

EL FOSFORO EN EL SUELO Y SU IMPORTANCIA EN EL CULTIVO DEL CAFETO



Por:
César Augusto Vinasco Ossa
Ignacio Federico Carrillo Pachón

FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA
SUBGERENCIA GENERAL TECNICA
Centro Nacional de Investigaciones de Café
Cenicafé

BOLETIN TECNICO
No. 12
1987

FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA

COMITE NACIONAL DE CAFETEROS

Ministerio de Relaciones Exteriores
Ministerio de Hacienda y Crédito Público
Ministerio de Agricultura
Ministerio de Desarrollo Económico
Representante del Presidente de la República
Gerente de la Caja de Crédito Agrario

Miembros elegidos para el período 1986 - 1988

PRINCIPALES

Luis Ignacio Múnera Cambas
Mario Gómez Estrada
Alfonso Palacio Rudas
Rodrigo Múnera Zuluaga
Milciades Zuluaga Herrera
Gustavo Ríos Ochoa
Adolfo Forero Joves
Luis Ardila Casamitjana

SUPLENTE

Octavio Arizmendi Posada
Felipe Montes Trujillo
Lisandro Méndez Manchola
José Vicente Romero
Octavio Arbeláez Giraldo
Morris Pinedo Alzamora
Rodrigo Ocampo Ospina
Emiliano Díaz del Castillo

Gerente General

JORGE CARDENAS GUTIERREZ

Subgerente General - Primer Gerente Auxiliar

HERNAN URIBE ARANGO

Subgerente General Técnico

GERMAN VALENZUELA SAMPER

Director Centro Nacional de Investigaciones de Café

SILVIO ECHEVERRI ECHEVERRI

FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA

SUBGERENCIA GENERAL TECNICA

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFE

Cenicafé

DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA Y SUELOS

Sección de Química Agrícola

El Fósforo en el Suelo y su Importancia en el Cultivo del Cafeto

Por:

**César Augusto Vinasco Ossa
Ignacio Federico Carrillo Pachón
1987**

UNA PUBLICACION DE LA SECCION DE DIVULGACION CIENTIFICA

Cenicafé

EDITORES : José Vélez Marulanda I. A.
Héctor Fabio Ospina Ospina I. A. M. S.

COMPOSER : Edith Vera de Marín

MONTAJE : Clemencia Londoño Gómez

CARATULA : Luz Adriana García Bravo

Los trabajos suscritos por el personal técnico del Centro Nacional de Investigaciones de Café son parte de las investigaciones realizadas por esta Institución. Sin embargo, tanto en este caso como en el de personas no pertenecientes a este Centro, las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente las opiniones de la entidad.

PRESENTACION

La importancia que el fósforo tiene en la agricultura queda demostrada no solo por el volumen de trabajos existentes sobre el particular en la literatura, sino por consideraciones como las siguientes:

a) La mayor parte el fósforo del suelo se encuentra en formas no fácilmente disponibles para la planta; b) existe una amplia diversidad de métodos de extracción de fósforo en suelos para su análisis químico, todos ellos tratando de simular la extracción que la planta hace; c) la química del fósforo en el suelo y su interacción con otros factores es materia de permanentes estudios.

La primera parte de este boletín es el resultado de un largo y paciente trabajo de biblioteca que facilitará enormemente la labor a los interesados en este complejo tema.

La importancia que el fósforo tiene en la nutrición de las plantas queda explicada por el hecho de que el ácido fosfórico ocupa una posición central en el metabolismo vegetal, como constituyente que es de numerosos compuestos vitales y por el papel fundamental que tiene en todos los procesos de transformación de energía en la planta.

Conscientes de todo lo anterior y teniendo en cuenta que los fertilizantes fosfóricos son uno de los insumos más costosos, se hizo un trabajo de condensación de los resultados experimentales en el cultivo del café, en relación con su respuesta a este nutrimento.

Esta publicación va dirigida al personal técnico interesado en los aspectos anotados; se espera que sirva como guía en las decisiones de campo en el cultivo del café y como orientación para la planificación de nuevos experimentos que den más claridad sobre aspectos tan complejos como los relacionados en este boletín.



GERMAN VALENZUELA SAMPER
Subgerente General Técnico

CONTENIDO

	Página
A- EL FOSFORO EN LOS SUELOS.	
1. INTRODUCCION	1
2. QUIMICA DEL FOSFORO EN EL SUELO	2
2.1 Retención y fijación de los fosfatos	4
3. FORMAS DE FOSFORO EN LOS SUELOS	6
3.1 El fósforo total	7
3.2 El fósforo orgánico	8
3.3 El fósforo aprovechable	9
4. METODOS DE EXTRACCION	10
4.1 Químicos	10
4.2 Biológicos	20
5. METODOS DE DETERMINACION DE FOSFORO ..	20
6. EL ANTAGONISMO FOSFORO-ZINC	21
7. EFECTO DEL ENCALADO EN LA DISPONIBILIDAD DEL FOSFORO	22
8. CONCLUSIONES	24
9. BIBLIOGRAFIA	26
B- IMPORTANCIA DEL FOSFORO PARA EL CAFETO.	
1. INTRODUCCION	35
2. TRABAJOS EN ALMACIGO	37
3. ENSAYOS EN CAFE EN ESTABLECIMIENTO Y EN CAFE ESTABLECIDO	40
4. RECOMENDACIONES	47
5. BIBLIOGRAFIA	47

A.

EL FOSFORO EN LOS SUELOS

César Augusto Vinasco Ossa*

1. INTRODUCCION

El fósforo forma parte de importantes compuestos que están directamente relacionados con los procesos energéticos de las plantas y en general de los organismos vivos. Sustancias tales como los ortofosfatos, los fosfolípidos, la fitina, los azúcares fosforilados, las nucleoproteínas, los ácidos nucleicos y otros.

En general los suelos tienen un bajo contenido de fósforo, pero en los suelos del trópico esta situación se hace crítica especialmente por la fijación o retención de los fosfatos, debido al contenido de materiales amorfos, como la alófana y en consecuencia, no siempre que se aplican fertilizantes fosfóricos se garantiza la disponibilidad de este elemento para las plantas.

La complejidad de la química del fósforo en el suelo y sus implicaciones económicas en la producción de los cultivos, ha merecido el interés y dedicación de numerosos investigadores a nivel mundial.

* Auxiliar IV de la Sección de Química Agrícola del Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFE, Chinchiná, Caldas, Colombia.

Este trabajo condensa y actualiza en forma ordenada la bibliografía que se ha revisado, como parte del programa que se adelanta en el Centro Nacional de Investigaciones de Café, sobre el estudio de métodos de análisis de fósforo en suelos, para el establecimiento de niveles críticos para el café.

2. QUIMICA DEL FOSFORO EN EL SUELO:

La mayoría de los autores estima que la principal fuente de fosfatos del suelo es el mineral llamado apatita $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})_2]$, el cual se encuentra en casi todas las rocas que dan origen a los suelos: ígneas, metamórficas y sedimentarias (21).

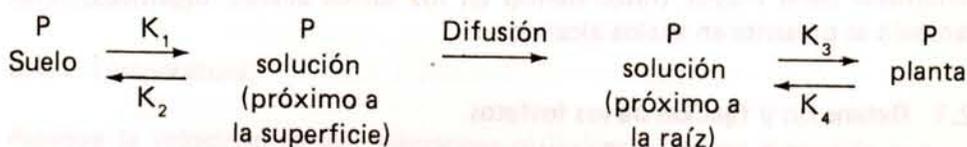
La meteorización produce la desaparición gradual de la apatita y la formación de fosfatos secundarios. Si las reacciones en el suelo se dan en un medio ácido se favorece la formación de fosfatos ligados al Al y al Fe; en estas reacciones complejas de intercambio iónico, el PO_4^{3-} reemplaza los OH^- de los minerales hidroxilados o el oxígeno de los minerales oxidados de donde se derivan los iones trivalentes. Ejemplo de estos nuevos compuestos son: la variscita $\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$ ó $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y la strengita $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$ ó $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (9, 15).

El grado de meteorización química de los suelos se refleja en la transformación de discretas formas de fosfatos inorgánicos y está relacionado con factores del suelo tales como: pH, actividad de varios cationes (particularmente Ca, Fe y Al), los productos de solubilidad de los diferentes fosfatos, las prácticas de fertilización y encalado; de todos éstos, el pH es el más fácilmente controlable. La solubilidad de los compuestos fosfatados de Ca, Al y Fe es muy similar en el rango de pH del suelo entre 6,0 y 7,0. Por debajo de este rango de pH, los fosfatos de Fe y Al son más estables que el fosfato de calcio; por encima de éste rango, se forman entonces varios fosfatos de calcio. Entre ellos se destacan la hidroxiapatita $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ y el fosfato dicálcico CaHPO_4 (9).

El fósforo nativo también se presenta en el suelo como cloroapatita $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{Cl}_2$, o en combinación con la fracción arcilla. Numerosos com-

puestos intermedios muy complejos se originan en la mineralización de los fosfatos; varias combinaciones con Ca, Mg, K, Fe, Al y NH_4^+ pueden ser encontradas con ayuda de la petrografía. Otras partes importantes del fósforo se encuentran formando complejos enlaces con la fracción orgánica del suelo (110).

La planta se nutre de fósforo solamente a través de la solución del suelo; el mecanismo puede ser representado de la siguiente manera (49, 92).



Donde K es la velocidad de la reacción; así que en condiciones de crecimiento vegetativo normal, K_4 es prácticamente nula y la velocidad de absorción de P de la solución (K_3) parece ser limitativa solo cuando hay altas concentraciones de fosfato. En consecuencia, los cuatro factores más importantes son: cantidad (P suelo), velocidad (K_1/K_2), intensidad (P solución) y difusión.

El fósforo es absorbido de la solución del suelo en forma de iones ortofosfato primario y secundario (H_2PO_4^- y HPO_4^{2-}). Aunque pequeñas cantidades pueden ser absorbidas por la planta en forma de fosfatos orgánicos solubles, pero se considera que son cantidades que no tienen mucha importancia (110).

El crecimiento de las plantas es proporcional a las cantidades de fósforo presentes en la solución del suelo, siempre y cuando no haya factores que limiten su absorción. Sin embargo, la concentración de fósforo en la solución del suelo es extremadamente baja; en un estudio efectuado en Estados Unidos, se encontró un contenido promedio de 0.03 ppm de P en la solución del suelo (16).

Pero quizás el fenómeno más importante, es la capacidad de la planta para acumular y mantener una alta concentración de fosfato en sus tejidos, a pesar de la baja concentración de este ión en la solución del suelo. Varios investigadores han demostrado que la concentración de fosfato inorgánico en la savia celular es frecuentemente varios miles de veces mayor que en la solución desplazada del suelo (91).

El otro aspecto de carácter químico con gran repercusión económica es la fijación de los fosfatos.

Cuando se aplican fertilizantes fosfatados solubles al suelo, estos reaccionan con los componentes del suelo para formar compuestos muy insolubles. El fenómeno tiene mayor trascendencia en los suelos ácidos, orgánicos, pero también se presenta en suelos alcalinos.

2.1 Retención y fijación de los fosfatos.

Varios son los factores que según Tisdale y Nelson (110), intervienen en la retención del fósforo por los suelos. A continuación se analizan brevemente dichos factores, debido a la importancia de la retención y la fijación en la eficiencia de la fertilización.

2.1.1 Tipos de arcilla.

Los suelos con grandes contenidos de arcillas caoliníticas, que abundan en regiones con altas precipitaciones y altas temperaturas, fijan mayores cantidades de fosfato que otros. La presencia de óxidos hidratados de hierro y aluminio también contribuye a la retención de fósforo agregado como fertilizante. En general los suelos que contienen grandes cantidades de arcilla son también suelos fijadores de fosfatos.

2.1.2 Tiempo de reacción.

Entre mayor sea el tiempo de contacto del suelo con el fertilizante, mayor será la cantidad de fosfato fijado; para evitarlo, debe escogerse bien la época de aplicación con respecto al tiempo de mayor aprovechamiento por parte del cultivo. Otro aspecto importante es la forma de aplicación; la aplicación en bandas ha tenido éxito en muchos ensayos.

2.1.3 Reacción del suelo.

El pH del suelo es uno de los factores que más afectan la disponibilidad de fósforo y es el factor que puede ser alterado con mayor facilidad por el agricultor. En la mayoría de los suelos, el máximo de disponibilidad de fósforo se da en un rango de pH entre 5,5 y 7,0. A valores de pH inferiores de 5,5 la retención de fosfatos es muy grande debido a la reacción con los óxidos hidratados de hierro y aluminio. Si el pH aumenta, la capacidad de reacción de estos compuestos disminuye y se presenta entonces la máxima actividad y disponibilidad del fósforo. Por encima de pH 7,0 los iones de calcio y de magnesio, como también los carbonatos de estos metales presentes en el suelo, causan la precipitación del fósforo añadido y su disponibilidad decrece nuevamente.

2.1.4 Temperatura.

Aunque la velocidad de las reacciones químicas aumenta a medida que se incrementa la temperatura, la importancia de la influencia de ésta en condiciones de campo no es bien conocida. Sin embargo, los suelos de los climas cálidos generalmente fijan más fósforo que los suelos de regiones templadas.

2.1.5 Materia orgánica.

Las más recientes investigaciones sugieren que los materiales orgánicos aumentan la disponibilidad del fósforo del suelo y del agregado como fertilizante, lo cual puede deberse a varias causas:

- a) La descomposición de los residuos orgánicos está acompañada de la producción de CO_2 . Este gas, cuando se disuelve en agua, forma ácido carbónico capaz de disolver algunos minerales primarios del suelo. Ha sido demostrado el efecto del CO_2 en la disponibilidad de fósforo en suelos calcáreos, neutros y ácidos, inclusive. Lógicamente que el mayor efecto en la disponibilidad del fósforo se presenta, probablemente, en condiciones que van desde ligeramente ácidas a alcalinas.
- b) Numerosos estudios reportan además la importancia del humus en el aumento de la disponibilidad de fósforo, debido a la formación del complejo fosfohúmico el cual es más asimilable por las plantas; sin embargo, otros investigadores sostienen que en cuanto el P se libera en esta forma, reacciona inmediatamente con el hierro y aluminio libres para formar nueva-

mente compuestos insolubles. Este fenómeno se presenta en suelos ricos en materia orgánica con altos contenidos de hierro, aluminio y fósforo total, pero con niveles muy bajos de fósforo asimilable como es el caso de la mayoría de suelos Andepts.

