INFORMACIONES AGRONOMICAS

INVESTIGACION INPOFOS K P EDUCACION

INSTITUTO DE LA POTASA Y EL FOSFORO
POTASH AND PHOSPHATE INSTITUTE

Nº 14 • ENERO 1994

CONTENIDO

	Página
Fósforo en el suelo: propiedades y dinámica	1
Nutrición y fertilización del espárrago	6
Efectos residuales y acumulativos del potasio en caña de azúcar	12
Avances y tendencias en las técnicas de fertilización. (III parte)	13
Reporte de investigación reciente	17
Cursos y Simposios	19
Publicaciones de INPOFOS	20

Editor: Dr. José Espinosa

FOSFORO EN EL SUELO: PROPIEDADES Y DINAMICA

INTRODUCCION

El principal objetivo de analizar el contenido de fósforo (P) en el suelo es el de determinar la cantidad de P a aplicarse para prevenir una pérdida económica en el rendimiento del cultivo debido a deficiencia de este elemento. El análisis de suelo provee un índice del P disponible en el suelo para las plantas, índice que a su vez es utilizado para predecir la cantidad suplementaria de P a aplicarse. Un segundo objetivo del análisis de P es el de monitorizar la cantidad de P disponible presente en el suelo a través del tiempo. Esta última información es valiosa para la evaluación de las prácticas de fertilización en los sistemas agrícolas.

El P está presente en el suelo en una variedad de formas químicas. Cada una de estas formas contribuye de manera distinta a enriquecer el total de P disponible para el cultivo. La cantidad de P disponible no es un valor único para un suelo determinado ya que varía de acuerdo a las condiciones ambientales que influyen el comportamiento del suelo y la planta. Por esta razón, el predecir la cantidad de P disponible en el suelo no es fácil. Sin embargo existen varios procedimientos de extracción que se correlacionan bien con la absorción del P por la planta.

EL FOSFORO EN EL SUELO

Las transformaciones del P aplicado al suelo ocurren dentro del esquema general que se describe en la Figura 1. El P en la solución del suelo está presente en concentraciones muy bajas, pero ésta es la fuente de donde las plantas absorben P para su nutrición. Por esta razón es importante el conocer las interacciones entre las otras formas de P en el suelo y el P presente en la solución.

La pérdida del P soluble de la solución del suelo es un proceso continuo que comprende mecanismos como la adsorción en la superficie de los coloides y la precipitación como compuestos insolubles. A continuación se discutirán estos aspectos.

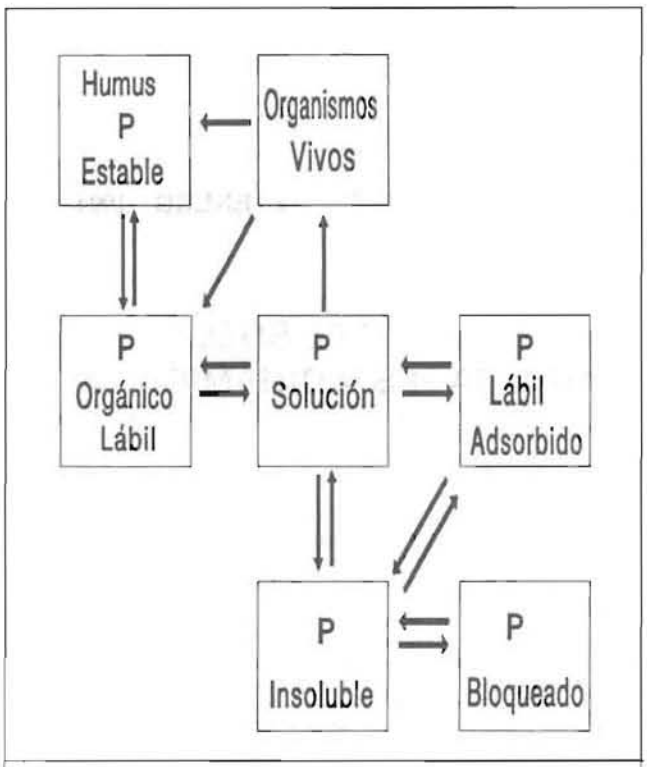

Fig. 1. Transformaciones del P en el suelo.

