

SUMAR FÓSFORO, HACE LA DIFERENCIA

FERTILIZACIÓN CON FÓSFORO



MANUAL TÉCNICO FICHAS 37 A 41



FERTILIZACIÓN CON FÓSFORO

ÍNDICE

#37 - <u>AL FERTILIZAR, SÓLO PARTE DEL “P” APLICADO LLEGA A LAS PLANTAS</u>	1
#38 - <u>FUENTES ORGÁNICAS DE “P”, UNA ALTERNATIVA DE BAJA CONCENTRACIÓN</u>	2
#39 - <u>ORÍGENES Y COMPOSICIÓN DE FERTILIZANTES MINERALES FOSFATADOS</u>	3
#40 - <u>CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES FERTILIZANTES FOSFATADOS</u>	4
#41 - <u>REACCIONES QUÍMICAS DE LOS FERTILIZANTES EN LOS SUELOS</u>	6
#42 - <u>PASOS EN LA DISOLUCIÓN DE FERTILIZANTES FOSFATADOS</u>	8
#43 - <u>ADMINISTRACIÓN EFICIENTE DE LA FERTILIZACIÓN CON FÓSFORO</u>	9
#44 - <u>FUENTES DE APORTES DE FÓSFORO</u>	10
#45 - <u>¿FERTILIZANDO EL SUELO O LOS CULTIVOS? EL PUNTO DE PARTIDA DE LAS ESTRATEGIAS DE MANEJO DE FERTILIZACIÓN</u>	11
#46 - <u>CANTIDAD A APLICAR SEGÚN FILOSOFÍAS DE FERTILIZACIÓN</u>	13
#47 - <u>BALANCES ENTRE EXTRACCIONES Y APORTES DE “P”: CAMBIOS EN LOS SUELOS</u>	14
#48 - <u>MOMENTO DE APLICACIÓN; ¿CUÁNDO APLICAR FERTILIZANTES CON FÓSFORO?</u>	15
#49 - <u>EFICIENCIA DE LAS DISTINTAS FORMAS DE APLICACIÓN</u>	16
#50 - <u>LUGAR CORRECTO: CUIDADO AL APLICAR FERTILIZANTES CON P JUNTO A LAS SEMILLAS.</u>	17
#51 - <u>PARTE DEL FÓSFORO CON EL QUE FERTILIZAMOS QUEDA PARA PRÓXIMOS CULTIVOS</u>	19



Una parte del P aplicado al fertilizar es incorporar en las plantas y el resto queda en distintas fracciones del suelo. Del fósforo que es aplicado solo una parte es absorbida en el primer año por las plantas. El resto del fósforo no utilizado se ubica en fracciones que puede liberarse en el corto plazo (“fracciones lábiles”), pero una parte importante queda “fijado” en compuestos estables. La proporción de fósforo que es fijado o inmovilizado luego de la fertilización fosfatada es mayor en suelos ácidos, alcalinos, arcillosos y ricos en óxidos. El P residual puede ser aprovechado por cultivos siguientes. La cantidad de fósforo del sistema también influye en la proporción que se fija, es decir, que no queda disponible: a valores bajos de fósforo del suelo, la proporción es mayor. Dada la limitada movilidad del P en los suelos, este tiende a acumularse superficialmente cuando se aplica en los suelos.

Destino	Rango	Referencias
Planta	15 al 35%	Mattingly, 1975; Johnston y Syers, 2001; Ciampitti y col., 2011c
Fracciones lábiles de P*	15 al 44%	Beck y Sánchez, 1994; Johnston y Syers, 2001; Dobermann y col., 2002; Zheng y col., 2002; Blake y col., 2003; Boschetti y col., 2004; Verma y col., 2005; Wang y col., 2007; Picone y col., 2008; Ciampitti y col., 2011c
Fracciones moderadamente lábiles **	26 al 59%	Johnston y Syers, 2001; Zheng y col., 2002; Blake y col., 2003; Boschetti y col., 2004; Verma y col., 2005; Picone y col., 2008; Wang y col., 2007; Ciampitti y col., 2011c
Fracción recalcitrante o más estable ***	17 al 36%	Johnston y Syers, 2001; Zheng y col., 2002; Blake y col., 2003; Vázquez y col., 2008; Ciampitti y col., 2011c

Una parte del P aplicado al fertilizar es incorporada en las plantas y el resto, dependiendo del tipo de suelo y de la dosis y ubicación del fertilizante, queda en distintas fracciones del suelo (residual). Del fósforo que es aplicado solo una parte es absorbida en el primer año por las plantas; la cantidad de fósforo absorbido depende de los mecanismos que la planta posea para adquirir el nutriente: arquitectura de raíces, número de raíces y pelos radicales, liberación de moléculas o ácidos orgánicos, capacidad de asociarse con micorrizas vehículo avasculares, etc. El resto del fósforo no utilizado se ubica en fracciones que puede liberarse en el corto plazo (“fracciones lábiles”), pero una parte importante queda “fijado” en compuestos estables (“recalcitrantes”), que son sales de fosfatos de hierro, aluminio o calcio, o adherido muy fuertemente a las cargas positivas (el fósforo se encuentra en forma de anión (-) fosfato) de las partículas más pequeñas del suelo, arcillas, óxidos y materia orgánica estabilizada. Por lo tanto, la proporción de fósforo que es fijado o inmovilizado luego de la fertilización fosfatada es mayor en suelos ácidos (precipitación con hierro y aluminio) o moderadamente alcalino (reacción con el calcio), y en suelos con altos contenidos de arcillas y óxidos. La cantidad de fósforo del sistema también influye en la proporción que se fija, es decir que no queda disponible: a valores bajos de fósforo del suelo, la proporción es mayor, por lo que es más difícil aumentar los niveles y disponibilidad de fósforo cuando éste escasea, dado que mucho del fósforo aplicado por fertilización se va a ubicar en los sitios de reserva del nutriente en los suelos, aunque pareciera que con bajos contenidos de fósforo, las primeras fracciones que se enriquecen son las de reserva lábiles. Luego de muchos años de aplicación y con balances positivos (reposición mayor a extracción por los cultivos), dada la limitada movilidad del P en los suelos, este tiende a acumularse superficialmente (estratificación). El P residual puede ser aprovechado por cultivos siguientes, pero también queda expuesto a pérdidas si el suelo se erosiona por el paso del agua.

Una opción para el agregado de fósforo a los suelos es vía el reciclado de residuos orgánicos. Los estiércoles de animales son una fuente de P en cantidades variables según su origen, especies y tipo de alimentación. Independientemente de su origen, las fuentes orgánicas de origen animal tienen que ser estabilizadas antes de su aplicación en los suelos.

Como las concentraciones de P son muy inferiores a las que contienen los fertilizantes minerales, se requiere considerar operaciones de logística diferentes y manejar grandes volúmenes de materiales.

Contenido de P	Estiercol Bovinos Lecheros	Estiercol Bovinos de carne	Estiercol Porcino	Estiercol Gallinas
P Total g/kg	3,2	4,1	7,7	16,4
P Inorgánico (%)	83%	79%	88%	96%
P orgánico (%)	17%	21%	12%	4%