- c) La fijación de fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia ha sido estudiada por varios investigadores. Una revisión bibliográfica sobre el tema fué realizada por Chávez en 1950 (28). López (64) y Bravo (18), estudiaron el fenómeno de la fijación de fósforo en suelos Andepts de la zona cafetera colombiana y encontraron una gran capacidad de fijación de fósforo que debería ser tenida en cuenta para programas de fertilización.

La necesidad de determinar la capacidad de fijación de fosfatos en los suelos ha sido reconocida por numerosos investigadores, quienes sostienen que de esta manera se adquiere un enfoque más preciso del comportamiento del elemento en los diferentes suelos (96). Uno de los métodos más usados son las isotermas de adsorción de Langmuir (40), aunque la utilización de otras técnicas es también conocida (71).

En un estudio realizado en 60 subsuelos del piedemonte de Carolina del Norte se encontró un alto coeficiente de correlación ($r = 0,838$), entre las cantidades de fosfato adsorbidas y el aluminio intercambiable (24).

3. FORMAS DE FOSFORO EN LOS SUELOS.

En el numeral anterior se vieron los compuestos de fósforo más comunes, presentes en los suelos. Estudios posteriores los han agrupado en tres grandes grupos: P total, P orgánico y P inorgánico.

Se comenzó entonces con los métodos para caracterizar cada uno de estos grandes grupos. Bray y Kurtz en 1945 (19) publicaron el método para la determinación de P total, orgánico y formas disponibles de fósforo en suelos.

Basados en los productos de solubilidad, Chang y Jackson (26) describieron el procedimiento de extracción de las diferentes formas de P, utilizando soluciones extractoras de P para cada fracción.

Más tarde, Sen Gupta y Cornfield (99), introdujeron modificaciones al sistema de fraccionamiento de Chang y Jackson, las cuales contribuyen a simplifi-

car el procedimiento. Los trabajos posteriores sobre fraccionamiento de fósforo utilizaron la metodología modificada.

Para los procedimientos de rutina en los estudios de fraccionamiento de las formas de fósforo, Petersen y Corey (89), proponen también una interesante modificación que aumenta la rapidez de las determinaciones en serie.

El estudio de las formas de fósforo en las regiones tropicales (61) y en especial en los suelos derivados de cenizas volcánicas, demuestra que existen altos contenidos de P total en estos suelos, a pesar de los problemas de asimilación que se presentan.

Numerosos investigadores se han dedicado a estudiar las diferentes fracciones de P, para tratar de entender cuáles de éstas son asimiladas por las plantas (83). En Colombia el conocimiento de las fracciones de fósforo se inició hace varios años (8, 10, 11, 17, 48, 65, 97, 108, 109).

3.1 El fósforo total.

Aunque se asegura la poca importancia del fósforo total en la determinación de la fertilidad fosfórica de los suelos (91), existen varios métodos para su valoración.

La fusión con Na_2CO_3 (58, 78) es el más antiguo; posteriormente se desarrollaron métodos más rápidos, precisos y aptos para ser utilizados en serie, basados en una digestión con HClO_4 (106).

Dick (31), describe un método sencillo y preciso para la determinación de P total en suelos y sedimentos lacustres. Se trata el suelo con una solución de hipobromito de sodio y el P total se extrae con H_2SO_4 1N. El método fue comparado con el de digestión con HClO_4 y con el de fusión con Na_2CO_3 , y las muestras analizadas dieron esencialmente la misma cantidad de fósforo.

Existen otros trabajos donde se comparan diferentes metodologías para el análisis de P. Merece destacarse la de Méndez y otros (73), quienes concluyen que los valores más altos de P total se obtienen al hacer reaccionar el suelo con HF/HNO_3 , y los más bajos con HClO_4 ; aunque sostienen que los suelos con contenidos de más de 1.000 ppm mostraron grandes variaciones en los siete diferentes métodos comparados.

Recientemente se ha desarrollado un método basado en la fusión con NaOH a 325 °C, en crisoles de níquel (104). Hasta el momento no se conocen otros trabajos que hayan empleado esta metodología.

En un ensayo realizado en el Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFE), se evaluaron tres métodos para la determinación de P total en un suelo de la hacienda Naranjal (Typic Distrandept). Los métodos utilizados fueron el de fusión con Na_2CO_3 , el de digestión con HClO_4 y el denominado CENICAFE (65), que consiste en la calcinación del suelo y la extracción de P con H_2SO_4 0,8N.

Los resultados muestran que los valores obtenidos por fusión con Na_2CO_3 son mayores que los obtenidos por digestión con HClO_4 , lo cual confirma los resultados encontrados por otros investigadores.

Sin embargo, los resultados obtenidos mediante el método CENICAFE (116) no distan demasiado de los obtenidos por los otros dos métodos; además es sencillo, no presenta mucha variabilidad dentro del método y permite analizar simultáneamente el P orgánico y el P inorgánico.

3.2 El fósforo orgánico.

Desde que se iniciaron los trabajos sobre el fósforo orgánico en el suelo, hace ya más de 100 años, ha existido esencialmente un procedimiento único para su determinación, que consiste principalmente en la extracción del P inorgánico, antes y después de convertir el P orgánico en formas inorgánicas. El P orgánico se calcula entonces por diferencia (91).

La determinación del fósforo orgánico en los suelos se puede clasificar en dos grupos, de acuerdo con las condiciones bajo las cuales el P orgánico es transformado en P inorgánico. El primero está compuesto por los métodos en los cuales esa transformación ocurre en el suelo, es decir, el de la hidrólisis a altas temperaturas, el de combustión húmeda o el de combustión seca. El segundo grupo incluye los métodos en los que la transformación se lleva a cabo luego de haber extraído el P orgánico del suelo.

Uno de los métodos que más auge tuvo en su época, fue el de extracción sucesiva con HCl concentrado y NaOH 0,5N a temperatura ambiente y luego con NaOH 0,5N a 90 °C. Los valores obtenidos por este método fueron más altos que los conseguidos por otros (72).

El método fue mejorado años más tarde al introducir en éste la técnica de ultrasonido para hacer la extracción con NaOH 0,5N, luego del pretratamiento con HCl; los resultados mostraron ser mejores que los obtenidos con las técnicas comunmente usadas (107)

Saunders y Williams (98), realizaron una comparación de las varias metodologías usadas para el análisis de P orgánico en los suelos y encontraron que el método de la ignición y la extracción posterior con H_2SO_4 0,2N, es el más simple y rápido para realizar la caracterización de suelos con fines de investigación.

Utilizando suelos de la zona cafetera, López (65) investigó en el Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFE) algunas variaciones del método de ignición de Saunders y Williams, con diferentes tiempos de extracción y agitación y dos concentraciones diferentes de ácido. Este método ha sido empleado con algunas modificaciones por el Instituto Geográfico "Agustín Codazzi" (78), y en trabajos de caracterización de suelos como los de Benavides (10, 11) y Blasco (17).

Appiah (3) en Ghana, con suelos cacaoteros, también encontró más ventajoso el método de la ignición al compararlo con el de la extracción con NaOH/HCl.

En un ensayo llevado a cabo recientemente en CENICAFE con suelos representativos de la zona cafetera (113) y aplicando la metodología de López (65) con las modificaciones propuestas por el Instituto Geográfico "Agustín Codazzi" (78), se encontró que el método era equivalente, con la ventaja de que resulta más rápido y sencillo.

Por último, es necesario mencionar que Hong (56) ha intentado establecer un nuevo método para extraer el P orgánico con una resina acetilcetónica conocida como R-AA. Reporta valores muy altos de P orgánico, pero no se dispone de información posterior de la utilización de esta metodología.

3.3 El fósforo aprovechable.

La determinación del P aprovechable por las plantas ha llamado el interés de numerosos investigadores y son muchas y muy variadas las soluciones propuestas a este antiguo problema.

En general, se podría afirmar que la solución extractora óptima es aquella que mejor simule la extracción de nutrimentos por la planta; en este sentido se han venido orientando los trabajos más recientes.

En tales circunstancias, cualquier método de extracción de fósforo aprovechable no tiene ningún valor, si no es calibrado respecto al tipo de suelo y de cultivo al cual va a ser aplicado. Es por eso que en este momento prácticamente no existen métodos universales, sino metodologías desarrolladas para cada región de acuerdo con los parámetros ya enunciados.

4. METODOS DE EXTRACCION.

4.1 Químicos (Tabla 1).

4.1.1 Método de Bray y Kurtz.

Uno de los métodos más utilizados, inclusive en procedimientos de rutina, y que ha correlacionado con varios tipos de cultivo y de suelo, ha sido el de la solución de fluoruro de amonio más ácido clorhídrico ($\text{NH}_4\text{F} + \text{HCl}$), (19). La solución inicialmente propuesta, llamada luego Bray I (NH_4F 0,03N + HCl 0,025 N), ha venido siendo modificada como es el caso de la solución Bray II (NH_4F 0,03N + HCl 0,1N) para aumentar la solubilidad de los fosfatos de calcio. Se conocen también otras modificaciones a la solución original como Bray III y Bray IV, donde se aumentan las concentraciones de NH_4F para mejorar la solubilidad de los fosfatos de aluminio (38).

Navas y otros (77), realizaron pruebas regionales en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá (Colombia), para correlacionar la respuesta obtenida por el trigo (*Triticum sp.*) en el campo, con varios métodos de extracción de fósforo y encontraron que de los nueve métodos estudiados, los que demostraron mayor efectividad para medir las necesidades de fósforo en este cereal fueron: Bray II, Troug, Bray I y N.C.D.A. (HCl 0,5N + H_2SO_4 0,025N). Sin embargo, el método de Bray II mostró el índice de correlación más alto.

En pruebas de invernadero realizadas con café y pasto, utilizando 20 suelos de la zona cafetera colombiana, se concluyó que para determinar el P disponible del suelo se podían utilizar los métodos Bray I ó Bray II (87).

Un resumen de los trabajos realizados sobre P aprovechable en el Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFE), hasta 1979, da cuenta de los esfuerzos realizados en este campo de investigación (36).

TABLA 1. PRINCIPALES METODOS DE EXTRACCIÓN DE FOSFORO EN SUELOS, SEGUN LA BIBLIOGRAFIA CITADA. CENICAFE, 1981 (115).

No.	Solución extractora	Nombre del método	Referencias
1	H ₂ SO ₄ 0,05 N		37, 93
2	H ₂ SO ₄ 0,08 N	Cenicafé	63, 66
3	H ₂ SO ₄ 0,2 N		63, 118
4	H ₂ SO ₄ 0,5 N		14
5	H ₂ SO ₄ 0,002 N - (NH ₄) ₂ SO ₄ 0,3 ^o /o	Troug	27, 63, 74, 92, 94, 118
6	HCl 0,3 N		63
7	HCl 0,05 N - H ₂ SO ₄ 0,025 N	Mehlich (Carolina del Norte)	7, 27, 37, 66, 74, 92
8	HCl 0,025 N - NH ₄ F 0,03 N	Bray I	7, 19, 23, 27, 46, 59, 63, 74, 78, 92, 100, 118
9	HCl 0,1 N - NH ₄ F 0,03 N	Bray II	19, 27, 59, 63, 66, 74, 78, 92, 94, 118
10	HCl 0,1 N - NH ₄ F 0,5 N	Bray IV	27, 74
11	HCl 0,1 N - NaNO ₃ 0,1 N		63
12	HCl 0,1 N - AcONa 0,1 N		63
13	HNO ₃ 0,1 N		63
14	C ₆ H ₈ O ₇ 1 ^o /o (ácido cítrico)		63
15	AcONa 10 ^o /o - AcOH 3 ^o /o pH 4,8	Morgan	27, 63, 74, 92, 118
16	AcONH ₄ 0,5 N - AcOH 0,5 N		74
17	AcONa 1 N pH 5,0		63
18	AcONH ₄ 1 N pH 7,0		63, 81
19	NaOH 0,025 N		63
20	NaOH 1 N	Saunders	7, 94
21	Na ₂ CO ₃ 0,1 N	Dalal	94
22	NaHCO ₃ 0,5 M pH 8,5	Olsen	7, 27, 66, 74, 78, 79, 81, 92, 93, 100, 118
23	NaHCO ₃ 0,5 M - NH ₄ F 0,5 N pH 8,5	Olsen - Dabin	93, 94
24	NaHCO ₃ 2 ^o /o - (NH ₄) ₂ SO ₄ 7 ^o /o	Donev	32
25	CaCl ₂ 0,01 M		74, 92
26	(C ₃ H ₅ O ₃) ₂ Ca.5H ₂ O 0,02 N pH 3,8 (Lactato de Calcio)	Egner - Reihm	7, 92, 118
27	EDTA (ácido etilendiaminotetraacético)		81
28	Resina aniónica (Dowe x 2 x 4)	IMPHOS	25, 59, 86, 92, 93, 94, 118, 124
29	H ₂ O		59, 68, 74, 85, 94, 103

En suelos volcánicos del departamento de Nariño (Colombia), se realizó un trabajo en el cual se estudiaron diferentes métodos de extracción de fósforo con respecto al P absorbido por el sorgo (*Sorghum* sp.). Se recomienda modificar el método Bray II, aumentando la concentración del fluoruro de amonio (NH_4F), para así mejorar la solubilidad de los fosfatos de Fe y Al. La solución modificada quedaría así: HCl 0,5N + NH_4F 0,3N (66).

En Venezuela también se encontraron los mejores resultados con el método de extracción de Bray (46).

Sherrell citado por Ospina (84), realizó un estudio en suelos alofánicos de Nueva Zelandia. Comparando 15 métodos de extracción, encontró una alta correlación entre el P - Al* y el P extraído con Bray II.

Los resultados de los análisis de fósforo aprovechable obtenidos por diferentes métodos, en 90 suelos de las dos principales regiones del oeste de Nigeria, fueron correlacionados con el P absorbido por dos cosechas sucesivas de arroz (6). En el estudio se encontró que se deben utilizar diferentes soluciones extractoras para cada zona, pero que en general, el mejor extractante es la solución Bray I. Fueron probadas también: Bray II, Bray IV, Olsen modificado, Saunder, agua y Egner - Riehm.

Estudios de correlación entre el P total determinado por dos métodos diferentes y el P aprovechable (Bray I), de muestras de suelos y subsuelos del departamento del Magdalena (Colombia), indicaron que existe una buena correlación entre los resultados obtenidos (23).

En un ensayo de aplicación de diferentes dosis de roca fosfórica pulverizada en parcelas cultivadas con café (*Coffea* sp.) realizado durante 18 años, se hizo un inventario del P total y aprovechable determinado por cinco métodos. Los métodos de Bray II y Carolina del Norte (HCl 0,05N + H_2SO_4 0,025N), fueron los que más alta correlación presentaron con el P absorbido por el café (57).

