plan de pastoreo	Al distribuir el rebaño de forma planificada por subparcelas, los excrementos animales se reparten uniformemente por toda la finca, eliminando los lugares fijos de reposo prolongado, donde antes se acumulaban en exceso.	Al utilizar vallas móviles para la retención de los animales, se aleja al ganado de las riberas de los cursos de agua, eliminando el riesgo de que los excrementos animales puedan llegar a los cursos de agua o evitando que degraden la cubierta vegetal que recubre los taludes de las riberas.

Gestión de residuos leñosos y de vegetación plaga y/o invasora

Los residuos leñosos procedentes de la poda y el clareo de especies no deseadas en el mosaico florístico biodiverso se procesan inmediatamente en la explotación con una trituradora. Los restos resultantes se esparcen de manera homogénea por el terreno para crear una capa muerta protectora que, al descomponerse, se transforma en materia orgánica estable, mejorando la estructura del suelo. Además, una parte seleccionada se compostiza junto con estiércol ovino para obtener un compost orgánico equilibrado que reactiva más rápidamente la biota del suelo en las zonas más degradadas.

Compostaje

Se lleva a cabo alternando capas de virutas de madera (ricas en carbono) con estiércol ovino maduro (rico en nitrógeno) en pilas alargadas. La humedad y la temperatura se controlan periódicamente mediante removidos mecánicos. Tras seis meses de compostaje, el compost maduro resultante se esparce en las zonas más compactadas, lo que acelera la regeneración de la biota del suelo, aumenta inmediatamente el contenido de materia orgánica del suelo, reduce la compactación y mejora la fertilidad general.

Beneficios de la valorización de los residuos

La reintegración de los residuos de poda y el estiércol retrasa la degradación del pastizal, al aportar humus estable y frenar la rápida mineralización que provoca la pérdida natural

de nutrientes y una elevada susceptibilidad del suelo a la erosión. Una de las sugerencias consiste en aplicar las virutas directamente en los montículos que rodean a los alcornoques enfermos, como cobertura muerta, o distribuir el compost en las zonas de pastizal más erosionadas, para reactivar más rápidamente la fertilidad y la porosidad del suelo.

Buenas prácticas recomendadas para la gestión del suelo
Plan de pastoreo holístico: consiste en rotar el rebaño ovino de forma planificada por subparcelas, utilizando vallas móviles, y manteniendo al ganado durante unas pocas horas o días en cada zona. Esta práctica garantiza períodos de reposo prolongados para que el pastizal se recupere y distribuye el estiércol de forma homogénea.
Mantenimiento de pastos biodiversos: se basa en la siembra directa de mezclas de semillas ricas en leguminosas para mantener el suelo cubierto de vegetación durante todo el año. Este manto verde actúa como un escudo físico que atenúa la fuerza de la lluvia y evita la pérdida de suelo por escorrentía.
Tala y poda selectiva de los robles (robles albar y/o alcornoques): consiste en la limpieza, durante el invierno, de las ramas secas y en la aireación de las copas de los árboles, desinfectando cuidadosamente las herramientas para evitar la propagación de enfermedades. Esta intervención regula la entrada de luz solar, lo que estimula un crecimiento más vigoroso de la hierba que crece en el suelo.
Desbroce de matorrales en franjas: se lleva a cabo mediante el desbroce mecánico selectivo de la maleza invasora en franjas alternas, siguiendo siempre las curvas de nivel del terreno. Las franjas de vegetación arbustiva que se dejan intactas actúan como barreras naturales en las laderas de los pastos, con una función de protección física para amortiguar la energía del escurrimiento hídrico y como refugio para organismos auxiliares.
Trituración y compostaje de residuos: los restos leñosos de la poda se procesan en la propia explotación para ser esparcidos como cubierta protectora, fermentados junto con el estiércol de los corrales o convertidos en compost. Al reincorporar estos materiales, se aporta humus estable al suelo, lo que mejora su porosidad y su capacidad de retención de agua, y aumenta la biodiversidad microbiológica del suelo, esencial para la micorrización que facilita la asimilación del fósforo por parte del pastizal.

2 Fertilización

2.1 Principios generales:

- **Sustitución de los fertilizantes sintéticos por la fertilización biológica**: dar prioridad a las especies fijadoras de nitrógeno y a los microorganismos del suelo que solubilizan el fósforo precipitado en el suelo, reduciendo así la dependencia de los fertilizantes comerciales.
- **Optimización nutricional supervisada mediante análisis:** Añadir nutrientes al suelo solo tras analizar sus carencias, ajustando las dosis a las necesidades del pastizal y de los robles para evitar bloqueos químicos.
- **Prevención de pérdidas hídricas:** Aplicar los correctores orgánicos en épocas de estabilidad climática y sobre cubiertas vegetales densas, impidiendo que el fósforo sea arrastrado por la erosión hídrica del suelo.

2.2 Época de aplicación de los fertilizantes

La aplicación de fósforo para la corrección de nutrientes se realiza principalmente a principios de otoño, aprovechando la pausa estival y las primeras lluvias para que el nutriente se incorpore al suelo de forma más eficaz, antes de que los pastos de robles entren en letargo. Sin embargo, la eficacia de esta fertilización tradicional presenta grandes limitaciones: en los suelos típicamente ácidos o muy calcáreos del dehesa, el fósforo queda rápidamente bloqueado al unirse químicamente al hierro, al aluminio o al calcio. Esto impide que las raíces lo absorban libremente, lo que hace que gran parte del fertilizante aplicado quede inmovilizado e inaccesible para la vegetación durante los meses de máximo crecimiento, que son los de primavera.

2.3 Técnica de aplicación de los fertilizantes

La materia orgánica y los nutrientes se incorporan mediante esparcidores superficiales, sin Labranza, aplicando el compost o los restos triturados cada tres o cuatro años para mejorar la estructura del suelo. Para corregir el pH en suelos ácidos, se distribuyen correctores calcáreos de forma intensiva cada cinco años, lo que libera el fósforo fijado. Las carencias puntuales de nutrientes se resuelven anualmente mediante esparcidores centrífugos de precisión o fertirrigación localizada en los árboles jóvenes. Estas técnicas evitan alterar los horizontes del suelo y reducen las pérdidas por lixiviación hacia las cuencas hidrográficas.