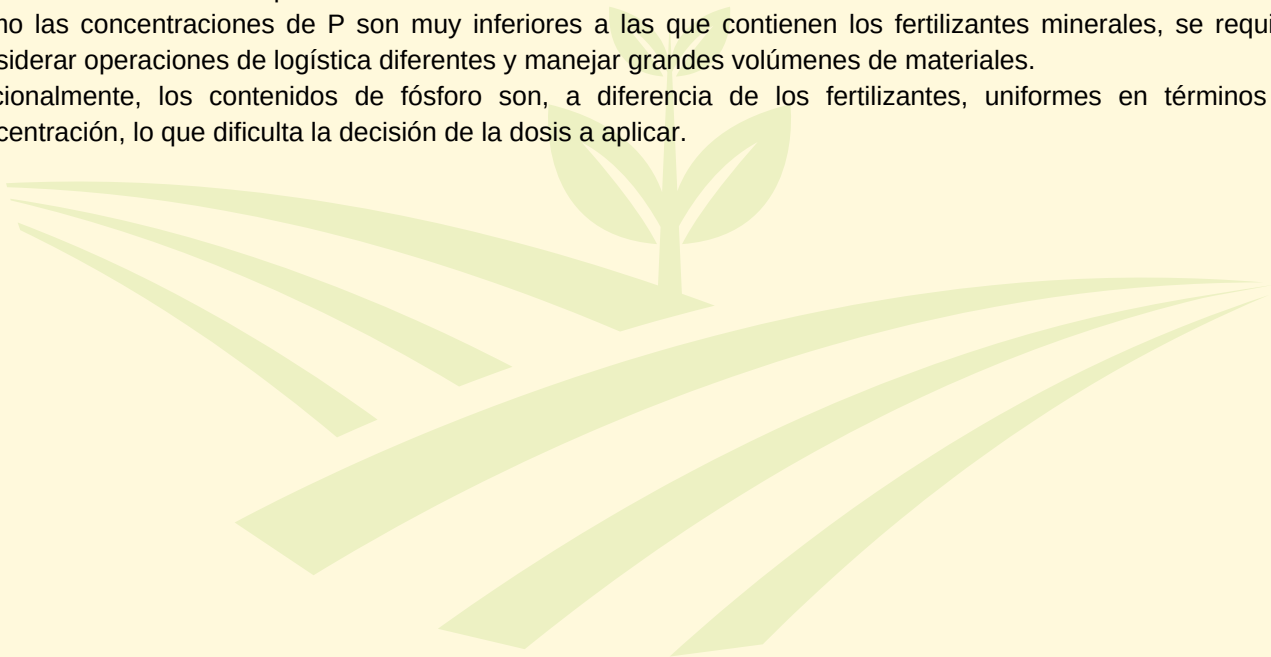
Una opción para el agregado de fósforo a los suelos es vía el reciclado de residuos orgánicos de diferente origen. Los estiércoles de animales son una fuente de P en cantidades variables (P total) según su origen, especies y tipo de alimentación. La proporción entre formas orgánicas e inorgánicas depende del tipo de estiércol, condicionando su uso y efectividad.

Los residuos sólidos urbanos también presentan concentraciones variables de P (2 al 4%) y mayoritariamente en forma inorgánica.

Independientemente de su origen, las fuentes orgánicas de origen animal tienen que ser estabilizadas por fermentación antes de su aplicación en los suelos.

Como las concentraciones de P son muy inferiores a las que contienen los fertilizantes minerales, se requiere considerar operaciones de logística diferentes y manejar grandes volúmenes de materiales.

Adicionalmente, los contenidos de fósforo son, a diferencia de los fertilizantes, uniformes en términos de concentración, lo que dificulta la decisión de la dosis a aplicar.



Los fertilizantes fosfatados se producen al procesar apatita, un mineral rico en fósforo. La reactividad de las rocas fosfóricas, que contiene diferentes cantidades de apatita, varía según su origen. Al tratar las rocas con ácidos o con calor aumenta la solubilidad en agua (reactividad) y así la concentración del P soluble, dando lugar a los fertilizantes que suelen usarse en la agricultura extensiva.

La concentración de fósforo se suele expresar como contenido porcentual de pentóxido de fósforo; para la conversión entre ambas formas de expresión, pentóxido de fósforo (P₂O₅) o fósforo (P), se usa la siguiente relación, derivada del porcentaje de fósforo elemento(43%) en la molécula de pentóxido:

$$\text{Cont de P} = \text{Cont de P}_{2}\text{O}_{5} * 0,43$$



Principales yacimientos de fósforo del mundo. Fte: DERA(Agencia de Recursos Minerales de Alemania)

Los fertilizantes fosfatados se producen al procesar apatita, un mineral rico en fósforo.

Los principales reservorios de apatita o roca fosfórica se encuentran en China, Rusia, Marruecos, Estados Unidos y Túnez.

La reactividad de las rocas fosfóricas, que contiene diferentes cantidades de apatita, varía según su origen. En condiciones naturales presentan baja concentración de P soluble y su aplicación directa como roca se limita a algunos suelos (ácidos) y cultivos mayormente perennes.

Al tratar las rocas con ácidos o con calor aumenta la solubilidad en agua (reactividad) y así la concentración del P soluble, dando lugar a los fertilizantes que suelen usarse en la agricultura extensiva.

La concentración de P en los fertilizantes tradicionalmente se ha expresado generalmente en forma de pentóxido de fósforo (P₂O₅), pero actualmente se recomienda el uso como P elemento, tal como lo indica la legislación argentina y lo sugiere la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACs)..

Para la conversión entre ambas formas de expresión se usan las siguientes relaciones, derivadas del porcentaje de fósforo elemento (43%) en la molécula de pentóxido:

De	A	Multiplicar por
P (%) "fosforo"	P ₂ O ₅ (%) "pentóxido"	0,43
P ₂ O ₅ (%) "pentóxido"	P (%) "fósforo"	2,29



A partir de la roca fosfórica pueden sintetizarse varios fertilizantes fosfatados, de diferentes propiedades físico químicas. Algunos de ellos son:

Fosfatos de amonio: tienen excelentes propiedades físicas, muy solubles, una elevada concentración de fósforo (ventaja logística), bajo índice salino y además tienen otro nutriente muy importante como nitrógeno.

Superfosfato triple de calcio (SPT): Se incluye en este caso a los superfosfatos que tienen más del 46% de P₂O₅. Su concentración de fósforo es relativamente elevada y cercana al 20%.

Super fosfato simple de calcio (SPS): Se obtiene cuando la roca fosfórica es acidulada con ácido sulfúrico, por lo que además de fósforo y calcio, aporta azufre en cantidades variables.

Polifosfatos: Se obtienen por polimerización encadenas de dos o más iones ortofosfato (fosfatos sencillos), con pérdida de una molécula de agua por cada dos moléculas de ácido fosfórico. Al tener amonio tienen la ventaja de aportar también nitrógeno.

Fertilizante	Grado	P ₂ O ₅	P	Otros nutrientes
Fosfato diamónico	18-46-0	46-52	20-23	18-21 N
Fosfato monoamónico	11-52-0	48-62	21-27	11-13 N
Superfosfato triple de calcio	0-46-0	48-62	19-23	14-Ca
Superfosfato simple de calcio	0-21-0			12 S:20 Ca
Roca fosfórica	0-30-0	25-40	11-17	48 Ca
Fosfato líquido	10-31-0	25-40	13-15	10-21 N
Fosfato monopotásico	0-52-35	52	23	29 K
Polifosfato de amonio	10-34-0	35-62	15-27	10-15 N

La roca fosfórica presente en los yacimientos es la fuente original de fósforo para la agricultura. La cantidad de fósforo en la roca es variable, dependiendo del yacimiento, y tiene otros nutrientes como el calcio. La roca puede usarse directamente como fuente de fósforo, aunque presenta limitaciones de disponibilidad en suelos alcalinos. A partir de la roca se pueden elaborar otros fertilizantes fosfatados, siendo los más comunes los siguientes:

Fosfatos de amonio: Se forman por reacción del amoníaco con el ácido fosfórico. Los más representativos son el fosfato diamónico (DAP o FDA) y el fosfato monoamónico (MAP o FMA). Los fosfatos de amonio poseen varias ventajas con respecto a otros grupos: tienen excelentes propiedades físicas, muy solubles, una elevada concentración de fósforo (ventaja logística), bajo índice salino (es decir son sales que no generan fenómenos de tensión osmótica serios) y además tienen otro nutriente muy importante como nitrógeno. Estas ventajas convierten a este grupo en el más popular dentro de los fertilizantes fosfatados, especialmente el DAP, el cual puede encontrarse en forma granulada o cristalina.

El DAP presenta una elevada concentración de P, superior al 20%, y además una cantidad importante de nitrógeno, cercana al 18%. En las inmediaciones del gránulo el pH es alto (8-8,5), lo cual puede derivar en algunas pérdidas por volatilización de amoníaco, aunque luego la misma oxidación del amonio equilibra el pH, bajándolo y limitando estas pérdidas.

Por su parte el MAP tiene una concentración de fósforo aún superior a la del DAP, entre un 21 a 27% de este elemento, y una reacción más ácida cercana al gránulo, atenuando las pérdidas de amoníaco por volatilización, lo cual es beneficioso para aplicar junto con la semilla, dado que el amoníaco es fitotóxico en elevadas concentraciones. Existen formulaciones de MAP que incluyen azufre en su composición (MAP azufrados), que pueden llegar a aportar entre un 10 y un 15% de azufre elemento.

Superfosfato triple de calcio (SPT): Se incluye en este caso a los superfosfatos que tienen más del 46% de P_2O_5 . Su elaboración es simple, tiene bajos requerimientos técnicos y poca inversión de capital. Su concentración de fósforo es relativamente elevada y cercana al 20%. Además de proveer directamente calcio, su reacción fuertemente ácida (1,5-2,7 en las inmediaciones del gránulo) conducen a la disolución de minerales de magnesio y calcio del suelo. Tiene en general más humedad que los fosfatos de amonio, y no se recomienda su mezcla con urea.