Formas de P adsorbido (fijado)

Existe abundante trabajo científico que ha estudiado las formas y mecanismos de adsorción o fijación de P en el suelo. El método más generalizado para determinar la fijación de P en el suelo es el de las curvas de adsorción (antes que las isotermas). Este procedimiento hace reaccionar el suelo con soluciones de P de concentración conocida y mide, después de algún tiempo para equilibrio, el P remanente en la solución. De esta forma se puede calcular por diferencia la cantidad de P fijado. Esta técnica es bastante simple y se ha utilizado en una gran variedad de suelos.

Existen diferentes mecanismos que permiten la adsorción de P (fijación de P en la superficie de los coloides en el suelo). Los principales son: 1) Superficie específica, 2) Capacidad del coloide para ocluir P, 3) Concentración o tipo de aniones que compiten con el P por los sitios de adsorción y 4) Reactividad de la superficie de los coloides.

Quizá el más importante de estos mecanismos de adsorción es la reactividad o afinidad de la superficie de los diferentes coloides (arcillas) del suelo para reaccionar con P. Las arcillas de tipo 2:1 (esmectitas) tienen una baja afinidad por P y en consecuencia fijan poco P. Por el contrario, las arcillas presentes en suelos tropicales (Ultisoles y Oxisoles) y las de los suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) tienen gran afinidad por P.

Las diferencias en fijación debido a la reactividad de la superficie de los coloides se deben principalmente a las reacciones del fosfato con Al y Fe que también se encuentran fuertemente adsorbidos a la superficie de los coloides. En los suelos altamente meteorizados se considera que la adsorción esta relacionada principalmente con la presencia de óxidos e hidróxidos de Al y Fe. La fijación de P se produce fundamentalmente por un intercambio de ligandos entre el fosfato y los grupos aquo e hidroxilos presentes en la superficie de los coloides dando como resultado la formación de enlaces monodentados, bidentados o binucleares como se observa en la Figura 2.

Se considera que las reacciones de fijación de P en ciertos Andisoles son aún más fuertes y absorben apreciables cantidades de P a través del tiempo. En los Andisoles, la fijación de P ocurre en la superficie de la alófana, imogolita y complejos humus-Al. En los complejos humus-Al, el Al se encuentra quelatado en la

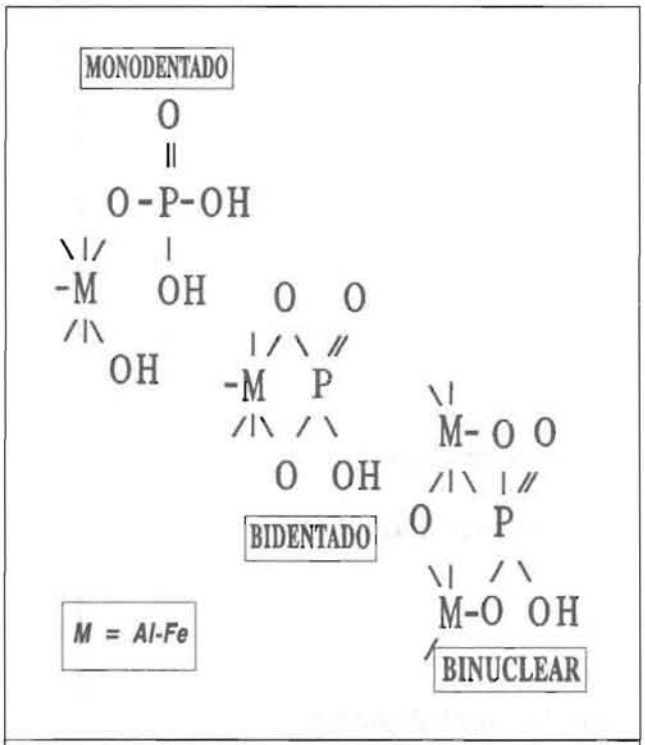

Fig. 2. Tipos de enlaces que producen adsorción de P en la superficie de óxidos e hidróxidos de Al y Fe.

