

CONCEPTOS DE FERTILIDAD

FOSFATADA

Pablo Undurraga D.¹
Ingeniero Agrónomo

¹ Centro Regional de Investigación Remehue - INIA.

ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN	37
COMPORTAMIENTO DEL FÓSFORO EN EL SUELO	37
DISPONIBILIDAD DEL FÓSFORO EN EL SUELO	39
FACTORES QUE INFLUENCIAN LA DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO.....	39
OTROS FACTORES QUE AFECTAN LA DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO	40
• Acidez del suelo	40
• Contenido de materia orgánica	40
• Relación Sílice / Sesquióxidos	40
• Relación con la humedad del suelo	41
• Fertilizantes fosfatados	41
FORMAS DE FÓSFORO EN LOS SUELOS	41
ADSORCIÓN DE FÓSFORO	42
CAPACIDAD TAMPÓN DE FÓSFORO	44
FERTILIZACIÓN DE CORRECCIÓN Y MANTENCIÓN	44
EJEMPLOS DE CÁLCULO UTILIZANDO LOS CP	45

INTRODUCCIÓN

En los suelos del país el fósforo (P) es uno de los elementos deficitarios para una adecuada productividad de los cultivos y praderas, especialmente en los suelos volcánicos que se extienden desde la zona central hasta el sur, dado que por el origen de estos suelos este elemento es retenido en gran parte, sin estar disponible para las plantas.

Las formas de asimilación por parte de la planta son el fosfato monobásico (PO_4H_2^-) y el dibásico (PO_4H^-); el primero es de mayor utilización que el segundo. A medida que va siendo extraído por las plantas, el complejo del suelo lo va restituyendo a la solución. Estas formas de fosfatos se encuentran en una baja proporción en el suelo pero la restitución es constante (en un ciclo normal de un cultivo la reposición del fósforo en dicha solución alcanza el número de 100 a 500 veces para cubrir las necesidades básicas del elemento), (Rodríguez, 1989).

El pH del suelo determina la disponibilidad de fosfatos asimilables por la planta. A medida que aumenta el pH la proporción de los fosfatos (pH > 7, es decir, alcalinidad) crece la proporción de fosfatos dibásicos y tribásicos.

El paso del fósforo asimilable a sus formas insolubles y no asimilables se conoce como "Fijación de fósforo" o sea su inmovilidad como nutriente vegetal. Esta inmovilidad la determinan las distintas reacciones químicas que se producen según el pH del suelo.

En suelos ácidos los fosfatos asimilables (monobásico y dibásico) se combinan con el hierro (Fe^{++}) y el aluminio (Al^{+++}) y con los distintos hidróxidos (de Fe, Al, etc.), formándose sales y complejos químicos insolubles.

En los suelos alcalinos se combinan principalmente con el calcio y el magnesio y se forman sales insolubles como el fosfato tricálcico [$(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3$].

COMPORTAMIENTO DEL FÓSFORO EN EL SUELO

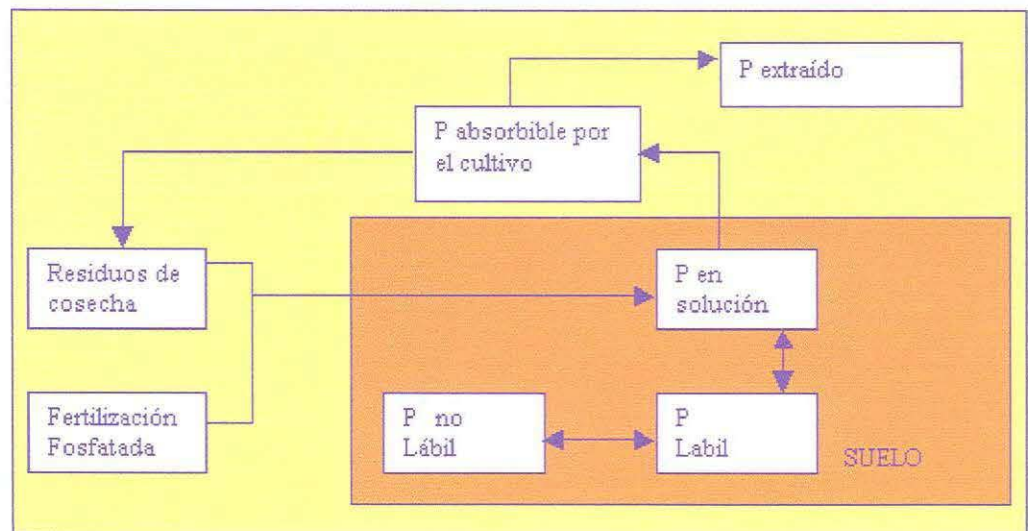
El fósforo en el suelo, funcionalmente se presenta como tres fracciones. La **fracción en solución**, la cual es inmediatamente disponible para la absorción de las plantas y