Superfosfato simple de calcio (SPS): Se obtiene cuando la roca fosfórica es acidulada con ácido sulfúrico, por lo que además de fósforo y calcio, aporta azufre en cantidades variables. Los productos formados por la acidulación son principalmente fosfato monocálcico y sulfato de calcio. El contenido de fósforo es bajo si lo comparamos con los anteriores, cercanos al 9%. Su elaboración también es sencilla, lo que lo transforma en un material relativamente económico.

Fosfatos potásicos: En este caso el catión acompañante es el potasio, reemplazando al calcio. Aunque las concentraciones de fósforo y potasio aportadas son importantes, su producción a nivel comercial tiene restricciones desde lo operativo y desde lo económico, dado que es un producto más caro de elaborar que los casos anteriores. No obstante, debido a su alta solubilidad, suele utilizarse para cultivos de valor aplicado con fertiriego.

Polifosfatos: En cuanto a los polifosfatos, los mismos se obtienen por polimerización en cadenas de dos o más iones ortofosfato (fosfatos sencillos), con pérdida de una molécula de agua por cada dos moléculas de ácido fosfórico. Los polifosfatos de cadenas cortas son más solubles y menos estables que los de cadenas largas. Las formas más utilizadas de polifosfatos son los polifosfatos de amonio, generalmente líquidos, que pueden combinarse con otros fertilizantes líquidos como el UAN, aunque pueden presentarse en forma granular. Al tener amonio tienen la ventaja de aportar también nitrógeno: usualmente tienen una cantidad de nitrógeno cercana al 10% (y 15% de P). Los polifosfatos se deben deshidratar y descomponer en ortofosfatos para que las plantas puedan absorber el fósforo (de cualquier manera, en los productos comerciales, una parte cercana al 30% ya se encuentra como ortofosfato).

En los fertilizantes minerales se describen dos tipos de moléculas con P: Ortofosfatos sencillos y Polifosfatos o mezclas con cadenas de Ortofosfatos y Pirofosfatos. La mayoría de los fertilizantes sólidos tienen una solubilidad en agua mayor al 80%. Luego de las reacciones iniciales se suceden procesos de precipitación y de absorción cuando son aplicados al suelo.

En principio, los Polifosfatos tienen mayor movilidad luego de aplicados al suelo que los iones ortofosfato, sin embargo, esta movilidad se reduce luego que los Polifosfatos son transformados a Ortofosfatos.

Es importante considerar que en las cercanías del gránulo la reacción del suelo (acidez o alcalinidad) es influenciada por la composición del fertilizante. De cualquier manera, en el mediano plazo la reacción general del suelo de casi todos los fertilizantes es hacia la acidificación. Por otro lado, los fertilizantes también modifican la cantidad de sales del suelo en los sitios cercanos al fertilizante, aunque el efecto salino de estos fertilizantes es bajo.

En los fertilizantes minerales se describen dos tipos de moléculas con P:

- Ortofosfatos sencillos (PO₄³⁻) frecuentes en la mayoría de las fuentes sólidas (SPT, SPS, FMA y FDA).
- Polifosfatos o mezclas con cadenas de ortofosfatos y pirofosfatos (P₂O₇⁴⁻) predominantes en fuentes líquidas.

La mayoría de los fertilizantes sólidos tienen una solubilidad en agua mayor al 80 % y en el punto de reacción, según la fuente, se describen cambios (ej. pH, formaciones de precipitados, etc.)

Luego de las reacciones iniciales se suceden procesos de precipitación (en cercanía del gránulo de fertilizante) y de adsorción (hacia la periferia del gránulo, donde son menores las concentraciones de P).

En principio, los Polifosfatos tienen mayor movilidad luego de aplicados al suelo que los iones Ortofosfato (presentes en el DAP, MAP, SPS, SPT, etc.), lo cual podría ser una ventaja, especialmente en suelos calcáreos (los Polifosfatos pueden quelatar al calcio y al magnesio, evitando la formación de sales insolubles de fósforo); sin embargo, esta movilidad se reduce luego que los Polifosfatos son transformados a Ortofosfato.

Es importante considerar que en las cercanías del gránulo la reacción del suelo (acidez o alcalinidad) es influenciada por la composición del fertilizante. Por ejemplo, los superfosfatos tienen en la periferia del gránulo valores de pH muy bajos (ácidos), cercanos a 1,5, el fosfato monoamónico un valor ácido, pero algo superior (pH= 3,5), y el fosfato diamónico un valor de pH alcalino, cercano a 8. De cualquier manera, en el mediano plazo la reacción general del suelo de casi todos los fertilizantes es hacia la acidificación.

Fertilizante	Análisis del Fertilizante (%)	% de N como NH ₄ ⁺	Reacción (pH)
Nitrato de Amonio	33 - 0 - 0	50	Ácido
Nitrato de Potasio	13 - 0 - 44	0	Neutro
Nitrato de Calcio	15,5 - 0 - 0	6	Básico
Nitrato de Sodio	16 - 0 - 0	0	Básico
Nitrato de Magnesio	11 - 0 - 0	0	Neutro
Sulfato de amonio	21 - 0 - 0	100	Ácido
Fosfato Monoamónico	12 - 62 - 0	100	Ácido
Fosfato Diamónico	21 - 53 - 0	100	Ligeramente ácido
Sulfato de Potasio	0 - 0 - 53	----	Neutro
Cloruro de Potasio	0 - 0 - 60	----	Neutro
Fosfato Monopotásico	0 - 53 - 34	----	Básico
Fosfato Dipotásico	0 - 41 - 54	----	Básico
Sulfato de Magnesio	----	----	Neutro

Por otro lado, los fertilizantes también modifican la cantidad de sales del suelo en los sitios cercanos al fertilizante, pudiendo afectar la disponibilidad de agua por efecto osmótico en las cercanías del gránulo: este efecto es cuantificado por el Índice Salino, aunque en general los fertilizantes fosfatados presentan valores bajos de este índice.

Reacciones químicas de los Fertilizantes en el suelo

Fertilizante	Equivalente Acidez	Índice Salino (relativo al nitrato de sodio)
NITROGENADOS		
UREA	84	26,8
Nitrato de Amonio	63	104,7
Nitrato de Sodio	29	100
Sulfato de Amonio	110	53,7
UAN	58	38,3

FOSFATADOS

Fosfato Diamónico	70	34,2
Fosfato Monoamónico	65	29,9
Fosfato Monopotásico	-	8,4
Superfosfato Simple	65	29,9
Superfosfato Triple	-	10,1

En el suelo, los gránulos de los fertilizantes se hidratan y se identifican tres zonas de reacción

1. La primera en contacto íntimo con el gránulo, contiene compuestos insolubles del fertilizante y precipitados en la zona muy cercana.
2. Zona intermedia con concentraciones de P soluble superiores a la capacidad de adsorción del suelo. Esta zona saturada en fósforo se extiende hasta 2 cm alrededor del gránulo.
3. Externa, con menor concentración de P e inferior a la capacidad de adsorción del suelo. Como la capacidad de retención del fósforo sobre las arcillas no está excedida, se limitan los procesos de precipitación con cationes.

