

5. EL FOSFORO DEL SUELO

J. Gildardo Marín M. *

Los problemas relacionados con la provisión de una adecuada cantidad de fósforo (P) aprovechable en el suelo, para el crecimiento normal de las plantas, son de los más complejos e interesantes del área de la fertilidad de los suelos. La absorción del P por las plantas, es el resultado de una multiplicidad de procesos que tienen lugar en el suelo y en la misma planta.

Gran parte de la superficie del país corresponde a suelos "álicos" (con alto contenido de aluminio intercambiable) y suelos alofánicos derivados de cenizas volcánicas. Todos estos suelos son generalmente muy deficientes en P aprovechable para las plantas y además fijan grandes cantidades del P aplicado en los fertilizantes (Fox y Benavides, 1974; Kamprath, 1974; Ospina, 1974). Con el fin de aumentar el nivel del P aprovechable es necesario añadir altas cantidades de fertilizantes fosfóricos en los suelos tropicales y en los derivados de cenizas volcánicas.

Las respuestas de los cultivos al fósforo en Colombia, han estado localizadas principalmente en las regiones altas e intermedias, y en los Llanos Orientales, pues la mayoría de estos suelos son extremadamente deficientes en fósforo aprovechable

* Ing. Agrónomo, M.S. Programa de Suelos, Instituto Colombiano Agropecuario Tibaitatá, Apartado Aéreo 151123. Bogotá, Colombia.

para las plantas. En las partes más frías del país, el fósforo es el primer elemento claramente limitante. En la mayoría de los casos, la producción de cereales y papa es extremadamente baja sin aplicaciones altas de fósforo y no es posible lograr algún beneficio apreciable con el uso de variedades mejoradas sin fertilización fosfórica adecuada (Guerrero, 1974 ; Marín, 1973).

Este artículo se refiere principalmente a las fases del fósforo del suelo y su relación con las prácticas de fertilización fosfórica de acuerdo con la química de este elemento en los suelos.

5.1. FORMAS Y CONTENIDO.

El P en el suelo se clasifica como orgánico e inorgánico, dependiendo de la naturaleza de los compuestos en los cuales aparece. La fracción orgánica se encuentra en el humus y otros materiales orgánicos que pueden o no estar asociados con él. La fracción inorgánica se presenta en numerosas combinaciones con Fe, Al, Ca, F y otros elementos. Los fosfatos también reaccionan con las arcillas para formar complejos arcillofosfatados, los cuales son generalmente insolubles (León, 1971).

5.1.1. Formas Químicas del Fósforo en los Suelos.

Russel (1954) agrupó los compuestos del fósforo del suelo en las siguientes clases : a) Fósforo inorgánico en suelos neutros, probablemente fosfatos de calcio ; b) Fósforo inorgánico en suelos ácidos,

presumiblemente en combinación con óxidos de hierro y aluminio y c) Compuestos orgánicos. Las formas del fósforo soluble, H_2PO_4^- y $\text{HPO}_4^{=}$, que se encuentran en la solución del suelo, también hacen parte de la fracción inorgánica del P del suelo.

El fósforo inorgánico existe en el suelo en muchas formas (Kurtz, 1953; Lotero, 1966). Allí se forman en parte, por la reacción de los fertilizantes con ciertos componentes del suelo, y en este caso se llaman productos de reacción de los fosfatos (León, 1971). Algunas formas químicas del fósforo inorgánico del suelo se presentan en la Tabla 11.

Chang y Jackson (1957) desarrollaron un procedimiento para fraccionar el P del suelo en varias formas químicas denominadas: soluble, fosfatos de aluminio, fosfatos de hierro y fosfatos de calcio, extraídos respectivamente con NH_4Cl 1N; NH_4F 0,5N; NaOH 0,1N y H_2SO_4 0,5N.

Las plantas, animales y microorganismos, son la fuente del fósforo orgánico del suelo; hay cinco grupos principales de compuestos: fosfolípidos, ácidos nucleicos, fosfatos de inositol, fosfatos "metabólicos" y fosfoproteínas (Black y Goring, 1953). En las investigaciones sobre los compuestos de fósforo orgánico en los suelos, la atención se ha dirigido casi completamente a los tres primeros grupos.

TABLA 11. Formas químicas del fósforo inorgánico del suelo
(León, 1971).