resultante del equilibrio entre los distintos componentes y mecanismos que dominan la fracción lábil. La **fracción lábil**, la que representa la cantidad de P que puede pasar a la solución en una temporada de cultivo y la **fracción no lábil** que representa todas aquellos compuestos fosforados en el suelo que no salen a la solución del suelo durante la temporada del cultivo.

Tres mecanismos de reacción del P en el suelo dominarían los componentes de las fracciones lábiles y no lábiles: el mecanismo de adsorción-desorción a través de las reacciones del fosfato con las arcillas del suelo, el mecanismo de precipitación-disolución en la formación de compuestos fosforados en el suelo, dependiente del pH del suelo y de la concentración de iones en la solución del suelo, y el tercer mecanismo es el de mineralización-inmovilización del P ligado a la materia orgánica del suelo. De esta forma, las fracciones lábiles y no lábiles estarían constituidas por P que ha reaccionado en el suelo a través de estos mecanismos y que constituyen los componentes de **P adsorbido**, **P precipitado** y **P orgánico**, tanto en fracciones lábiles como no lábiles. Además, se supone que el contenido de P en la solución resulta de un equilibrio rápido entre la cantidad de P presente en la fracción lábil y los mecanismos que determinan la labilidad del P. Es decir, para que exista P en solución es necesaria una cierta cantidad de P en la fracción lábil, que variaría de acuerdo a la intensidad con que los mecanismos de reacción actúan en el suelo.

Existe la hipótesis de que, a través de los mecanismos de reacción un equilibrio lento existe entre la fracción lábil y la fracción no lábil del P del suelo, de tal forma de que un crecimiento en las componentes lábiles induce a un crecimiento en los componentes no lábiles del suelo y que un decrecimiento en la fracción de P lábil induce un lento decrecimiento en la fracción de P no lábil del suelo.

Figura 1.
Esquema de
fósforo en el
suelo.



DISPONIBILIDAD DEL FÓSFORO EN EL SUELO

La disponibilidad de fósforo en el suelo, corresponde a una pequeña fracción del fósforo total contenido en el suelo, reflejando parte del fósforo de la solución suelo y aquella que se encuentra en la fase sólida, susceptible de ser asimilada por las plantas.

El fósforo forma compuestos débilmente solubles con cationes bivalentes y monovalentes. Por esta razón, la cantidad de fósforo de la solución suelo es muy pequeña. Las plantas que crecen en el suelo, absorben esta pequeña cantidad de la solución suelo, que a su vez se encuentra en equilibrio con el fósforo de la fase sólida. Así, cada una de las formas químicas del suelo contribuye de manera distinta a enriquecer el fósforo disponible para el cultivo.

La cantidad de fósforo disponible en el suelo, no es un valor único y constante, ya que varía de acuerdo a las condiciones ambientales que a su vez influyen sobre el suelo y el desarrollo de las plantas.

El análisis de suelo, proporciona solo un índice del fósforo disponible en el suelo para las plantas, o sea este valor corresponde a un reflejo del suministro natural del suelo, lo que por diferencia con los requerimientos de fósforo de la especie, permiten estimar las necesidades de fertilización.

FACTORES QUE INFLUENCIAN LA DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO

El contenido de fósforo disponible en el suelo es una variable dinámica, fuertemente influenciada por las propiedades del suelo, la planta y las condiciones ambientales.

