

Dinámica del fósforo en el suelo después de cinco fertilizaciones consecutivas^{*1/}

JOAQUIN GAMBOA J, MARIO BLASCO L.**

ABSTRACT

The soils (alluvials influenced by volcanic materials) used in this investigation were obtained from the fields of the IICA-CITEI, Turrialba, Costa Rica. This area which belongs to a very humid sub-tropical forest, lies at about 620 m above sea level and the mean average temperature and mean average rainfall are 22°C and 2.600 mm per year respectively.

The objectives of this study were to determine the P-fractions status in plots receiving 2000 kg/P₂O₅/ha after 5 harvests of corn over a three years period.

Results show a low soluble P concentration, giving major intensity of retention processes until 30 cm of depth, Al-P was predominant above the other. Seventy per cent of applied-P pass to insoluble forms of Al, Fe and Ca. Application of P during the crop, two times at least, is recommended. — The authors.

Introducción

El fósforo es catalogado como elemento doblemente crítico, debido a las bajas concentraciones en que se encuentra en el suelo y a los fenómenos de retención ya sea por los sesquióxidos de hierro y aluminio, por el calcio o por materiales de tipo amorfo (9, 10, 12). El mecanismo de la fijación se presenta a partir de precipitaciones en forma de compuestos de hierro y aluminio y a la reacción con arcillas silicatadas y materiales amorfos (11).

De acuerdo con Wada (24), la alófana y la halloisita al reaccionar con los iones fosfato, forman las llamadas taranakitas; al respecto Lindsay y Stephenson (16) demostraron que cuando se agrega al suelo un fertilizante cuya fuente de fósforo sea superfosfato granulado se forman dos clases de taranakitas ($H_2K_3Al_2(PO_4)_8$ y $H_2K(AlFe)_2 \cdot 6H_2O$). Lo anterior concuerda con las apreciaciones de León y Coleman, citados por Pantoja (20); estos autores encontraron que suelos que conte-

nían alófana retenían mayores cantidades de fósforo que los suelos con altos contenidos de goethita y hematita y apreciables cantidades de óxidos hidratados de hierro.

En lo que respecta a la distribución de los fosfatos, Fassbender (13) anota que después de haber aplicado 1 660 kilogramos de P₂O₅ por hectárea, a suelos cultivados con cacao, se encontró una predominancia de fosfatos de aluminio en los primeros 7,5 cm de la capa arable.

Parece que las pérdidas por lixiviación son insignificantes, aunque en algunos casos, como en suelos de Florida, EE UU, cuya textura es bastante arenosa, se han encontrado pérdidas a causa de este proceso (19).

En resumen se puede decir que la retención es mayor en suelos arcillosos ácidos que en suelos arenosos neutros o básicos. Otras condiciones que favorecen esta retención pueden ser: la concentración de iones fosfato que se aplique al suelo, el método de aplicación y la clase de fertilizante usado, lo mismo que el tamaño del fertilizante fosfatado (11).

Materiales y métodos

Los suelos utilizados en el experimento, están localizados en los terrenos del IICA-CITEI, Turrialba, Costa Rica. La región pertenece al bosque subtropical muy

* Recibido para la publicación el 3 de marzo de 1976.

1/ Parte del trabajo de Tesis para el grado de Magister Scientiae del primer autor en la Escuela para Graduados del IICA-CITEI - Turrialba, Costa Rica.

** Actualmente profesor Asociado Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño - Pasto, Colombia. Especialista en Investigación, IICA-Zona Andina, Lima - Perú, respectivamente.

húmedo, con una altitud de 630 m sobre el nivel del mar, una temperatura promedio de 22,3°C y una precipitación pluvial media de 2682,5 mm. Los suelos de topografía plana, pobres e imperfectamente drenados, pertenecen a la serie Instituto de formación fluviolacustre, con influencias volcánicas (2).

Durante las cinco cosechas consecutivas de maíz (*Zea mays*, var. 'Rocamex'), estos suelos recibieron en total, 2 000 kg/P₂O₅/ha, siendo su fuente superfosfato simple (20 por ciento de P₂O₅). Además, se adicionaron 1 000 kg/ha de N y K en base a urea y cloruro de potasio respectivamente (17).

El fraccionamiento del fósforo se efectuó de la siguiente manera:

Fósforo total se utilizó el método de Ulrich y colaboradores (23), a partir de una mezcla de ácido nítrico, sulfúrico, clorhídrico y perclórico concentrados.