2.4 Tipo de fertilizantes fosfatados

En virtud del Reglamento (UE) 2019/1009 y del Decreto-Ley 1051/2022 sobre nutrición sostenible, se limita el uso excesivo de fósforo mineral para frenar la contaminación del agua. La «gestión holística» reduce drásticamente la necesidad de aportes externos, ya que el pastoreo planificado y concentrado recicla el fósforo a través de los excrementos del ganado y activa los microorganismos del suelo, logrando una fertilización natural, legal

y autosuficiente para el pastizal.

IMPORTANTE: Es obligatorio consultar la normativa legal aplicable, especialmente en el caso de los correctores orgánicos.

Puntos Críticos

- **Dosis máxima de nitrógeno de origen orgánico**: En las zonas vulnerables a la contaminación por nitratos (ZVN), la aplicación máxima permitida de N de origen orgánico es de 170 kg N/ha/año (Directiva 91/676/CEE del Consejo). Este límite condiciona indirectamente la cantidad de P aplicada, ya que, si tomamos como referencia el estiércol bovino, las 170 unidades de N orgánico corresponden a una aplicación máxima de aproximadamente 70 kg de P_2O_5/ha/año a través de los abonos orgánicos.
- **Análisis del efluente**: Conocer la concentración de P total del efluente antes de la aplicación; calcular el balance de P para aplicar solo lo estrictamente necesario para obtener las producciones que se pueden esperar de forma realista.
- **Época y condiciones de aplicación**: Evitar la aplicación de fertilizantes en suelos saturados, con una pendiente superior al 8 % o antes de una precipitación prevista y, en las ZVN, garantizar una franja de protección de 10–50 m con respecto a las líneas de agua.

Buenas prácticas en la gestión de la fertilización
Fertilización biológica mediante una gestión holística: esta práctica sustituye los abonos sintéticos tradicionales de alta solubilidad por el reciclaje natural de nutrientes a través del pastoreo planificado y rotativo del ganado ovino.
Correcciones orgánicas y organominerales de precisión: Consiste en dar prioridad al uso de compost, estiércol maduro y abonos organominerales frente a los fertilizantes sintéticos solubles, aplicando únicamente las dosis necesarias determinadas mediante análisis previos del suelo.
Aplicación superficial en otoño y sin Labranza: Se basa en la distribución de los fertilizantes y correctores sobre el terreno a principios de otoño, aprovechando las primeras lluvias para su incorporación antes del despertar de los pastos y los robles.

3 Protección de las masas de agua

Proteger las masas de agua en el dehesa es vital para garantizar la salud del ecosistema, del ganado y de las poblaciones situadas aguas abajo. Evitar la llegada de sedimentos y nutrientes, como el fósforo (P), previene la eutrofización, un proceso que agota el oxígeno de las masas de agua y altera la biodiversidad acuática. Mantener el agua limpia garantiza el suministro de agua potable segura para los animales y preserva los acuíferos

subterráneos. Una red hidrológica sana funciona como un indicador directo de que la gestión del suelo en las laderas se está llevando a cabo de forma correcta y sostenible.

3.1 Mantenimiento de las zonas de infiltración y gestión de la vegetación ribereña

La cubierta vegetal permanente y un suelo microbiológicamente vivo maximizan la infiltración y la biorremediación, almacenando agua para los períodos de sequía y reduciendo la escorrentía erosiva. Para mitigar los riesgos temporales de compactación o lixiviación de excrementos derivados del pastoreo concentrado de la Gestión Holística, hemos establecido zonas de amortiguación de entre 10 y 15 metros mediante vallas móviles que alejan al ganado de los cauces de los ríos. Además, la vegetación ribereña se mantiene intacta en las laderas y riberas, actuando como un filtro biológico natural que retiene los sedimentos, absorbe el exceso de fósforo y protege la calidad del agua en los pastos.

3.2 Otros factores

El riesgo potencial de contaminación de las masas de agua por fósforo puede aumentar exponencialmente cuando se combinan varios de los factores mencionados en los apartados anteriores. La tabla que figura a continuación ayuda a realizar un diagnóstico rápido en el que se puede identificar la presencia o la concurrencia de un conjunto de factores de riesgo. En función del número de factores de riesgo identificados y combinados, el nivel de riesgo de contaminación por fósforo puede clasificarse de ***bajo*** a ***muy elevado***.

Factores de riesgo	Factores identificados	Riesgo de contaminación
Suelo de textura gruesa/ligera o fina/pesada (arenoso o arcilloso/limoso-arcilloso)	X	***Elevado***
MO igual o inferior al 2%	X	
pH igual o inferior 6		
P_2O_5 (Égner-Riehm-AL) igual o superior a 200 ppm o P2 O5 (Olsen) igual o superior a 115 ppm	X	
Nivel freático superficial: profundidad igual o inferior a 2 m durante la temporada estival (estación seca)		
Pendiente de la parcela igual o superior al 8 %		
Riego por inundación o escorrentía superficial identificada del agua de riego	X	

Solo compactado: macroporosidade inferior 10%		
Cobertura del suelo: nula o escasa		
Clima con elevadas precipitaciones: con episodios frecuentes de lluvias intensas y concentradas		

Escala del nivel de «Riesgo de contaminación por fósforo»	
Reducido: hasta **2** factores	***Medio:*** **3** factores
Elevado: **4** factores	***Muy elevado:*** Más **5** factores

Nota: La tabla se utiliza a modo de ejemplo y debe adaptarse a la realidad de cada sistema para el autodiagnóstico del riesgo de contaminación de las masas de agua con P.