Cualquier cambio en las propiedades del suelo se encuentra relacionada con la concentración de fósforo en solución (intensidad) la magnitud del fósforo de la fase sólida del suelo susceptible de pasar a la solución o fósforo lábil (cantidad); la capacidad del suelo de restablecer el fósforo de la solución (capacidad o poder tampón del fósforo) y las características del suelo que permiten el paso de iones fosfato desde las zonas de alta concentración a la superficie de las raíces (difusión), explican los cambios producidos en la cantidad de fósforo disponible.

Las plantas también influyen la disponibilidad de fósforo. Los vegetales poseen sistemas radicales característicos de cada especie, diferenciándose por la longitud y densidad de los pelos radicales, así como a la morfología de su sistema radicular, lo que afecta sensiblemente la capacidad de extracción de fósforo por las raíces de las plantas. En general, se puede afirmar que menos de un 1% del volumen total de suelo está ocupado por las raíces.

Otra de las características de la planta que afectan la capacidad de remoción del Fósforo disponible, se refiere a la capacidad individual de las especies de absorber este elemento por cm^2 de raíz o poder de absorción de fósforo. Además, ciertas condiciones ambientales afectan la capacidad específica de absorción de fósforo por las raíces, tales como la asociación con micorrizas activas (hongos del suelo), altas densidades de siembra, y otros.

OTROS FACTORES QUE AFECTAN LA DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO

Existen factores que afectan la disponibilidad de Fósforo relacionados al suelo, que pueden ser numerosos y se consideran de tipo ambientales que modifican la disponibilidad del fósforo. Entre estos los más importantes son:

- **Acidez del suelo:** el óptimo rango de pH del suelo dentro del cual se observa la máxima disponibilidad de fósforo se encuentra entre 6,5 y 7,5. Las causas de este comportamiento se asocian fundamentalmente a que en este rango ocurre la máxima solubilidad de las formas de fósforo inorgánico del suelo. Así, en rangos de pH ácido hasta 6,5, se reduce la solubilidad de fosfatos de hierro y aluminio y aumenta la solubilidad de las formas ligadas al calcio. Pasado cierto nivel de pH alcalino (sobre 7,5) comienza a precipitar ciertas formas de fosfatos de calcio y nuevamente se reduce la disponibilidad del fósforo.
- **Contenido de materia orgánica:** la materia orgánica del suelo, presenta predominantemente cargas negativas, por lo que los ácidos orgánicos forman con cationes hidroxilados tales como $\text{Fe}(\text{OH})_2$ y $\text{Al}(\text{OH})_2$, combinaciones complejas que inmovilizan éstos iones dejando en libertad los iones fosfatos. Por esta razón, la agregación de estiércol y otros compuestos orgánicos favorecen la disponibilidad del fósforo de los suelos.
- **Relación Sílice/Sesquióxidos:** según la naturaleza mineralógica de los suelos, éstos varían en su contenido de Silicio, Hierro y Aluminio. Los suelos que contienen una más baja relación Sílice (SiO_2); Sesquióxidos ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$), están generalmente más intemperizados y por lo tanto contienen más hierro y aluminio libres que pueden inmovilizar a los fosfatos; en cambio, una más alta eficiencia en el uso de fertilizantes fosfóricos se logra con una alta relación sílice/sesquióxidos incrementando rápidamente el P-disponible. Esta relación, se puede afectar con el uso de la cal inmovilizando los sesquióxidos, lo que tiende a incrementar la disponibilidad del fósforo.

- **Relación con la humedad del suelo:** el aumento de agua en el suelo induce a un incremento de iones fosfato en solución, lo que ocurre después de las lluvias o por el efecto del riego. Esto está ligado a las características de las formas inorgánicas de fósforo presentes en el suelo (P-Ca, P-Fe y P-Al) cuya naturaleza cristalina relativamente insoluble, tiene en realidad variables constantes de productos de solubilidad. Así, solo una cierta cantidad del compuesto se disuelve alrededor de las partículas cristalinas, sin embargo, aunque la concentración se mantiene relativamente constante, la cantidad de iones fosfato solubles aumenta si se incrementa la cantidad de agua en la solución. La cantidad de fósforo absorbido por especies desarrolladas en condiciones de secano es menor en condiciones de sequía que en años lluviosos.
- Fertilizantes fosfatados: uno de los mayores efectos sobre el incremento del P-disponible, se ha logrado con la adición de fertilizantes fosfatados. La fijación del fósforo soluble ocurre rápidamente después de la aplicación de un fertilizante fosfatado, especialmente si el fertilizante se ha mezclado con el suelo. Después de varios días desde su aplicación en un cultivo, cualquier aplicación posterior de fosfatos probablemente originaría cambios mínimos debido al equilibrio alcanzado entre fosfatos solubles y el fósforo fijado. A través del tiempo, sin embargo, la disponibilidad del fósforo se ha incrementado debido a que la adición de fósforo fertilizante y la remoción de fósforo de la solución efectuada por las plantas, es reemplazada rápidamente por el fósforo fertilizante.