Tabla 1. Efecto residual del P en el rendimiento de papa en un Andisol de Ecuador.

Primer Ciclo		Segundo Ciclo		Tercer Ciclo		P Extraído*
P_2O_5 kg/ha	Rendim t/ha	P_2O_5 kg/ha	Rendim t/ha	P_2O_5 kg/ha	Rendim t/ha	ppm
0		0	6.04	0	6.37	28
0	3.09	0	5.90	300	32.39	41
0		300	39.34	300	31.19	466
150		0	9.90	0	8.33	28
150	18.46	150	32.65	0	11.32	32
150		150	35.44	150	30.45	40
300		0	17.92	0	7.90	27
300	27.60	300	36.54	0	12.44	38
300		300	39.86	300	32.63	64
450		0	18.84	0	13.21	34
450	27.7	450	42.55	0	24.09	59
450		450	45.12	450	28.28	89

* P extraído con $NaHCO_3$

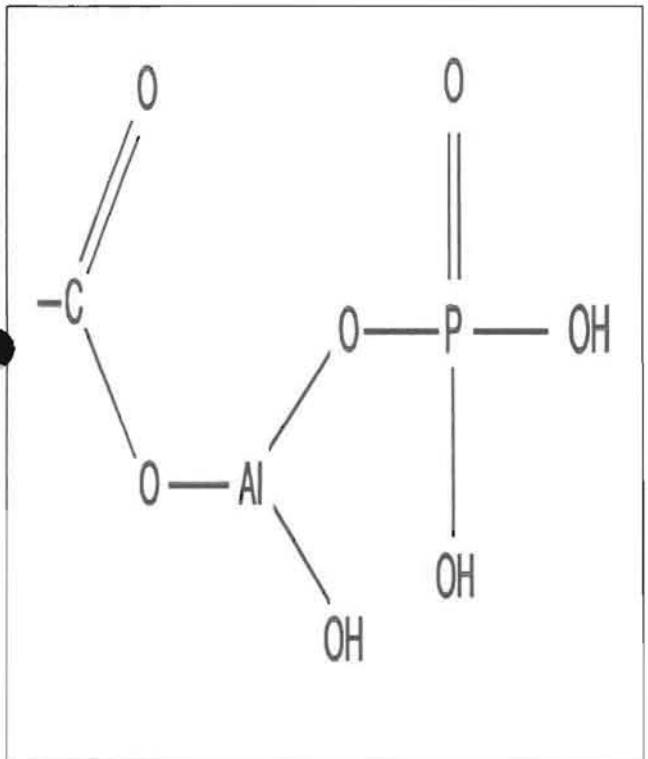

Fig. 3. Modelo de fijación de P en los complejos humus-Al de Andisoles.

superficie de las moléculas de humus pero tiene alta afinidad con el P inmovilizándolo fuertemente. Un modelo de las reacciones de fijación de P en los complejos humus-Al se presentan en la Figura 3. En la Tabla 1 se presentan datos que ilustran el efecto de la fijación de P en Andisoles de Ecuador. Los datos de la Tabla 1 sugieren que aun dosis muy altas de aplicación de P no satisfacen la capacidad de fijación del suelo y que el efecto residual es bajo. Para obtener un adecuado rendimiento es necesario aplicar P cada ciclo. La capacidad de fijación varía también con el grado de meteorización de la ceniza volcánica.

La relación entre la fijación de P y el encalado de suelos ácidos altamente meteorizados(suelos tropicales) no es tan directa como sucede en los suelos dominados por esmectitas (arcillas de tipo 2:1). En el caso de suelos tropicales la fijación de P se reduce muy poco con el incremento de pH.

En suelos calcáreos la fijación de P ocurre en los carbonatos que tienen una apreciable superficie específica. Aun cuando la adsorción es la primera reacción de fijación, la precipitación de P como fosfato de calcio es la principal causa de fijación de P en este tipo de suelos. El P adsorbido sobre la superficie de los carbonatos sirve como punto de nucleación para la precipitación de los fosfatos de Ca.

