

AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT
WASHINGTON, D. C. 20623
BIBLIOGRAPHIC INPUT SHEET

FOR AID USE ONLY

Batch # 34

1. SUBJECT CLASSIFICATION	A. PRIMARY Agriculture	AF22-0000-GG50
	B. SECONDARY Soil chemistry and physics--Tropics	

2. TITLE AND SUBTITLE
Aspectos quimicos y formas minerales del fosforo del suelo en regiones tropicales

3. AUTHOR(S)
Kamprath, E.J.

4. DOCUMENT DATE 1974	5. NUMBER OF PAGES 18p.	6. ARC NUMBER ARC
--------------------------	----------------------------	----------------------

7. REFERENCE ORGANIZATION NAME AND ADDRESS
N.C.State

8. SUPPLEMENTARY NOTES (Sponsoring Organization, Publishers, Availability)
(Available in English and Portuguese; English, 17p.: PN-AAB-633)

9. ABSTRACT

10. CONTROL NUMBER PN-AAB-954	11. PRICE OF DOCUMENT
12. DESCRIPTORS Phosphorus Tropics	13. PROJECT NUMBER
	14. CONTRACT NUMBER GSD-2835 211(d)
	15. TYPE OF DOCUMENT

CSD - 2835 211(V)
PN - AAB-959

ASPECTOS QUIMICOS Y FORMAS MINERALES DEL FOSFORO

DEL SUELO EN REGIONES TROPICALES *

Eugene J. Kamprath **

INTRODUCCION

Muchos de los suelos en las regiones tropicales tienen un nivel muy bajo de fósforo aprovechable. Los rendimientos de los cultivos generalmente son muy bajos, al menos que se apliquen fertilizantes fosfatados. Con el fin de aumentar el nivel del fósforo aprovechable en el suelo, es necesario añadir altas cantidades de fertilizantes fosfatados a los suelos rojos y a los derivados de cenizas volcánicas. Estos suelos tienen la capacidad de inmovilizar grandes cantidades de fertilizantes fosfatados. El desarrollo de prácticas de fertilización fosfórica seguras y la interpretación de análisis de suelos para fósforo, deben tener en cuenta la química y la reacción del fósforo en los suelos.

Formas y cantidades del fósforo nativo del suelo

Las formas y cantidades de fósforo nativo del suelo para algunos suelos representativos de los trópicos se pre-

* Contribución del Departamento de Ciencias del Suelo, Universidad del Estado de Carolina del Norte, Raleigh N.C. La ejecución de este trabajo fue auspiciada con fondos de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional, AID/cd 2835. Traducido por el Dr. Luis Alfredo León S., Director Nacional Programa Suelos. ICA.

** Profesor de Ciencias del Suelo.

sentan en la Tabla 1. Los suelos altamente meteorizados, latosoles (oxisoles), contienen cantidades de fósforo relativamente bajas. El fósforo inorgánico consiste primordialmente de fosfatos de hierro y aluminio y fosfatos ocluidos relativamente insolubles, en los cuales el fósforo se encuentra asociado con hierro y aluminio. Los fosfatos de calcio están presentes solamente en muy pequeñas cantidades. Cuando se considera la baja cantidad de fósforo y la baja solubilidad de las formas de los fosfatos, no es sorprendente que los latosoles sean muy deficientes en este elemento.

Los suelos de Terra Roxa del Brasil y los suelos del Valle del Cauca de Colombia, poseen una cantidad considerablemente más alta de fósforo total e inorgánico que aquéllos altamente meteorizados. El fosfato de hierro es el mayor componente de las llamadas formas "activas" de fósforo inorgánico de los suelos, generalmente fosfatos de hierro, aluminio y calcio.