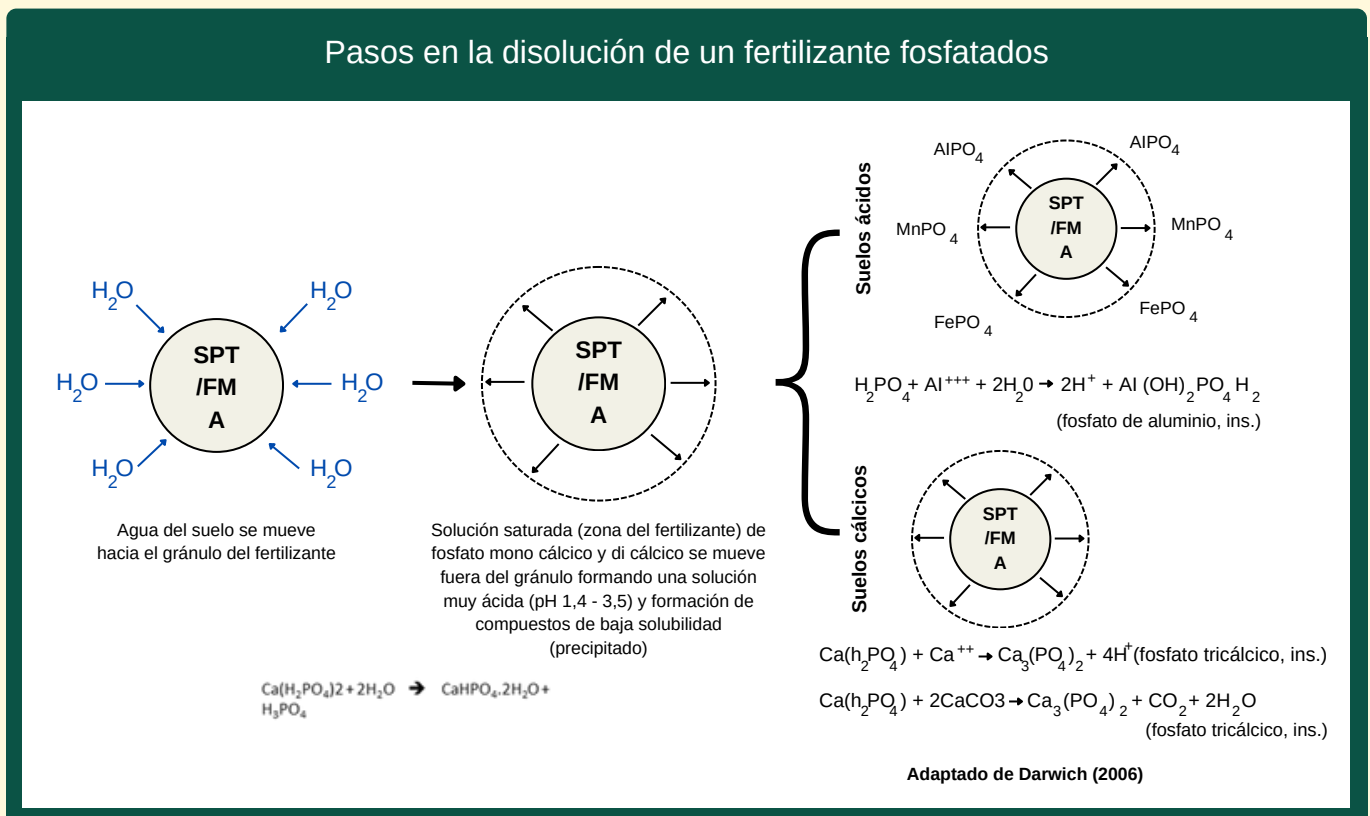
En el suelo, los gránulos de los fertilizantes más solubles se hidratan y se identifican tres zonas de reacción:

La primera en contacto íntimo con el gránulo, contiene compuestos insolubles del fertilizante y precipitados en la zona muy cercana.

Zona intermedia con concentraciones de P soluble superiores a la capacidad de adsorción del suelo y en parte se forman precipitados de los fosfatos con los cationes presentes, que pueden ser calcio o magnesio (suelos ligeramente ácidos, neutros y alcalinos), o hierro y aluminio (en suelos ácidos). Esta zona saturada en fósforo se extiende hasta 2 cm alrededor del gránulo

Externa, con menor concentración de P e inferior a la capacidad de adsorción del suelo. Como la capacidad de retención del fósforo sobre las arcillas no está excedida, se limitan los procesos de precipitación con cationes.

En el caso de fuentes de fósforo menos reactivas, como la roca fosfórica, los procesos son similares pero tanto la disolución como la retención ocurren a velocidades menores



La recomendación de aplicación de fertilizantes fosfatados depende de la integración de cuatro estrategias identificadas como de buenas prácticas de manejo de los nutrientes. Estas estrategias contemplan la elección de fuente y de la dosis, del momento y la ubicación de la aplicación del nutriente correctas. En todos los casos el objetivo es lograr que el aporte de P a los cultivos no limite su normal crecimiento contemplando minimizar o limitar los riesgos de su pérdida por fuera de la captación con las plantas.

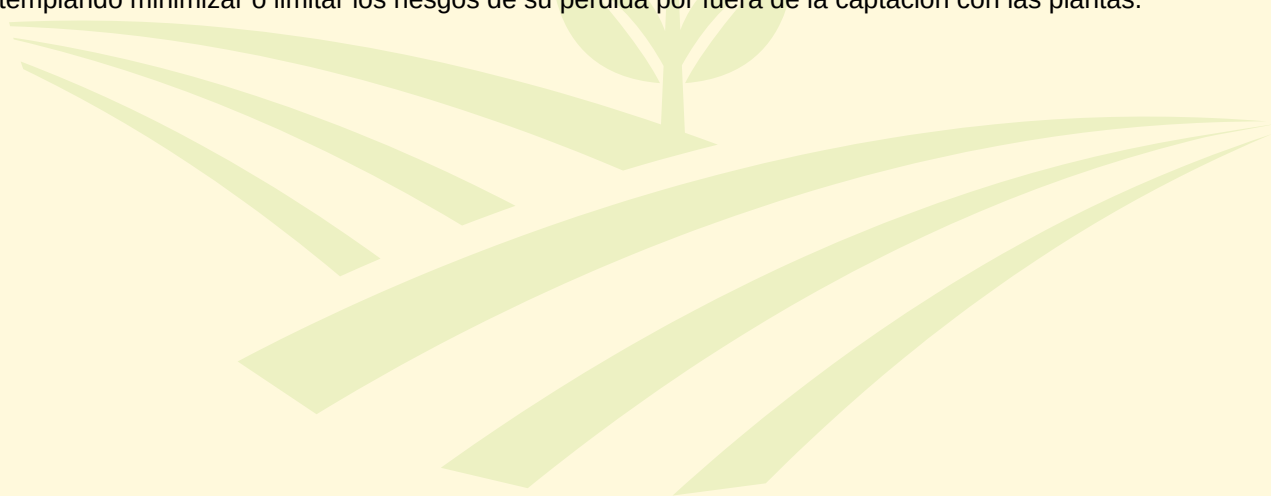


			
Fuente correcta Coincide con el tipo de fertilizante que el cultivo necesita	Dosis correcta Coincide con la cantidad de fertilizante que el cultivo necesita	Momento correcto Logra nutrientes disponibles cuando los cultivos los necesitan.	Lugar correcto Mantiene los nutrientes donde los cultivos pueden utilizarlos.

La recomendación de aplicación de fertilizantes fosfatados no son únicas ni dependen de un indicador único de decisión, sino de la integración de cuatro estrategias identificadas como de buenas prácticas de manejo de los nutrientes.

Estas estrategias contemplan la elección de fuente y de la dosis, del momento y la ubicación de la aplicación del nutriente. Para cada una, las opciones de resolución son variadas dependiendo de cuestiones económicas, estrategias, filosofías, antecedentes técnicos, disponibilidad de recurso y regulaciones.

En todos los casos, el objetivo es lograr que el aporte de P a los cultivos no limite su normal crecimiento contemplando minimizar o limitar los riesgos de su pérdida por fuera de la captación con las plantas.



Las fuentes de P que podemos aplicar en los suelos son de naturaleza orgánica e inorgánica. Las fuentes de fósforo más utilizadas son las inorgánicas de alta solubilidad: los superfosfatos y fosfatos de amonio.

La respuesta de los cultivos es independiente del origen del P, ya que en todos los casos requiere de transformaciones físico-químicas y biológicas hasta formas inorgánicas solubles. Además de los fertilizantes derivados de minerales con alta concentración de P, existen algunas fuentes orgánicas de este elemento y algunas de sus variantes son: estiércol, residuos orgánicos descompuestos y residuos biológicos urbanos que responden muchas veces a la necesidad de disposición y reciclaje de residuos de origen orgánico.

Nombre común	N	P 205	K20	S
Fosfato monoamónico	11	52	0	0
Fosfato diamónico	18	45	0	0
Nitrato de potasio	13	0	44	0
Roca fosfórica molida	0	20 - 40	0	0
Superfosfato simple	0	16 - 20	0	12
Superfosfato triple	0	46	0	0

Los orígenes del P que podemos aplicar en los suelos provienen tanto de formas orgánicas como inorgánicas.

Las fuentes de fósforo más utilizadas son las inorgánicas de alta solubilidad: los superfosfatos y fosfatos de amonio, aunque ha crecido en los últimos años el uso de fertilizantes líquidos a base de polifosfatos de amonio, o el uso directo de roca fosfórica como fertilizante de reacción retardada.

La respuesta de los cultivos es independiente del origen del P ya que en todos los casos requiere de transformaciones físico-químicas y biológicas hasta formas inorgánicas solubles.

Además de los fertilizantes derivados de minerales con alta concentración de P, existen algunas fuentes orgánicas de este elemento y algunas de sus características son:

-Estiércoles: con composición variada, la concentración de P depende del tipo de animal y de la calidad de su alimentación.