Fósforo inorgánico, se siguió el método de Chang y Jackson, con las modificaciones propuestas por Sen Gupta y Cornfield (22) en el sentido de extraer los fosfatos mono y dicálcicos (no apatíticos) antes de la extracción de los fosfatos de aluminio. Los fosfatos solubles se extrajeron con NH₄Cl-1N, los fosfatos cálcicos no apatíticos con CH₃CO₂H-0,5N, los de aluminio con NH₄F-0,5N, los férricos con NaOH-1N y los fosfatos cálcicos apatíticos con H₂SO₄-0,5N (6).

Fósforo orgánico se determinó a partir del método de ignición de Saunders y Williams (21) tratando el suelo residual con H₂SO₄-0,2N.

El fósforo inerte se calculó por diferencia entre el fósforo total y la suma de las fracciones inorgánicas y orgánica (22).

Resultados y discusión

La concentración y formas de fósforo estudiadas, así como los porcentajes de las distintas fracciones con relación al fósforo total se presentan en los Cuadros 1 y 2.

Los resultados indican que el P-total (1 450 a 3 250 ppm) determinado, está dentro del ámbito presentado por varios investigadores para los suelos de origen volcánico de Costa Rica (8, 10, 14). De acuerdo a Fassbender (11) los suelos con influencias de materiales volcánicos de tipo alofánico presentan mayores contenidos de P-total que los suelos de trópico abundantes en sesquióxidos de Fe y Al. Además al aumentar la materia orgánica y con ella los fosfatos orgánicos se obtiene generalmente un mayor contenido de P-total (5).

De las fracciones estudiadas el mayor porcentaje corresponde al P-orgánico, que representa entre el 23,9 al 46,6 por ciento del P-total. Resultados que coinciden con los observados en otras regiones tropicales (1, 4, 7).

De otra parte, en cuanto a las fracciones inorgánicas, se observa un aumento en los fosfatos de aluminio y de hierro, lo mismo que en fósforo inerte; este resultado no es más que el efecto del Al y el Fe soluble, tan común

en suelos intemperizados, siendo la forma inerte altamente insoluble (11).

En cuanto a retención del fósforo aplicado, se puede observar que al absorber una cosecha normal de maíz aproximadamente 250 kg de fósforo/ha (3) y habiéndose aplicado en forma neta 873 kg de este elemento en comparación con el testigo, se presentaron en los primeros 15 cm de profundidad los siguientes porcentajes de P-retenidos:

a) Fosfatos de Aluminio :	22,8 por ciento
b) Fosfatos de Hierro :	12,1 por ciento
c) Fosfatos de Calcio (apatítico) :	4,2 por ciento
d) Ca no apatítico :	2,5 por ciento

Para la profundidad 15-30 cm la retención fue:

a) Fosfatos de Aluminio :	12,0 por ciento
b) Fosfatos de Hierro :	9,4 por ciento
c) Fosfatos Ca apatítico :	0,9 por ciento
d) Fosfatos Ca no apatítico:	4,8 por ciento

En total, con referencias a las fracciones inorgánicas se puede concluir que un 41,17 por ciento queda retenido en los primeros 30 centímetros del suelo y que un 27,1 por ciento entre los 30 y 60 centímetros de profundidad, datos que coinciden con los resultados obtenidos por Morillo y Fassbender (18) en suelos aluviales de Honduras y Fassbender (8), en suelos de Costa Rica (Juan Viñas).

La suma de los fosfatos de Al y de Fe superan aproximadamente en la proporción de 3:1 a los de Ca. Este resultado confirma los conceptos presentados por Fassbender (11) en el sentido de que en suelos en donde existe meteorización química adecuada, los fosfatos de Al y de Fe priman sobre los de Ca.

En el presente caso, no pudo existir una meteorización química drástica, ya que la concentración de las fracciones de Al y de Fe son relativamente similares y es de conocimiento que los fosfatos férricos abundan en suelos bastante intemperizados (15).