Los suelos derivados de cenizas volcánicas contienen muy altas cantidades de fósforo si se comparan con otros suelos de los trópicos. Los fosfatos de calcio fueron los componentes mayores de la fracción inorgánica "activa". Suelos de las montañas de Colombia contienen considerablemente más fósforo inerte que los suelos derivados de cenizas volcánicas de América Central (3). Los Andosoles de Colombia están formados por materiales muy recientes y la meteorización puede ser muy limitada.

A pesar de que los suelos derivados de cenizas volcánicas tienen un alto contenido de fósforo total, los cultivos que crecen en ellos generalmente responden marcadamente a la fertilización con fósforo. Esto sugiere que la habilidad de las plantas para tomar las formas "activas" del fósforo inorgánico determinadas por los métodos de fraccionamiento de fósforo, es muy diferente para el caso de los suelos volcánicos, comparada con la de otros suelos.

TABLA 1. Formas y cantidades de fósforo en suelos superficiales de regiones tropicales de América Latina.

Suelo	Area	Total	P-Ca	P-Al	P-Fe	Inerte	Orgánico	Referencia
Latosol	Colombia	179	2	1	19	19	138	Benavides, 1963
Latosol	Brasil	198	6	49	39	77	27	Viera y Borne- misza, 1968
Volcánico	América Central	1042	124	92	55	274	496	Fassbender, 1969
	Colombia	1455	201	108	159	829	133	Blasco, 1969
Terra Roxa	Brasil	467	21	37	145	91	171	Viera y Borne- misza, 1968
	Valle del Cauca (Co- lombia)	591	23	33	54	360	121	Blasco y Bohór- quez, 1968

Factores que influyen en las formas del fósforo inorgánico

Las formas del fósforo inorgánico presentes en un suelo están relacionadas con el grado de meteorización química que haya tenido lugar (5). Los factores que determinan la formación de los compuestos de fósforo en el suelo son: actividades de los cationes, pH, productos de solubilidad de los compuestos de fósforo, propiedades mineralógicas de suelo y condiciones de topografía y drenaje (17).

El estado de meteorización de suelos de Venezuela tiene un efecto marcado en las cantidades de fosfatos de hierro y calcio, en la fracción "activa" del fósforo inorgánico (Tabla 2). Al aumentar la intensidad de la meteorización se presentó una disminución en la proporción relativa de los fosfatos de calcio comparativamente más solubles y un aumento en los fosfatos de hierro más insolubles (25). Los fosfatos de calcio y aluminio predominaron en los suelos jóvenes (regosoles) de El Salvador, mientras que los fosfatos ocluidos fueron las formas inorgánicas principales en los suelos viejos (latosoles) (8).

La transformación de los fosfatos de un compuesto a otro está controlada principalmente por el pH. A medida que los suelos se tornan ácidos las actividades del hierro y el aluminio aumentan y los fosfatos de calcio relativamente solubles, se convierten en compuestos de hierro y aluminio menos solubles. En suelos de América Central más del 50% del fósforo inorgánico activo se encontró en forma de fosfato de calcio, cuando el pH del suelo era mayor o igual a 6,1 (5,5 en cloruro de calcio diluido) (12).

El régimen de humedad del suelo también produce un efecto importante en las formas del fósforo presente. Suelos en áreas con estaciones marcadas de sequía y humedad, tienen una alta proporción de su fósforo inorgánico en forma de fosfatos de hierro (25). Los mismos investigadores encontraron que el drenaje impedido favorece la formación de fosfatos de aluminio.

TABLA 2. Distribución del fósforo activo inorgánico en suelos de los trópicos en relación con su estado de meteorización (Westiny de Brito, 1969)

Grado de meteorización	Distribución porcentual de los fosfatos inorgánicos activos		
	P-Ca	P-Al <i>σ</i>	P-Fe
Muy fuerte	4	0	96
Fuerte	6	20	74
Moderado	23	13	64
Débil	38	16	46