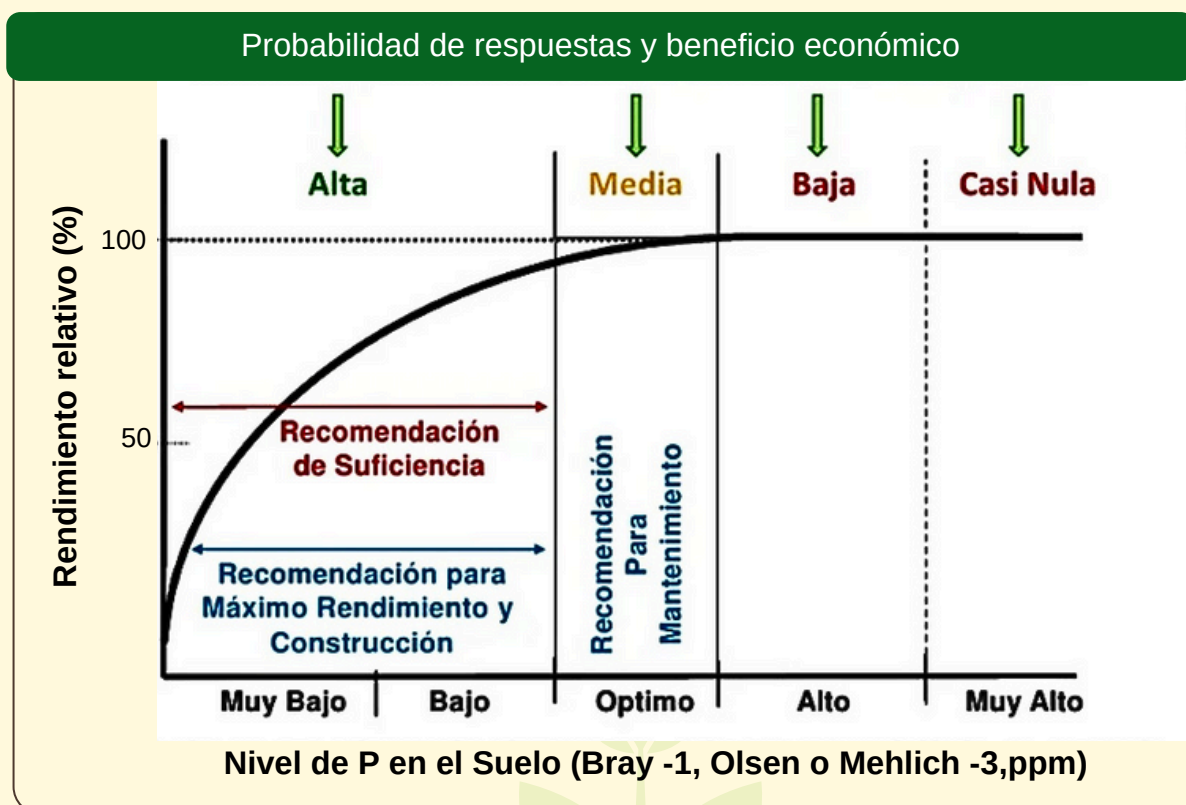
Residuos orgánicos descompuestos (compostaje): su origen y composición es variados, no es frecuente su aporte a los suelos como fuente de nutrientes solamente.

Residuos biológicos urbanos (biosólidos): provienen del reciclado de aguas de tratamiento domiciliario, su composición y concentración de nutrientes varía según orígenes, procesos de tratamiento, condiciones de almacenamiento y distribución pudiéndose emplear como complementos nutricionales.

Las fuentes orgánicas de fósforo son en general de uso ocasional y responden muchas veces a la necesidad de disposición y reciclaje de residuos de origen orgánico.

Al identificar que los niveles de P en un sitio pueden limitar la normal producción de los cultivos y decidir la dosis de aplicación de fertilizantes para su corrección, se describen principalmente dos planteos o “filosofías” para establecer cantidades a aplicar: Suficiencia (fertilizando el cultivo) y Reposición (Reconstrucción y mantenimiento, fertilizando el suelo).

Las estrategias mencionadas, también llamadas “filosofías”, no siempre responden estrictamente a cuestiones económicas de corto plazo, sino que pueden incluir perspectivas económicas de mayor alcance.



Al identificar que los niveles de P en un sitio pueden limitar la normal producción de los cultivos y decidir la dosis de aplicación de fertilizantes para su corrección se describen principalmente dos planteos o “filosofías” para establecer cantidades a aplicar:

·Suficiencia (“fertilizando el cultivo”): El objetivo es aplicar la cantidad mínima necesaria de fertilizante como para maximizar la rentabilidad de la aplicación, considerando el efecto sólo en el año de aplicación. El foco de este planteo es en la eficiencia económica del cultivo a nutrir con P, la dosis a aplicar maximiza el retorno de la práctica, los rendimientos alcanzados no alcanzan la máxima productividad y el balance entre aporte y extracciones es negativo tendiendo a reducir los niveles de P del suelo. Para su implementación es importante el uso de análisis de suelos en cada cultivo, ya que se aplica la dosis que sea económicamente rentable para el nivel de fósforo extractable del suelo, y descarta la aplicación a partir de contenidos medios del elemento. Es por ello que este planteo requiere un excelente muestreo y un ajuste fino de la dosis de fertilización en relación al nivel de fósforo medido y a la respuesta esperada.

Reposición (Reconstrucción y mantenimiento, “fertilizando el suelo”): el propósito es estabilizar los niveles de fósforo extractable de los suelos en valores no limitantes para la normal producción de los cultivos tal que esta se maximice, intentando llegar a la zona de valores óptimos. Se establecen planteos de construcción (crecimiento) y de mantenimiento (reposición) con controles frecuentes (no anuales) de análisis de suelos. En este caso el objetivo es que la reposición de fósforo vía fertilización supere a la extracción del mismo por los cultivos, de modo de ir generando balances positivos. La mirada de esta estrategia se enfoca en el mediano y largo plazo, por lo que es más usual que se elija en caso de productores que trabajan su propia tierra y en años donde la relación precio fertilizante / precio grano es baja. En este caso, no es tan importante la rigurosidad del muestreo y análisis de suelos, aunque tener un valor correcto del análisis permite ubicar claramente la condición del suelo en el nivel de fósforo disponible existente.

Los planteos mencionados no son excluyentes, en algunos casos se deciden estrategias intermedias entre la de suficiencia y la de reposición. Las estrategias mencionadas, también llamadas “filosofías”, no siempre responden estrictamente a cuestiones económicas de corto plazo, sino que pueden incluir perspectivas económicas de mayor alcance, así como cuestiones ligadas a la tenencia de la tierra, culturales e incluso entran en juego consideraciones posibles sobre inclinación propia del técnico o productor con respecto a la conservación del recurso suelo y productividad futura.





Al disminuir los niveles de fósforo extractable las dosis de fertilización recomendadas a aplicar son crecientes. Las principales diferencias entre los criterios de suficiencia y de reconstrucción se observan en condiciones de muy bajos niveles de P en el suelo.

Para la filosofía de suficiencia, se deberían buscar modelos regionales que relacionan respuestas al agregado de diferentes dosis de P con niveles variables de P extractable, Para la filosofía de reconstrucción, se busca aumentar el nivel de fósforo extractable hasta determinado valor crítico por sobre el cual las plantas ya no sufren deficiencia de este elemento.

Existen varios modelos que intentan estimar esta cantidad de fósforo a aplicar necesaria para subir el fósforo extractable; el trabajo de Rubio y col. (2008) propone un modelo que es quizás el más popular en la región pampeana argentina. Este trabajo apunta a la generación de un coeficiente (coeficiente “b”) que se relaciona con la capacidad de aumentar el nivel de fósforo de cada suelo.

Concentración de P disponible (mg kg ⁻¹)					
5-7	7,1-9	9,1-11	11,1-13	13,1-16	16,1-20
Filosofía de nivel de suficiencia					
kg P2O5 ha ⁻¹					
59	55	51	46	42	32
Filosofía de rápida reconstrucción					
kg P2O5 ha ⁻¹					
174	142	112	82	47	44

Independientemente de la filosofía de interpretación y manejo de la fertilización, al disminuir los niveles de fósforo extractable las dosis de fertilización recomendadas a aplicar son crecientes.

Las principales diferencias entre ambos criterios se observan en condiciones de muy bajos niveles de P en el suelo porque en planteos de reconstrucción se adiciona los requerimientos del cultivo más los necesarios para “fertilizar al suelo”.