Al relacionar el P-total con el P-apatítico, P-Al y P-Fe se encontraron los siguientes coeficientes de correlación: $r = 0,5951$, $r = 0,3774$, $r = 0,1747$ respectivamente. En términos de asociación, significa que solamente un 34,41 por ciento de la variancia observada en la retención del P por el Ca; 13,69 por ciento por el Al y 2,99 por ciento de la del Fe, es explicada por la relación lineal de la concentración del P-total. Para conocer el grado de relación entre el P-Al y el P-Fe; el P-Al y el P-Ca apatítico y el P-Fe y P-Ca apatítico, se efectuaron correlaciones cuyos coeficientes fueron: $r = 0,3774$, $r = 0,6070$, $r = 0,2990$ respectivamente, de los cuales en términos de asociación (r^2), solamente el P-Al con el P-Ca apatítico presentaron una asociación de 36 por ciento, siendo para los otros dos relativamente baja.

La concentración de P-fácilmente reemplazable es muy baja. Como lo señala Fassbender (12), al aplicar fertilizantes fosfatados a un suelo ácido, prácticamente la fracción que no es absorbida por la planta reacciona con el Al y el Fe para formar precipitados cristalinos o amorfos de menor solubilidad,

Cuadro 1—Concentración y formas de fósforo.

Formas	Profundidad	T	N	P	NP	NK	PK	NPK
	cm	ppm						
Fósforo total	0—15	2325,0	2325,0	3250,0	3150,0	2750,0	3200,0	2175,0
	15—30	1875,0	2450,0	2450,0	2950,0	2575,0	2200,0	2700,0
	30—60	1450,0	1950,0	2425,0	2325,0	2200,0	2050,0	1775,0
	60—100	1550,0	1775,0	1875,0	2050,0	1700,0	1550,0	1450,0
Fósforo orgánico	0—15	795,0	1025,0	1010,0	1030,0	1020,0	1075,0	885,0
	15—30	835,0	915,0	950,0	1060,0	1010,0	1025,0	795,0
	30—60	580,0	665,0	580,0	730,0	810,0	665,0	565,0
	60—100	515,0	595,0	715,0	675,0	690,0	610,0	540,0
Fósforo soluble en NH ₄ Cl	0—15	7,0	5,6	7,5	6,8	7,5	8,1	7,5
	15—30	5,6	4,6	5,6	4,6	6,8	8,1	4,6
	30—60	5,0	2,8	8,1	5,0	6,8	7,5	6,8
	60—100	4,6	5,6	6,8	5,0	5,0	6,8	5,0
Fosfatos de aluminio	0—15	225,0	290,0	402,0	462,5	285,0	337,5	315,5
	15—30	275,5	315,0	340,5	355,0	257,5	355,0	290,0
	30—60	290,0	295,0	252,5	265,5	257,5	242,5	210,0
	60—100	382,5	347,5	275,5	295,0	377,5	241,0	282,5
Fosfatos de hierro	0—15	280,0	292,5	360,0	367,5	317,0	342,5	342,0
	15—30	267,5	300,0	292,5	327,5	275,0	360,0	297,5
	30—60	322,5	310,0	267,5	275,0	280,0	250,0	280,0
	60—100	347,5	420,0	305,0	347,5	292,5	275,0	305,0
Fosfatos de calcio no apatítico	0—15	40,0	30,0	52,5	61,2	61,0	55,0	42,5
	15—30	47,0	22,5	90,0	91,7	55,0	48,7	48,7
	30—60	47,5	27,5	52,5	52,5	35,0	24,0	22,5
	60—100	43,0	42,5	80,0	46,2	27,5	30,0	42,5
Fosfatos de calcio apatítico	0—15	102,5	112,5	125,0	125,0	122,5	133,7	146,2
	15—30	143,7	131,2	116,2	97,5	127,5	161,2	170,0
	30—60	116,2	110,0	118,7	116,2	163,7	112,5	138,7
	60—100	137,5	143,7	93,7	97,5	140,0	137,5	140,0
Fósforo inerte	0—15	875,5	569,4	1293,0	1097,0	937,0	1248,2	463,3
	15—30	300,7	690,3	655,2	1013,0	843,2	242,0	1094,2
	30—60	88,8	539,7	1145,7	880,8	647,0	748,5	532,0
	60—100	119,9	220,7	399,0	583,8	167,5	249,7	135,0

Cuadro 2.—Cantidades porcentuales de las diferentes formas de fósforo con respecto al fósforo total