De otro lado, en suelos inundados secados al aire, también el método Bray I mostró los más altos coeficientes de correlación cuando fue comparado con otros como Carolina del Norte, Olsen y Peech (112).

*P - Al: Expresión utilizada para denotar el fósforo ligado al aluminio o a otros elementos, ej.: P - Ca; P - Fe; etc.

4.1.2. Soluciones ácidas.

Las más conocidas son las de Troug y la de Mehlich, también llamada de Carolina del Norte. Otras soluciones ácidas de diferentes concentraciones han sido también utilizadas.

En el Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFE), se iniciaron los primeros ensayos para la determinación del fósforo, utilizando la solución sulfúrica amortiguada a pH 3,0 conocida como método de Troug (88).

En un estudio realizado en Jamaica en 12 muestras de suelos en el que se utilizó coliflor (*Brassica oleracea*) como planta indicadora, se encontró que los métodos para estimar el P disponible de los suelos se presentaron en orden decreciente de extracción así: Troug, Bray, Olsen, Morgan y Saunder (119).

Para suelos cacaoteros del estado de Bahía en Brasil (95), se encontró en un ensayo con plántulas de cacao (*Theobroma cacao*) en 10 suelos diferentes, que la cantidad de P extraído presentó el siguiente orden decreciente: Troug, Olsen modificado, Olsen, Egner-Riehm y Mehlich.

Con respecto al método de Mehlich o Carolina del Norte, se ha encontrado que en suelos orgánicos el mejor indicador de la necesidad de P, es la cantidad de este mismo elemento extraído con la solución de ácidos diluídos HCl 0,05N + H₂SO₄ 0,025N, tal como lo muestran los resultados encontrados por Daughtrey y otros (30). En el ensayo utilizaron un híbrido de Sudan grass (*S. sudanese*) y sorgo (*Sorghum* sp.) como planta indicadora y el fósforo fué analizado además por los métodos del P total, P orgánico, P inorgánico, agua y CaCl₂. La limitación del método de Carolina del Norte para predecir el P disponible en algunos oxisoles, es discutida por Cajuste y Kussow (22) en un trabajo en que se utilizó millo (*Sorghum* sp.) sembrado en macetas.

Sin embargo, la solución de Mehlich se reporta también como la mejor solución extractora entre 10 evaluadas utilizando café (*Coffea* sp.) y cebada (*Hordeum vulgare*) como plantas indicadoras en suelos de Kenya (74).

En un ensayo realizado con suelo de la Unidad Chinchiná (Andept), en el que se utilizó maíz (*Zea mays*) como planta indicadora, fueron ensayadas 14 soluciones extractoras. Al final los resultados mostraron que la solución H₂SO₄ 0,08N era la que más alto coeficiente de correlación mostraba, seguida por la solución Bray II. López (63) desarrolló una metodología que fue conocida como método CENICAFE y que tuvo una gran aplicación en Colombia.

En un ensayo de laboratorio tendiente a seleccionar un método de análisis de fósforo, Bruce (20) encontró que el del H_2SO_4 0,01N sería apropiado para análisis de rutina. Los resultados obtenidos relacionaron linealmente con los de Bray II (NH_4F 0,03N + HCl 0,1N).

En caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en suelos tropicales, Bittencourt (14) realizó un experimento en el campo y en materas para evaluar seis soluciones extractoras de fósforo. Se encontró que el H_2SO_4 0,5N en relación suelo-solución extractora (1:10) y 15 minutos de agitación, dio los mejores resultados.

Ferreira (37), realizó una comparación de métodos ácidos: H_2SO_4 0,05N y Mehlich, con variación de las relaciones suelo-solución extractora y los tiempos de extracción; no encontró diferencias entre los métodos probados.

4.1.3 Soluciones alcalinas.

La solución $NaHCO_3$ 0,5M a pH 8,5 (Olsen), presenta correlación alta con el P absorbido por las plantas, si se agrupan suelos similares. La solución desplaza tanto los fosfatos cálcicos como los P - Al y P - Fe*. La materia orgánica puede interferir en el análisis colorimétrico de fósforo pero esto se puede obviar realizando los respectivos blancos de color.

La Sección de Suelos del Laboratorio Químico Nacional, evaluó la extracción de fósforo por los métodos de Troug (H_2SO_4 0,002N), Bingham (H_2O) y Olsen ($NaHCO_3$ 0,5 M pH 8,5) en dos grupos de suelos del Tolima y de Santander. Los resultados fueron correlacionados con el rendimiento relativo de las plantas y el mejor método resultó ser el de Olsen, seguido por el de Bingham y el de Troug (102).

Según el estudio realizado por Chang (27) en suelos arroceros de Taiwan, en los cuales el fosfato de hierro (P - Fe) es la fracción de fosfato dominante, el P extraído por la solución alcalina (Olsen) es el que mejor correlaciona con la respuesta del arroz (*Oriza sativa*) a la aplicación de fertilizantes fosfóricos. Le siguen las soluciones de ácido-fluoruro ($HCl + NH_4F$) y en menor grado las soluciones de ácidos fuertes.

En la India también fueron evaluados diferentes métodos para la determinación de P disponible y se correlacionaron con el P absorbido por el arroz

* P - Al: Expresión utilizada para denotar el fósforo ligado al Aluminio o a otros elementos. Ejemplo: P - Ca; P - Fe; etc.

(*Oriza sativa*) y el rendimiento de materia seca. El método Olsen correlacionó significativamente con los dos parámetros estudiados (12, 33).

El método de Olsen también arrojó los más altos estimativos para P aprovechable y fue el que menos sensibilidad mostró a los cambios en las propiedades del suelo, cuando se compararon nueve métodos de extracción. En este ensayo se relacionaron los datos de rendimiento de materia seca y los de fósforo tomado por plantas de maíz (*Zea mays*) cultivado en 155 suelos de las Antillas, en condiciones de invernadero (118).

En ensayos realizados en invernadero fueron evaluados varios métodos respecto del P absorbido por la planta y a su rendimiento relativo. La solución extractora Olsen fue la que mejor correlacionó en ambos casos. Se estudiaron 30 suelos con pH entre 5,4 y 8,1 (55).

Los resultados anteriores fueron confirmados posteriormente en un trabajo donde se evaluaron los factores cantidad e intensidad de P en el suelo, con la ayuda del P^{32} y con avena (*Avena sativa*) cultivada en macetas. Se utilizaron seis métodos de extracción convencionales en 40 suelos ácidos. Las más altas correlaciones con el crecimiento de las plantas, se obtuvieron con las soluciones extractoras suaves, a valores intermedios de pH, cortos períodos de extracción, con aniones relativamente débiles y una relación estrecha de suelo-solución extractora, como en los métodos del Lactato (Egner-Riehm) y del bicarbonato (Olsen) (121).

Otras soluciones alcalinas han sido probadas en la determinación del fósforo aprovechable.

En Kenya, al evaluar la respuesta del trigo (*Triticum* sp.) al fosfato en varios tipos de suelo, se encontró que sólo el P-orgánico total y el P-inorgánico extraído con NaOH caliente resultó correlacionado significativamente con la respuesta del fosfato. Se ensayaron 10 métodos diferentes, entre los cuales estaban: Bray, Williams, Olsen, Saunder, Troug, resina y agua (42). Los resultados encontrados en este trabajo, no son confirmados por ninguno de los trabajos revisados posteriormente.

Una nueva solución extractora para fósforo fue propuesta por Dalal (29) basada en la extracción del suelo con NaOH 0,25N - Na_2CO_3 0,1M. En un experimento en invernadero y con trigo, como planta indicadora, el coeficiente de correlación entre el P absorbido y la cantidad de P extractado, fue altamente significativo ($r = 0.8282$).

4.1.4 Fósforo extraído con agua.

Bingham (13), hace una importante revisión sobre los métodos utilizados en los Estados Unidos, y precisa sobre lo que debe ser la selección de un método de análisis de fósforo. El autor propone la extracción con agua, que ha sido ampliamente difundida y que presenta una alta correlación con el P absorbido por la planta pero tiene el inconveniente de que las cantidades extraídas son muy pequeñas y difíciles de cuantificar con exactitud.

En suelos de Alemania (85), la correlación entre el fósforo del suelo extraído con agua (valor P_w) y la respuesta de la planta, fue alta y no estuvo afectada por las diferencias entre los suelos. En resumen, la relación fue la misma para todos los tipos de suelos investigados.

Sissingh (103), al utilizar el valor P_w , determinó la cantidad de fosfato en suelos de Holanda; en este trabajo se detalla la técnica para determinar el valor P_w .

Al comparar el fósforo soluble en agua con el obtenido con Olsen y Troug se concluye que el P obtenido por extracción con agua, aparece como un método potencial para determinar el contenido de fósforo en suelos que han recibido fertilización fosfórica (68).

En Alemania, donde se utiliza ampliamente el método de Egner-Riehm (Lactato de amonio y ácido acético a pH 3,7), se realizó un experimento para buscar un método que mejorara la caracterización del P aprovechable. El método de extracción con agua resultó satisfactorio para análisis en serie y mostró una buena relación con los ensayos biológicos con maíz (*Zea mays*) y trigo (*Triticum* sp.) (39).

4.1.5 El método de la resina intercambiadora de iones.

Este método empezó a ser investigado para la determinación de fosfato disponible en el suelo hace algún tiempo, y si bien es cierto que tiene grandes ventajas, también presenta algunas desventajas que son analizadas en el estudio efectuado por Cooke y Hislop (25) donde se proponen métodos para eliminar sus variaciones.

Algunos años más tarde, Zunino y otros (123) propusieron una modificación a este método, utilizando una bolsa de poliéster. La aplicación de esta técnica a suelos derivados de cenizas volcánicas permitiría una rápida y precisa de-

terminación de fosfato disponible. La nueva técnica fue aplicada en un estudio en que se relacionó el P determinado con la resina, con un método biológico en trigo. Los resultados sugieren que con esta metodología se obvian las distorsiones que ocurren cuando los suelos han sido recientemente fertilizados. Estas distorsiones se deben a los cambios en la disponibilidad relativa a las plantas y a la naturaleza de las soluciones extractoras del P añadido, el cual es transformado a formas menos solubles (124).

La propuesta sobre la utilización de una bolsa para evitar las dificultades en el manejo de la resina en la determinación del P disponible, es discutida ampliamente en el trabajo realizado por Sibbensen (101).

En una amplia revisión bibliográfica realizada por Raij (92) en Brasil, donde se tienen en cuenta los principales métodos de extracción de fósforo reportados en la literatura, se acoge el método de la resina como el mejor y el más versátil.

Palma y Fassbender (86) al estudiar la adsorción de fosfatos por una resina de intercambio aniónico y correlacionarla con el P obtenido por varios métodos de análisis, el método de la resina, evalúa mejor el P disponible en el suelo. El estudio se realizó en 40 suelos de América Central en los cuales también se determinó el P inicialmente disponible, el P en equilibrio y el P de reserva. Se encontró que los dos últimos son los parámetros más significativos para evaluar la disponibilidad del P en el suelo.

Varios métodos fueron estudiados en suelos tropicales de todo el mundo, en un trabajo realizado por el Instituto Mundial del Fosfato. Se relacionaron los resultados obtenidos con varios cultivos; los resultados sugieren, como método de rutina, el de la desorción de fosfatos durante 48 horas, con resina aniónica (94).

También se encontraron ventajas en el uso del método de la resina en un estudio en que se compararon los métodos Bray I, II, Bray I modificado, resina y agua. Los resultados sugieren que un buen método para la determinación de P aprovechable debe extraer principalmente el P de la fracción P - Al. La resina resultó ser el método más apropiado tanto para suelos ácidos como para los básicos (59).

4.1.6 Otros métodos.

Muchos otros métodos han sido probados en la determinación del P disponible. Entre ellos se pueden destacar el de Egner-Riehm, ampliamente utilizado

en Europa, como también en América Central, donde se estudiaron cinco métodos de análisis de fósforo en los suelos. La producción de materia seca y la absorción de P por plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum*), tratadas con fertilizante fosfatado en invernadero, correlacionó con los métodos estudiados en orden decreciente así: Egner-Riehm, Olsen, Bray I, Mehlich y Saunder. Los autores recomiendan utilizar los métodos de Egner-Riehm y Olsen en futuros trabajos de calibración de métodos (7).

Aunque la capacidad del EDTA (ácido dietilendiaminotetraacético) como agente quelatador para muchos metales es ampliamente conocida, no se sabía de sus ventajas para la extracción del fósforo disponible de los suelos. Cuando se comparó el P extractable con EDTA con el determinado como valor A*, el determinado como valor E*, P-Miller y Axley (H_2SO_4 0,05N + NH_4F 0,03N), P-Olsen y con algunas formas de P-inorgánico, se encontraron altos coeficientes de correlación (1, 79, 81).

También se reportó un nuevo método para la determinación de P y de K, el cual se destaca por su simplicidad, repetibilidad, bajo costo y posibilidad de automatización. El método se basa en la utilización de una solución al 20/o de $NaHCO_3$ y $(NH_4)_2SO_4$ al 70/o (32).

Especialmente, para fines de investigación, ha sido utilizado el fósforo radioactivo (P^{32}) en la determinación de fósforo superficial, conocido también como el método de dilución isotópica. Los valores A*, L* y E*, han sido correlacionados con el P absorbido por varios cultivos y con el crecimiento relativo en macetas.

El valor E es un análisis de fósforo que fácilmente se puede llevar a cabo en laboratorio sin utilizar ensayos biológicos (111).

El fósforo en la solución del suelo es considerado como el mejor factor para indicar la verdadera disponibilidad para las plantas. Existen algunos problemas prácticos para la determinación, debido a las bajas concentraciones en que este elemento se encuentra en la solución del suelo.

A*: Valor L interpolado para diferentes especies de plantas.

L*: Fósforo lábil determinado mediante dilución isotópica del P^{32} en una planta indicadora.

E*: Índice potencial de fósforo lábil, determinado bajo condiciones de laboratorio con fósforo radioactivo P^{32} .

Se ha encontrado que el logaritmo de la concentración de P en la solución del suelo, el P-lábil* y la concentración de fósforo en el extracto de ácido diluido y en el extracto de CaCl_2 , dieron altos coeficientes de correlación con el P absorbido por un híbrido de sudan grass y sorgo (*Sorghum bicolor* x *S. sudanese*). Todos los índices resultaron representativos de la disponibilidad de P (105).

4.1.7 Conclusiones.

En 57 trabajos realizados en diferentes países, con diversos suelos y distintas especies vegetales, se encontró en el mayor número de trabajos, que el método de extracción química más ventajoso, por su capacidad para ser relacionado con el P absorbido por los cultivos fue el de Olsen, seguido por el de la resina, Bray II, Mehlich y Bray I.