Para la filosofía de suficiencia, se debería buscar en los modelos regionales que relacionan respuestas al agregado de diferentes dosis de P con niveles variables de P extractable. En muchos casos estos modelos no están disponibles, pero sí existen modelos que relacionan rendimiento relativo del/os cultivo/s con los niveles de fósforo extractable: en este caso se debería estimar cuanto fósforo se debe aplicar para lograr determinado aumento fósforo extractable (y por lo tanto de rendimiento), para después luego chequear la viabilidad económica de esta aplicación. Para la filosofía de reconstrucción, también muchas veces se busca aumentar el nivel de fósforo extractable hasta determinado valor crítico por sobre el cual las plantas ya no sufren deficiencia de este elemento.

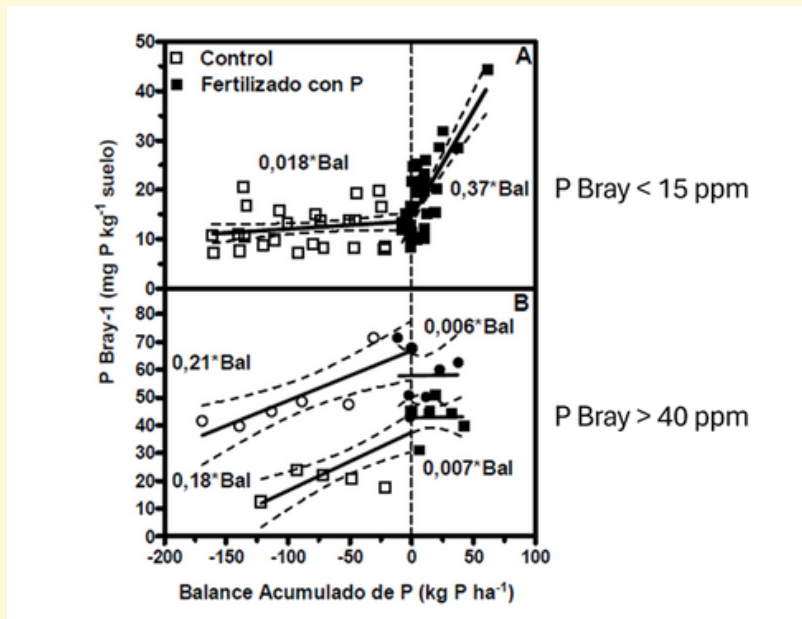
Entonces usualmentelo que se precisa estimar es cuanto fósforo de fertilizante se debe aplicar para lograr determinado aumento en los niveles de fósforo extractable: esta cantidad es obviamente distinta entre suelos, siendo mucho mayor en suelos que naturalmente fijan fósforo (arcillosos, calcáreos, ácidos, derivados de cenizas volcánicas, etc).

Existen varios modelos que intentan estimar esta cantidad de fósforo a aplicar necesaria para subir el fósforo extractable; el trabajo de Rubio y col. (2008) propone un modelo que es quizás el más popular en la región pampeana argentina. Este trabajo apunta a la generación de un coeficiente (coeficiente “b”) que estima la cantidad necesaria de fósforo a aplicar en determinado suelo para aumentar 1 ppm (mg P/kg de suelo) del fósforo extractable. El modelo estima el coeficiente b de acuerdo al nivel de fósforo inicial de un suelo (suelos más pobres requieren más fósforo para subir 1 ppm), la cantidad de arcillas (suelos más arcillosos precisan más fósforo para subir su contenido) y la zona de la región pampeana (los suelos al norte de la Pampa Deprimida precisan aplicaciones mayores de fósforo).

Modelo disponible en: [https://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/4F62D71884E2C0038525799500784FE2/\\$FILE/2.pdf](https://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/4F62D71884E2C0038525799500784FE2/$FILE/2.pdf)

La cantidad de fósforo extractable en los suelos agrícolas, que influye en los rendimientos de los cultivos, es afectada por el balance anual del nutriente. No obstante, los cambios en el P extractable de los suelos como resultado de balances positivos o negativos varían según sus contenidos iniciales:

En suelos con bajos contenidos iniciales de fósforo extractable, cuando el balance es positivo, los valores de fósforo aumentan, pero si es negativo no se observan cambios relevantes. En los suelos con altos contenidos de fósforo extractable no se observan cambios en los valores de fósforo cuando los balances son positivos, pero sí se aprecia una importante disminución cuando los balances son negativos.



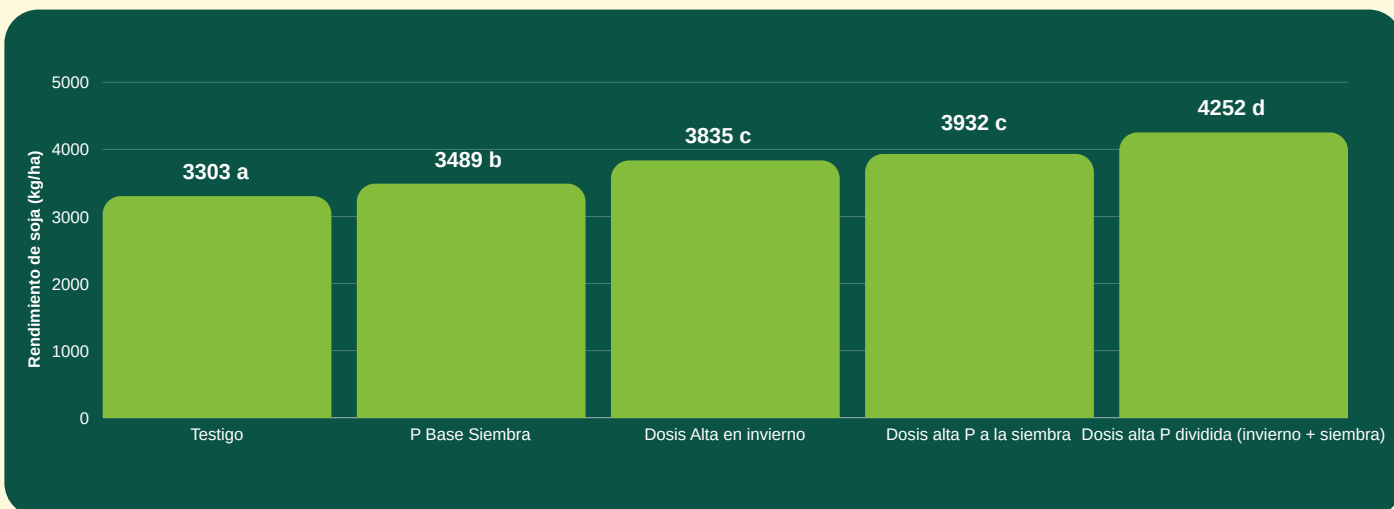
La cantidad de fósforo extractable en los suelos agrícolas, que influye en los rendimientos de los cultivos, es afectada por el balance anual del nutriente, que es la diferencia entre el fósforo que es exportado en los granos, forrajes u otro órgano cosechable, y la aplicación de fósforo por fertilización. Cuando la reposición supera la extracción (balance positivo) los niveles de fósforo extractable aumentan, mientras que estos niveles disminuyen cuando la extracción supera regularmente la reposición (balance negativo), ya que el fósforo no presenta mecanismos naturales de reposición en los suelos.

No obstante, los cambios en el P extractable de los suelos como resultado de balances positivos o negativos varían según sus contenidos iniciales:

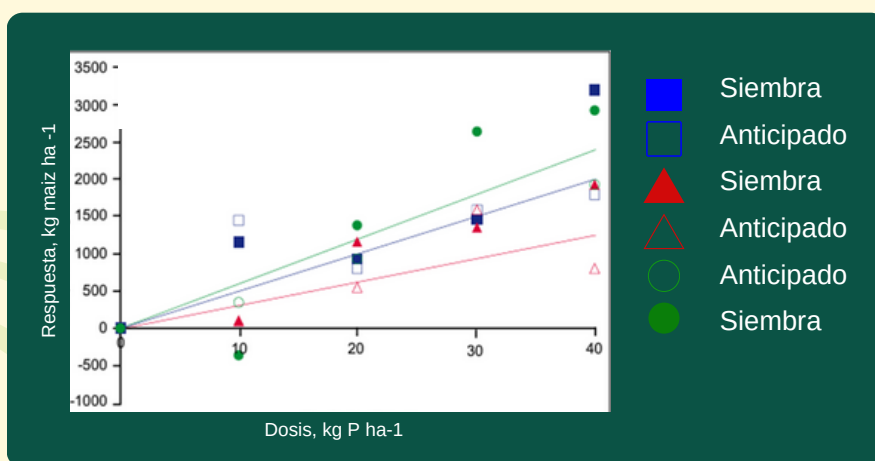
- En suelos con bajos contenidos iniciales de fósforo extractable (Ej. < 15 ppm, Bray Kurtz 1) cuando el balance es positivo (mayor aporte que extracción) los valores de fósforo aumentan, pero si es negativo (menores aportes que extracciones) no se observan cambios relevantes, lo cual no permite en muchos casos tomar real dimensión de las pérdidas de fósforo desde las fracciones lábiles del suelo que están ocurriendo en años con balances negativos. En este caso, las respuestas al agregado de fósforo por fertilización son consistentes si no hay limitaciones hídricas en los cultivos.
- En los suelos con altos contenidos de fósforo extractable (ej. 45 ppm, Bray Kurtz 1) no se observan cambios en los valores de fósforo cuando los balances son positivos, pero sí se aprecia una importante disminución cuando los balances son negativos. En estos casos, conviene ir monitoreando el suelo cada tantos años, y aprovechar los años de precios relativos bajos de fertilizantes para realizar aplicaciones de fósforo para mantenimiento de los altos niveles existentes.