Fórmula química	Nombre
$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Fosfato dicálcico hidratado
CaHPO_4	Fosfato dicálcico anhidro
$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	Hidroxiapatita
$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}$	Fluorapatita
$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Fosfatos de hierro (estregita)
$\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Fosfatos de aluminio (variscita)

5.1.2. Contenido de fósforo en los Suelos.

El contenido de P total en el suelo es relativamente pequeño. Lipman y Conybeare (1936) obtuvieron un promedio de 1.240 Kg/Ha, para el P total en los primeros 18 cm de la superficie de tierra cultivable. Esta cifra representa el 0,064 por ciento en peso para el P, asumiendo que la capa arable de una hectárea pesa 2.000.000 de kilogramos. En este mismo estudio el nitrógeno representó el 0,14% y el potasio el 0,83%.

En la Tabla 12 se presentan datos del contenido total de fósforo en suelos colombianos. El contenido total de P en un suelo de origen volcánico es de 1.465 ppm, mientras que en un latosol es de

TABLA 12. Cantidad de fósforo total en la capa superficial de suelos de Colombia.

Región	Tipo de Suelo *	P Total (ppm)	Referencia
Nariño (volcánico)	Andept	1.465	Blasco (1969)
Valle del Sibundoy	Andept	1.270	Bastidas <u>et al</u> (1970)
Zona cafetera (Caldas)	Andept	750	López (1969)
Valle del Cauca	Mollisol	585	Blasco y Bohorquez (1968)
Valle del Cesar	Mollisol	414	Tafur y Blasco (1969)
Llanos Orientales	Inceptisol	179	Benavides (1963)

* Guerrero, R. Programa de Suelos. Instituto Colombiano Agropecuario Tibaitatá - Información personal.

179 ppm. Los suelos altamente meteorizados (latosoles), contiene cantidades de P relativamente bajas. Los suelos derivados de cenizas volcánicas contienen muy altas cantidades de P total si se comparan con otros suelos de Colombia. Sin embargo, los cultivos que crecen en estos suelos responden marcadamente a la fertilización con P. Los Andosoles de Colombia están formados por materiales muy recientes y la meteorización puede ser muy limitada (Kamprath, 1974).

5.2. EL FOSFORO APROVECHABLE PARA LAS PLANTAS.

Está plenamente aceptado que el P es absorbido por las plantas, principalmente en forma de ión monofosfato (H_2PO_4^-) y del ión difosfato (HPO_4^{2-}); también se ha sugerido que este elemento puede ser absorbido en forma de ácidos nucleicos y fitina (Black y Coring, 1953), pero estos compuestos son solo de importancia académica o científica, y no de importancia práctica ya que existen en el suelo en muy pequeñas cantidades y son mineralizados fácilmente (Truog, 1930).

Bray (1948) definió la forma aprovechable de un nutrimento, como aquellas cuyas variaciones en cantidades son responsables de variaciones significativas en rendimiento y respuesta a los fertilizantes aplicados. Esta definición excluye cualquier forma cuya contribución al crecimiento de la planta sea relativamente insignificante.

5.2.1. La Determinación del Fósforo Aprovechable en los Suelos.

El P es uno de los elementos que presenta mayores problemas para determinar su grado de aprovechabilidad por las plantas, de ahí que sus determinaciones hayan recibido atención especial por parte de los químicos de suelos. Dentro de los métodos más comunes para determinarlos están los siguientes :

5.2.1.1. Método de Bingham. En este método se usa agua destilada como solución extractora, agitación por 5 minutos y una relación suelo - solución de 1:10 ; esta

solución extrae únicamente el P soluble en agua, lo que indica que no es aconsejable para suelos ácidos (Marín, 1966).

5.2.1.2. Método de Olsen. Este método emplea una solución 0,5N de NaHCO_3 a un pH de 8,5. Es muy recomendable para la extracción de P en suelos calcáreos (Marín, 1966).

5.2.1.3. Método de Olsen Modificado. Este método emplea la misma solución anterior, pero se le añade EDTA más floculante "superfloc 127". En esta forma también se utiliza para determinar el estado de la fertilidad de los suelos en relación con los elementos P, K, Cu, Mn y Zn que se extraen con esta solución (Hunter, Sf.).

5.2.1.4. Método de Truog. En este método se usa una solución extractora 0,002 N de H_2SO_4 tamponada a pH 3. Extrae P de los compuestos apatíticos (Truog, 1953). Basado en esta solución, López, 1958, desarrolló el método "Cenicafé" de determinación de P aprovechable en suelos de la zona cafetera, el cual se extrae con una solución 0,08 N de H_2SO_4 .