La aplicación de fósforo fertilizante al suelo, origina una reacción rápida en la superficie de los minerales arcillosos donde el fenómeno dominante es la adsorción, luego una reacción lenta de difusión de fósforo predomina hacia el interior de las partículas, generándose la fijación.

Esta última etapa, define qué cantidad de P agregado permanece en el pool lábil sobre las partículas del suelo y este valor estima la efectividad residual del fósforo lábil.

FORMAS DE FÓSFORO EN LOS SUELOS

Aunque se reconoce que el fósforo es retenido a la forma de aniones intercambiables por las arcillas, se cree que éstas formas no son importantes para la nutrición directa de las plantas.

En otras palabras, las plantas obtienen directamente los aniones fosfatos de la solución suelo más bien que aquellos adsorbidos por los coloides. En realidad, la cantidad de

fosfato en la solución del suelo no es tan importante como la tasa en que este fosfato se disuelve o pasa a la solución.

Las plantas pueden crecer en forma satisfactoria con una pequeña concentración de fosfato en la solución a medida que esta concentración se puede mantener.

Deben producirse condiciones que favorezcan la rápida liberación de fosfatos desde las formas orgánicas y/o de las formas inorgánicas de modo de mantener un adecuado suministro de formas disponibles (Figura 2).

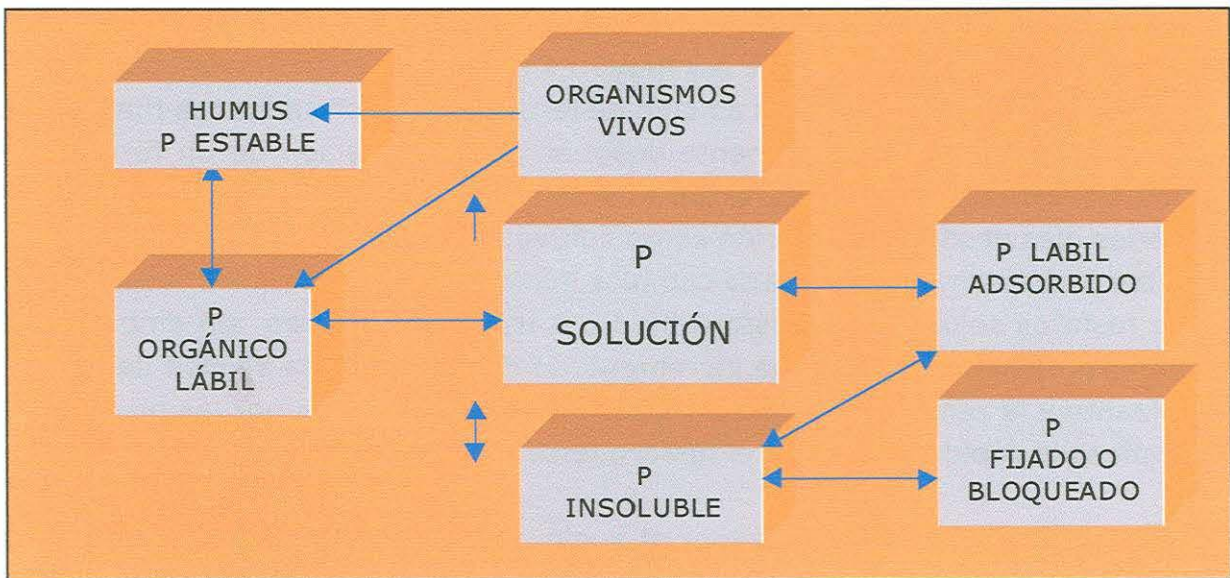


Figura 2. Transformaciones del fósforo en el suelo.