Formas	Profundidad	T	N	P	NP	NK	PK	NPK
	cm	— Por ciento —						
Fósforo total	0—100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Fósforo orgánico	0—15	34,19	44,08	31,07	32,69	37,09	33,59	40,68
	15—30	44,53	38,57	38,77	35,93	39,22	46,59	29,44
	30—60	40,00	34,10	23,91	31,39	36,81	32,43	31,83
	60—100	33,22	33,52	38,13	32,92	40,58	39,35	37,24
Fósforo soluble en NH ₄ Cl	0—15	0,30	0,24	0,23	0,21	0,27	0,25	0,34
	15—30	0,29	0,18	0,22	0,15	0,26	0,36	0,17
	30—60	0,34	0,14	0,33	0,21	0,30	0,36	0,38
	60—100	0,29	0,31	0,36	0,24	0,29	0,43	0,34
Fosfatos de aluminio	0—15	9,67	12,47	12,38	14,66	10,36	10,54	14,50
	15—30	14,69	12,85	13,80	12,03	10,00	16,13	10,74
	30—60	20,00	15,12	10,41	11,41	11,70	11,82	11,83
	60—100	24,67	10,57	14,68	14,39	22,20	15,54	19,44
Fosfatos de hierro	0—15	12,04	12,58	11,07	11,66	11,52	10,70	15,72
	15—30	14,26	12,26	11,93	11,10	10,67	16,36	11,01
	30—60	20,00	15,89	11,01	11,82	12,77	12,19	15,77
	60—100	22,41	23,66	16,26	16,95	17,21	17,74	21,03
Fosfatos de calcio no apatítico	0—15	1,72	1,29	1,61	1,94	2,21	1,71	1,95
	15—30	2,50	0,91	3,67	3,10	2,13	2,21	1,80
	30—60	3,25	1,40	2,16	2,25	1,59	1,17	1,26
	60—100	2,77	2,39	4,27	2,25	1,61	1,93	2,93
Fosfatos de calcio apatítico	0—15	4,40	6,33	3,84	3,96	4,45	4,17	6,72
	15—30	7,66	5,34	4,74	3,30	4,95	7,32	6,29
	30—60	8,01	5,64	4,89	4,99	7,44	5,48	8,94
	60—100	8,87	8,09	4,99	4,75	8,23	8,87	9,65
Fósforo inerte	0—15	37,65	24,49	39,78	34,82	34,07	39,00	21,30
	15—30	16,03	28,17	26,74	34,33	32,74	11,00	40,52
	30—60	6,12	27,67	47,24	37,88	29,40	36,51	30,02
	60—100	10,63	12,43	21,28	28,47	9,85	16,10	9,31

Conclusiones

- 1—A pesar de haberse adicionado altas cantidades de fósforo, la fracción soluble determinada se considera como muy baja.
- 2—Los procesos de retención del fósforo se presentan con mayor intensidad en los primeros 30 cm del suelo, primando la fracción de P-Aluminio sobre las demás.
- 3—Se ratifica el predominio del fósforo unido al Al y al Fe sobre los de calcio en suelos de meteorización química adecuada.
- 4—Por lo menos un 70 por ciento del fósforo aplicado al suelo, pasa a formas insolubles de Fe, Al y Ca.
- 5—El P-orgánico representó el mayor porcentaje en relación con el P-total.
- 6—Dada la retención que se presenta en los primeros 60 cm del suelo, sería conveniente efectuar la aplicación de fertilizante fosforado a través del período vegetativo, en por lo menos dos épocas.

Resumen

Se efectuó un estudio sobre el fraccionamiento del fósforo en muestras de suelo, con influencia de materiales volcánicos, en un lote situado en terrenos del IICA-CTEI en Turrialba, Costa Rica.

El área corresponde al bosque sub-tropical húmedo, con una altitud de 630 m.s.n.m., una temperatura de 22°C y una precipitación promedio de 2.600 mm/año. Los objetivos fueron: determinar la concentración de las diferentes fracciones del fósforo a distintas profundidades del perfil del suelo, en parcelas que recibieron en total 2 000 kg de P_2O_5 /ha en el transcurso de cinco cosechas consecutivas de maíz; estudiar el fenómeno de retención y obtener información sobre el mejor uso de los fertilizantes fosfatados en suelos del sub-trópico muy húmedo.

Los resultados indican una baja concentración de P-soluble, en donde los procesos de retención se presentaron con mayor intensidad en los primeros 30 cm del suelo, primando la fracción de P-aluminio sobre las demás.