Precipitación de P

Cuando se aplican formas solubles de P al suelo las reacciones de equilibrio en la solución del suelo forman radicales fosfato ($H_2PO_4^-$ y HPO_4^{-2}). En suelos ácidos predomina la forma $H_2PO_4^-$ y a pH altos predomina la forma HPO_4^{-2} como se presenta en la Figura 4.

Los iones fosfato tienen alta afinidad con el Al, Fe y Ca con los cuales forman compuestos que se precipitan en forma insoluble. Estos procesos dependen entonces de la presencia de estos metales en la solución del suelo. En suelos dominados por esmectitas (montmorillonita, vermiculita, illita), el incremento en acidez conduce a la ruptura de la estructura de los cristales y a la liberación de Al que puede fácilmente combinarse con los iones fosfato y formar compuestos insolubles. Es por esta razón que en este tipo de suelos el incremento de pH por encalado permite la precipitación del Al y en consecuencia mejora la disponibilidad de P en la solución del suelo.

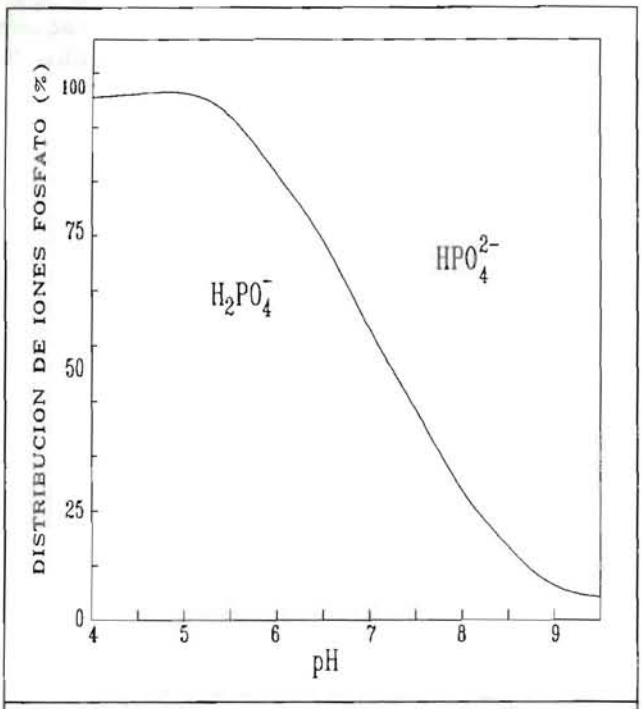

Fig. 4. Distribución de los iones $H_2PO_4^-$ y HPO_4^{-2} de acuerdo al pH.

En los suelos tropicales (Ultisoles y Oxisoles) que han sufrido procesos severos de meteorización, las arcillas dominantes (óxidos e hidróxidos de Fe y Al y caolinita) son estables hasta valores de pH tan bajos como 5.0. En esta forma el Al se encuentra fijo en una partícula de arcilla y solamente a pH muy bajos ingresa a la solución del suelo y puede reaccionar con los fosfatos para formar compuestos insolubles. En estos suelos la principal forma de pérdida de P es la adsorción de los fosfatos a la superficie muy reactiva de los coloides.

FACTORES QUE AFECTAN LA DISPONIBILIDAD DE P EN EL SUELO

La cantidad de P disponible en el suelo está determinada por las propiedades del suelo y de la planta. Estas propiedades están a su vez influenciadas por las condiciones ambientales.

Propiedades del suelo

Los factores que definen la disponibilidad de P en el suelo son:

1.- Intensidad: representa la concentración de P en la solución del suelo.
2.- Cantidad: representada por el P que puede pasar de la fase sólida a la solución del suelo conocida también como P lábil.
3.- Capacidad o poder tampón de P en el suelo: representa la capacidad que tiene el suelo de mantener o restablecer el P a la solución en niveles adecuados a través de la disolución de este elemento de la fase sólida.
4.- Difusión: representado por las características que permiten que los iones fosfatos migren de las zonas de alta concentración a la superficie de las raíces.