De acuerdo a FERTILIZAR ASOCIACIÓN CIVIL, en las regiones productivas de Argentina, los contenidos de fósforo extraíble han disminuido notablemente en los últimos años, tanto en Región Pampeana como extra pampeana. Esta disminución es entonces fácilmente atribuible a balances negativos casi permanentes en todos los cultivos extensivos: a pesar de ser uno de los nutrientes con mayor porcentaje de reposición, se considera que solamente se repone aproximadamente el 58% del fósforo que es extraído por las cosechas anualmente.

El limitado movimiento de P en los suelos, el proceso de ingreso en las plantas (difusión) y la necesidad de su incorporación desde etapas tempranas del crecimiento hacen que su disponibilidad se necesite desde la siembra de los cultivos. La fertilización, independientemente del criterio o filosofía para su implementación, tiene que realizarse en forma completa o fraccionada antes o durante la siembra de los cultivos. No obstante, cuando los niveles de fósforo extractable son altos, y se fertiliza anticipadamente, la elección del momento, incluso del año, no es tan influyente en la producción del cultivo en curso.



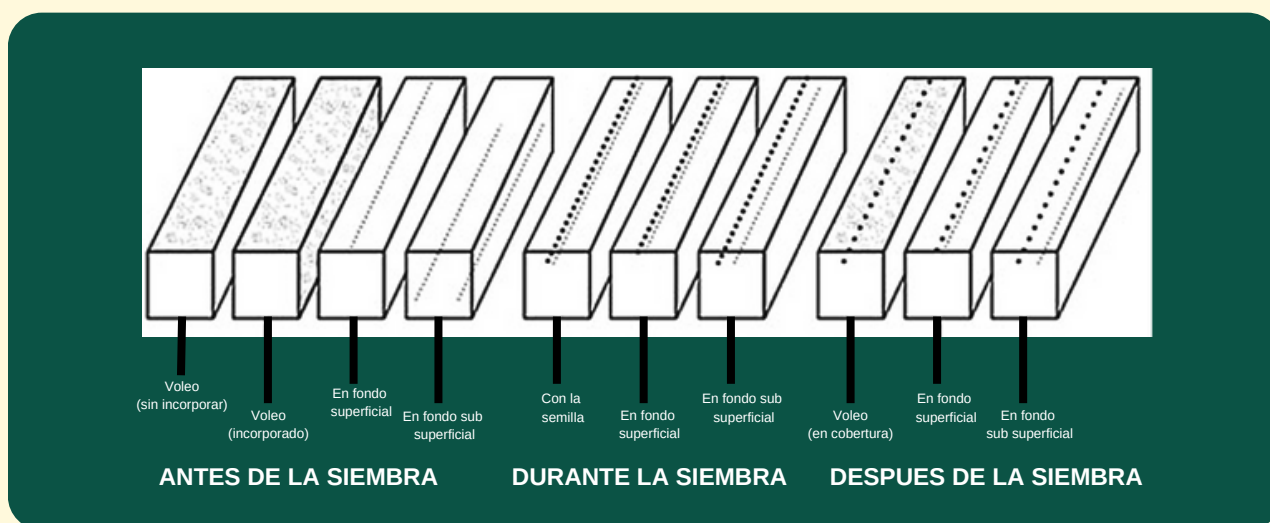
El limitado movimiento de P en los suelos, el proceso de ingreso en las plantas (difusión) y la necesidad de su incorporación desde etapas tempranas del crecimiento hacen que su disponibilidad se necesite desde la siembra de los cultivos:



Respuesta del cultivo de maíz a la aplicación de fósforo en distintas dosis y momentos: a la siembra y anticipada (90 días antes de la siembra). Los colores y símbolos distintos indican 3 campañas diferentes. Fte: Tellería y Col., 2016. La fertilización, independientemente del criterio o filosofía para su implementación, tiene que realizarse en forma completa o fraccionada antes o durante la siembra de los cultivos. No es eficiente la aplicación fraccionada luego de sembrar. No obstante, cuando los niveles de fósforo extractable son altos, y se fertiliza con el criterio de mantenimiento de estos altos niveles, la elección del momento, incluso del año, no es tan influyente en la producción del cultivo en curso. Esto permite agregar el fertilizante en momentos de precios relativos de los fertilizantes fosfatados que sean convenientes.

La distribución espacial de la aplicación de fósforo puede seguir dos formatos: en cobertura total al voleo y localizado en bandas en la línea de siembra. Las aplicaciones al voleo garantizan una mejor distribución espacial del fertilizante fosfatado, también facilitan el muestreo y el diagnóstico de la fertilidad fosforada en años siguientes. La aplicación de los fertilizantes en bandas, dado que se ubica al fósforo, que es poco móvil, en una zona muy cercana a la semilla y a las primeras raíces de los cultivos, genera mayor absorción inicial y un mejor efecto arrancador.

Los aportes de la fertilización en bandas próximas a la línea de siembra son más eficientes en determinadas condiciones: con alta probabilidad de respuesta a la fertilización, con alta capacidad de fijación de P, cuando se aplican bajas dosis, cuando se aplica solo al momento de siembra y en suelos con alto contenido de residuos previos a la siembra



La distribución espacial de la aplicación de fósforo puede seguir dos formatos: en cobertura total al voleo (incorporado o no) y localizado en bandas en la línea de siembra (superficiales o subsuperficiales).

Las aplicaciones al voleo garantizan una mejor distribución espacial del fertilizante fosfatado, lo cual es recomendable cuando se sigue la filosofía de aplicación de reconstrucción y mantenimiento; también facilitan el muestreo y el diagnóstico de la fertilidad fosforada en años siguientes, dado que la aplicación en bandas aumenta la heterogeneidad espacial de los valores de fósforo, ya que quedan zonas de muy alta cantidad de fósforo vecinas a zonas con muy bajas cantidades, a distancias cercanas y no visibles a simple vista.

La aplicación de los fertilizantes en bandas (concentrados) próximas al sitio de crecimiento inicial de las raíces es la forma, independientemente del tipo de suelo, con mayor eficiencia general de incorporación en las plantas, dado que se ubica el fósforo, que es poco móvil, en una zona muy cercana a la semilla y a las primeras raíces de los cultivos.

Los aportes de la fertilización en bandas próximas a la línea de siembra son más eficientes en determinadas condiciones:

- En suelos con alta a muy alta probabilidad de respuesta a la fertilización (bajos niveles de fósforo extractable).
- En suelos con alta capacidad de reacción y de fijación del P: suelos calcáreos, ácidos y con alta proporción de arcillas, especialmente si son arcillas expansibles.
- Cuando se aplican dosis bajas de fertilizantes.
- Cuando la fertilización se realiza sólo en el momento de la siembra.
- En suelos con altas cantidades de residuos previos a la siembra.

Las aplicaciones localizadas cuando se ubican por debajo de la superficie del suelo también disminuyen la posibilidad de escorrentía superficial (en suelos con pendiente marcada), lo cual puede comprometer la calidad del agua en cursos de agua cercanos.

La ubicación localizada en altas concentraciones es una práctica usual en nuestros sistemas de producción. No obstante, hay que manejar esta práctica con precaución porque el contacto directo de los fertilizantes con las semillas interfiere en su normal germinación y emergencia pudiendo reducir la cantidad de plantas logradas. Los fenómenos de toxicidad son resultado tanto de efectos salinos de los fertilizantes como por la formación de amoniaco. Con respecto al efecto salino, la posibilidad de daño de ubicar el fertilizante junto a la semilla aumenta en condiciones de déficit hídrico. El efecto fitotóxico que el amoniaco gaseoso puede producir sobre las semillas se da cuando se fertiliza con fuentes fosfatadas sólidas que contienen amonio, La posibilidad de daño depende del cultivo, ya que la susceptibilidad de la semilla a daño es propia de cada especie.