5.2.1.5. Método Bray I. La solución extractora utilizada en este método es una mezcla de NH_4F 0,03 N y HCl 0,025 N. El ión F^- tiene la propiedad especial de formar compuestos con los iones Al^{+++} y Fe^{+++} en soluciones ácidas, con la consecuente liberación del P retenido en el suelo por los iones trivalente (Marín, 1966).

5.2.1.6. Método Bray II. En este método se usa una solución extractora similar a la anterior pero con HCl 0,1 N, con el fin de incluir una mayor concentración de P proveniente de la apatita del suelo (Marín, 1966).

Como es obvio suponer, los métodos de extracción de P difieren en su poder extractante según la naturaleza de los suelos. Sin embargo, se ha encontrado que, en los suelos muy bajos en fósforo, los métodos presentan muy pocas variaciones en la medida del P aprovechable, como se puede observar en los datos presentados en la Tabla 13.

5.2.2. Distribución del Fósforo Aprovechable en Ocho Regiones Naturales de Colombia.

En la Tabla 14 se presenta la distribución en porcentaje de los niveles críticos de P determinado por el método Bray II, en ocho regiones naturales de Colombia en las cuales se ha dividido el país de acuerdo

TABLA 13. Fósforo extraído (ppm de P) de la capa arable de varios suelos de Colombia por tres métodos químicos *

Región	Tipo de Suelo **	Método de extracción de P		
		Bray I	Bray II	Truog
Sabana de Bogotá	Inceptisol	13,2	32,8	16,0
Sabana de Bogotá	Andosol	1,1	1,3	1,0
Llanos Orientales	Oxisol	3,7	3,9	4,0
Oriente Antioqueño	Andosol	1,5	2,3	2,5
Zona Cafetera	Andosol	4,1	8,1	4,5
Meseta de Popayán	Andosol	2,0	3,0	2,5
Antioquia	Ultisol	1,6	1,5	2,5

* Fuente : Laboratorio de Suelos ICA - Palmira

** Guerrero, R. Programa de Suelos - Instituto Colombiano Agropecuario Tibaitatá. Información personal.

TABLA 14. Distribución en porcentajes del fósforo aprovechable en ocho regiones naturales del país*

Región natural	Porcentaje de muestras analizadas			No. de muestras analizadas.
	P-Bajo	P-Medio	P-Alto	
Cordilleras Andinas	65	15	20	25.766
Sabana de Bogotá	33	24	43	3.287
Valle del Alto Magdalena	43	17	40	3.655
Valle del Río Cauca	43	24	33	13.671
Costa del Pacífico	69	19	12	1.583
Costa Atlántica	23	13	64	4.904
Valle del Bajo Magdalena	58	18	24	2.483
Llanos Orientales	68	14	18	2.472

* Fuente : Banco de Datos del Programa de Suelos del ICA.

con el criterio de Guerrero, (1965).

En la Tabla 14 se puede observar que el nivel del P aprovechable varía ampliamente en las diferentes regiones naturales del país. De acuerdo con estos porcentajes, se puede considerar que los fertilizantes fosfatados son bajos para los suelos de la Costa Atlántica, ya que solamente el 23% de las muestras analizadas de esa región dieron contenidos bajos de P. Se puede considerar con requerimientos medianos, los suelos de las regiones de la Sabana de Bogotá, Valle del río Cauca y Valle del Alto Magdalena, ya que entre un 33% y un 43% de las muestras analizadas de esas regiones dieron resultados bajos en P. Finalmente se considera que los suelos de las Cordilleras Andinas, de la Costa del Pacífico, de los Llanos Orientales y del Valle del Bajo Magdalena presentan altos requerimientos de fertilizantes fosfatados, ya que entre el 58 y el 69% de las muestras analizadas de esas regiones, dieron resultados bajos en fósforo. Debe tenerse en cuenta además, que los suelos de las Cordilleras Andinas tienen una alta capacidad de fijación de P (Baird y Aristizábal, 1957; León, 1964).