Buenas prácticas recomendadas para la protección de las masas de agua
Creación de zonas de amortiguación ribereñas: consiste en la exclusión temporal del ganado, mediante vallas eléctricas móviles, en una franja de entre 10 y 15 metros a lo largo de los cursos de agua y arroyos de los pastos. Esta medida evita que los excrementos de los animales caigan directamente en los lechos de los ríos y elimina el pisoteo continuo que degrada mecánicamente las laderas y las riberas.
Mantenimiento y conservación de la vegetación ribereña: se basa en la protección y restauración del estrato arbustivo y arbóreo característico de las riberas fluviales, manteniéndolo intacto frente a la deforestación o las podas severas. Esta densa barrera vegetal actúa como un filtro biológico natural que reduce la velocidad del agua de lluvia, retiene los sedimentos de las laderas y absorbe los excesos de fósforo antes de que contaminen el agua.
Red de abrevaderos móviles fuera de los cursos de agua: consiste en la instalación de puntos de agua alternativos y desplazables, conectados a la red de distribución en las zonas altas de las subparcelas. Al alejar los abrevaderos de los lechos naturales, se reduce drásticamente la presión del ganado en las zonas húmedas sensibles, disminuyendo el riesgo de compactación del suelo y de lixiviación de nutrientes hacia los acuíferos.

Ficha técnica: Gestión del fósforo en la cría extensiva de aves de corral en pastoreo

La cría extensiva de aves de corral en pastoreo en régimen de pastoreo se caracteriza por el vertido directo de excrementos sobre el suelo y por la generación de lechos y efluentes ricos en fósforo (P), un nutriente con un elevado potencial de contaminación de las masas de agua. La vulnerabilidad se acentúa por la concentración de animales junto a los refugios, comederos y puntos de agua. El carácter estacional de la actividad —con picos de densidad de ganado y de producción de efluentes— eleva temporalmente el riesgo, por lo que las decisiones de gestión (épocas de aplicación, rotación de los recintos, valorización de residuos) deben adaptarse a dicha estacionalidad. Las buenas prácticas de gestión del suelo son esenciales para minimizar las pérdidas de fósforo hacia las aguas superficiales y subterráneas.

1 Gestión del fósforo en el suelo

Las buenas prácticas en el manejo del fósforo en el suelo son positivas para:

i) **Salud del suelo**: mantener una cubierta vegetal (pastos) permanente y densa, protegiendo la estructura y la actividad biológica del suelo; ii) **Ciclo de nutrientes**: reincorporar las camas y los efluentes, tras su compostaje, cerrando así el ciclo del fósforo en la explotación; iii) **Eficiencia de la fertilización con fosfatos**: rotación de los pastos para distribuir uniformemente la carga de fósforo y evitar acumulaciones puntuales.

Aspectos importantes de la gestión del fósforo en la extensiva de aves de corral en pastoreo

- Estado de fertilidad del suelo (determinación del contenido de fósforo asimilable —P_{2O_5}—, valor del pH, contenido de materia orgánica —MO—) y capacidad de carga de fósforo;

- Distribución espacial de la carga animal (proximidad a refugios, comederos y bebederos);
- Gestión y aprovechamiento de las camas y los efluentes (compostaje, almacenamiento, exportación del excedente);
- Mantenimiento de la cubierta vegetal permanente y protección del suelo contra la erosión;
- Carácter estacional de la actividad y adaptación de las prácticas al calendario productivo.

1.1 Diagnóstico del estado de fertilidad del suelo

En los sistemas avícolas de pastoreo, el diagnóstico del suelo tiene un objetivo distinto al de los cultivos agrícolas: dada la entrada continua de fósforo a través de los excrementos, el riesgo principal es la acumulación y no la carencia de fósforo. El análisis del suelo, realizado antes de la época de mayor densidad de animales, permite conocer los contenidos de fósforo asimilable (P_2O_5), el pH y la materia orgánica (MO), evaluando así la capacidad del suelo para recibir más fósforo sin sobrepasar los umbrales de riesgo medioambiental.

Cómo interpretar los resultados del fósforo en el suelo

Clase	P_2O_5 - Égner-Riehm (mg/kg)	P_2O_5 - (Olsen) (mg/kg)	Interpretación	Medidas recomendadas
Muy bajo	≤25	≤18	Disponibilidad de P muy reducida	Aplicar fertilización con fosfatos. Se espera una respuesta muy elevada del cultivo a la fertilización
Bajo	26–50	18–34	Disponibilidad de P reducida	Aplicar fertilización con fosfato. Se espera una respuesta elevada del cultivo a la fertilización
Medio	51–100	35–56	Disponibilidad de P satisfactoria	Aplicar fertilización con fosfato. Se espera una buena respuesta del cultivo a la fertilización
Alta	101–200	57–115	Disponibilidad de P elevada	Reducir o suspender la fertilización con fosfato, según la producción prevista
Muy alto	> 200	>115	Disponibilidad de P muy elevada	Reducir o suspender la fertilización con fosfatos minerales, en función de la producción prevista

Adaptado de Calouro et al., (2022). Manual de fertilización de cultivos, INIAV

Cómo interpretar los resultados del $pH_{(H2O)}$

Clase	pH (H_2 O)	Interpretación	Acción recomendada
Muy ácido	≤ 4,5	Toxicidad por Al y Mn; bloqueo de P y Mo	Corregir con encalado (aplicación de caliza)
Ácido	4,6 - 5,5		
Ligeramente ácido	5,6 - 6,5	Mayor disponibilidad de P	No es necesario corregir la reacción del suelo
Neutro	6,6 – 7,5	Máxima disponibilidad de P	No es necesario corregir la reacción del suelo
Ligeramente alcalino	7,6 - 8,5	Inicio de la fijación del P en fosfatos de calcio	No es necesario corregir la reacción del suelo
Alcalino	8,6 – 9,5	Fuerte fijación del P; carencias de Fe, Mn y Zn	Corregir con azufre o MO
Muy alcalino	>9,5		

Adaptado de Calouro et al., (2022). Manual de fertilización de cultivos, INIAV

Nota: En suelos con un pH entre 6,0 y 6,8, la disponibilidad de P es máxima y la actividad microbiana es más intensa.