Una representación esquemática de estas formas de P en el suelo se presenta en la Figura 5. La magnitud de cada una de estas formas de P en el suelo y sus interrelaciones depende de factores como el contenido de Fe y Al, contenido de carbonatos, cantidad y tipo de arcilla, etc., factores que se discutieron antes en este artículo.

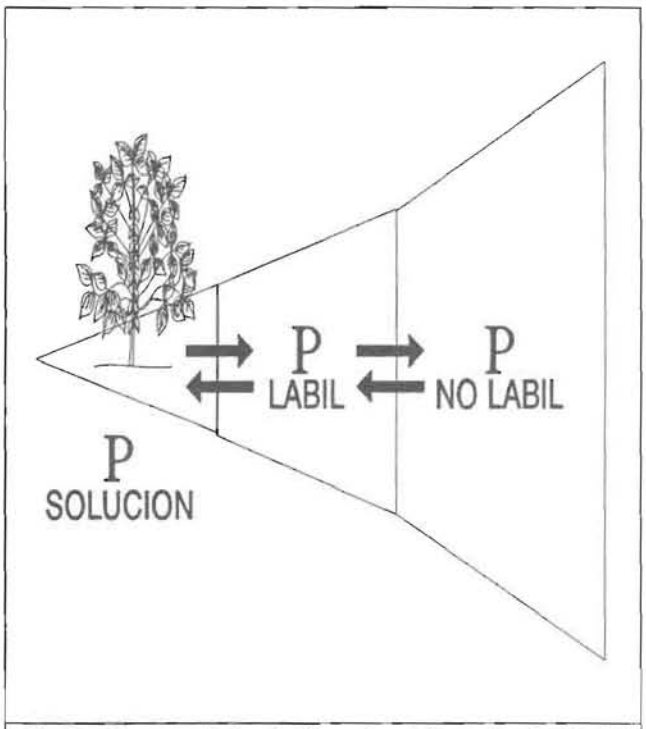

Fig. 5. Diagrama de la relación entre el P en la solución del suelo, P lábil y P no lábil.

La determinación en el laboratorio de estas formas de P en el suelo son difíciles y poco prácticas. Por otro lado el concepto de P lábil no siempre es un concepto equivalente al de P disponible. Aun cuando se han diseñado varios métodos para determinar la disponibilidad de P (intercambio isotópico, curvas capacidad-intensidad, etc.) ninguno de estos métodos ha podido introducir un procedimiento que permita un cambio radical en el análisis común de P en el suelo. La mayor parte de muestras en el mundo se analizan por medio de la extracción de P con soluciones diluidas.

Características de la planta

Generalmente menos del 1% de volumen total del suelo está ocupado por las raíces de la planta. Por esta razón cualquier factor que modifique el tamaño y la morfología del sistema radicular modifica la cantidad de P que esta disponible para la planta. Se ha demostrado en varios estudios que existe un impacto apreciable en la absorción de P por la planta debido a elongación de las raíces.

Las características individuales de las raíces como la longitud y densidad de los pelos radiculares, infección con micorrizas y cinética de absorción influencian la habilidad de la planta para remover P del suelo. Por esta razón los niveles críticos de P cambian no solamente con el tipo de suelo sino que también con el cultivo y aún con el manejo específico del cultivo.

METODOS DE ANALISIS DE SUELO PARA P

Existe una variedad muy grande de métodos de extracción de P en el suelo en uso en diferentes regiones del mundo, lo que se explica por la complejidad del comportamiento de este elemento y por la falta de concordancia para unificar criterios. El problema no está realmente en el proceso de extracción sino más bien en el hecho de que los diferentes métodos dan diferentes resultados que hacen difícil la comparación. En muchos casos la conveniencia analítica a prevalecido sobre la eficiencia de un método.