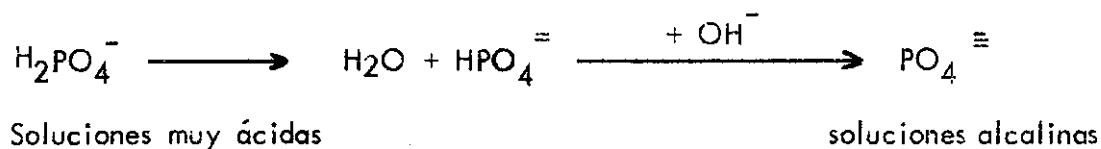
5.3. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO QUE AFECTAN LA APROVECHABILIDAD DEL FOSFORO.

Algunas características de los suelos tienen influencia muy marcada en la aprovechabilidad del P por las plantas. Tales características son : el pH, los contenidos de Fe y Al, y los minerales de arcilla.

5.3.1. La Reacción del Suelo.

El pH del suelo es uno de los factores que afectan la utilización del P por las plantas, pero el agricultor puede alterarlos fácilmente. En casi todos los suelos la mayor aprovechabilidad del P se obtiene en los límites de pH de 5,5 a 7,0. A pH bajos la retención del P resulta principalmente de la reacción con el Fe y el Al, y sus hidróxidos. Por encima de un pH de 7,0 los iones Ca^{++} y Mg^{++} así como la presencia de carbonatos de esos metales en el suelo, precipitan al P agregado en los fertilizantes, y por tanto su aprovechabilidad disminuye.

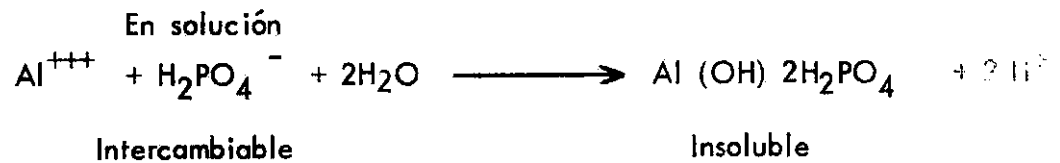
Como se indicó antes, el P es absorbido por las plantas, principalmente en las formas H_2PO_4^- y $\text{HPO}_4^{=}$ que están presentes en la solución del suelo. La clase de ión fosfato, presente en la solución del suelo, varía con el pH de la solución (Tisdale y Nelson, 1966). En las soluciones altamente ácidas, solamente están presentes los iones H_2PO_4^- . Si el pH aumenta, predominarán los iones $\text{HPO}_4^{=}$ y luego los iones PO_4^{\equiv} . Esta situación generalmente se representa por medio de la siguiente ecuación :



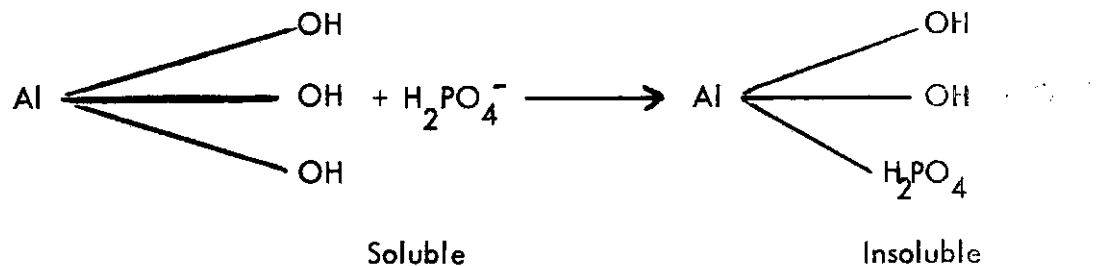
En soluciones a pH 6,0 están presentes las formas H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} . En general, estos iones se consideran más aprovechables que la forma PO_4^{3-} . Sin embargo, en los suelos, esta relación se complica por la presencia o ausencia de otros compuestos o iones.

5.3.2. Los Contenidos de Hierro y Aluminio.

En suelos minerales ácidos, el complejo de intercambio iónico, contiene apreciables cantidades de Al adsorbido y más pequeñas pero significativas cantidades de Fe (Coleman, Thorup y Jackson, 1960). Estos iones se intercambian con fosfatos para formar compuestos insolubles, en la forma como se ilustra en la siguiente reacción :



Los fosfatos también reaccionan con los hidróxidos de hierro y aluminio, mediante un mecanismo de intercambio aniónico (Hasegan Brown y Witt, 1950). Estas reacciones se ilustran en la siguiente forma :