Reacción de los fertilizantes fosfatados con los suelos

Los fertilizantes fosfatados cuando se añaden a un suelo ácido mineral reaccionan con los compuestos de hierro y aluminio para formar compuestos de fósforo poco solubles (26). La remoción de los óxidos de hierro libre y de aluminio del suelo, reducen en forma apreciable la cantidad de fosfatos adsorbida por el suelo (6). El contenido de sesquióxidos en el suelo generalmente aumenta a medida que el contenido de arcillas aumenta, sugiriéndose que los óxidos hidratados de hierro y aluminio se adsorben en la superficie de las arcillas. Por lo tanto, la capacidad de fijación de fósforo en los suelos formados bajo condiciones similares de meteorización, generalmente aumenta con el aumento del contenido de arcillas. Esto se ilustra con la información presentada en la Tabla 3. La cantidad de fertilizante fosfatado requerida para dar aproximadamente la misma cantidad de fósforo extraída con ácido diluído en tres ultisoles aumenta en proporción relativa a su conteni-

TABLA 3. Fijación de fósforo en tres ultisoles con relación a su contenido de arcillas (Datos tomados de Woodruff, 1963)

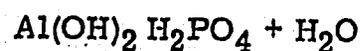
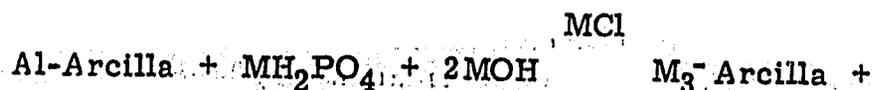
Serie de Suelos	Arcilla %	Fósforo adicionado p.p.m.	Fósforo extraído con ácido diluido p.p.m.
Norfolk	2,0	27	20
Cecil	7,5	52	17
Georgeville	38,0	174	22

A pesar de que la adsorción del fósforo por los suelos generalmente aumenta con el aumento del contenido de óxidos de hierro libre, la relación no es siempre aparente. Cuando unos suelos del Brasil se colocaron dentro del grupo taxonómico apropiado, se presentó una alta correlación entre el fósforo fijado y el contenido de óxido de hierro libre (20). Los latosoles (oxisoles), adsorben menos fósforo que los podzoles rojo-amarillentos (ultisoles), a un determinado contenido de óxido de hierro (Tabla 4). Las diferencias en adsorción de fósforo se atribuyeron a diferencias en las formas del óxido de hierro y/o a diferencias en la cantidad de la superficie expuesta. Es posible que el hierro en los latosoles, fuera de naturaleza más cristalina que aquél de los podzoles rojo amarillentos.

La reacción del fósforo con el aluminio intercambiable y los productos de hidrólisis del aluminio, se encontró que es un mecanismo importante de la fijación del fósforo en suelos ácidos minerales (6). El esquema de la reacción sugerida fue:

TABLA 4. Fijación de fósforo en suelos del Brasil con relación a su contenido de óxido de hierro (Datos tomados de Pratt, et al., 1969).

Suelos	Oxido de hierro libre	Fijación de fósforo meq/g. de suelo
Ultisol	2,1	1,5
	6,5	4,5
Latosol	4,0	1,8
	19,9	4,5



en la cual M representa calcio, potasio o sodio. Basado en información de la solución del suelo y suponiendo que el producto de la reacción tiene la composición general de la variscita, los autores calcularon el producto de solubilidad del material, el cual encontraron que era más soluble que dicho mineral.

Cuando el fertilizante fosfatado fue adicionado a suelos altamente meteorizados, las formas del fósforo del suelo extraídas subsecuentemente, fueron principalmente las fracciones de fosfatos de hierro y aluminio (Tabla 5). La presencia de arcillas silicatadas y el contenido de óxido de hierro influyeron en la proporción relativa de los fosfatos de hierro y aluminio que se formaron (9).

La fracción de fosfatos de aluminio aumentó más que la de fosfatos de hierro en un ultisol que contenía cantidades apreciables de caolinita. En el oxisol que contenía solamente trazas de caolinita y con un contenido muy alto de óxido de hierro el fosfato añadido se convirtió principalmente en fosfato de hierro.