Cómo interpretar los resultados del análisis de materia orgánica ( )

Clase	MO (%)	Impacto	Medida recomendada
Muy bajo	< 1,0	Materia orgánica no disponible	Aplicar enmiendas orgánicas para aumentar el contenido de materia orgánica: compost, estiércol, lodos de depuración mezclados con biomasa estructurante (madera forestal, maleza, paja, serrín, etc.) y fósforo mineral, si es necesario
Bajo	1,0-2,0	Fósforo orgánico poco disponible	Aplicar enmiendas orgánicas para aumentar el contenido de materia orgánica y aplicar fósforo mineral, si es necesario
Medio	2,0-3,5	Buena actividad microbiana; disponibilidad media de P orgánico	Aplicar la cantidad necesaria de enmiendas orgánicas para mantener el contenido de materia orgánica y aplicar

			fósforo mineral, si es necesario
Alto	3,5-5,0	Elevada reserva de fósforo orgánico; la disponibilidad de este nutriente depende de la tasa de mineralización del fósforo	Aplicación de cantidades menores de fósforo mineral
Muy alto	>5,0	Reserva importante de fósforo orgánico; la disponibilidad de este nutriente depende de la tasa de mineralización del fósforo	Controlar los niveles de P asimilable, ya que e e podrían alcanzar valores elevados, lo que aumentaría el riesgo de pérdidas por lixiviación y/o arrastre/erosión. Aplicar únicamente la cantidad mínima indispensable de P mineral

Adaptado de Calouro et al., (2022). Manual de fertilización de cultivos, INIAV

Ejemplos de combinaciones de factores que condicionan o favorecen la disponibilidad del P *(si procede)*

La disponibilidad efectiva del P dependerá de la combinación de tres factores: contenido de P asimilable, pH y contenido de materia orgánica en el suelo

- **pH bajo + P_2O_5 alto** → El P está presente en gran cantidad, pero bloqueado (no está disponible para las plantas porque se vuelve insoluble cuando el pH es bajo). Realizar un encalado antes de la fertilización con fosfatos;
- **Baja materia orgánica + P_2O_5 medio** → Aumentar el contenido de materia orgánica del suelo y, si es necesario, reforzar la aplicación de P mineral.
- **pH 6,0–6,8 + materia orgánica > 2 %** → Condiciones favorables para una mayor disponibilidad del P para las plantas; máxima eficiencia de la fertilización.
- **pH > 7,3 + materia orgánica < 1 % + P_2O_5medio o bajo** → Condiciones frecuentes en suelos calcáreos, con el P bloqueado por el calcio procedente de los carbonatos y una escasa reserva de P orgánico. Aumentar la materia orgánica y complementar con fertilizantes fosfatados cuando se apliquen otros nutrientes, como nitrógeno o potasio.

1.2 Protección y conservación del suelo

Mejora del suelo

La cría de patos en pastoreo expone el suelo a la compactación por pisoteo y a la concentración localizada de excrementos. Prevenir su degradación física, biológica y química es esencial para equilibrar el balance de fósforo. Se recomienda la rotación de los pastos, el descanso periódico del suelo y el mantenimiento de una cubierta vegetal densa y permanente.

Protección contra la erosión

Mantener una cubierta vegetal permanente y densa, reforzándola sobre todo en las zonas de mayor pendiente y junto a las líneas de agua; establecer franjas de protección con vegetación sin fertilización cerca de las líneas de agua; evitar el sobrepastoreo, aunque sea temporal, ya que destruye la cubierta vegetal; instalar barreras vegetales en las riberas de los cursos de agua, que sirvan de franjas de contención para ralentizar la escorrentía superficial y retener el fósforo particulado.

Ventajas

- Reducción de las pérdidas de fósforo en forma de partículas por erosión hídrica;
- Mayor infiltración y menor escorrentía superficial;
- Protección de la estructura y la actividad biológica del suelo;
- Protección de las masas de agua superficiales;
- Mayor resistencia de la cubierta vegetal al pisoteo de los animales.

Desventajas

- Exige una gestión activa de la rotación de los pastos y de la entrada de los animales;
- Coste de instalación y mantenimiento de las franjas o barreras de amortiguación;
- Reducción temporal de la superficie de pastoreo disponible.

Resumen de los efectos de ***la mejora del estado del suelo y los pastos*** sobre el fósforo (P) en el suelo y en el agua

Práctica	**Efecto del fósforo en el suelo**	**Efecto del fósforo en el agua**
Protección del suelo contra la erosión	Retiene el fósforo particulado en el suelo, favorece y preserva la agregación	Reduce la transferencia de fósforo particulado a las masas de agua
Aumento de la biodiversidad del pastizal	Mejora el ciclo de nutrientes y la absorción de fósforo por parte de la vegetación, ya que estimula procesos simbióticos como la micorrización	Menor escorrentía superficial de fósforo; mayor filtración y depuración del agua

1.3 Uso del suelo y gestión de residuos

Pastos

El pastizal constituye a la vez la base alimentaria de los patos y la principal protección física del suelo. Una cubierta vegetal permanente y bien desarrollada intercepta la energía de la lluvia, favorece la infiltración del agua y reduce la escorrentía superficial, limitando las pérdidas de fósforo. Los principales beneficios son la protección contra la erosión, el mantenimiento de la actividad biológica y el aprovechamiento del fósforo depositado por los excrementos. Las mayores dificultades se deben al pisoteo intenso, a la concentración de animales y a la estacionalidad, que pueden degradar la cubierta vegetal. Una buena gestión se basa en la rotación de los pastos, en la adecuación de la densidad de animales y en la resiembra de las zonas degradadas.

Establecimiento y conservación d

El pastizal se establece mediante la siembra de mezclas bien adaptadas (gramíneas y leguminosas) a las condiciones edafoclimáticas, lo que garantiza una cobertura rápida y densa. La conservación se basa en la rotación de los pastos, el respeto de los períodos de reposo, la resiembra de las zonas de suelo expuesto por el pisoteo y el control de la densidad de ganado, con el fin de mantener una cobertura del suelo permanente a lo largo del año

Ventajas

- Cobertura permanente que protege el suelo contra la erosión;
- Aprovechamiento por parte de la vegetación del fósforo procedente de los excrementos;
- Mejora de la infiltración y de la actividad biológica del suelo.