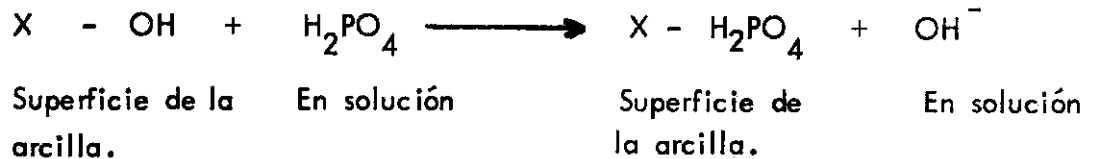


El grado de saturación de P del suelo y la cantidad de este elemento previamente fijado, son de considerable importancia en la fijación de fertilizantes fosfatados agregados al suelo. La relación P_2O_3/P_2O_5 es una medida de la cantidad de P, en relación con los contenidos de óxidos de Fe y Al del suelo. Una relación amplia indica una pequeña cantidad de P presente, o una saturación baja de P. Bajo tales condiciones, se fijan grandes cantidades del P agregado con los fertilizantes. Las implicaciones prácticas de la relación P_2O_3/P_2O_5 son muy importantes, pues indica que el P aplicado en los fertilizantes puede ser fijado por los suelos hasta un punto tal a partir del cual ya no habrá más fijación y por consiguiente puede ser fácilmente aprovechado por las plantas (Tisdale y Nelson, 1966).

5.3.3. Los Minerales de Arcilla.

El P del suelo y el agregado en los fertilizantes, puede ser retenido o fijado por minerales de arcilla, especialmente aquellos del tipo 1:1 como la caolinita y por arcillas amorfas como la alúmina y óxidos e hidróxidos de Fe y Al (Hemwall, 1957; Low y Black, 1950). Por tanto, aquellos suelos de áreas con temperaturas altas y precipitación abundante y con altos contenidos de arcilla caolinita, pueden fijar cantidades más altas de P, que los suelos de áreas de precipitación escasa, con arcillas del tipo 2:1. La razón para estas diferencias

es que las arcillas del tipo 1:1 poseen mayores cantidades de grupos hidroxido en su superficie, y por un mecanismo de intercambio aniónico, los iones OH^- son reemplazados por iones H_2PO_4^- , como se ilustra en la siguiente ecuación :



5.4. PRACTICAS DE MANEJO DEL SUELO EN RELACION CON LA APROVECHABILIDAD DEL FOSFORO.

En un sentido muy amplio puede decirse que la mayoría de las prácticas de manejo del suelo influyen ya sea directa o indirectamente en la utilización del P nativo del suelo, y en el de los fertilizantes. Las prácticas más importantes y que han sido investigadas intensamente son : a) El encalado de los suelo, b) la aplicación de materiales orgánicos, c) el efecto residual en rotación de cosechas y d) el riego.

5.4.1. El Encalado de los Suelos.

Numerosos investigadores han sostenido desde hace muchos años que el encalado racional de los suelos ácidos promueve la aprovechabilidad del P del suelo, ya sea el nativo o el añadido en forma soluble en los fertilizantes (Truog, 1953). En este aspecto Colombia no

ha sido excepción, ya que existen numerosos datos de campo que prueban que hay mejor utilización del P del suelo y el de los fertilizantes aplicados, cuando se encalan los suelos ácidos. A manera de ilustración se citarán algunos ejemplos.

En experimentos de campo localizados en las series de suelos Río Bogotá y Techo de la Sabana de Bogotá, Vega y Navas (1971), informaron que el efecto benéfico del encalado en el rendimiento del trigo y en la posibilidad de disminuir la cantidad del P aplicado en los fertilizantes. Los datos se presentan en la Tabla 15. En el experimento de campo localizado en la serie Río Bogotá, con la aplicación de 3 toneladas de cal agrícola por hectárea se obtuvo un rendimiento adicional similar al obtenido con la aplicación de 160 Kg/Ha de P_2O_5 . Estos rendimientos adicionales fueron respectivamente de 7,7 y 9,1 por ciento en relación con el rendimiento del tratamiento testigo. En la serie Techo, tanto el efecto de la cal como del P fueron más pronunciados. La aplicación de 2 toneladas de cal se reflejan en un aumento en el rendimiento del 46% y con la aplicación de 160 Kg/Ha de P_2O_5 los incrementos del trigo llegaron hasta el 69%. El efecto benéfico de la cal se corrobora con el tratamiento Cal + P. Los incrementos de trigo con este tratamiento llegaron hasta el 116% en relación con el tratamiento testigo.