La pérdida del fósforo soluble de la solución suelo es un proceso continuo, por las raíces de las plantas, por los microorganismos y por mecanismos de adsorción y/o precipitación en la superficie de los coloides, quedando como fósforo insoluble.

Las formas de fósforo orgánico denominadas lábiles son aquellas que se pasan a la solución suelo a través de la mineralización del fósforo orgánico; las formas más refractadas a la mineralización son las provenientes del humus y solo se relacionan en el equilibrio con el fósforo orgánico lábil.

ADSORCIÓN DE FÓSFORO

En la medida que se agite una cierta cantidad de fósforo soluble en contacto con el suelo, rápidamente una proporción importante de este fósforo soluble desaparece

de la solución, debido a que queda retenido en la fase sólida, fenómeno que se conoce con el nombre de fijación. Una proporción importante de este fósforo evoluciona a formas insolubles por lo que vuelve con gran dificultad a la solución y otra fracción queda retenida casi irreversiblemente con gran energía, lo que se considera prácticamente una pérdida de fósforo del suelo y se conoce también con el nombre.

Existen diferentes mecanismos que explican la adsorción del fósforo en el suelo, tales como:

- Reacciones de superficie no específica (intercambio de aniones),
- Fenómeno de oclusión o captura física de fosfatos como un todo dentro de las partículas sólidas, y
- Reacciones de ligado, formando complejos, tales como el complejo humus-Aluminio característico de suelos Andisoles.

En suelos calcáreos de la Zona Central, la fijación ocurre fundamentalmente sobre los carbonatos minerales que tienen una importante superficie específica. La precipitación de fósforo como fosfato de calcio es la principal causa de fijación de fósforo en este tipo de suelos.

Las reacciones de fijación de fósforo en los suelos Andisoles en cambio, son mucho más energéticas y éstos adsorben apreciables cantidades a través del tiempo. Estas alcanzan al 80 a 90% como "fósforo fijado" del total del fósforo aplicado como fertilizante. La fijación de fósforo ocurre en la superficie de algunos minerales tales como el alofán, la imogolita y complejos humus-Aluminio, especialmente en la estrata arable de los suelos.

En los complejos humus-Aluminio, el Aluminio se encuentra a la forma de quelato sobre la superficie de las moléculas de humus, manteniendo cierta afinidad con el fósforo inmovilizándolo con gran energía.

En general, los iones fosfatos tienen alta afinidad por el Aluminio, Hierro y Calcio, elementos con que forman precipitados insolubles dependiendo de la acidez del suelo. Al respecto, en suelos con presencia de arcillas expansibles, al incrementarse el pH de la solución se produce la ruptura de las estructuras cristalinas y la liberación del Aluminio que se puede combinar con iones fosfatos y formar compuestos insolubles. En estos suelos, el encalado favorece el incremento de la disponibilidad del fósforo por la precipitación del Aluminio.

En los suelos derivados de cenizas antiguas (suelos rojo arcillosos) de la Zona Sur sometidos a procesos intensos de meteorización y condiciones de lavado de bases (alta pluviometría) clasificados como Ultisoles, las arcillas dominantes son los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio. Estas arcillas, son estables hasta valores de pH tan bajos como 5 y en ellas la principal forma de pérdida de fósforo ocurre por adsorción sobre la superficie de los coloides.

CAPACIDAD TAMPON DE FÓSFORO

La capacidad tampón del suelo o CP corresponde a la resistencia de un suelo particular a elevar sus contenidos de P-disponible al incrementar la aplicación de P-fertilizante. En otras palabras, es la cantidad de P-fertilizante que es necesario agregar para elevar el Fósforo disponible en 1 mg/kg o ppm de fosfato por kg de fósforo aplicado. El CP es una característica química del suelo, que se refiere a la relación entre el P-disponible que éste es susceptible de mantener en equilibrio en la solución suelo por cada kg de fósforo agregado como fertilizante soluble al agua, tal como el Superfosfato Triple.