Estos resultados se acercan a los obtenidos en un amplio estudio de soluciones extractoras de fósforo utilizadas en los trópicos (96), en el cual se concluye que las soluciones más usadas son: Olsen, Bray II y Mehlich (Carolina del Norte).

En suelos tropicales, es interesante el trabajo realizado por Pichot y Roche (90), donde se presenta un amplio análisis de los métodos utilizados en estas regiones.

John (60) en un estudio con 343 suelos, concluye que la mayor contribución de las formas de fósforo en los métodos de Olsen y de Bray está dada por el P - Al; para el método de intercambio isotópico por el P - Fe; y para el de Carolina del Norte (Mehlich) por el P - Ca.

Según este trabajo se puede afirmar que de las diferentes formas de fósforo y de las propiedades de los suelos, depende más del 50% de las variaciones en los valores de P analizados por los métodos de Olsen, Bray II, Carolina del Norte y CaCl_2 0,01M.

Otros muchos trabajos, recomiendan tanto el uso de Olsen como el de Bray para la determinación de P extractable (4, 43, 44, 100). Por otra parte, varios investigadores encontraron resultados tan similares, por diferentes métodos, que dejan prácticamente la decisión sobre el más conveniente a juicio del interesado (6, 93, 114, 115, 117).

*P - lábil: Índice del contenido de fósforo disponible para el crecimiento semanal de una planta.

Es necesario anotar que el secado de los suelos al aire aumenta la cantidad de P extractable, según los estudios de Friedrich (41), Olsen y Court (80) y Willett (120).

Para los laboratorios dedicados al servicio de análisis de suelos para agricultores, no es práctico todavía adoptar las técnicas de la desorción de fosfato con resina intercambiadora de iones, de la dilución isotópica con fósforo radioactivo, o la de fosfato soluble en la solución del suelo, que si bien pueden reflejar muy bien el fosfato disponible para las plantas, son pocas las ventajas que presentan para análisis de rutina por razones de manejo, tiempo y altos costos.

4.2 Biológicos.

Los métodos biológicos se basan en la utilización de microorganismos o plantas que permiten determinar la relación existente entre el nutrimento presente en el suelo y el transportado a la planta.

Entre los microorganismos utilizados para estas metodologías, el más conocido es el *Aspergillus niger*, un hongo que tiene gran afinidad por los micronutrientes y el fósforo (35).

Las plantas pueden realizar una extracción intensa de nutrientes cuando se incrementa el número de ellas y se reduce la cantidad de suelo en el que crecen. Basados en este principio, Neubauer (70) y Jenny (35) desarrollaron sus metodologías para el estudio de los elementos disponibles para las plantas.

Los métodos biológicos, en general, tienen el inconveniente del tiempo que demanda la obtención de los resultados, por lo que no son aconsejables como métodos de rutina, aunque si son una herramienta importante en investigación (45).

5. METODOS DE DETERMINACION DE FOSFORO.

Los procedimientos para la determinación de fósforo en los extractos del suelo y las reacciones químicas involucradas, son estudiados ampliamente por Black (15) y Jackson (58), aunque en general han recibido la atención de los Químicos de Suelos, tanto por su importancia como por su complejidad.

Con el advenimiento de los métodos colorimétricos se ha logrado mayor sensibilidad y precisión. Principalmente todos los métodos colorimétricos se basan en la medición del color azul del producto de reducción del ácido molibdo-fosfórico, producido mediante la reducción selectiva del heteropoliácido molibdo-fosfórico.

El método tiene numerosas modificaciones para ser adaptado a condiciones particulares de las soluciones, pero en general, se presentan inconvenientes de sensibilidad, estabilidad e interferencias.

Recientemente se ha encontrado que la utilización del ácido ascórbico como reductor, en presencia de tartrato de antimonio y potasio, es aplicable en la determinación de fósforo en los extractos de suelos y en soluciones de material vegetal, por su buena estabilidad, rango de determinación y la tolerancia de la mayoría de los iones interferentes (69).

Un nuevo método para la determinación espectrofotométrica de trazas de fósforo en aguas ha sido desarrollado últimamente en el Japón (75); éste utiliza molibdato y verde de malaquita. La mayor sensibilidad del método lo haría viable para su uso en la detección del P de la solución del suelo. Con- vendría realizar pruebas para determinar su factibilidad.

6. EL ANTAGONISMO FOSFORO-ZINC.

El problema del antagonismo P-Zn ha sido investigado por diversos autores desde diferentes puntos de vista y en términos generales se ha considerado que se debe a:

- a) Reacciones químicas en el medio de cultivo.
- b) Disminución en la absorción de Zn.
- c) Interferencia en la translocación del Zn en la planta.
- d) Efecto de dilución debida al crecimiento de la planta.
- e) Desequilibrio fisiológico.

Aunque no se ha resuelto del todo este problema y aparentemente todos los procesos mencionados están involucrados en una u otra forma, últimamente

se ha dado mayor énfasis al desbalance fisiológico que se puede presentar por acción de los elementos P y Zn (67).

Varios trabajos se han realizado recientemente, en algunos de los cuales se han utilizado isótopos de los elementos en estudio. A estos se les hace un seguimiento en el suelo y dentro de la planta. Los resultados confirman las interacciones entre el P y el Zn y se atribuyen las causas al pH, y a los niveles de dichos elementos en el suelo (122).

Diferentes tratamientos con niveles variables de P y Zn, con el uso de plantas indicadoras en macetas y en el campo, han sido también empleados en el estudio del comportamiento de estos elementos (50, 51, 82).

7. EFECTO DEL ENCALADO EN LA DISPONIBILIDAD DEL FOSFORO.

Debido a la importancia que la práctica del encalado ha tenido desde hace muchos años, se considera necesario discutir aquí el efecto de las aplicaciones de cal sobre la extracción del P disponible de los suelos y su disponibilidad para las plantas.

Cuando se estudiaron estos efectos en un experimento de campo realizado en el distrito de El Zamorano en Honduras, se encontró un aumento altamente significativo del rendimiento cuando se aplicó cal a un suelo ácido (pH 5,5) para aumentar el pH a 6,5. El mayor rendimiento fue obtenido en las parcelas donde se aplicaron al mismo tiempo cal y fósforo. La mayor porción de P disponible en los suelos de Zamorano se encuentra en la fracción orgánica. Los análisis de suelo después del ensayo, demostraron que el encalado libera el fósforo de la fase orgánica y aumenta la eficiencia del P aplicado al cultivo (5).

Cuando fue estudiado en 13 suelos ácidos (47) el efecto del encalado sobre los niveles de P disponible determinados por tres diferentes métodos, se encontraron variaciones en el P extraído que se explican por el tipo de suelo y el tipo de solución extractora utilizada. El método de Morgan modificado fue el que más cambió, seguido por el de Carolina del Norte y el de Bray I.

La absorción de P por la planta aumenta cuando las aplicaciones de P van acompañadas con aplicaciones de cal. En un suelo ácido tropical se estudió la fertilidad fosfórica con seis niveles de cal. El rendimiento y el porcentaje de P, aumentó significativamente mediante aplicación de P, pero la respuesta fue mayor en presencia de cal (2).

Munevar (76) estudió el efecto del encalado en la fijación del fósforo en 10 andosoles colombianos. En ocho de los suelos el encalado produjo una disminución en el fósforo extraído con la solución Bray II. En dos de estos suelos se realizó la extracción, con las soluciones de Carolina del Norte y Olsen modificado, pero los resultados no mostraron un efecto notorio del encalado en el P extraído. Las aplicaciones de P causaron una disminución apreciable en el Al intercambiable de los dos suelos en los cuales se midió este efecto. Los resultados encontrados sugieren que el encalado produce efectos similares en la disponibilidad del fósforo a los observados en Andepts de otros lugares.

En un suelo ácido altamente lixiviado y de pH 4,2, el encalado provocó una baja de los niveles de Al, Fe y Mn intercambiables. Al incrementar las adiciones de cal, los índices de P disponible por los métodos de agua, la resina, Morgan y Williams rebajaron significativamente. El P extraído por el método de Troug, no presentó variaciones, mientras que por el método de Bray generalmente aumentó (53).

En dos leguminosas forrajeras se estudiaron los efectos del encalado y la fertilización fosfórica sobre la concentración de elementos disponibles y sobre el P, el Al y el Mn absorbidos por ellos. En estas leguminosas, se analizó la composición química, la morfología de sus raíces y su rendimiento. Se encontró que tanto el Al como el Mn de la parte aérea y de las raíces de ambas especies, rebajaron con el incremento de las dosis de cal (54).

El mismo autor (52), estudió el efecto del encalado en suelos ácidos y encontró también un aumento en la disponibilidad de fósforo debido a la mineralización del fósforo orgánico. Además, explica la mayor utilización del fosfato cuando se encala debido a la disminución del Al intercambiable el cual causa toxicidad a las plantas. La toxicidad del Al se caracteriza por la inhibición de la absorción, el bloqueo de la traslocación de fosfatos y en consecuencia de su utilización por la planta.

Otros estudios realizados con suelos ácidos del sureste de los Estados Unidos, a nivel de laboratorio e invernadero, evaluaron los efectos combinados de la aplicación de cal, fosfato y aluminio sobre el crecimiento de la planta y encontraron que las aplicaciones de cal favorecieron su crecimiento debido a la neutralización de la toxicidad de Al en el suelo y por el incremento del P en solución. Lo anterior se afirmaba pero no había sido demostrado (62).

Se puede concluir entonces que el encalado ejerce efectos múltiples en el desarrollo de las plantas y favorece la solubilidad del fósforo, controlando la acidez del suelo, la toxicidad de Al y de Mn y a la vez, mejora la disponibilidad del Ca y del Mg. Pero el exceso de encalado en suelos tropicales puede ser peligroso, ya que el uso desmedido de cal produce resultados catastróficos en la agricultura tropical (34).

Sobre estos efectos benéficos o perjudiciales en los suelos ácidos, la información se podría ampliar revisando los tratados sobre Química de Suelos de Cajuste (21) y de Fertilidad de Suelos de Tisdale y Nelson (110).

8. CONCLUSIONES.

El crecimiento de las plantas es proporcional a las cantidades de nutrimentos presentes en la solución del suelo, entre los cuales, el fósforo es uno de los más importantes porque forma parte de compuestos ligados a los procesos energéticos en los organismos vivos.

Entre los factores que pueden limitar el crecimiento de las plantas está el fenómeno de la fijación de fosfatos, de gran importancia económica y que ocurre con mayor frecuencia en los suelos ácidos y orgánicos, pero que también se presenta en suelos alcalinos. Los factores que intervienen en la fijación del fósforo son: tipo de arcilla, tiempo de reacción, reacción del suelo, temperatura y contenido de materia orgánica. Aunque se ha encontrado también que el Al intercambiable tiene una gran participación en este fenómeno.

A pesar de la poca importancia que se le atribuye al fósforo total en la fertilidad fosfórica del suelo, se reportan varios métodos para su determinación, que son utilizados principalmente en estudios de fraccionamiento y caracterización de suelos.

La determinación de fósforo orgánico se basa en la conversión del P orgánico a formas inorgánicas y se calcula por diferencia con relación a una muestra, en la cual no se lleva a cabo dicha transformación.

En cuanto al fósforo disponible o "asimilable", el estudio de numerosos trabajos indica que los métodos de Olsen, resina, Bray II, Mehlich y Bray I en su orden, son los más usados; lo anterior está de acuerdo con los resultados de otras revisiones y estudios similares.

Es necesario recalcar que, aunque varios métodos de análisis son excelentes herramientas de trabajo en investigación y permiten hacer seguimientos en los cultivos a estudiar, no son métodos prácticos para su utilización a nivel de los laboratorios de servicio de análisis de suelos, debido al tiempo que demanda y a sus altos costos.

La determinación de fósforo con ácido ascórbico como reductor, catalizado con tartrato de antimonio y potasio, para lograr la estabilidad del complejo fosfomolíbico, es hasta ahora el mejor procedimiento tanto para los extractos de suelo como para las soluciones de material vegetal. Tiene buena estabilidad, buen rango de determinación y amplia tolerancia a la mayoría de los iones interferentes.

El problema del antagonismo P - Zn, ha sido ampliamente estudiado y se ha confirmado que entre los dos elementos existen interacciones atribuibles al pH y a los niveles de dichos elementos en el suelo. En la planta, el fenómeno se puede presentar originando un desequilibrio fisiológico.

La disponibilidad de fósforo es afectada positiva o negativamente por el encalado, según el tipo de suelo y el método de extracción utilizado; el fósforo extraído por Bray generalmente aumentó en suelos encalados.

En cuanto a la respuesta al fósforo, ésta fue mayor cuando se utilizó cal. En suelos ácidos altamente lixiviados, su uso provoca la baja en los niveles de Al, Fe y Mn intercambiables y estimula a la vez la mineralización del P orgánico y la utilización del P nativo, debido a la disminución de la toxicidad de aluminio. También se ha comprobado que la aplicación de cal incrementa el fósforo en la solución del suelo.

Es necesario destacar que, aunque aparentemente el encalado tiene numerosas ventajas, el uso excesivo de cal en los suelos tropicales puede resultar peligroso, ya que se podrían alterar otras condiciones físico-químicas que producirían resultados perjudiciales.

Para finalizar, hay que manifestar que falta por conocer muchos aspectos importantes de la química del fósforo, especialmente de los suelos de la zona cafetera colombiana. Los estudios sobre fraccionamiento y fijación de fosfatos y sobre el fósforo en la solución del suelo son todavía escasos, en comparación con los estudios realizados para otros tipos de suelos tanto en Colombia como en otros países.