TABLA 15. Incremento del rendimiento del trigo en dos suelos de la Sabana de Bogotá, con diferentes dosis de cal y fósforo (Vega y Navas, 1971).

Tratamiento	Rendimiento en Kg/ Ha		% de aumento	
	Serie Río Bogotá	Serie Techo	Serie Río Bogotá	Serie Techo
Sin Cal - Sin P	1.980	680	-	-
Con Cal *	2.130	990	7,7	46
P ₂ O ₅ (160 Kg/Ha)	2.150	1.150	9,1	69
Cal + P	2.680	1.470	35,5	116

* En la serie Río Bogotá se aplicó cal a razón de 3 toneladas por hectárea y en la serie Techo a razón de 2 toneladas.

Parra (1971), presentó resultados de experimentos con maíz realizados en suelos derivados de cenizas volcánicas, de la zona cafetera del país, para medir los efectos aislados y combinados del encalado y la aplicación de superfosfato. Estos suelos se caracterizan por la extrema acidez y la baja concentración de P soluble. En la Figura 8 se aprecia como se puede mejorar la producción de maíz con aplicaciones de P previo encalado del suelo.

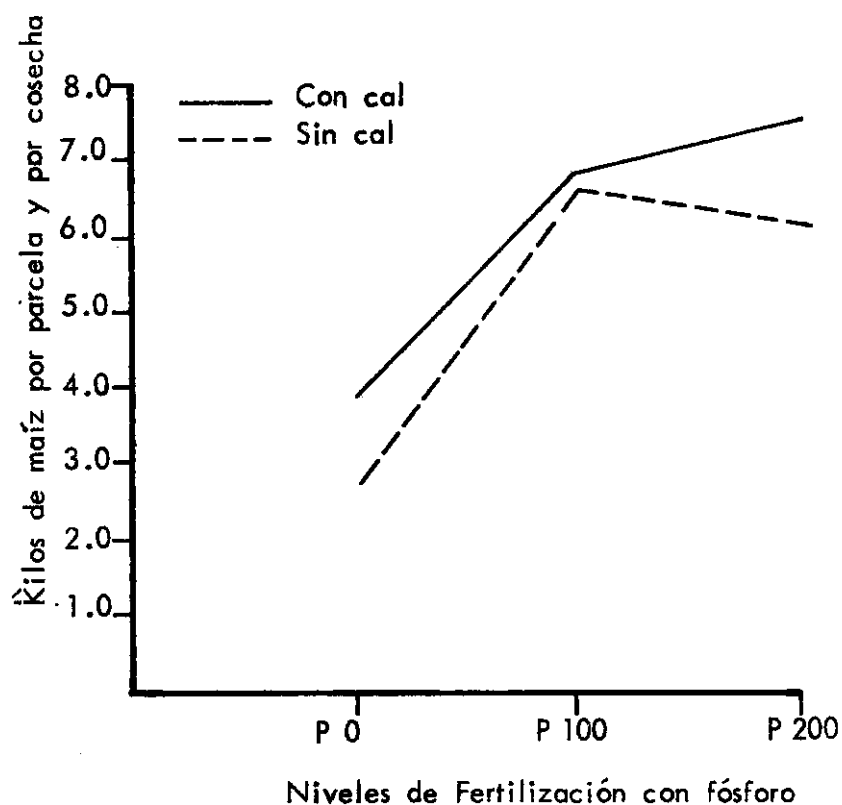


FIGURA 8. Interacción entre encalamiento y fertilización con fósforo en la producción de maíz (Zea mays L.) en suelos derivados de cenizas volcánicas (Parra, 1971).

5.4.2. La Aplicación de Materiales Orgánicos.

La nutrición fosfórica de las plantas es influenciada en varias formas por la adición de materiales orgánicos al suelo. El P proporcionado por los abonos verdes, los residuos de cosechas y el

abono de estable así como los efectos indirectos de esos materiales sobre la aprovechabilidad del P presente en el suelo, o aplicado en los fertilizantes comerciales, merecen consideración especial en una discusión sobre las prácticas de manejo del suelo que afectan el uso del P.