Estudios efectuados por agrónomos de la T.V.A. han suministrado una gran cantidad de información sobre las reacciones que tienen lugar cuando se añade a un suelo mineral ácido con superfosfato (fosfato monocálcico) (19). Cuando se coloca en el suelo un gránulo de superfosfato, el agua inicialmente se mueve dentro del gránulo. La solución que se separa del gránulo tiene un pH de 1 a 1,48 y la concentración del fósforo es de 4 a 4,5M y la de calcio es 1,3M. Tan pronto como la solución ácida hace contacto con el suelo que la rodea, disuelve los compuestos de hierro, aluminio, potasio y manganeso. El hierro y aluminio disueltos reaccionan con el fósforo para formar compuestos precipitados. Estas reacciones de precipitación continúan a medida que la solución se mueve en el suelo. Los productos de reacción formados son compuestos complejos de fósforo que contienen aluminio, hierro, potasio y calcio.

La mayoría del fósforo agregado a andosoles resulta en compuestos asociados con el aluminio. Cuando el fósforo se agregó a cinco suelos derivados de cenizas volcánicas de Costa Rica, un 83% del fósforo pasó a la fracción de los fosfatos de aluminio (10). Los compuestos de fósforo formados en suelos derivados de cenizas volcánicas, después de la adición de fosfatos, presentan propiedades químicas similares a aquéllas de las taranakitas. Cuando se hizo reaccionar fosfato de amonio con alofana, se formó una taranakita insoluble sustituida con amonio. Más de $2\frac{1}{2}$ veces de fósforo reaccionó con alofana a pH 4 que a pH 7 (24).

Un estudio realizado con un ultisol de Carolina del Norte mostró que 6 meses después de la adición de superfosfato se formaron cantidades iguales de compuestos de fós-

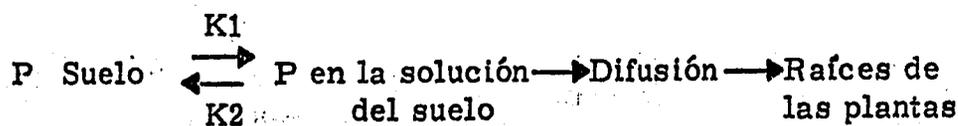
TABLA 5 Formas de fósforo extraídas cuando se adicionó fosfatos a un oxisol y a un ultisol (Datos tomados de Dunbar y Baker, 1965).

Suelo	Oxido de hierro libre	Distribución del fósforo agregado		
		P-Ca	P-Al	P-Fe
		ppm		
Ultisol	2,3	7	296	133
Oxisol	12,7	14	95	300

foro asociados con hierro y aluminio (Tabla 6). Con el tiempo, sin embargo, se presentó disminución en los fosfatos de aluminio y un aumento en los fosfatos de hierro. La disminución de los fosfatos de aluminio se debió, probablemente, a utilización de esta forma por las plantas y a conversión en fosfatos de hierro más insolubles (22).

Evaluación química del fósforo del suelo para estimar el fósforo aprovechable.

Los factores que influyen en el suministro del fósforo para las plantas han sido representados por Gunary y Sutton (16), en la siguiente forma:



Capacidad Tasa Intensidad

La concentración del fósforo en la solución del suelo es importante en la nutrición vegetal debido a que las raíces de las plantas absorben fósforo de esta solución. El movimiento del fósforo hacia las raíces por difusión para remplazar al que ha sido tomado por la planta, es depen-

TABLA 6. Cantidades de fosfatos de hierro y aluminio en un suelo Georgeville en períodos indicados para el testigo y para la adición de 685 kg/ha. de P y la relación P-Al a P-Fe del fósforo del suelo formado por la adición de fosfatos (Datos tomados de Shelton y Coleman, 1968).