Desventajas

- Degradación de la cubierta vegetal por pisoteo y sobrepoblación;
- Necesidad de resiembra y de gestión de la rotación de cultivos;
- Dependencia de las condiciones climáticas estacionales.

Residuos e

Los residuos predominantes son las camas (mezcla de material vegetal absorbente con los excrementos) y los efluentes resultantes de la limpieza de las instalaciones y de los puntos de agua. Se trata de materiales muy ricos en fósforo y nitrógeno, con una baja relación C/N, por lo que su aplicación directa y sin control supone un alto riesgo de contaminación. Su valorización pasa por una estabilización previa (compostaje), un almacenamiento adecuado y una aplicación ajustada al balance de fósforo. El excedente que supere la capacidad de carga de los suelos de la explotación debe exportarse

Tipo de residuos	**Medida recomendada**
Lechos avícolas (material vegetal + excrementos)	Compostar para estabilizar; aplicar según el balance de fósforo; exportar el excedente
Efluentes líquidos (aguas de lavado, puntos de agua)	Almacenar en una estructura impermeable; analizar el contenido de P; aplicar respetando los límites legales
Cadáveres y subproductos animales	Enviarlos a un destino legal autorizado (no aplicar al suelo)

Guiso de patos de engorde

El purín de patos procede de los excrementos de los patos, de las aguas de lavado y de las precipitaciones atmosféricas sobre las instalaciones de almacenamiento al aire libre. El contenido de materia seca influye directamente en la concentración de elementos nutritivos, en particular el fósforo (P), y depende principalmente de: i) la cantidad de agua potable consumida; ii) la cantidad de agua de lavado de las instalaciones y iii) la frecuencia de limpieza de los equipos.

La composición media del purín de patos es la siguiente (por kg de producto bruto):

Parámetro	Concentración media (g/kg)
Materia seca	69
Materia orgánica	61,1
Carbono orgánico	30,6
N total (Kjeldahl)	4,6
N-NH_4	1,3
N orgánico	3,3
$P_2 O_5$	1,0
$K_2 O$	1,3

Dosis de referencia y cantidad de P aplicada

Para una aplicación de referencia de 15 m^3/ha de purín de pato gordo, se añaden los siguientes elementos por hectárea:

Materia seca	**1,034 t/ha**
Materia orgánica	0,920 t/ha
C orgánico	0,459 t/ha
N total (Kjeldahl)	69 kg/ha
$N^- NH_4^+$	19,5 kg/ha
N orgánico	49,5 kg/ha
$P_2 O_5$	15 kg/ha disponibles en el año de la aplicación
$K_2 O$	19,5 kg/ha disponible en el año de la aplicación

La dosis de 15 m^3/ha deberá complementarse para cubrir las posibles necesidades de P_2O_5y K_2O.

Puntos Críticos

- Los efluentes de la cría de patos de engorde se clasifican como fertilizantes de **tipo II**, lo que implica períodos de esparcimiento en zonas vulnerables más restringidos que en el caso de los fertilizantes **de tipo** I.
- Los residuos procedentes de la cría de patos que no hayan sido sometidos a un tratamiento previo deben enterrarse inmediatamente después de su aplicación.
- Para tratar los residuos, debe respetarse un plazo de 90 días (tratamiento natural), o bien puede aplicarse un tratamiento térmico (metanización, calentamiento) antes de su aplicación.

Compostaje

El compostaje de las camas avícolas, que suelen presentar un exceso de nitrógeno y fósforo en relación con el carbono, requiere la adición de materiales estructurantes ricos en carbono (paja, virutas, maleza) para equilibrar la relación C/N. La estabilización previa reduce la solubilidad del fósforo, disminuye los olores y el riesgo de pérdidas por lixiviación, y produce un correctivo orgánico más seguro y homogéneo para su aplicación en el suelo, lo que aumenta inmediatamente el contenido de materia orgánica estabilizada en sustancias húmicas.

Almacenamiento

Las camas y los efluentes deben almacenarse en estructuras impermeables y cubiertas (depósitos de estiércol, estanques estancos), dimensionadas para los períodos en los que no es posible la aplicación. Estas estructuras evitan la lixiviación y las escorrentías típicas de la contaminación difusa, y permiten la estabilización y la adaptación de la aplicación al calendario agrícola. El excedente que supere la capacidad de retención y/o de valorización en la propia explotación agrícola deberá ser exportado.

Beneficios de la valorización de los residuos

La valorización de los residuos producidos en la explotación cierra el ciclo de los nutrientes, transformando un pasivo medioambiental en un recurso. La reincorporación de materia orgánica estable aumenta la funcionalidad y la resiliencia del suelo, mejora su estructura y su capacidad de retención de agua y nutrientes, y estimula la biodiversidad microbiológica —en particular los hongos micorrízicos, esenciales para la absorción eficiente del fósforo por parte de las plantas—. De este modo, se aumenta la eficiencia en el uso del fósforo y se reduce el riesgo de contaminación, que siempre es mayor cuando los residuos se aplican sin tratamiento previo.

Buenas prácticas recomendadas para la gestión del suelo
Mantener una cubierta vegetal (pastos) permanente y densa durante todo el año, como protección física del suelo.
Practicar la rotación de pastos y el descanso del suelo para evitar la compactación y la concentración localizada de fósforo.
Compostar las camas avícolas con materiales estructurantes ricos en carbono, antes de su aplicación al suelo.
Aplicar los correctores orgánicos según el balance de fósforo y exportar fuera de la explotación agrícola el excedente que supere la capacidad de carga de los suelos.

Incorporar biocarbón, probado y validado en el marco del proyecto Phos4Cycle, para aumentar el CTC y la retención de P, reduciendo así las pérdidas hacia las masas de agua.
Instalar y mantener franjas de protección cultivadas sin fertilización junto a las líneas de agua.