9. BIBLIOGRAFIA

1. ALEXANDER, T. G.; ROBERTSON, J. A. EDTA extractable phosphorus in relation to available and inorganic phosphorus forms in soils. *Soil Science (Estados Unidos)* 114(1):69-72. 1972.
2. AMARASIRI, S. L.; OLSEN, S. R. Liming as related to solubility of P and plant growth in an acid tropical soil. *Soil Science Society of America Proceedings* 37(5):716-721. 1973.
3. APPIAH, M. R. Note on the determination of organic phosphorus in some cocoa cultivated soils of Ghana *Journal of Agricultural Science* 8(2):159-162. 1975 (Tomado de: *Soils & Fertilizers* 40(8):415. 1977. Ref. 4170).
4. A review of the avail. P extraction methods in soils (1957-80). *Anales Edaf. y Agrobiol.* 41(5-6): 1085-1112. 1982 (Tomado de: *Fertilizers and Agriculture No. 85*:68. 1983. Ref. 5825).
5. AWAN, A. B. Effect of lime on availability of phosphorus in Zamorano soils. *Soils Science Society of America Proceedings* 28(5):672-673. 1964.
6. AYODELE, O.; AKINOLA, A. The relationship between Bray's P₁, modified sodium bicarbonate, New Mehlich and ammonium fluoride hydrofluoride extractants for phosphorus in savannah soils of western Nigeria. *Fert. Res.* 2(2):90-100. 1981. (Tomado de: *Biological Abstracts* 74(10):7475. 1982. Ref. 72316).
7. BALERDI, F.; MÜLLER, L.; FASSBENDER, H. W. Estudio del fósforo en suelos de América Central. III. Comparación de cinco métodos químicos de análisis de fósforo disponible. *Turrialba* 18(4):348-360. 1968.
8. BASTIDAS, O.; CAICEDO, A.; ROMO, F.; BLASCO, M. Formas de fósforo en los suelos volcánicos del valle de Sibundoy, Putumayo, Colombia. *Turrialba* 20(4):434-438. 1970.
9. BEAR, F. E. *The chemistry of the soil*. 2a. Ed. New York. Reinold Publishing. 1964. 515 p. (American Chemical Society. Monograph Series No. 160).
10. BENAVIDES, G. de. Fraccionamiento del fósforo en suelos de la amazonía colombiana y estimación del grado de meteorización. *Suelos Ecuatoriales* 9(1):20-30. 1978.
11. BENAVIDES, G. de. Fraccionamiento de fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas del departamento de Nariño. In: *Suelos Ecuatoriales. Memorias del Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 5, y Coloquio Nacional sobre suelos, 4. Medellín, agosto 17-21 de 1975. Medellín. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo* 8 (1):247-260. 1977.
12. BHAN, C.; SHANKER, H. Correlation of available phosphorus values obtained by different methods with phosphorus uptake by paddy. *Journal of the Indian Society of Soil Science* 21(2):177-180. 1973. (Tomado de: *Soil & Fertilizers* 37(3):121. 1974. Ref. 1131).
13. BINGHAM, F. T. Chemical soil tests for available phosphorus. *Soil Science* 94(1):87-95. 1962.
14. BITTENCOURT, V. C. de; ORLANDO, J.; ZAMBELLO, E. Determination of available P for sugar cane in tropical soils by extraction with 0.5N sulphuric acid. In: *Proceedings 16th Congress International Society of Sugar Cane Technologists, Brazil, 1977.* 1978:1175-1186. *International Sugar Journal* 81(964):112. 1981. (Tomado de: *Soil & Fertilizers* 43(1):18. 1980. Ref. 95).

15. BLACK, C. A. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* Madison, American Society of Agronomy, Inc. 1965. 1572 p. (Number 9 in the series Agronomy).
16. BLACK, C. A. *Relaciones suelo-planta. Tomo II. 1a. Ed.* Buenos Aires, Editorial Hemisferio Sur, 1975. 866 p.
17. BLASCO L., M. *Formas del fósforo en los suelos del Amazonas colombiano. Anales de Edafología y Agrobiología* 29:643-650. 1970.
18. BRAVO G., E. de J.; GOMEZ A., A. *Capacidad de fijación de fósforo en seis unidades de suelos andosólicos de la zona cafetera colombiana. Cenicafé (Colombia)* 25(1):19-29. 1974.
19. BRAY, R. H.; KURTZ, L. T. *Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. Soil Science* 59(1):29-45. 1945.
20. BRUCE, R. C. *The laboratory estimation of the phosphorus status of soil. 1. Choice of extraction method. Qd. J. Agric. Anim. Sci.* 23:461-465. 1966. (Tomado de: *Soils and Fertilizers* 31(1):18. 1968. Ref. 126).
21. CAJUSTE, L. J. *Química de suelos con un enfoque agrícola. 1a. Ed.* México. Colegio de Postgraduados, 1977. 278 p.
22. CAJUSTE, L. J.; KUSSOW, W. R. *Use and limitations of the North Carolina method to predict available phosphorus in some oxisols. Tropical Agriculture (Trinidad)* 51(2):246-252. 1974.
23. CANCHANO, E. *Evaluación del contenido de fósforo total y aprovechable en suelos del departamento del Magdalena utilizando los métodos de digestión perclórica, el de calcinación y el de Bray I. Revista Agronómica* 3(1-4):26-37. 1980.
24. COLEMAN, N. T.; THORUP, J. T.; JACKSON, W. A. *Phosphate-sorption reactions that involve exchangeable Al. Soil Science* 90(1):1-7. 1960.
25. COOKE, I. J.; HISLOP, J. *Use of anion-exchangeable resin for the assessment of available soil phosphate. Soil Science* 96(5):308-312. 1963.
26. CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. *Fractionation of soil phosphorus. Soil Science* 84(1):133-144. 1957.
27. CHANG, S. C.; JUO, S. R. *Available phosphorus in relation to forms of phosphates in soil. Soil Science* 95(2):91-96. 1963.
28. CHAVES, R. *Fijación de fosfatos en el suelo. Boletín Informativo (Chinchiná)* 1(12):36-40. 1950.
29. DALAL, R. C. *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium hydroxide-sodium carbonate solution. Journal of the Australian Institute of Agricultural Science* 39(2):142-143. 1973 (Tomado de: *Soils & Fertilizers* 37(5):121. 1974. Ref. 11300).
30. DAUGHTREY, Z. W.; GILLIAM, J. W.; KAMPRATH, E. J. *Soil test parameters for assessing plant-available P of acid organic soils. Soil Science* 115(6):438-446. 1973.

31. DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. An alkaline oxidation method for determination of total phosphorus in soils. *Soil Science Society of America Journal* 41(3):511-514. 1977.
32. DONEV, P.; NEIKOVA-BOCHEVA, E. A comparative study of routine soil testing methods for measuring available phosphorus in various soils. *Pochvoznanie i Agrokhimiya* 12(3): 61-67. 1977. (Tomado de: *Soils & Fertilizers* 41(8):462. 1978. Ref. 4400).
33. DUBEY, S. M.; KHERA, M. S.; OOMMEN, P. K. Evaluation of phosphorus soils tests. *Fertilizer News* 18(11):38-41. 1973. (Tomado de: *Soil & Fertilizers* 38(1):10. 1975. Ref. 97).
34. FASSBENDER, H. W. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. 3a. Ed. San José, C. R. IICA. 1982. XI + 398 p. (Serie de libros y materiales educativos No. 24).
35. FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Departamento de Biología y Suelos. Sección de Química Agrícola. Métodos de estudio de fertilidad de suelos. s.n.t. 6 p.
36. FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. 40 años de investigación en Cenicafe. Chinchiná, Centro Nacional de Investigaciones de Café - CENICAFE - 1982. 68 p. (Volumen 1. Suelos).
37. FERREIRA, M. E.; MELLO, F. A. F.; BRASIL SOBRINHO, M. O. C. do. Comparação entre tres técnicas de extração de P solúvel do solo. *Cientifica* 5(3):244-249. 1977. (Tomado de: *Soils & Fertilizers* 43(5):413. 1980. Ref. 3732).
38. FIFE, C. V. An evaluation of ammonium fluoride as selective extractant for aluminum bond soil phosphate. III. Detailed studies on selected soils. *Soil Science* 93(1):113-123. 1962.
39. FLOSSMANN, R.; RICHTER, D. Extraction method for characterizing the kinetics of phosphorus release from solid soil to soil solution. *Archiv für Acker und Pflanzenbau und Bodenkunde* 26(11):703-709. 1982. (Tomado de: *Soils & Fertilizers* 46(3):244. 1983. Ref. 2182).
40. FOX, R. L.; BENAVIDES, S. T. El fósforo de los oxisoles. In: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Suelos Ecuatoriales. El fósforo en zonas tropicales. Coloquio sobre suelos, 3. Medellín. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo 6 (1):137-175. 1974.
41. FRIEDRICH, J. L. et al. Determination of the P fixation after normal and excess fertilization using the extraction of moist and dried soils. *Rech. Agron. Suisse* 1(20):1-11. 1981. (Tomado de: *Phosphorus in Agriculture* 36(82):44. 1982. Ref. 5396).
42. FRIEND, M. T.; BIRCH, H. F. Phosphate responses in relation to soil tests and organic phosphorus. *The Journal of Agricultural Science* 54(3):341-347. 1960.
43. FU, S. Q.; SONG, J. Y. Study on the method of determination of soil available phosphorus in relation to phosphorus forms. *Acta Pedológica Sinica* 19(3):305-310. 1982. (Tomado de *Soil & Fertilizers* 46(1):21. 1983. Ref. 199).
44. FUNDORA H., O.; ARZOLA P., N. Comparación de varios métodos de determinación de fósforo asimilable en el suelo ferralítico rojo. *Centro Agrícola (Cuba)* 8(3):27-42. 1981.
45. GALIANO S., F. Estimación del fósforo asimilable en el suelo por análisis de tejidos vegetales. In: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Suelos Ecuatoriales. El fósforo en zonas

- tropicales. Coloquio sobre suelos, 3. Medellín. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo 6(1):329-347. 1974.
46. GONZALEZ T., R.; AVILAN R., L.; CHIRINOS, A. Métodos de análisis del fósforo de suelos de los estados Barinas y Cojedes estudiados en invernadero. *Agronomía Tropical* 27(1):3-14. 1977 (Tomado de: *Soils & Fertilizers* 42(2):80. 1979. Ref. 808).
 47. GRIFFIN, G. F. Effect of liming on the soil test level of phosphorus as determined by three methods. *Soil Science Society of America Proceedings* 35(4):540-542. 1971.
 48. GUERRERO R., R. Formas de fósforo y sus relaciones con la fertilidad de los suelos. In: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. *Suelos Ecuatoriales. El fósforo en zonas tropicales. Coloquio sobre suelos, 3. Medellín. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo* 6(1): 349-387. 1974.
 49. GUNARY, D.; SUTTON, C. D. Soil factors affecting plant uptake of phosphate. *Journal of Soil Science* 18(1):167-173. 1967.
 50. GUZMAN, E.; BORNEMISZA, E. Relaciones fósforo-zinc en tres suelos ácidos de Costa Rica. I. Comportamiento en el suelo. *Turrialba* 33(3):257-264. 1983.
 51. GUZMAN, E.; BORNEMISZA, E. Relaciones fósforo-zinc en tres suelos ácidos de Costa Rica. II. Absorción de los elementos por tomate en el invernadero. *Turrialba* 33(3):265-270. 1983.
 52. HAYNES, R. J. Effects of liming of phosphate availability in acid soils. *Plant and Soil* No. 68: 289-308. 1982.
 53. HAYNES, R. J.; LUDECKE, T. E. Effect of lime and phosphorus applications on concentrations of available nutrients and on P, Al and Mn uptake by two pasture legumes in an acid soil. *Plant and Soil* No. 62:117-128. 1981.
 54. HAYNES, R. J.; LUDECKE, T. E. Yield, root morphology and chemical composition of two pasture legumes as affected by lime and phosphorus applications to and acid soil. *Plant and Soil* No. 62:241-254. 1981.
 55. HOLFORD, I. C. R. Greenhouse evaluation of four phosphorus soil tests in relation to phosphate buffering and labile phosphate in soils. *Soil Science American Journal* 44(3):555-559. 1980.
 56. HONG, J. K.; YAMANE, I. Proposal for a more suitable method to extract soil organic phosphorus. *Soil Science and Plant Nutrition* 26(3):383-390. 1980. (Tomado de: *Soil & Fertilizers* 44(11):1035. 1981. Ref. 9646).
 57. IYENGAR, B. R. V.; NAIK, C. S. K.; BAKRE, S. G. Transformations and availability of phosphorus applied to soil under coffee. *Journal of the Indian Society of Soil Science* 30(3): 285-290. 1982, (Tomado de: *Soils & Fertilizers* 46(8):798. 1983. Ref. 7602).
 58. JACKSON, M. L. Determinaciones del fósforo para suelos. Disponibilidad, fijación, fraccionamiento. In: Jackson, M. L. *Análisis químico de suelos*. 2a. Ed. Barcelona, Ediciones Omega, S. A., 1964. p. 191-253.
 59. JITTANOONTA, D. The relative importance of inorganic P fractions in assessing soil P avail. *Diss. Abstr.* B41(8):2846. 1981. *T.V.A. Fert. Abstr.*, 1981. p. 1352. (Tomado de: *Phosphorus in Agriculture* No. 82:40. 1982. Ref. 5236.)

60. JOHN, M. K. Extractable phosphorus related to forms of phosphorus and other soil properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture* No. 23:1425-1433. 1972.
61. KAMPRATH, E. J. Aspectos químicos y formas minerales del fósforo del suelo en regiones tropicales. In: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Suelos Ecuatoriales. El fósforo en zonas tropicales. Coloquio sobre suelos, 3. Medellín. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo 6(1):1-18. 1974.
62. KUNISHI, H. M. Combined effects of lime, phosphate fertilizer and aluminum on plant yield from acids soil of the southeastern United States. *Soil Science* 134(4):233-238. 1982.
63. LOPEZ A., M. Determinación de fósforo aprovechable en suelos tropicales. *Cenicafé (Colombia)* 9(5-6):109-120. 1958.
64. LOPEZ A., M. Problemas de fertilización en suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. *Cenicafé (Colombia)* 20(2):55-67. 1969.
65. LOPEZ A., M. Valoración de las formas de fósforo, orgánica e inorgánica, de un suelo de la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé (Colombia)* 11(7):189-204. 1960.
66. LOPEZ A., S.; SALAS E., E.; GUERRERO R., R. Fósforo aprovechable extraído por diferentes métodos en relación con las fracciones minerales de P y su absorción por la planta en suelos volcánicos de Nariño, Colombia. *Revista de Ciencias Agrícolas (Colombia)* 6(1-6):1-18. 1974-1976.
67. LOTERO C., J. Absorción del fósforo y sus funciones en la planta. In: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Suelos Ecuatoriales. El fósforo en zonas tropicales. Coloquio sobre suelos, 3. Medellín. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo 6(1):67-96. 1974.
68. LUSCOMBE, P. C.; SYRES, J. K.; GREGG, P. E. H. Water extraction as a soil-testing procedure for phosphate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 10(11):1361-1369. 1979. (Tomado de: *Soil & Fertilizers* 43(9):788. 1980. Ref. 7218).
69. MATT K., J. Colorimetric determination of phosphorus in soil and plant materials with ascorbic acid. *Soil Science* 109(4):214-220. 1970.
70. McGEORGE, W. T. Modified Neubauer method for soil culture. *Soil Science* 62(1):61-70. 1946.
71. McLEAN, E. O. et al. Soil tests to inventory the initially available levels and to assess the fates added P and K as bases for improved fertilizer recommendations. *Commun. Soil Sci. Pl. Anal.* 10(3):623-630. 1979. (Tomado de: *Phosphorus in Agriculture* No. 77:29. 1980. Ref. 4662).
72. METHA, N. C.; LEGG, J. O.; GORING, C. A. I.; BLACK, C. A. Determination of organic phosphorus in soils. I. Extraction method. *Soil Science Society Proceedings* 18(4):443-449. 1954.
73. MENDEZ, J. A. P. et al. Comparative study of methods for the determination of total P in different types of andosols. *Science du Sol.* 4:241-250. 1978. (Tomado de: *Phosphorus in Agriculture* No. 77:29. 1980. Ref. 4597).
74. MICHORI, P. K.; GATITU, G. M.; KABAARA, A. M. Evaluation of methods for extraction of soil phosphorus in relation to phosphorus uptake by coffee and barley. *Kenya Coffee* 41(489):429-441. 1976.