Principios químicos de los extractantes de P

Los métodos comúnmente utilizados para analizar P en el suelo extraen el elemento de cuatro formas principales. A continuación se describe brevemente el modo de acción de cada una de ellas:

1.- **Dilución ácida:** Se utilizan ácidos fuertes (HCl, HNO_3 y H_2SO_4) y ácidos débiles (acético, cítrico y láctico). Las concentraciones son generalmente bajas y tienen un pH que esta entre 2 y 3. Los extractantes ácidos disuelven en mayor o menor grado las tres formas de P inorgánico. El orden de disolución es P-Ca P-Al P-Fe.

2.- **Sustitución de aniones:** Los fosfatos adsorbidos en la superficie de las arcillas pueden ser substituidos por otros aniones como sulfato, bicarbonato, citrato, lactato o acetato. Estos aniones, cuando están presentes en soluciones ácidas, reducen la readsorción de P.

3.- **Acomplejamiento de cationes combinados con P:** El flúor (F^-) y ciertos aniones orgánicos (citrato y lactato) acomplejan Al de los compuestos Al-P, liberando el P. El bicarbonato (HCO_3) actúa precipitando el Ca soluble como $CaCO_3$, permitiendo la liberación del P de los compuestos Ca-P. El F^- también disuelve los compuestos Ca-P con la consecuente precipitación de CaF_2. Se considera que el HCO_3^- y el F^- precipitan formas similares de P pero que el F^- es más agresivo.

4.- **Hidrólisis de cationes combinados con P:** Los cationes son hidrólisados a pH altos y de esta forma una porción de los compuestos Al-P y Fe-P se disuelven por la hidrólisis de Al y Fe. Los extractantes buferizados a pH 8.5 como el $NaHCO_3$ pueden remover algunas formas de Al-P y Fe-P del suelo debido a su alta concentración de OH.

La liberación de P de los compuestos orgánicos del suelo pueden ser una fuente significativa de P disponible para la planta. Aun cuando no se conoce exactamente el mecanismo, los extractantes de mayor éxito para extraer P orgánico contienen F y ácidos diluidos. Se considera que la liberación de P ocurre por hidrólisis ácida de los ésteres orgánicos de P o por el rompimiento de los enlaces organo-metálicos (Al y Fe).

La cantidad de P removido por cualquiera de los extractantes está determinada no solamente por la composición de la solución sino también por la forma como se realiza la extracción. Factores como cambio en la concentración de las soluciones, tiempo de contacto de la solución con el suelo, velocidad de agitación, tamaño y forma del recipiente de extracción y el tamaño de la muestra pueden influenciar marcadamente en la cantidad de P que se extrae del suelo.

Tabla 2. Extractantes comúnmente utilizados para determinar P disponible.

Nombre	Composición del Extractante
Bray P1	0.03 M NH_4F + 0.025 M HCl
Bray P2	0.03 M NH_4F + 0.1 M HCl
Acido Cítrico	Acido Cítrico al 1%
Mehlich I (Doble ácido)	0.05 M HCl + 0.0125 M H_2SO_4
Mehlich II	0.015 M NH_4F + 0.2 M CH_3COOH + 0.2 M NH_4Cl + 0.012 M HCl
Mehlich III	0.15 M NH_4F + 0.2 M CH_3COOH + 0.25 M NH_4NO_3 + 0.013 M HNO_3
Olsen	0.5 M $NaHCO_3$ - pH 8.5
Olsen modificado	0.25 M $NaHCO_3$ + 0.01 M NH_4F + 0.01 M EDTA - pH 8.5
Resina de intercambio aniónico	Resina enriquecida con HCO_3

Descripción de los principales extractantes de P

Aun cuando es aceptado generalmente que los extractantes ácidos son más apropiados para los suelos ácidos y los extractantes que contienen bicarbonato son más apropiados para suelos alcalinos, existe evidencia que la extracción con $NaHCO_3$ (Olsen) trabaja bien en suelos ácidos. Cualquiera que sea el método de extracción utilizado en un laboratorio, es un requisito indispensable que este método de extracción sea correlacionado y calibrado por un programa de investigación que valide el análisis. Solamente de esta forma se podrán desarrollar criterios para interpretar los resultados analíticos y preparar las respectivas recomendaciones de fertilización. En la Tabla 2 se describen los extractantes más populares en Latino América.