Tiempo después de aplicación (años)	P-Al Aumento			P-Fe Aumento			P-Al/ P-Fe
	Testigo	+ P	Kg/ Ha de P	Testigo	+ P	Kg/ Ha de P	
½	36	408	372	149	457	308	1,20
1	58	259	201	161	375	214	0,93
3	52	228	176	159	483	324	0,54
8	31	127	96	140	508	368	0,26

diente del gradiente de concentración de fósforo en la solución y de las interacciones entre el fósforo de la solución y de la fase sólida. Una concentración de fósforo en la solución del suelo de 0,07 p.p.m. en un suelo franco-arcilloso fue adecuada para un cultivo de mijo, pero se requirieron 0,2 p.p.m. en un suelo arenoso (14).

La cantidad de fósforo en la solución del suelo es una función de la capacidad de adsorción de fósforo y del porcentaje de saturación de la capacidad de adsorción. En suelos ácidos minerales la capacidad de adsorción está determinada principalmente por las cantidades y naturaleza de los óxidos hidratados de hierro y aluminio y de las cantidades de aluminio intercambiable. Suelos con baja capacidad de adsorción de fósforo requieren una saturación más alta de la capacidad de adsorción y una concentración más alta de fósforo en la solución del suelo, para que se obtenga un crecimiento óptimo, que suelos con alta capacidad de adsorción de fósforo (28). Cuando se neutralizó primero el aluminio intercambiable se obtuvo un crecimiento óptimo a concentraciones menores de fósforo en la solución del suelo.

Para estimar los requerimientos de fósforo de los suelos, Beckwith (1), propuso la medida de la cantidad de fósforo sorbida por un suelo a una concentración estándar de fósforo en el líquido sobrenadante. Las isotermas de sorción de fósforo suministran información sobre la cantidad de fosfatos (capacidad) requerida para dar varias concentraciones de fósforo en la solución del suelo (intensidad), y la inclinación de las curvas indican la capacidad amortiguadora del fósforo. Esta aproximación ha sido usada por muchos investigadores para determinar los requerimientos de fósforo de suelos altamente meteorizados (13, 14, 15).

En la tabla 7 se muestran ejemplos de cuánto fosfato se tiene que añadir a suelos de diferentes propiedades químicas para obtener 0,1 y 0,2 p.p.m. en la solución del suelo. Se requirieron altas tasas de fósforo para llevar el nivel de fósforo en la solución del suelo a una con-

centración óptima de ultisoles y oxisoles altamente meteorizados, comparados con un inceptisol débilmente meteorizado. Se necesitaron hacer adiciones de fosfatos extremadamente altas en el caso de suelos derivados de cenizas volcánicas que contenían alofana. Estos datos ilustran los altos requerimientos de fósforo de muchos de los suelos en el trópico y hacen resaltar la necesidad del estudio de prácticas que aumenten la eficiencia de la utilización de los fertilizantes fosfatados.

Otra forma de evaluar el contenido de fósforo en los suelos es mediante el uso de análisis de suelos. Un análisis de suelos confiable debe extraer la proporción del fósforo lábil que se encuentra en equilibrio con el fósforo de la solución del suelo. En tres suelos altamente meteorizados que recibieron una alta tasa de fósforo se equilibró una solución que contenía P^{32} con un 44% de la fracción del fosfato de aluminio y solamente un 20% de la fracción del fosfato de hierro (9). Por lo tanto, para suelos altamente meteorizados, las determinaciones del suelo cuyos extractantes remuevan selectivamente los fosfatos de aluminio proveerán una medida precisa de la aprovechabilidad del fósforo del suelo. El fósforo extraído con una solución ácida diluída (HCl 0,05N + H_2SO_4 0,025N) correlacionó altamente con el contenido de fosfatos de aluminio extraídos de un ultisol fertilizado (22). Los rendimientos de maíz en este suelo franco-arcilloso correlacionaron altamente con el fósforo extraído con la solución ácida diluída, encontrándose el nivel crítico entre 8 y 10 p.p.m. de P (18).