75. MOTOMIZU, S.; WAKIMOTO, T.; TOEI, K. Spectrophotometric determination of phosphate in river water with molybdate and malachite green. *Analyst* 108(1284):361-367. 1983. (Tomado de: *Soils & Fertilizers* 46(8):802. 1983. Ref. 7644).
76. MUNEVAR M, F. Efecto del encalado en la fijación de fósforo por 10 andosoles colombianos. *Revista ICA (Colombia)* 13(1):59-68. 1978.
77. NAVAS A., J.; MANZANO, H.; McLUNG, A. C. Algunos aspectos del análisis de suelos. III. Calibración del análisis. *Agricultura Tropical (Colombia)* 22(6):285-294. 1966.
78. OLARTE R., L. I.; MUÑOZ, B. M. de; BENAVIDES G., de; GARAVITO N., F.; LUNA Z., C.; MEJIA C., L.; ROZO, E. de. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 4a. Ed. Revisada y aumentada. Bogotá. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi". 1979. 664 p.
79. OLSEN, R. A. Rate of dissolution of phosphate from minerals and soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 39(4):634-639. 1975.
80. OLSEN, R. G.; COURT, M. N. Effect of wetting and drying of soils on phosphate adsorption and resin extraction of soil phosphate. *Journal of Soil Science* 33(4):709-717. 1982.
81. ONKEN, A. B.; MATHESON, R.; WILLIAMS, E. J. Evaluation of EDTA-extractable phosphorus as a soil test procedure. *Soil Science Society of American Journal* 44(4):783-786. 1980.
82. ORABI, A. A.; ISMAIL, A. S.; MASHADI, H. Zinc-phosphorus relationship in the nutrition of tomato plants as affected both by the soil and by the rate of applied zinc. *Plant and Soil* 69(1):67-72. 1982.
83. ORTEGA E., J.; GUERRERO R., R. Comportamiento de las formas de fósforo y sus relaciones con la absorción de P por la avena, bajo tres fuentes de fertilización fosfatada en un latosol de Nariño, Colombia. *Turrialba* 22(4):420-430. 1972.
84. OSPINA L., O. El fósforo de los andosoles. In: *Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Suelos Ecuatoriales. El fósforo en zonas tropicales. Coloquio sobre suelos, 3. Medellín. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo* 6(1):97-135. 1974.
85. PAAUW, F. van der. An effective water extraction method for the determination of plant-available soil phosphorus. *Plant and Soil* 34(1):467-481. 1971.
86. PALMA, G.; FASSBENDER, H. W. Estudio del fósforo en suelos de América central. V. Uso de resinas de intercambio para evaluar la disponibilidad de P. *Turrialba* 20(3):279-287. 1970.
87. PARRA H., J. Correlaciones entre peso seco de café y pasto y análisis de suelos. *Cenicafé (Colombia)* 22(3):83-92. 1971.
88. PARRA H., J. Determinación de fósforo soluble en suelos. *Boletín Informativo (Chinchina, Colombia)* 1(4):14-16. 1950.
89. PETERSEN, G. W.; COREY, R. B. A modified Chang and Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphates. *Soil Science Society of America Proceedings* 30(5):563-565. 1966.
90. PICHOT, J.; ROCHE, P. Phosphore dans les sols tropicaux. *Agronomie Tropicale* 27(9):939-965. 1972.

91. PIERRE, W. H.; NORMAN, A. C. Soil and fertilizer phosphorus in crop nutrition. New York. Academic Press, 1953. 492 p. (Agronomy Volume IV).
92. RAIJ, B. van. Seleção de métodos de laboratorio para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. Revista Brasileira de Ciencia do Solo 2(1):1-9. 1978.
93. RAIJ, B. van; FEITOSA T., C. Correlação entre o fósforo extraído de solos por diversos extratores químicos e o absorvido pelo milho. Bragantia (Brasil) 39:51-57. 1980.
94. ROCHE, P.; GRIERE, L.; BABRE, D.; CALBA, H.; FALLAVIER, P. Phosphorus in tropical soil; assessing deficiency levels and phosphorus requirements. Paris. Imphos-World Phosphate Institute. 1980. 48 p. (Scientific Publication No. 2).
95. ROSAND C., F. P.; SANTANA M., M. B. Comparação de extratores químicos de fósforo em solos do sul da Bahia. Turrialba 22(1):19-26. 1972.
96. SANCHEZ, P. A. Suelos del trópico. Características y manejo. 1a. Ed. San José, Costa Rica, IICA. 1981. 634 p. (Serie de libros y materiales educativos No. 48).
97. SANCHEZ T., L. C. Contenido de fósforo orgánico y mineral de algunos suelos del Valle del Cauca, Colombia. Acta Agronómica 6 (2):99-115. 1956.
98. SAUNDERS, W. M. H.; WILLIAMS, E. G. Observations on the determination of total organic phosphorus in soils. Journal of Soil Science 6(2):254-267. 1955.
99. SEN GUPTA, M. B.; CORNFIELD, A. H. Phosphorus in calcareous soils. I. The inorganic phosphate fractions and their relation to the amount of calcium carbonate present. Journal of the Science of Food and Agriculture 13(12):652-655. 1962.
100. SHARMA, P. K. et al. Available P in relation to some soil properties and the efficiency of the methods for its extraction in the soils of Himachal Pradesh (India). Agrochimica 24(2-3): 102-107. 1980. (Tomado de: Phosphorus in Agriculture No. 81:35. 1981. Ref. 5140).
101. SIBBESEN, E. A simple ion-exchange resin procedure for extracting plant-available elements from soil. Plant and Soil No. 46:659-664. 1977.
102. SILVA M., F. Correlaciones entre los resultados de invernadero y el valor "A" o fósforo asimilable, extraído del suelo por tres métodos diferentes. Agricultura Tropical (Colombia) 11(12):925-928. 1955.
103. SISSINGH, H. A. Analytical technique of the Pw method used for the assessment of the phosphate status of arable soils in the Netherlands. Plant and Soil No. 34:483-486. 1971.
104. SMITH, B. F. L.; BAIN, D. C. A sodium hydroxide fusion method for the determination of total phosphate in soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis 13(3):185-190. 1982. (Tomado de: Soil & Fertilizers 46(6):546. 1983. Ref. 5154).
105. SOLTANPOUR, P. N.; ADAMS, F.; BENNETT, A. C. Soil phosphorus availability as measured by displaced soil solutions, calciumchloride extracts, dilute-acid extracts and labile phosphorus. Soil Science Society of America Proceedings 38(2):225-228. 1974.
106. SOMMERS, L. E.; NELSON, D. W. Determination of total phosphorus in soils: A rapid perchloric acid digestion procedure. Soil Science Society of America 36(6):902-904. 1972.

107. STEWARD, J. H.; OADES, J. M. The determination of organic phosphorus in soils. *The Journal of Soil Science* 23(1):38-49. 1972.
108. TAFUR V., N. Fraccionamiento del fósforo en algunos suelos del Valle del Sinú-Córdoba. *Revista ICA (Colombia)* 4(2):59-71. 1969.
109. TAFUR V., N.; BLASCO L., M. Fósforo en los suelos de Valledupar (Cesar). *Agricultura Tropical (Colombia)* 25(3):151-159. 1969.
110. TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. Soil fertility and fertilizers. 3a. Ed. New York, MacMillan Publishing Co., 1975. 694 p.
111. VENKAT R., N.; SAXENA, M. C.; SRINIVASULU, R. E-, L- and A- values for estimation of plant-available soil phosphorus. *Plant and Soil* 69(1):3-11. 1982.
112. VERMA, T. S.; TRIPATHI, B. R. Evaluation of chemical methods for the determination of available phosphorus in waterlogged alfisols: 2. Suitability of soil test methods in relation to plant growth parameters. *Soil Science* 134(5):294-299. 1982.
113. VINASCO O., C. A. Avances en el estudio de P-total y P-orgánico en suelos. Chinchiná. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Departamento de Biología y Suelos. Sección de Química Agrícola, 1982. 9 p. (Oficio interno de agosto 9 de 1982).
114. VINASCO O., C. A. Informe del ensayo preliminar sobre el uso de diferentes soluciones extractoras para fósforo en algunos suelos. Chinchiná. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Departamento de Biología y Suelos. Sección de Química Agrícola, 1981. 5 p. (Oficio interno de octubre 23 de 1981).
115. VINASCO O., C. A. Informe preliminar sobre métodos de extracción de fósforo. Chinchiná. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Sección de Química Agrícola, 1981. 7 p. (Oficio interno de agosto 26 de 1981).
116. VINASCO O., C. A. Posibilidades para la determinación de fósforo total y fósforo orgánico en suelos. Chinchiná. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Departamento de Biología y Suelos. Sección de Química Agrícola, 1982. 6 p. (Oficio interno de mayo 19 de 1982).
117. VINASCO O., C. A.; VALENCIA A., G. El café y sus necesidades de fósforo. I. Selección de métodos analíticos de fósforo en suelos. In: Suelos Ecuatoriales. Memorias del Congreso Nacional 2, y Coloquio de Suelos sobre "Uso y manejo de suelos de clima medio", 8. Pasto, octubre 4 - 8 de 1983. Bogotá. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo 14(1):177-185. 1984.
118. WALMSLEY, D.; CONFORTH, I. S. Methods of measuring available nutrients in west indian soils. II. Phosphorus. *Plant and Soil* No. 39:93-101. 1973.
119. WEIR, C. C. Evaluation of chemical soil tests for measuring available phosphorus on some Jamaican soils. *Tropical Agriculture* 39(1):67-72. 1962.
120. WILLETT, I R. Phosphorus availability in soils subjected to short periods of flooding and drying. *Aust. J. Soil. Res.* 20(2):131-138. 1982. (Tomado de: *Biological Abstract* 74(10):7478. 1982. Ref. 72356).

121. WILLIAMS, P. G.; KNIGHT, A. H. Evaluations of soil phosphate status by pot experiments, conventional extraction methods, and labile phosphate values estimated with the aid of phosphorus-32. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 14(8):555-563. 1963.
122. YADAV, O. P.; SHUKLA, U. C. Effect of applied phosphorus and zinc on their absorption and distribution in chickpea plant. *Soil Science* 134(4):239-243. 1982.
123. ZUNINO, H.; AGUILERA, M.; PEIRANO, P. A modified resin exchange method for measurement of available phosphate in soils derived from volcanic ash. *Soil Science* 114(5):404-405. 1972.
124. ZUNINO, H.; PEIRANO, P.; AGUILERA, M.; CAIOZZI, P. Uptake by wheat and resin-extractable phosphate after incubation in soil derived from volcanic ash. *Agronomy Journal* 65(5):747-748. 1973.

B.

IMPORTANCIA DEL FOSFORO PARA EL CAFETO

Ignacio Federico Carrillo Pachón *

1. INTRODUCCION

Desde las primeras investigaciones sobre nutrición vegetal se ha comprobado un crecimiento normal de las plantas si la solución nutritiva del suelo contiene compuestos con N, P, K, Ca y Mg. Posteriormente en estudios más detallados se demostró que los elementos menores son igualmente requeridos (10). Todas las investigaciones son concluyentes acerca de la necesidad del P, el cual al ser estudiado se encuentra formando fosfatos de azúcares, en el trifosfato de adenosina, en los ácidos nucleicos, en los fosfolípidos y en las funciones enzimáticas en ciertas coenzimas.

Aduayi (1) ha demostrado que el fósforo, como nutrimento en las primeras etapas de desarrollo del cafeto, es el responsable de formar cafetos vigorosos, con buen sistema de raíces y como promotor de la floración y del desarrollo del fruto en la etapa de producción.

En el almácigo, Salazar (16) encontró respuesta positiva al P. Resultado similar encontró Baeza (3, 9), con tratamientos de superfosfato triple en suelos esterilizados preparados para almácigos.

Hasta las etapas iniciales del crecimiento de la planta (aproximadamente 24 meses), muchos ensayos demuestran que se presenta mejor desarrollo de la planta y del sistema radical cuando se han efectuado fertilizaciones con fosfatos. Su uso se recomienda también, por la acción resi-

* Asistente de la Sección de Química Agrícola del Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENI-CAFE, Chinchiná, Caldas, Colombia.

dual que puede llegar a los cinco años, debido a que en los suelos cafeteros, que tienen alta fijación de fosfatos (5), con el tiempo se liberan. Esto explica la poca respuesta al P en cafetales que hayan tenido fertilizaciones con fosfatos anteriormente.

Cuando los fosfatos se adicionan a un suelo ayudan a la retención de algunos cationes evitando la lixiviación y además actúan como tampón (7).

En suelos ácidos, que contienen fósforo, alófana y materia orgánica en altas proporciones, el fósforo forma un complejo que no puede ser extraído por los métodos analíticos tradicionales (22), pero el cafeto lo extrae con la ayuda de mecanismos bioquímicos, ya que aparece P en el tejido vegetal; es probable, entonces, que dicho fósforo sea suministrado a la solución por la materia orgánica del suelo (22).

Para suelos derivados de cenizas volcánicas, que contienen bastante alófana no existe un método de análisis del suelo que establezca una buena correlación con la producción presentada por la planta.

Todos los cultivos extraen gran número de nutrimentos que deben tenerse en cuenta para los programas de fertilización. Esto es además del N, P, K, también se extrae Ca, Mg, S, Cl, B, Fe, Mn, Zn, Cu y otros elementos; esta extracción es la suma de las cosechas retiradas y de lo necesario para el crecimiento durante los períodos estipulados.

El futuro de los cafeteros será catastrófico en caso de no tener presente que, el aumento de productividad adicionando únicamente unas fuentes que desequilibran el sistema, va empobreciendo los suelos hasta llegar el momento en que serán infértiles, y se formarían desiertos donde ni la microflora ni la microfauna podrían subsistir.