Por lo menos un 70 por ciento del P-aplicado pasa a formas insolubles de Al, Fe y Ca. Dada la retención detectada se recomienda aplicar el fósforo a través del período vegetativo en por lo menos dos épocas.

Literatura citada

1. ACQWAYE, D. K. Some significance of soil organic phosphorus mineralization in the phosphorus nutrition of cacao in Ghana. *Plant and Soil* 19(1):65-80. 1963.
2. AGUIRRE, V. Estudio de los suelos del área del Centro Tropical de Enseñanza e Investigación. Tesis Mag. Sc. Turrialba, IICA, 1971. 100 p. (Mimeo).
3. BERGER, J. Maize production and manuring of maize. Geneva, Centre d'Etude de l'azote, 1962. 308 p.
4. BLASCO, M., y BOHORQUEZ, N. Fractionation of phosphorus in tropical soils of Colombia. *Agrochimica* 12:173-178. 1968.
5. BORNEMISZA, E. El fósforo orgánico en suelos tropicales. *Turrialba* 16(1):33-38. 1966.
6. CHANG, S. C. y JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science* 81(2):134-144. 1957.
7. ENWEZOR, W. O. y MOORE, A. W. Phosphorus status of some Nigerian soils. *Soil Science* 102(5):322-328. 1966.
8. FASSBENDER, H. W. Formas de los fosfatos en algunos suelos de la zona oriental de la Meseta Central y de las Llanuras Atlánticas de Costa Rica. *Fitotecnia Latinoamericana* 3(1-2):187-202. 1966.
9. ———. La adsorción de fosfatos en suelos fuertemente ácidos y su evaluación usando la isoterma de Langmuir. *Fitotecnia Latinoamericana* 3(1-2):203-216. 1966.
10. ———. Phosphate retention and its different chemical forms under laboratory conditions for 14 Costa Rica soils. *Agrochimica* 12(6):512-521. 1968.
11. ———. Fósforo. In *Química de suelos*. San José, IICA, 1975. pp. 268-307.
12. ———. Phosphorus fixation in tropical soils. *Agri Digest* 18:20-28. 1969.
13. ———. Form of phosphate after nine years of superphosphate fertilization of cacao. *Agrochimica* 13(1-2):39-43. 1969.
14. ———, MULLER, I. y BALERDI, F. Estudio del fósforo en suelos de América Central. II Formas y su relación con las plantas. *Turrialba* 18(4):333-347. 1968.
15. HSU, P. H. y JACKSON, M. I. Inorganic phosphate transformation by chemical weathering of soil as influenced by pH. *Soil Science* 90(1):16-32. 1960.
16. LINDSAY, W. I. y STEPHENSON, H. F. Nature of the reaction of monocalcium phosphate monohydrate in soils. I. The solutions that reacts with the soil. *Soil Science Society of America Proceedings* 23(3):12-17. 1959.
17. MAZARIEGOS, F. J. Abonamiento con N-P-K en maíz y frijol y su efecto residual sobre la productividad y propiedades del suelo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, IICA, 1969. 191 p.
18. MORILLO, R. M. y FASSBENDER, H. W. Formas y disponibilidad de fosfatos en suelos de la cuenca baja del Río Choluteca, Honduras. *Turrialba* 18(1):23-26. 1968.

- 19 NELSON, W. I. y STANFORD, G. Changing concepts of plant nutrient behavior and fertilizer use. *Advances in Agronomy* 105-112. 1958.
- 20 PANTOJA, C. Fraccionamiento del fósforo en algunos suelos de clima medio del departamento de Nariño. Tesis Ing Agr Pasto, Universidad de Nariño. 1969. 111 p.
- 21 SAUNDERS, H. M. y WILLIAMS, E. G. Determination of total organic phosphorus in soils. *Journal of Soil Science* 6(2):25-260. 1965.
- 22 SEN GUPTA, M. B. y CORNFIELD, A. H. Phosphorus in calcareous soils. II. Determination of the organic phosphorus content of calcareous soils and its relation to soil calcium carbonate content. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 13:665-668. 1962.
- 23 ULRICH, B., HEMPLER, K. y BENZLER, J. H. Zur analytischen Bestimmung von Gesamtphosphorsäure und laktatlöslicher phosphorsäure in Bodenproben. *Die Phosphorsäure* 20:3-14-347. 1960.
- 24 WADA, K. Reaction of phosphate with allophane and halloysite. *Soil Science* 87(6):325-330. 1959.