2 Fertilización

2.1 - Principios generales:

- Análisis periódicos del suelo y balance de fósforo, teniendo en cuenta obligatoriamente el fósforo incorporado por los excrementos de los animales y por los efluentes aplicados;
- En suelos con contenidos de P «elevados» o «muy elevados» —situación frecuente en sistemas agrícolas intensivos—, reponer únicamente el P exportado por la vegetación, suspendiendo la fertilización con fosfatos minerales;
- Estabilizar y analizar los efluentes y/o las «camas de los patos» antes de su aplicación, ajustando la dosis a lo estrictamente necesario.

2.2 - Época de aplicación de los fertilizantes

La aplicación de correctores orgánicos debe realizarse en períodos de crecimiento activo del pastizal, en los que la absorción de P es máxima, y fuera de las épocas de mayor riesgo de lixiviación (temporada de lluvias y/o cuando el suelo está saturado de agua). En suelos ácidos, el encalado debe preceder a la aplicación de los fertilizantes para mejorar la disponibilidad del fósforo. Asimismo, debe evitarse la aplicación en los picos de carga ganadera, cuando el depósito directo de los excrementos de los animales pueda satisfacer o superar las necesidades de fósforo del pastizal.

2.3 - Técnica de aplicación de los fertilizantes

Se debe dar prioridad a la distribución uniforme y superficial de los correctores compostados sobre el pastizal, seguida de una ligera incorporación siempre que sea posible, para reducir las pérdidas por escorrentía. Se debe evitar la aplicación en franjas concentradas o junto a las líneas de agua. Se debe ajustar el equipo para garantizar la uniformidad y unas dosis controladas.

2.4 - Tipo de fertilizantes fosfatados

Fertilizantes minerales: los superfosfatos aportan el P en formas solubles; su uso debe reservarse para situaciones de carencia demostrada, poco frecuentes en estos sistemas.

Fertilizantes orgánicos y organominerales: liberación lenta y progresiva del fósforo, adecuada para los pastos.

Correctores orgánicos: las camas avícolas y sus compuestos son la principal fuente de fósforo del sistema; su aportación debe cuantificarse y tenerse en cuenta siempre en el plan de fertilización. Dada la riqueza en fósforo de estos materiales, la fertilización mineral fosfatada es, en la mayoría de los casos, innecesaria.

IMPORTANTE: Es obligatorio consultar la normativa legal aplicable, especialmente en el caso de los correctores orgánicos.

Puntos Críticos

- **Dosis máxima de nitrógeno de origen orgánico**: En las zonas vulnerables a los nitratos (ZVN), la aplicación máxima permitida según la Directiva 91/676/CEE es de 170 kg N/ha/año; este límite condiciona indirectamente la cantidad de fósforo aplicada.
- **Análisis del efluente**: Conocer la concentración de P total antes de la aplicación; calcular el balance entre el P aplicado y el P exportado por el cultivo.
- **Época y condiciones de aplicación**: Evitar la aplicación de fertilizantes en suelos saturados, con una pendiente superior al 8 % o antes de una precipitación prevista y, en las ZVN, garantizar una franja de protección de 10-50 m con respecto a las líneas de agua.

Buenas prácticas en la gestión de la fertilización de los suelos en la producción avícola
Conocer la concentración de P total y asimilable en el suelo y en los efluentes antes de la aplicación.
Calcular el balance de fósforo teniendo en cuenta el fósforo depositado por los animales y el aplicado mediante los correctores.
Suspender la fertilización con fosfatos minerales en suelos con niveles de fósforo altos o muy altos.
Evitar las aplicaciones en suelos saturados, con una pendiente superior al 8 % o antes de que se prevean precipitaciones.
Garantizar una franja de protección de 10–50 m respecto a las líneas de agua, cubierta de vegetación.

Estabilizar (o compostar) las camas y los efluentes antes de su aplicación al suelo.
Controlar periódicamente el fósforo del suelo a una profundidad superior a la media de las raíces del pastizal.

3 Protección de las masas de agua

El agua confiere movilidad al fósforo, ya sea en forma disuelta (por lixiviación y/o escorrentía superficial) o en forma de partículas (escorrentía y/o erosión hídrica). En los sistemas avícolas de pastoreo, el vertido directo de residuos y la concentración de animales junto a los puntos de agua hacen que la protección de las masas de agua sea especialmente crítica. El impacto se manifiesta a través de la eutrofización de las aguas superficiales y la contaminación de los acuíferos. Es fundamental mantener las franjas de protección cultivadas (con una anchura mínima de 10 m) junto a los cursos de agua, impedir el acceso directo de los animales a los mismos y garantizar buenas tasas de infiltración mediante una cubierta vegetal permanente y continua.

3.1 - Gestión del riego

Puede ser necesario recurrir al riego para el mantenimiento de los pastos. Este debe realizarse con una elevada eficiencia de aplicación y una gran uniformidad de distribución, evitando el encharcamiento y la escorrentía superficial, que arrastran el fósforo hacia las profundidades y hacia la superficie del suelo, respectivamente. Las dosis de riego deberán ajustarse a la capacidad de campo del suelo.

3.2 Otros factores

El riesgo potencial de contaminación de las masas de agua por fósforo puede aumentar exponencialmente cuando se combinan varios de los factores mencionados en las secciones anteriores. La tabla siguiente ayuda a realizar un diagnóstico rápido en el que se puede identificar la presencia o la concurrencia de un conjunto de factores de riesgo. En función del número de factores de riesgo identificados y combinados, el nivel de riesgo de contaminación por fósforo puede clasificarse de ***bajo*** a ***muy elevado***.

Factores de riesgo	Factores identificados	Riesgo de contaminación
Suelo de textura gruesa/ligera o fina/pesada (arenoso o arcilloso/limoso-arcilloso)	X	***Elevado***
MO igual o inferior al 2%	X	
pH igual o inferior 6		
P_2O_5 (Égner-Riehm-AL) igual o superior a 200 ppm o P2 O5 (Olsen) igual o superior a 115 ppm	X	
Nivel freático superficial: profundidad igual o inferior a 2 m durante la temporada estival (estación seca)		
Pendiente de la parcela igual o superior al 8 %		
Riego por inundación o escorrentía superficial identificada del agua de riego	X	
Solo compactado: macroporosidade inferior 10%		
Cobertura del suelo: nula o escasa		
Clima con elevadas precipitaciones: con episodios frecuentes de lluvias intensas y concentradas		
Escala del nivel de «Riesgo de contaminación por fósforo»		
Reducido: hasta **2** factores	***Medio:*** **3** factores	
Elevado: **4** factores	***Muy elevado:*** Más **5** factores	

Nota: La tabla se utiliza a modo de ejemplo y debe adaptarse a la realidad de cada sistema para el autodiagnóstico del riesgo de contaminación de las masas de agua con P.