Si un cultivo responde al N y al K, la decisión de agregar éstos únicamente es sencilla y más económica, transitoriamente en algunas cosechas; pero se debe pensar, qué ocurre con los elementos que la planta extrae y no se reponen al sistema? (4). En este caso dichos elementos serían P, S, Cl, Ca, Mg en mayor proporción y los microelementos en menor cantidad.

Será necesario que aparezcan los síntomas de deficiencias avanzadas (por ejemplo: P, Mg, Ca, B, Zn entre otros), para estudiar su adición o corrección? (Ver Figura 1).

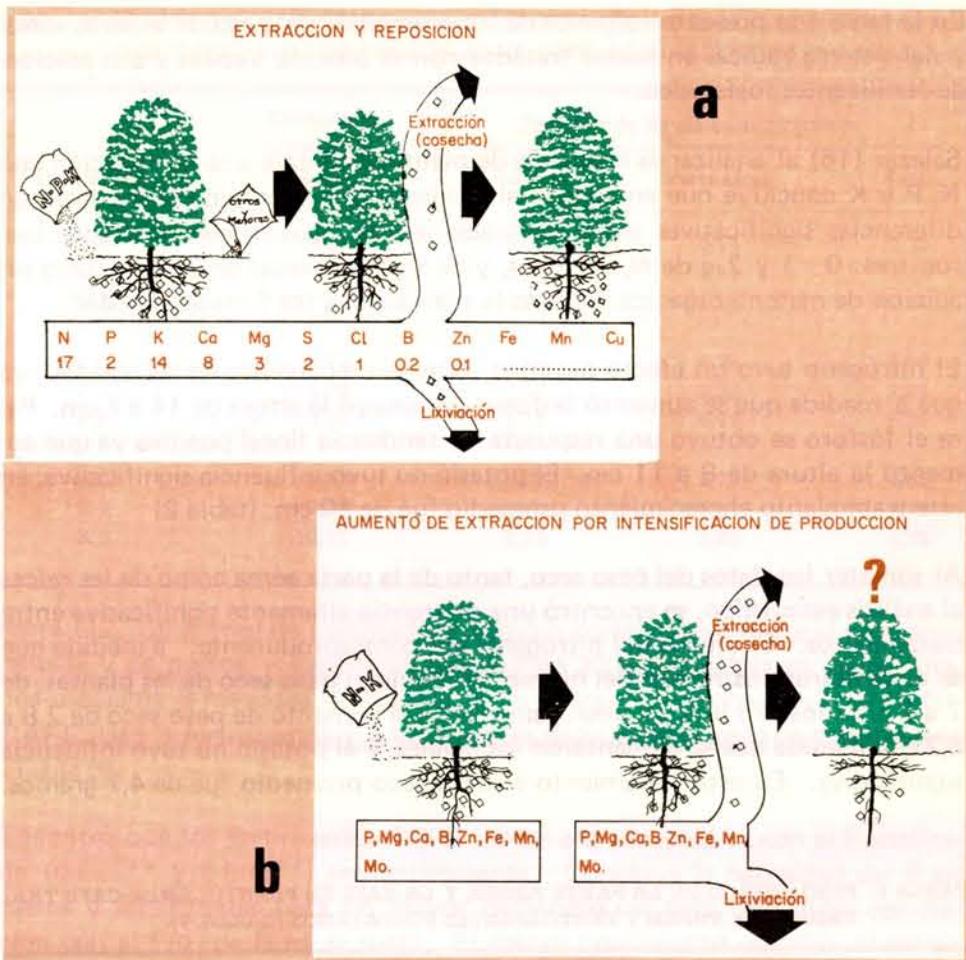


FIGURA 1. DIAGRAMA DE EXTRACCION DE NUTRIMENTOS: a) CON REPOSICION BALANCEADA, Y b) CON REPOSICION NO BALANCEADA, CASO EN EL CUAL PUEDEN OCURRIR PROBLEMAS AL INTENSIFICARSE LA PRODUCTIVIDAD.

2. TRABAJOS EN ALMACIGOS.

Baeza en los años 1977 y 1978 (3, 9) al trabajar en la preparación de suelos para almácigos, encontró que aquellos con un 10% de materia orgánica, o con pulpa adicionada al efectuar la esterilización, u otros con adición de biocidas, afectan las plantas de café en almácigo, pero dicho efecto es controlado mediante la adición de superfosfato triple de calcio (SFT). En el primer ensayo halló que la aplicación de 30g/bolsa de 2 kg era suficiente y en un segundo ensayo determinó este nivel en 383 g y SFT/matero de 0,1 m³.

En la tabla 1 se presentan algunos de los promedios del peso de la parte aérea y del sistema radical en suelos tratados con el biocida Vapam y con adición de fertilizantes fosfatados.

Salazar (16) al analizar la respuesta de plántulas de café a la fertilización con N, P y K concluye que en cuanto al crecimiento ortotrópico se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. Los niveles utilizados fueron tres: 0 - 1 y 2 g de N, de P_2O_5 y de K_2O en bolsas de 2 kg de suelo sin adición de materia orgánica. Se hizo la evaluación a los 6 meses de edad.

El nitrógeno tuvo un efecto negativo sobre el crecimiento de las plantas, ya que a medida que se aumentó la dosis, disminuyó la altura de 14 a 7 cm. Para el fósforo se obtuvo una respuesta de tendencia lineal positiva ya que aumentó la altura de 8 a 11 cm. El potasio no tuvo influencia significativa; en este tratamiento el crecimiento promedio fué de 10 cm. (tabla 2)

Al someter los datos del peso seco, tanto de la parte aérea como de las raíces al análisis estadístico, se encontró una diferencia altamente significativa entre tratamientos. El efecto del nitrógeno fué contraproducente: a medida que se aumentaron los niveles del mismo, se redujo el peso seco de las plantas, de 7 a 2 g. El fósforo influyó positivamente en el aumento de peso seco de 2,8 a 6,2 g. a medida que se aumentaron los niveles, y el potasio no tuvo influencia significativa. En este tratamiento el peso seco promedio fué de 4,7 gramos.

TABLA 1. PESO FRESCO DE LA PARTE AEREA Y LA RAIZ EN PLANTULA DE CAFE TRATADAS CON VAPAM Y FERTILIZANTES FOSFATADOS (BAEZA, 9).

Tratamientos	Parte aérea (g)	Raíz (g)
Suelo + Vapam + SFT*	12,3	62,4
Suelo + Vapam	0,8	5,3
Suelo	3,3	32,5
Suelo + SFT	2,9	15,0
Suelo + Vapam T 14**	6,3	42,0

* SFT = Superfosfato triple de calcio.

** T14 = Fertilizante 14-14-14.

TABLA 2.- EFECTO DE LOS NIVELES DE FERTILIZACION EN EL CRECIMIENTO ORTOTRÓPICO Y PESO SECO DE PLANTULAS DE CAFE A LOS SEIS MESES (SALAZAR, 16).

Tratamiento	Crecimiento Ortotrópico (cm)	Peso seco de las plántulas en gramos		
		Raíces	Parte aérea	Total
N 0	14,15	1,57	6,16	7,73
N 1	9,57	0,71	3,51	4,23
N 2	7,13	0,33	1,86	2,18
P 0	8,77	0,57	2,28	2,85
P 1	8,77	0,57	2,28	2,85
P 2	11,70	1,13	5,12	6,25
K 0	9,87	0,89	3,76	4,65
K 1	10,29	0,86	3,87	4,73
K 2	10,71	0,86	3,90	4,75

Parra (12, 13) a nivel de invernadero, estudió correlaciones entre el peso seco de café y de pastos, y los contenidos de P en 20 suelos cafeteros, determinados mediante 3 métodos de análisis: Bray I, Bray II y el convencional CENICAFE. Usó 3 fertilizantes y a los 6 meses determinó el peso de materia seca (Tabla 3).

Encontró que los fertilizantes A y B tenían alta correlación con el P analizado (0.621** y 0.533**) respectivamente. Concluye la necesidad del P en suelos y fertilizantes para un mayor desarrollo del café. No hubo correlación con el 0/o de N en el suelo. El menor crecimiento se halló al omitir el fósforo.

TABLA 3.- MATERIA SECA DE PLANTAS DE SEIS MESES DE EDAD CON TRATAMIENTO CON TRES FERTILIZANTES.

Fertilizante	Peso seco (g)
A: 10-20-10	8,55
B: 0-20-10	9,34
C: 10-0-10	6,32

** Estadísticamente significativo al 50/o.

Parra en "Fertilidad de los suelos de la zona cafetera" (15) presenta respuestas en las series de suelos 10 - 60 y 120, a las adiciones de N, P, K, Ca, Mg, más una mezcla de cinco elementos menores. Las series corresponden a suelos derivados de cenizas volcánicas de Chinchiná, y sus alrededores hacia Palestina y Marsella (series Chinchiná, Chuscal y Manila), respectivamente.

Usó plántulas de café en macetas, y el efecto fue determinado mediante el peso seco de las plantas, análisis foliares y observaciones de los síntomas de deficiencias (14).

Las series estudiadas respondieron positivamente al nitrógeno y al fósforo, una al calcio y ninguna a elementos menores y magnesio.

3. ENSAYOS EN CAFE EN ESTABLECIMIENTO Y EN CAFE ESTABLECIDO.

Aduayi (1) en plantas de café de dos y medio años que transplantó a materos con arena y que mantuvo en soluciones nutritivas con diferentes dosis de P, obtuvo los resultados que se transcriben en las tablas 4. 5 v 6.

Se observa que los tratamientos que corresponden a las dosis de 50 y 100 ppm, fueron los que determinaron mayor crecimiento y desarrollo, mejor sistema radical y mejor vigor de la planta. Para dosis menores o mayores se obtuvo menor respuesta. También se encontró, como consecuencia, que con esta dosis se incrementan los contenidos de los nutrimentos en la planta.

Carvajal (6), en su seminario de fertilización efectiva del cafeto a partir de las cantidades de elementos que extrae la cosecha, calcula la relación N P K así: 5,1:1:5,8. En cuanto a la respuesta de P en café corrobora que el contenido de P en las hojas es bajo, de 0,1 a 0,2^o/o y que la respuesta a P en suelos cafeteros del mundo no es común, pero a pesar de esta baja respuesta se incluye en las fórmulas, en grados de 5 a 24, con énfasis en los grados altos para los almácigos y el establecimiento.

Valencia y Bravo (21) en un estudio acerca de la influencia del encalamiento en la producción de cafetales establecidos, hicieron tratamientos con fertilizante 12-12-17-2 (testigo) y con dos dosis de cal Ca(OH)_2 de 250 y 500 g/árbol/año. Encontraron la ventaja de el uso de la cal para reemplazar una fertilización sin disminución en la cosecha.

TABLA 4.- EFECTO DEL FOSFORO EN EL CRECIMIENTO DEL CAFETO (ADUAYI, 1).

Tratamiento	No. hojas	No. ramas	No. nudos	diámetro del tallo (cm)
Testigo	102	13	21	1,06
P 50 ppm	116	14	22	1,18
P 100 ppm	252	20	45	1,45
P 200 ppm	146	20	26	1,12
P 400 ppm	190	23	27	1,27
P 800 ppm	168	24	26	1,15
D. M. S.				
5°/o	20	3	5	0,18
1°/o	28	5	8	0,26
0,1°/o	41	7	12	0,38

TABLA 5. EFECTO DEL FOSFORO EN EL PESO FRESCO Y EL PESO SECO DE LOS CAFETOS (ADUAYI, 1).

Tratamiento	Peso fresco (g)	Peso seco (g)
Testigo	204,00	61,96
P 50 ppm	262,20	95,06
P 100 ppm	599,46	155,66
P 200 ppm	316,10	85,73
P 400 ppm	415,63	134,30
P 800 ppm	308,10	83,56
D.M.S.		
5°/o	270,41	64,20
1°/o	384,62	91,32
0,1°/o	N. S.	N. S.

TABLA 6. EFECTO DEL FOSFORO EN EL CONTENIDO TOTAL DE NUTRIMENTOS EN LOS CAFETOS, EXPRESADO EN PESO SECO (ADUAYI, 1).

Tratamiento	P (g)	K (g)	Ca (g)	Mg (g)
Testigo	1,10	4,17	2,16	0,58
P 50 ppm	1,58	6,33	2,57	0,86
P 100 ppm	2,32	10,96	3,30	1,52
P 200 ppm	1,81	6,55	1,74	0,68
P 400 ppm	3,66	10,52	2,13	0,93
P 800 ppm	2,76	7,43	1,48	0,50
D.M.S.				
5‰	1,13	4,55	N.S.	0,76
1‰	1,61	6,47	N.S.	N.S.
0,1‰	2,33	N.S.	N.S.	N.S.

Al analizar históricamente el comportamiento del fósforo en este experimento, se encontró que el cafetal tuvo durante años anteriores cuatro veces al año una fertilización con 12-12-17-2 150 g./árbol, además 50 g. de úrea. En 1974 se zoqueó y se iniciaron los tratamientos así:

1. 12-12-17-2 (150g) y 50 g. de úrea (testigo) cuatro veces al año.
2. Igual al tratamiento 1, más 250 g. de cal/árbol/año.
3. Igual al tratamiento 1, más 500 g. de cal/árbol/año.
4. 250 g. de cal/árbol/año.
5. 500 g. de cal/árbol/año.

O sea que los tratamientos 1, 2 y 3 llevaban fósforo. Los tratamientos 4 y 5 no llevaron fósforo desde 1974 hasta 1979.

Se nota el aumento de P en el suelo cuando se fertilizó con 12-12-17-2 y la disminución cuando únicamente se encaló. El P permaneció a niveles altos durante todo el experimento. (Tabla 7).

El fósforo en el tratamiento 4 se encuentra desde 90 a 246 ppm y en el tratamiento 5 se mantuvo de 77 a 173 ppm.

Se nota que los tratamientos 4 y 5, aún sin su adición, mantuvieron durante 5 años un nivel altísimo de P; luego una deficiencia por este elemento no era

TABLA 7. RESULTADO DE LOS ANALISIS DE P (BRAY II) EN MUESTRAS DE SUELOS TOMADAS ANTES DE CADA APLICACION DE CAL. DATOS AGRUPADOS SEGUN TRATAMIENTO (1).

Tratamiento	P (ppm) en lote encalamiento				
	Diciembre/75	Diciembre/76	Diciembre/77	Diciembre/78	Diciembre/79
1	154	123	134	263	198
2	133	203	121	303	279
3	124	171	132	323	239
4	181	246	90	164	109
5	141	173	77	121	103

(1) Datos originales de Valencia y Bravo (21).

de esperarse. Como ventaja sobresale la fijación del P ya que en este suelo se mantuvo un buen nivel durante los 5 años consecutivos.