Se ha observado que los suelos en general, muestran diferente efectividad inicial frente al fósforo aplicado como fertilizante. Así, los suelos de acuerdo a esta característica, pueden dividirse en reactivos y poco reactivos. En un suelo poco reactivo, una mayor proporción del fósforo aplicado permanece lábil y en un suelo de alta reactividad, se requiere agregar una mayor cantidad de fósforo para lograr el mismo contenido de P lábil, el que puede expresarse por ejemplo en ppm de P-Olsen por kg de P-fertilizante aplicado.

El CP permite predecir cuanto fósforo, en kg por hectárea, es necesario aplicar a un suelo para subir el P-disponible desde un nivel inicial a un nivel esperado.

Para estimar este valor, debe considerarse la tasa de reducción en el largo plazo (paso de P lábil a no lábil) y la extracción individual de los cultivos en la rotación. De este modo, la cantidad de fósforo que permanece lábil en el suelo depende fundamentalmente de la cantidad de fósforo agregado, de la capacidad tampón de P del suelo y de la extracción efectuada por los cultivos.

FERTILIZACIÓN DE CORRECCIÓN Y MANTENCIÓN

En la planificación de la fertilización fosfatada en los agro sistemas, debe considerar las características de fijación de fósforo del suelo o su reactividad, una estimación de la extracción efectuada por los cultivos, los contenidos de P-disponible del suelo y los

antecedentes disponibles relativos al historial de fertilización tales como fuentes fertilizantes empleadas, formas y épocas de aplicación de fósforo.

En el caso de considerar un criterio de fertilización de mantención, se aplica una dosis equivalente a la Dosis Optima Económica, que permite suplir los requerimientos del cultivo o pradera para lograr un rendimiento esperado rentable, con este criterio de fertilización se apunta a cubrir la cantidad de fósforo necesaria para corregir el déficit nutricional o diferencia entre los requerimientos del cultivo y el suministro de P disponible.

En cambio, la aplicación de un criterio conservacionista considera la aplicación de fósforo sobre los requerimientos del cultivo en dosis superiores a la dosis óptima económica, de modo de incrementar paulatinamente los contenidos de P-disponible del suelo y supliendo las necesidades del mismo suelo mediante la saturación de los sitios de más alta energía de retención hacia aquellos más lábiles. En este caso, la relación entre la efectividad residual de la fertilización y el fósforo extraído por los sistemas de cultivo de la rotación, van a permitir obtener un balance positivo de acumulación de fósforo en el tiempo.

Un criterio conservacionista estratégico, podría basarse en el empleo de una dosis de corrección basal, o sea la cantidad de fertilizante fosfatado necesaria para subir los contenidos de P-disponible presente en el suelo hasta un nivel determinado, más la dosis de producción, que será la cantidad total de fósforo necesaria para suplir los requerimientos del cultivo o pradera que dependerá del rendimiento esperado de la especie.

Luego de lograr estos objetivos, se podrá después de un cierto tiempo retornar al empleo de la dosis óptima económica.

Para cualquier alternativa que se elija, es necesario conocer los valores de disponibilidad de otros nutrientes, ya que la corrección de otras deficiencias favorecerá el aprovechamiento del fósforo por el cultivo alcanzando un mayor rendimiento.

EJEMPLOS DE CÁLCULO UTILIZANDO LOS CP

La fertilización de corrección de fósforo para un suelo trumao que tiene 4 ppm de P-Olsen, el cual esta con pradera y se ha medido el Fósforo en una muestra tomada a 10 cm de profundidad. Se quiere llegar a las 15 ppm, utilizando dos estrategias, primero se considera realizar la corrección en un año y en segundo lugar se quiere realizar la corrección en tres años, de acuerdo a los criterios que permite aplicar el reglamento del PRSD.