Buenas prácticas recomendadas para la protección de las masas de agua
Instalar y mantener franjas de protección cultivadas (de un mínimo de 10 m de ancho) junto a las líneas de agua
Impedir el acceso directo de los patos a los cursos de agua y a las zonas ribereñas (valla a 10–15 m de la orilla)
Mantener una cubierta vegetal permanente para maximizar la infiltración y minimizar la escorrentía superficial
Situar los comederos, bebederos y refugios lejos de las líneas de agua y de las zonas de mayor pendiente
Almacenar la cama y los efluentes en estructuras impermeables y cubiertas
Realizar un seguimiento del fósforo (P) en las masas de agua adyacentes
Instalar y mantener franjas de protección cultivadas (de un mínimo de 10 m de ancho) junto a las líneas de agua

4 Gestión de la producción avícola

La gestión de la producción avícola tiene un impacto directo en el riesgo de contaminación por fósforo. La ubicación de las instalaciones, la gestión de las explotaciones y el bienestar animal condicionan la cantidad, la distribución y el destino de los efluentes. Una producción eficiente y bien planificada reduce la carga de fósforo por unidad de producto y facilita la valorización segura de los residuos.

4.1 Gestión del bienestar animal

El bienestar animal y la eficiencia productiva están asociados a una menor carga de efluentes por animal y a una deposición más homogénea de los excrementos. Unas densidades adecuadas, el acceso a pastos de calidad y una gestión que evite el *estrés* animal reducen la concentración localizada de nutrientes y facilitan la gestión de los efluentes, contribuyendo indirectamente a mitigar el riesgo de contaminación por fósforo.

Ubicación

La ubicación de las instalaciones de alojamiento y de almacenamiento de efluentes (depósitos de estiércol, lagunas, posibles estaciones de tratamiento) es determinante para la gestión del riesgo. Deben situarse alejadas de los cursos de agua, de las zonas de mayor pendiente y de las áreas con un nivel freático elevado, en suelos con buena capacidad de retención. Una ubicación bien elegida optimiza la recogida y el aprovechamiento de los efluentes, minimiza los trayectos de transporte y reduce el riesgo de escorrentía y lixiviación del fósforo, garantizando al mismo tiempo el bienestar animal y un destino seguro para los residuos.

Ventajas

- Minimiza el riesgo de escorrentía y lixiviación del fósforo;
- Facilita la recogida y el aprovechamiento de los efluentes;
- Reduce las distancias de transporte de los residuos.

Desventajas

- Puede requerir inversión en infraestructuras y su reubicación;
- Posibles limitaciones debidas a la topografía y/o la configuración de la explotación.

Es de alojamiento

Las estructuras de alojamiento deben contar con suelos y sistemas de recogida que eviten las pérdidas de efluentes, que faciliten la retirada y el traslado de la cama para el compostaje, y que tengan unas dimensiones adecuadas a la densidad animal, garantizando el bienestar y reduciendo la concentración de residuos. Los alojamientos pueden ser pabellones fijos o móviles y deben tener, como mínimo, un tercio de la superficie del suelo ocupada por una estructura de construcción sólida.

Ventajas

- Recogida eficiente y controlada de la cama y los efluentes;
- Mejor bienestar animal;
- Facilita el tratamiento de estabilización y valorización de los residuos.

Desventajas

- Costes de construcción y mantenimiento;
- Necesidad de limpieza y gestión periódicas.

Cómo ponerlo en práctica:

Crecimiento

1.ª fase: Parques de aclimatación (2-3 semanas)

2.ª fase: Con acceso continuo al aire libre

Instalación de los corrales

El tamaño de los pastos, la densidad de ganado y la frecuencia de rotación deben definirse para distribuir uniformemente el depósito de excrementos y evitar la saturación localizada del suelo en P. Los pastos más pequeños con rotación frecuente (pastoreo de presión controlada) favorecen la regeneración del pasto y la distribución de la carga de P, reduciendo el riesgo de contaminación por P.

Ventajas

- Distribución homogénea del fósforo depositado;
- Regeneración del pastizal y protección del suelo;
- Reducción de la saturación localizada y de la lixiviación superficial del fósforo.

Desventajas

- Requiere infraestructura de cercado y una mayor gestión;
- Mayor necesidad de planificación y mano de obra.

Densidad animal o número de cabezas

Una densidad de animales adecuada en las zonas interiores, exteriores y de los nidos de las aves permite a estas acceder fácilmente a los parques exteriores y a los pabellones, y contribuye a su bienestar general. La superficie interior corresponde al espacio útil disponible para los animales, mientras que la superficie exterior corresponde al espacio disponible para el pastoreo rotativo.

Ventajas

- Una carga ganadera adecuada maximiza la producción, garantizando el bienestar animal;
- Control natural de las malas hierbas y las plagas de los pastos;
- Fomenta el abono natural;
- Menor compactación y menor efecto de remoción superficial del suelo.

Cómo aplicarlo:

Límite de aves: Máximo de 8 aves por $^{m^2}$ (en alojamiento)
Límite de peso: no debe superar los 35 kg de peso vivo para los patos *Mulard*
Límite por instalación: el número máximo por cada instalación con cubierta vegetal es de 3200 patos *Mulard*
Densidad exterior: Superficie mínima de 3 m^2 por pato al aire libre (patos *Mulard)*

IMPORTANTE: Es obligatorio consultar la normativa legal aplicable a los patos (Anas platyrhynchos dom., Cairina muschata), los patos de Pekín y los patos de Berbería.