La adición de P al cafeto en establecimiento en el campo es fundamental, ya que asegura buenas cosechas posteriormente.

López (11), anota para los fertilizantes fosfóricos el poder residual a corto plazo, tanto en los portadores de P de alta solubilidad (superfosfato) como en los portadores de baja solubilidad (escorias Thomas), debido al alto poder residual de fijación del P por estos suelos (suelo de la Unidad Chinchiná, Dystandept). El autor recomienda utilizar Escorias Thomas por razones de costos.

Bravo y Gómez (5) en el estudio "Fijación de P en seis unidades de suelos andosólicos de la zona cafetera colombiana" encontraron:

- 1.900 ppm de fósforo fijado para la unidad Fresno.
- 1.800 ppm de fósforo fijado para la unidad Chinchiná.
- 1.300 ppm de fósforo fijado para la unidad Montenegro.
- 1.300 ppm de fósforo fijado para la unidad Fondesa.
- 1.100 ppm de fósforo fijado para la unidad Quindío.
- 600 ppm de fósforo fijado para la unidad Malabar.

Estas unidades son representativas de los suelos de la zona cafetera colombiana, y tienen en común, alta capacidad de fijación de fósforo, por lo tanto, son suelos que a largo plazo mantienen el fósforo que se adiciona como fertilizante.

Uribe y Mestre (18) en un estudio entre los años 1966 y 1976 evaluaron, en términos de producción, el efecto de N, P y K a diferentes niveles (combinados e individuales) en ocho lugares de la región cafetera del país.

Los campos experimentales fueron los siguientes:

a. Hacienda Naranjal	municipio Chinchiná	Depto. Caldas
b. Cenicafé	municipio Chinchiná	Depto. Caldas
c. Subestación Paraguaicito	municipio Buenavista	Depto. Quindío
d. Subestación El Rosario	municipio Venecia	Depto. Antioquia
e. Hacienda Piamonte	municipio Fredonia	Depto. Antioquia
f. Hacienda Mesitas	municipio Cachipay	Depto. Cundinamarca
g. Hacienda Granjas	municipio El Colegio	Depto. Cundinamarca
h. Subestación La Trinidad	municipio Líbano	Depto. Tolima

Se establecieron como niveles 0, 1 y 2 de cada uno de los nutrimentos las cantidades 0 - 120 y 240 kg/ha/año de N, P₂O₅ y K₂O respectivamente.

Para el establecimiento de los cafetos se adicionaron fertilizantes con fósforo en las siguientes proporciones y cantidades:

- Naranjal: Cuatro aplicaciones de 12-12-17-2, 50 g/árbol (14 meses antes del experimento).
- Cenicafé: Cuatro aplicaciones de 14-14-14, 50 g/árbol. En forma similar Mesitas, Granjas, La Trinidad y Paraguaicito.
- Rosario: Cuatro fertilizaciones: la primera de 100 g/árbol de 6-24-6-2 y tres de 14-14-14, 100 g/árbol.
- Piamonte: Hasta los 22 meses se habían efectuado 11 aplicaciones así la primera de 25 g de urea + 100 g/árbol de 6-24-6-2; ocho aplicaciones de 100 g de 14-14-14, y dos aplicaciones de 15-15-15.

Debido a la fijación del fósforo se deben encontrar niveles altos durante los años siguientes y tanto en el ensayo de la influencia del encalamiento de Valencia y Bravo (21), como en el Uribe y Mestre (18), la necesidad de fósforo no sería notoria en los cinco o seis años siguientes por lo cual, no debe esperarse respuesta a las aplicaciones adicionales. Las cuatro respuestas ocasionales y de poca importancia encontradas en Cenicafé, Naranjal, Mesitas y La Trinidad (18) están indicando que además del fósforo aplicado con anterioridad sería conveniente adicionar alguna cantidad posteriormente.

Para la localidad de El Rosario la situación es agravada por el aluminio intercambiable, el cual interfiere y puede llegar a formar fosfatos de aluminio en las raíces y bloquear la buena nutrición de la planta (8), apareciendo como elemento detrimental (tratamientos con fósforo eran desfavorables al desarrollo de las plantas de la parcela).

Es así como Valencia y Arcila (20) en el estudio del efecto de la fertilización con N, P, K a tres niveles, en la composición mineral de las hojas del experimento anterior, no encontraron aumento en el nivel de P en las parcelas ubicadas en El Rosario y en Paraguaicito. Para las localidades de Cenicafé, Granja Piamonte y Naranjal hubo aumento de P foliar cuando se aplicó dicho elemento (efecto positivo y significativo al 5^o/o).

Se destaca la localidad de Paraguaicito la cual tampoco tuvo respuesta en producción a las aplicaciones de P, lo que se explicaría nuevamente por su suficiencia.

Uribe en su estudio del efecto del fósforo en la producción de café (17) concluye que no hay respuesta significativa al comparar la fertilización con 12-6-22 en relación a 12-0-22 en las localidades de Supía, Quindío y Albán. En algunos casos de cosechas individuales de Naranjal, El Rosario y Líbano encontró respuesta considerada de poca magnitud. Para el Rosario halló respuesta negativa a su aplicación, lo que confirma lo dicho anteriormente para suelos ácidos con altos contenidos de Al intercambiable (8). Los datos acumulados y las respectivas D.M.S. se presentan en la tabla 8.

TABLA 8. RESPUESTA EN PRODUCCION (c.p.s.), A FERTILIZACION CON FOSFORO Y SIN FOSFORO (URIBE, 18).

Localidad	Tratamiento	Kg c. p. s. Acumulado de las cosechas	D.M.S. al 0,05
Naranjal	12-6-22	31.600 (4 cosechas)	4.213
Naranjal	12-0-22	26.714 (4 cosechas)	—
Supía	12-6-22	31.538 (5 cosechas)	2.913
Supía	12-0-22	29.352 (5 cosechas)	—
Quindío	12-6-22	22.189 (4 cosechas)	5.513
Quindío	12-0-22	20.127 (4 cosechas)	—
Líbano	12-6-22	30.476 (4 cosechas)	3.375
Líbano	12-0-22	29.589 (4 cosechas)	—
Albán	12-6-22	21.475 (4 cosechas)	2.288
Albán	12-0-22	21.437 (4 cosechas)	—
TOTALES	12-6-22	137.278 (21 cosechas)	
	12-0-22	127.219 (21 cosechas)	

Aguilar (2) en El Salvador, en un estudio para determinar los niveles de N, P, K para el cafeto, encontró, con tres niveles de fertilización 0 - 130 - 360 libras/ha de cada elemento, que el cafeto no respondió a K y tuvo un efecto depresivo en esos suelos. En estudios similares encontró respuesta a fertilizantes con P en las relaciones 2-1-0; 2-1-1 y 1-1-0. Se hace la advertencia que estos suelos son ricos en K.

Valencia (19) en interpretación de análisis de suelo para café, en un resumen de la fertilidad de los suelos cafeteros colombianos, presenta el porcentaje de respuesta a N, P, K de registros de 36 cosechas en ocho localidades así:

69% de respuesta con aplicaciones de N.

11% de respuesta con aplicaciones de P_2O_5 .

42% de respuesta con aplicaciones de K_2O .

Hace notar en la tabla 3 de su trabajo, que la totalidad de los suelos cafeteros tiene un contenido de P menor de 10 ppm (Bray II), el 77% de los suelos tienen menos de 12% de materia orgánica y el 69% están con menos de 0.34 m.e.de K/100 g de suelo.

Carrillo (7) en ensayos en microlisímetros con el suelo y el subsuelo de Naranjal (Typic Dystrandept) con adiciones de humus, K, Ca, Mg, amonio y fosfatos, encontró que en los tratamientos que contenían fosfatos el K y el amonio fueron retenidos en mayor proporción que cuando no se adicionaron fosfatos. Recomienda la adición de fosfatos en los fertilizantes que lleven K y amonio para ayudar a mantenerlos a disposición y evitar que sean lavados; es decir la presencia de fosfatos ayudaría a que se presentara mejor respuesta a las aplicaciones de N y K. En la figura 2 se observa la acción benéfica de los fosfatos en la retención de K.

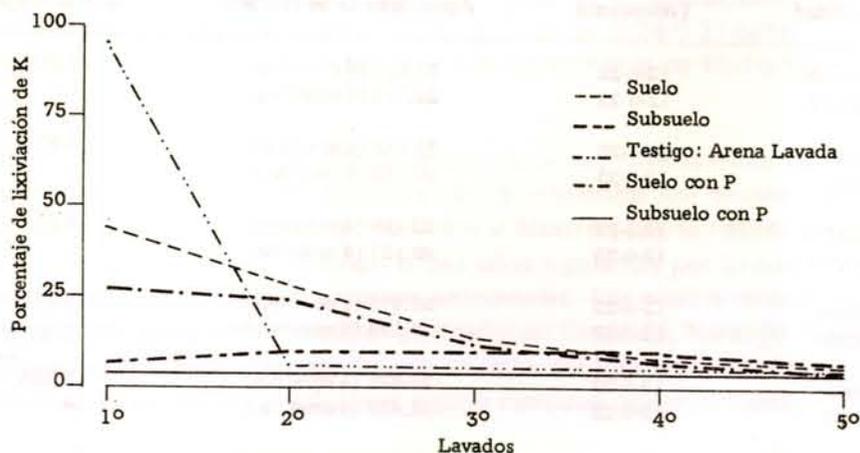


FIGURA 2. LIXIVIACION DE K EN EL SUELO Y EL SUBSUELO DE NARANJAL (CHINCHINA).

4. RECOMENDACIONES.

Al analizar las respuestas de la planta a la acción del P en términos de los diferentes estados de desarrollo del cafeto se puede decir:

1. El fósforo aplicado a plantas en el almácigo y en el establecimiento hasta la primera cosecha, ayuda a un desarrollo vigoroso de la planta y la formación de un buen sistema radical.
2. Cuando se suministra P en suelos derivados de cenizas volcánicas es fijado y después habrá una liberación de éste durante varios años, debido principalmente a procesos microbiológicos que lo hacen nuevamente disponible.
3. La relación P a N, o a K es baja. Es alrededor de 1/6 parte. Para los ensayos con N, P, K se sugiere partir de esta relación; el grado de fertilizante para estos ensayos sería 18-3-18.
4. Para los seguimientos de P en suelos derivados de cenizas volcánicas se sugiere utilizar métodos que tengan mayor poder de extracción, para evitar la interferencia de materia orgánica y alófana.

5. BIBLIOGRAFIA

1. ADUAYI, E. A. The role of phosphorus on the growth and mineral nutrient composition of young arabica coffee grown in sand culture. *Kenya Coffee* 37(440):336-340. 1972.
2. AGUILAR R., J. Resultados de la fertilización potásica en la producción de café. *El Café de El Salvador* 35(386):11-24. 1965.
3. BAEZA A., C. Tratamiento en suelo para establecer almácigos de café. In: Centro Nacional de Investigaciones de Café. Departamento de Biología y Suelos. Sección de Fitopatología. Informe anual de labores 1978/1979. Chinchiná. Cenicafé. 1979. p. 73.
4. BASF. Fertilón-Combi. Previene y cura deficiencias de micronutrientes. s. f. 23 p.
5. BRAVO G., E.; GOMEZ A., A. Capacidad de fijación de fósforo en seis unidades de suelos andosólicos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé (Colombia)* 25(1):19-29. 1974.
6. CARVAJAL C., J. F. Requerimiento de minerales por el cafeto. *Revista Cafetalera (Guatemala)* No. 157:25-27. 1976.

7. CARRILLO P., I. F. Comportamiento del potasio adicionado a un typic dystrandept. In: Memorias del Congreso Nacional, 2 y Coloquio de Suelos, 8. "Uso y manejo de suelos de clima medio". Documentos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 14(1):244-251. 1984.
8. CARRILLO P., I. F.; GOMEZ A., A. Métodos de Yuan y espectrofotometría de absorción atómica (E.A.A.) para determinación de aluminio intercambiable en suelos cafeteros colombianos. Cenicafé (Colombia) 27(1):26-33. 1976.
9. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFE. DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA Y SUELOS. SECCION DE FITOPATOLOGIA. Informe anual de labores 1977/1978. Chinchiná. Cenicafé. 1978. p. 5.
10. HOWARD M., R. Hydroponic food production. California, U.S.A. Woodbridge Press Pub. Co. 1978. 287 p.
11. LOPEZ A., M. Cambios químicos provocados en el suelo Chinchiná franco-arenoso con la aplicación de distintas fuentes y dosis de fertilizantes. Cenicafé (Colombia) 16:55-76. 1965.
12. PARRA H., J. Correlaciones entre los contenidos de nitrógeno y fósforo del suelo y la composición del tejido vegetal en café y pasto. Cenicafé (Colombia) 22(1):18-26. 1971.
13. PARRA H., J. Correlaciones entre peso seco de café y pasto y análisis de suelos. Cenicafé (Colombia) 22(3):83-92. 1971.
14. PARRA H., J. Las chapolas de café en el estudio de los suelos. Boletín Informativo (Colombia) 4(42):15-26. 1953.
15. PARRA H., J. Fertilidad de los suelos de la zona cafetera de Caldas. Boletín Informativo (Colombia) 5(56):22-31. 1954.
16. SALAZAR A., N. Respuesta de plántulas de café a la fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio. Cenicafé (Colombia) 28(2):61-66. 1977.
17. URIBE H., A. Efecto del fósforo en la producción de café. Cenicafé (Colombia) 34(1):3-15. 1983.
18. URIBE H., A.; MESTRE M., A. Efecto del nitrógeno, el fósforo y el potasio sobre la producción de café. Cenicafé (Colombia) 27(4):158-173. 1976.
19. VALENCIA A., G. Interpretación de análisis de suelos para café. In: Memorias del Congreso Nacional, 2 y Coloquio de Suelos, 8. "Uso y manejo de suelos de clima medio". Documentos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 14(1):186-189. 1984.
20. VALENCIA A., G.; ARCILA P., J. Efecto de la fertilización con N, P, K, a tres niveles en la composición mineral de las hojas del cafeto. Cenicafé (Colombia) 28(4):119-138. 1977.

21. VALENCIA A., G.; BRAVO G., E. de J. Influencia del enclamiento en la producción de cafetales establecidos. *Cenicafé (Colombia)* 32(1):3-14. 1981.
22. ZUNINO U., H. Ecología microbiana, acumulación de humus y fertilidad en suelos alofánicos. In: Seminario sobre materia orgánica y uso de residuos agropecuarios e industriales en el suelo. Medellín. Septiembre 8 - 10 de 1982. Documentos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. *Suelos Ecuatoriales (Colombia)* 13(1):23-35. 1983.