A través del uso de material de plantas que contienen fósforo marcado (P^{32}), se ha encontrado que la aprovechabilidad del P de ciertos materiales de plantas, puede compararse favorablemente con la aprovechabilidad del P del superfosfato. Fuller y Dean (1949) encontraron que el P del abono verde formado por raíces y parte aérea de plantas de trigo, fué cerca de 70% tan eficiente como el del superfosfato, cuando esos materiales se mezclaron con el suelo bajo condiciones de invernadero. Cuando el material de plantas se colocó en capas que simulaban su aplicación en el campo, el porcentaje de utilización del P excedió al del superfosfato aplicado en una cantidad equivalente de P.

Hay otro aspecto muy interesante de la aplicación de residuos de plantas al suelo y es el relacionado con la aprovechabilidad del P: cuando se incorporan al suelo residuos altos en carbono y bajos en fósforo, tales

materiales no solamente suministran poco P sino que puede reducir apreciablemente el P aprovechable del suelo durante un tiempo indefinido. Este hecho fué demostrado por Papadakis (1947), quien concluyó que el efecto adverso de tamo agregado al suelo con plantas en crecimiento, fue debido a la inmovilización del P inorgánico del suelo por la acción microbiana.

En la mayoría de los casos, con el abono de establo puede esperarse un contenido de 2 a 3 Kg de P_2O_5 por tonelada, dependiendo de la fuente, la proporción y clase de cama usada, su estado de descomposición y de la prevención de las pérdidas del P soluble en agua. Algunos investigadores, citados por Pierre y Stanford (1953), han concluído que la aprovechabilidad del P de los abonos de establo es igual, o en algunos casos exceden, a la de los fertilizantes químicos.

5.4.3. El efecto Residual en Rotación de Cosechas.

Uno de los hechos más importantes en la economía de los fertilizantes fosfóricos es el efecto residual del P aplicado a cosechas previas (Monsalve y Lotero, 1972). Wiczorek, en experimentos de rotación papa-trigo-pastos, llevados a cabo en suelos derivados de cenizas volcánicas, en el departamento de Nariño, encontró efectos residuales apreciables del P aplicado a un cultivo de papa, tal como se observa

en la Tabla 16. Resultados similares se han obtenido en la Sabana de Bogotá. La magnitud del efecto resigual puede ser extremadamente bajo, aún con aplicaciones altas de P, cuando la relación P_2O_3/P_2O_5 en el suelo originalmente es demasiado amplia.

5.4.4. El Riego.

Aumentando la humedad del suelo a un nivel cercano a la capacidad de campo, se aumenta la aprovechabilidad del P por las plantas así como la tasa de disolución de los fertilizantes, pero la humedad excesiva del suelo reduce la absorción de P por las plantas. Esto se debe a la reducción de la aireación del suelo y de complemento, a la poca penetración.

Otra situación muy diferente puede presentarse en suelos inundados donde se cultiva arroz. Muchas investigaciones indican que la disponibilidad del P aumenta después de la inundación, lo cual se ha reflejado, en el arroz de rigo en un aumento en la concentración de P soluble en agua, en un aumento en la cantidad de P aprovechable, determinado con varias soluciones extractoras, y un aumento en el contenido de P en comparación con el arroz de secano (Howler, 1974), Ponnampuruma, 1972, observó una gran diferencia entre suelos en cuanto a los cambios de P soluble en agua, después de la inundación. El aumento en la concentración del P soluble lo atribuyó a las siguientes

TABLA 16. Rendimiento de trigo en un suelo de Nariño después de una siembra de papa (Wieczoreck, 1975).

P_2O_5	Kg / Ha *	Rendimiento (Kg / Ha)	
		1957 A	1957 B
0		2.600	3.300
50		2.600	3.400
100		2.700	3.600

* El suelo con un pH inicial de 5,6 y un contenido de 36 ppm de P recibió una dosis de 200 Kg/Ha al momento de sembrar la papa. El trigo recibió las dosis de P_2O_5 anotadas en la tabla.

causas : a) hidrólisis de fosfato de Fe y Al trivalentes ; b) liberación de P adsorbido en las arcillas e hidróxidos de Fe y Al trivalentes por intercambio iónico y c) reducción del hierro férrico (Fe^{+++}) al hierro ferroso (Fe^{++}) con la liberación del P adsorbido o fijado.

5.5. LOS REQUERIMIENTOS DE FOSFORO POR LAS PLANTAS.

Probablemente el P es uno de los elementos esenciales para las plantas más estudiados hasta la fecha, principalmente en lo que se refiere a su química o comportamiento en el suelo o medio de cultivo, fijación, absorción por las plantas y