- La superficie disponible en rotación, por número de cabezas (en m^2), no puede superar el valor límite de efluentes depositados en el terreno, que equivale a 170 kg de N/ha/año.

4.2 Gestión de la alimentación

La composición nutricional de la ración de las aves, su digestibilidad y la eficacia de la absorción y asimilación de los nutrientes serán aspectos relevantes para reducir la excreción de fósforo por parte de los animales. La mayor parte del P presente en los cereales y las oleaginosas se encuentra en forma de P fítico (ácido fítico), que se elimina en las excreciones sin ser aprovechado por el animal. Al ser monogástricos, las aves no son capaces de aprovechar eficazmente el P fítico. La incorporación de fitasa en la ración es crucial para reducir la excreción de P por parte de los animales.

La fitasa y la reducción de la excreción de fósforo

La fitasa es una enzima que descompone el ácido fítico, liberando el fósforo y otros nutrientes contenidos en los fitatos. La fitasa microbiana puede añadirse durante la fabricación del pienso en forma de polvo o líquido. El uso de fitasa microbiana mejora la digestibilidad y la asimilación del fósforo total, lo que favorece una mayor absorción de fósforo en el intestino delgado de las aves, reduciendo así la necesidad de ingesta de fósforo mineral.

Los aumentos en la digestibilidad del fósforo en los cereales y semillas oleaginosas utilizados para la alimentación animal suelen ser: del 17 % para el bagazo de girasol; del 20 al 24 % para el maíz y el bagazo de soja; y del 50 al 55 % para el trigo y la cebada.

Mecanismo de acción de la fitasa

El **ácido fítico** se considera un antinutriente porque se une a los minerales (Zn, Fe, Ca, Mg) y a las proteínas, formando complejos insolubles que el animal no puede absorber.

En la dosis estándar (alrededor de 500 FTU/kg), la fitasa reduce el ácido fítico del pienso, pero no en su totalidad. Por lo tanto, incluso con el uso de esta enzima, sigue conservando cierto poder antinutricional.

En caso de sobredosis de fitasa (≥ 1 500 FTU/kg), se produce la destrucción casi completa del ácido fítico, lo que libera no solo más P, sino también otros nutrientes, como el zinc, el cobre y el sodio. Esto se traduce en i) un mejor aprovechamiento de los micronutrientes, y ii) una reducción de las necesidades de suplementación mineral inorgánica.

La suplementación con fitasa puede reducir la excreción de fósforo en las heces entre un 30 % y un 50 %, lo que disminuye la carga de fósforo en los suelos receptores de efluentes. Estas moléculas pueden quelar minerales como el hierro, el zinc y el calcio, e inhibir la actividad de la pepsina.

- La incorporación de fitasas en la ración de las aves aumenta la disponibilidad del fósforo vegetal entre un 20 % y un 30 % en pollos de engorde, gallinas ponedoras y pavos. Este beneficio es directamente aplicable a la cría de patos.
- Por regla general, una reducción del 0,1 % del fósforo total en los piensos mediante el uso de fitasa se traduce en una disminución de la excreción de fósforo superior al 20 % en las gallinas ponedoras y en los pollos de engorde.
- Las medidas preventivas que pueden adoptarse ya en la alimentación de los patos reducen las cantidades de elementos fertilizantes excretados por los animales y, en consecuencia, reducen la necesidad de medidas correctivas posteriores en el ciclo de producción, cuando dichos elementos suponen un riesgo de contaminación ambiental.

Fosfatos alimentarios y otros aditivos

La adición de fosfatos alimentarios digeribles, así como de otros aditivos como enzimas, estimuladores del crecimiento y microorganismos, permite mantener el crecimiento de los animales al tiempo que se reduce la cantidad de pienso, lo que contribuye a reducir los vertidos de fósforo al medio ambiente. Estos aditivos actúan en sinergia con la fitasa para optimizar el aprovechamiento de los nutrientes y reducir su vertido a través de los efluentes ganaderos.

Buenas prácticas recomendadas en la gestión de la producción avícola
Reducir el fósforo en origen a través de la alimentación, mediante el uso de fitasa y la adaptación de las raciones, disminuyendo así la excreción de fósforo.
Dimensionar los recintos y la densidad de ganado para distribuir uniformemente la deposición de fósforo.
Practicar la rotación frecuente de los corrales con períodos de descanso del pastizal.
Ubicar los alojamientos y las instalaciones de vertido de efluentes lejos de los cursos de agua.

4. Referencias bibliográficas

Directiva n.º 91/676/CEE del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación causada por nitratos de origen agrícola.

Comisión Europea. (2014). Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones: Sobre la revisión de la lista de materias primas críticas para la UE y la aplicación de la Iniciativa sobre las Materias Primas (COM/2014/0297 final). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52014DC0297

Comisión Europea. (2019). El Pacto Verde Europeo. COM(2019) 640 final. Comisión Europea.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L 327, 1-73.

Comisión Europea. (2019). El Pacto Verde Europeo. COM(2019) 640 final. Comisión Europea.

Comisión Europea. (2020a). Estrategia «De la granja a la mesa»: por un sistema alimentario justo, saludable y respetuoso con el medio ambiente. COM(2020) 381 final. Comisión Europea.

Comisión Europea. (2020b). Un nuevo Plan de Acción para la Economía Circular: Por una Europa más limpia y competitiva. COM(2020) 98 final. Comisión Europea.

HORTA, Carmo; TORRENT, J. (2010) - Dinámica del fósforo en el suelo: perspectiva agronómica y medioambiental. Castelo Branco: Ediciones IPCB. ISBN 978-989-8196-10-1.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2025). Directiva (UE) 2025/2360 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de noviembre de 2025, relativa al seguimiento y la resiliencia de los suelos. Diario Oficial de la Unión Europea. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2025/2360/oj/eng

Portugal. Ministerio de Medio Ambiente y Ministerio de Agricultura, Bosques y Desarrollo Rural (2018). Orden n.º 1230/2018: por la que se aprueba el Código de Buenas Prácticas Agrícolas. Diario de la República n.º 25/2018, Serie II.