RESUMEN

El fosfato nativo del suelo en suelos altamente meteorizados de los trópicos se encuentra principalmente en forma inerte (ocluída) y como fosfatos de hierro de aluminio. Los suelos derivados de cenizas volcánicas tienen un contenido de fósforo total mucho más alto que los latosoles. Mientras menos meteorizados los suelos mayor fue el porcentaje de fosfatos de calcio en la fracción de fósforo inor-

TABLA 7. Cantidades de fósforo sorbido requeridas para dar concentraciones en la solución del suelo 0.1 y 0.2 p. p. m. de P (Datos tomados de Rivera, 1971).

Suelo	Arcilla mineral dominante	Arcilla %	P sorbido $\mu\text{g/g}$ suelo		Capacidad amortiguadora del P $\mu\text{g/g}$
			Solución del suelo P 0,1 p.p.m.	Solución del suelo P 0,2 p.p.m.	
Inceptisol	Montmorillonita	27	65	83	13
Ultisol	Caolinita	38	285	360	75
Oxisol	Caolinita	36	310	395	85
Andosol	Alofana	11	500	670	170

gánico activo. Cuando el suelo nativo presentó un pH mayor o igual a 6,1, más del 50% del fósforo inorgánico activo se encontró en la forma de fosfatos de calcio. La ocurrencia de estaciones secas y húmedas bien delimitadas favorecieron la formación de fosfatos de hierro, mientras que un drenaje impedido resultó en una mayor presencia del fósforo como fosfatos de aluminio.

Los fertilizantes fosfatados se convirtieron muy rápidamente en fosfatos de hierro y aluminio. La presencia de arcillas silicatadas favoreció inicialmente la transformación de la mayoría del fosfato añadido a forma de fosfato de aluminio, pero con el tiempo éste se convirtió gradualmente en fosfatos de hierro. Un compuesto similar a la taranakita se forma en suelos derivados de cenizas volcánicas que contienen alófana. Cantidades mayores de fosfato reaccionaron con alófana a pH 4 que a pH 7.

Las isotermas de adsorción de fosfatos son un buen método para evaluar la capacidad, intensidad y capacidad amortiguadora de los fosfatos de los suelos. Una concentración en la solución del suelo de 0,07 p.p.m. de P parece ser un valor adecuado de intensidad para los suelos que contengan una apreciable cantidad de arcilla. El fósforo en la solución del suelo de aquéllos altamente meteorizados se encuentra en equilibrio principalmente con fosfato de aluminio. Por lo tanto, soluciones extractoras para análisis de suelos que remuevan selectivamente los fosfatos de aluminio deben proporcionar una buena medida de la aprovechabilidad del fósforo.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- BECKWITH, R.S. 1964. Sorbed phosphate at standard supernatant concentration as an estimate of the phosphate needs of soils. *Aust. J. Exp. Agr. and An. Hus.* 5:52-58.
- 2.- BENAVIDES, S.T. 1963. Distribution on native phosphorus and phosphorus sorption capacity of some tropical soils of Colombia. M. S. Thesis, Oklahoma State University.
- 3.- BLASCO, M. 1969. Chemical characteristics of the volcanic ash soils of Nariño, Colombia. *Proceedings of Panel on Volcanic Ash Soils in Latin America.* B. 8.1 - B. 8.9.
- 4.- BLASCO, M., and N.A. BOHORQUEZ. 1968. Fractionation of phosphorus in tropical soils of Colombia. *Agrochimica* 12: 173-179.
- 5.- CHANG, S.C., and M.L. JACKSON. 1958. Soil phosphorus fractions in some representative soils. *J. Soil Sci.* 9: 109-119.
- 6.- COLEMAN, N.T., J.T. Thorup, and W.A. JACKSON. 1960. Phosphate-sorption reactions that involve exchangeable Al. *Soil Sci.* 90: 1-7.
- 7.- COLEMAN, R. 1945. The mechanism of phosphate fixation by montmorillonitic and kaolinitic clays. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 9: 72-78.