En los ámbitos de producción de cultivos extensivos en Argentina se suelen dar una o más de las condiciones que favorecen la aplicación localizada en bandas: suelos fijadores, bajos contenidos de fósforo extractable y bajas dosis de fertilización fosforado. Por lo tanto, la ubicación localizada en altas concentraciones es una práctica usual en nuestros sistemas de producción. No obstante, hay que manejar esta práctica con precaución porque el contacto directo de los fertilizantes con las semillas interfiere en su normal germinación y emergencia llegando a reducir la cantidad de plantas logradas.

Los fenómenos de toxicidad son resultado tanto de efectos salinos de los fertilizantes como por la formación de amoniaco, que puede ser fitotóxico a altas concentraciones, cuando se emplean fuentes amoniacaes.

Con respecto al efecto salino, la posibilidad de daño de ubicar el fertilizante junto a la semilla aumenta en condiciones de déficit hídrico, independientemente del tipo de fertilizante. También podemos evaluar la posibilidad de daño evaluando la susceptibilidad propia de las semillas de la especie (por ejemplo el maíz es más sensible que el trigo) y por supuesto la fuente de fósforo utilizada. La caracterización de un posible daño por exceso de sales está cuantificada en los fertilizantes comerciales a través del índice salino IS:

Material	Composicion (N ₂ ,P ₂ O ₅ ,K ₂ O)	IS por unidad de nutriente	IS
PORTADORES de NITROGENO			
Amoniaco anhidro	82,2	0,572	47
Nitrato de amonio	35	2,99	105
Sulfato de amonio	21,2	3.253	68
Fosfato diamónico	21,2	1,614	34
Nitrato potásico	13,8	5,336	75
Nitrato sódico	16,5	6,06	100
Urea	46	1,618	74
PORTADORES de FOSFORO			
Superfosfato	21	0,39	8
Superfosfato triple	48	0,21	11
Fosfato diamónico	53	0,637	34
PORTADORES de POTASIO			
Cloruro de potasio	60	1,936	116
Nitrato de potasio	46,6	1,58	74
Sulfato de potasio	54	0,853	46

El efecto fitotóxico que el amoníaco gaseoso puede producir sobre las semillas se da cuando se fertiliza con fuentes fosfatadas sólidas que contienen amonio: Fosfatos mono y diamónico (MAP y DAP). Por su contenido mayor de nitrógeno y por su reacción fuertemente alcalina cerca del gránulo (el amoníaco se forma en condiciones de alcalinidad, cuando el suelo se acidifica el amoníaco se transforma en amonio, no volátil ni fitotóxico), el DAP puede generar mayores fenómenos de fitotoxicidad en semillas. Los polifosfatos de amonio, al ser líquidos, no generan la concentración de producto en un micrositio, por lo que los daños por fitotoxicidad por amoníaco son muy bajos.

La combinación del efecto salino con la toxicidad por amoníaco genera límites en la cantidad de fertilizante que pueden ser agregados cuando este se ubica junto a la semilla, límite que es llamado dosis crítica:

Cultivo	Tipo de fertilizante fosfatado	Dosis crítica kg ha ⁻¹	
		20% *	50% *
Trigo	FDA	30 - 50	65 - 90
Soja	FDA-FMA-SFT **	20 - 40	55 - 75
	SFS	20 - 80	60 - 120
Maíz	FDA	60 - 80	130 - 170
Girasol	FDA	40 - 50	80 - 120
Cebada	FDA	30 - 55	65 - 90
Alfalfa	FDA - SFT	90 - 110	160 - 200

* Para pérdidas de 20% y 50% del stand de plántulas a emergencia

** FDA: Fosfato Diamónico - FMA: Fosfato Monoamónico - SFS: Superfosfato Simple - SFT: Superfosfato Triple

Las dosis críticas más bajas corresponden a suelos secos, arenosos o alcalinos, y las más altas son las correspondientes a suelos más arcillosos y húmedos. Es importante que se consulte siempre a la información más actualizada y local de este tema para evitar problemas en la implantación por fitotoxicidad del fertilizante.



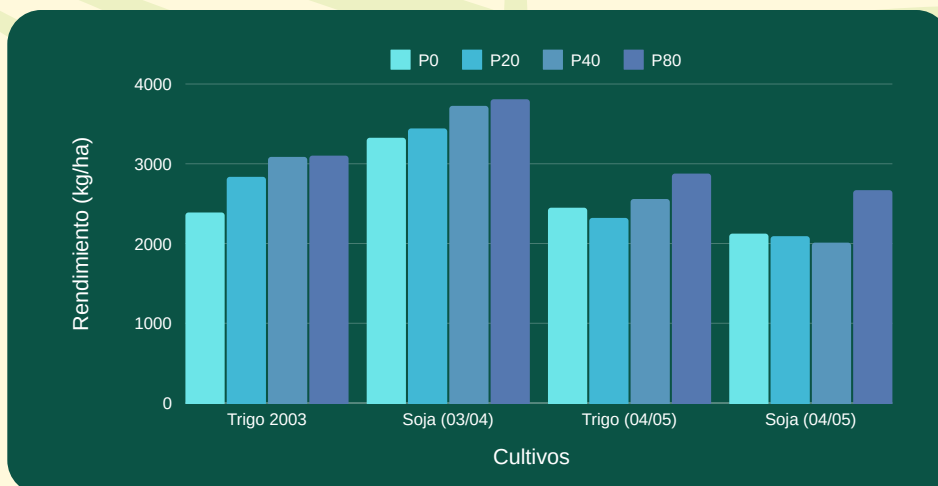
Los niveles de P extractable de los suelos aumentan inicialmente al aumentarse las dosis aplicadas al fertilizar y se reducen con el uso de los cultivos. No obstante, aun con dosis medias a bajas y en suelos donde se observan respuestas al agregado de fertilizante, una parte del fósforo agregado no es absorbido por el cultivo en el año en que fue aplicado. La parte del fósforo aplicado que no es absorbido se ubica en fracciones (compartimentos o pooles) con distintos niveles de estabilidad. La promoción del crecimiento por el fósforo residual de cultivos subsiguientes, depende de factores de suelo y de cultivos.

El nivel inicial de fósforo influye en el efecto residual; cuanto más alto, mayor será la residualidad de la fertilización en el corto plazo. Suelos con elevados contenidos de arcillas, en especial expansibles, pueden fijar grandes cantidades de fósforo que pueden ser liberados mucho tiempo después de aplicado.

Destino	Rango
Planta	15 al 35%
Fracciones lábiles de P	15 al 44%
Superfosfato triple de calcio	26 al 59%
Fracciones recalcitrante o más estables	17 al 36%

Los niveles de P extractable de los suelos aumentan inicialmente al aumentarse las dosis aplicadas al fertilizar y se reducen con el uso de los cultivos. Al reiterarse la fertilización con dosis superiores a las extracciones, el fósforo extractable también aumenta, dado que el fósforo presenta bajas salidas o pérdidas desde el sistema suelo planta (con excepción de la exportación por cosecha), lo cual indica un enriquecimiento general del status fosforado del suelo.

No obstante, aún con dosis medias a bajas y en suelos donde se observan respuestas al agregado de fertilizante, una parte importante del fósforo agregado no es absorbido por el cultivo en el año donde fue aplicado.





La parte del fósforo aplicado que no es absorbido se ubica en fracciones (compartimentos o pooles) con distintos niveles de estabilidad, lo que permite que haya efectos residuales del fósforo aplicado sobre los cultivos subsiguientes al que se fertilizó.

La extensión de tiempo durante la cual existen efectos residuales, es decir, la promoción del crecimiento de cultivos subsiguientes, depende de factores de suelo y de cultivos;

Hay cultivos que son muy eficientes en captar el fósforo de distintas fracciones, por lo cual pueden aprovechar el fósforo del fertilizante en momentos alejados de la fertilización inicial.

El nivel inicial de fósforo influye en el efecto residual; cuanto más alto, mayor será la residualidad de la fertilización, dado que el fósforo agregado se ubica en compuestos más lábiles, es decir, accesibles para las plantas.

Suelos con elevados contenidos de arcillas, en especial expansibles, pueden fijar grandes cantidades de fósforo que pueden ser liberados con el tiempo.

Abundan ejemplos de estos cambios en los diferentes tipos de suelos argentinos y en sistemas tanto agrícolas como con pasturas.