Cuadro 1. Ejemplo de Calculo de Dosis de Corrección P

$$\text{Dosis de P}_2\text{O}_5 = (\text{ppm a alcanzar} - \text{ppm inicial}) * \text{CP} * 2,29$$

P inicial = 4 ppm

P a alcanzar = 15 ppm

CP = 16 kg de P/ppm

Corrección en 1 año: Dosis = $(15 - 4) * 16 * 2,29 = 403 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ (876 kg SFT)

Corrección en 3 años: (se consideran disminuciones entre cada año)

8 ppm	Dosis = $(8 - 4) * 16 * 2,29$	= 147 kg P ₂ O ₅	} 532 kg
12 ppm	Dosis = $(12 - 6,5) * 16 * 2,29$	= 202 "	
15 ppm	Dosis = $(15 - 10) * 16 * 2,29$	= 183 "	

Al considerar la fertilización en una año, la dosis para alcanzar el nivel de 15 ppm es de 403 kg/ha de P₂O₅, de acuerdo al ejemplo. Ahora si consideramos parcializar la corrección en un período de tres temporadas, debemos considerar que el suelo subirá en una primera etapa de 4 a 8 ppm, pero en el período las 8 ppm que estimamos llegar, disminuirán por efecto de la reactividad particular del tipo de suelo y para calcular la dosis de la temporada siguiente, nuestro nuevo nivel inicial no serán 8 ppm sino que será menos. En este ejemplo consideramos una pérdida de 1,5 ppm, es decir, nuestro nuevo nivel inicial ahora es de 6,5 ppm y el final 12 ppm.

Al seguir el procedimiento anterior no tenemos que aplicar 147 kg/ha el primer año, 202 kg/ha el segundo año y 183 kg/ha el tercer año, lo que nos da un total de 532 kg/ha de P₂O₅, repartido en tres años. Superior a la corrección realizada en una sola temporada.

Este comportamiento está graficado en la Figura 3, de acuerdo a lo presentado por Pinochet (1996).

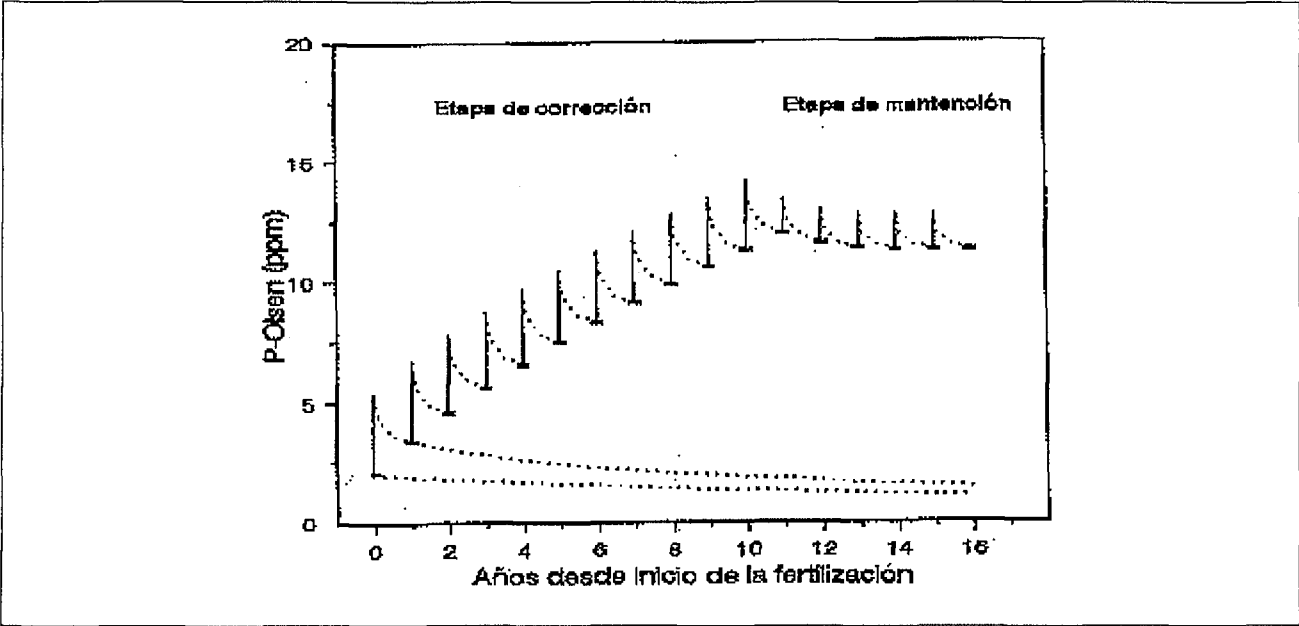


Figura 3: Efecto de la fertilización parcializada en el P-Olsen a través del tiempo.