- 8.- DAHNKE, W.C., J.L. MALCOLM and M.E. MENDEZ, 1964. Phosphorus fractions in selected soil profiles of El Salvador as related to their development, Soil Sci. 98: 33-38.
- 9.- DUNBAR, A.D. and D.E. BAKER. 1965. Use of isotopic dilution in a study on inorganic phosphorus fractions from different soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 29:259-262.
- 10.- FASSBENDER, H.W. 1968. Phosphate retention and its different chemical forms under laboratory conditions for 14 Costa Rican soils. Agrochimica 12:512-521.
- 11.- FASSBENDER, H.W. 1969. Phosphorus deficiency and fixation in Volcanic Ash Soils in Latin America. B.4.1 - B.4.10.
- 12.- FASSBENDER, H.W., L. MUELLER and F. BALLERDI. 1968. Estudio del fósforo en suelos de América Central. II. Formas y relación con la planta. Turrialba 18:333-347.
- 13.- FOX, R.L., S.M. HASAN and R.C. JONES. 1971. Proc. Int. Symp. Soil Fert. Evaln, New Delhi 1:857-864.
- 14.- FOX, R.L., and E.J. KAMPRAH. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 34: 902-907.
- 15.- FOX, R.L., D.L. PLUCKNETT, and A.S. WHITNEY. 1968. Phosphate requirements of Hawaiian Latosols and residual effects of fertilizer phosphorus. Int. Cong. Soil Sci., Trans. 9th. 2: 301-310.

- 16.- GUNARY, D. and C.D. SUTTON. 1967. Soil factors affecting plant uptake of phosphate. J. Soil Sci. 18:167-173.
- 17.- HSU, P. H., and M.L. JACKSON. 1960. Inorganic phosphate transformations by chemical weathering in soils as influenced by pH. Soil Sci. 90:16-24.
- 18.- KAMPRATH, E.J. 1967. Residual effect of large applications of phosphorus on high phosphorus fixing soils. Agron J. 59:25-27.
- 19.- LINDSAY, W.L., and H.F. STEPHENSON. 1959. Nature of the reactions of monocalcium phosphate monohydrate in soils: I-The solution that reacts with the soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 23:12-18.
- 20.- PRATT, P.F., F.F. PETERSON and C.S. HOLZHEY. 1969. Qualitative mineralogy and chemical properties of a few soils from Sao Paulo, Brasil. Turrialba 19:491-496.
- 21.- RIVERA, C. 1971. Phosphate fixation by tropical soils. M.S. Thesis. North Carolina State University.
- 22.- SHELTON, J. E., and N.T. COLEMAN. 1968. Inorganic phosphorus fractions and their relationship to residual value of large applications of phosphorus on high phosphorus fixing soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 32: 91-94.
- 23.- VIERA, L. S., and E. BORNEMISZA. 1968. Categorías de fósforo en los principales grandes grupos de suelos en la Amazonia de Brasil. Turrialba 18:242-248.

- 24.- WADA, K. 1959. Reactions of phosphate with allophane and halloysite. Soil Sci. 87: 325-330.
- 25.- WESTIN, F.C. and J.G. DE BRITO. 1969. Phosphorus fractions of some Venezuelan soils as related to their stage of weathering. Soil Sci. 107: 194-202.
- 26.- WILD, A. 1950. The retention of phosphate by soil. A review. J. Soil Sci. 1:221-238.
- 27.- WOODRUFF, J.R. 1963. Relation of phosphorus availability to the adsorption maximum of soils as determined by the Langmuir isotherm. M.S. Thesis. North Carolina State University.
- 28.- WOODRUFF, J. R., and E.J. KAMPRATH. 1965. Phosphorus adsorption maximum as measured by the Langmuir isotherm and its relationship to phosphorus availability. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 29: 148-150.