

FORMAS DE FOSFORO EN SUELOS ALTAMENTE METEORIZADOS DEL SUR DE LA PROVINCIA DE MISIONES

C FERNANDEZ LOPEZ¹, S VAZQUEZ¹, HC DALURZO¹

¹Cátedra de Edafología F.C.A. UNNE, Sargento Cabral 2131 3400 Corrientes Argentina. email: carolfl@agr.unne.edu.ar

Recibido 30 de mayo de 2002, aceptado 11 de noviembre de 2002

PHOSPHORUS FORMS IN HIGHLY WEATHERED SOILS OF SOUTH MISIONES PROVINCE

The low phosphorus availability of Oxisols, Ultisols, and Alfisols of Misiones is an important limitation for agricultural production, though their high total phosphorus content. Our objectives were to determine the distribution of organic- (Po) and inorganic (Pi) phosphorus forms in these soils and to determine the relationships between phosphorus fractions and edaphic properties. Phosphorus fractions were determined by means of the Hedley's modified extraction method. Results showed that residual phosphorus forms were the highest in all studied soils (293 mg kg⁻¹ in Ultisols, 230 mg kg⁻¹ in Oxisols and 128 mg kg⁻¹ in Alfisols), and it showed an increase with soil depth. Negative correlations were obtained between Al and H and residual phosphorus. Phosphates were transformed into secondary forms (the inorganic and organic NaOH and NaOH sonicated extracted phosphates) which predominated over the labile phosphate forms in agreement with an increase of the amorphous Al and Fe contents. Organic NaOH extracted phosphates followed the residual phosphates in accumulation amounts, and also showed decreases with depth: Oxisols and Ultisols contained 28% at soil surface and 10% at the bottom, while Alfisols showed similar amounts at both depths (26% and 14%, respectively). The bicarbonate organic extracted phosphorus varied between 18 to 28 mg kg⁻¹ in all soil types. The NaHCO₃ and NaOH extracted organic phosphates were positively correlated with organic carbon. Though all studied soils were developed on basaltic materials, the HCl soluble phosphates were very low (<1% of total P) probably because they went lost during pedogenesis process. Alfisols located at lower relief positions showed lowest phosphate contents than other studied soils.

Key words: Phosphorus Fractionation, Alfisol, Ultisol, Oxisol.

INTRODUCCION

Una de las principales limitantes de la producción de cultivos de Misiones es la baja disponibilidad de fósforo (P) de sus suelos, a pesar del alto contenido de P total. En suelos ácidos como los de Misiones, la adsorción de P está generalmente atribuida a los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio y a otras propiedades del suelo (Vazquez, Morales 2000). Considerando que el P disponible para las plantas no es solamente aquel que puede ser solubilizado por una solución estándar, el análisis por medio de fraccionamientos proporciona datos más completos para estimar la disponibilidad del elemento a corto y largo plazo, según sea la forma encontrada en los distintos suelos, ya que el ciclo biológico y la meteorización alteran la disponibilidad del P para los vegetales (Hedley *et al.* 1982).

El procedimiento de fraccionamiento de Hedley *et al.* (1982) remueve el P asimilable en las primeras extracciones, y las formas de P

más estables se obtienen con extractantes fuertes en pasos posteriores. Lo que asume básicamente el procedimiento es que al variar la fuerza de los extractantes se pueden estimar distintas fracciones de P para distintos grados de asimilabilidad y que cada fracción específica tiene una asimilabilidad similar en los distintos suelos; de todos modos esta presunción necesita ser verificada en cada orden (Guo 2000). El bicarbonato de sodio a pH 8,5 extrae las fracciones de fósforo inorgánico (Pi) y orgánico (Po) que constituyen los reservorios lábiles y fácilmente asimilables por las plantas. Las formas inorgánicas y orgánicas de P extraídas con NaOH son las moderadamente lábiles que están quimiosorbidas sobre los óxidos de Fe y Al. El NaOH combinado con ultrasonido permite la liberación del Pi y Po protegidos físicamente y de muy baja biodisponibilidad (Hedley *et al.* 1982). Los fosfatos de calcio son principalmente extraídos con HCl y el P residual puede contener tanto Pi

y Po que son muy resistentes a la descomposición.

Las formas de fósforo no extractables están relacionadas con los procesos pedológicos que incrementan la actividad y movilidad de hierro asociado con los procesos de meteorización. Existen zonas de acumulación de fósforo en los distintos perfiles, según distintos modos de inmovilización. Ésto se puede dar en distintos horizontes de un perfil o en perfiles diferentes si hay distintas posiciones de suelo en una ladera (Smeck 1985).

Como hipótesis se planteó que los cambios debidos a la evolución del suelo, tales como disminuciones de pH, incrementos de la materia orgánica, aluminio, hierro y arcilla 1:1 son reflejados en cambios en la distribución del P del suelo tales como la predominancia de Pi residual en los suelos más intemperizados y de Po en los horizontes superficiales. Los objetivos del presente trabajo fueron: a)

establecer las formas predominantes de P y su distribución en el perfil en Alfisoles, Ultisoles y Oxisoles, y b) determinar las relaciones entre fracciones de P y propiedades de los suelos.

MATERIALES Y METODOS

Se estudiaron nueve suelos representativos de los suelos rojos del sur de la Provincia de Misiones: tres Kandiualfes Ródicos, tres Kandihumultes Típicos, dos Eutrudoxes Ródicos y un Hapludox Húmico. Para la interpretación de los resultados se consideraron los promedios de los tres suelos de un mismo Orden en forma conjunta, dado que eran idénticos entre sí (Tabla 1). Los suelos estudiados estaban ubicados entre los paralelos de 27° 20' y 28° 10' de latitud sur y los meridianos de 55° 10' y 56° 00' de longitud oeste. Los Alfisoles se hallaban ubicados en la región natural llamada "Pediplanos Parcialmente Disectados cubiertos por vegetación herbácea" y los de mayor evolución, Ultisoles y Oxisoles, en los "Pediplanos Parcialmente Disectados cubiertos por vegetación selvática" y en la "Meseta Central Preservada" ambas

Tabla 1. Principales propiedades físicas y químicas de los suelos estudiados.
Table 1. Main physical and chemical properties of the studied soils.

Suelo	Hor.	Profund. cm	pH	Ca Mg H+Al Al				CO arena limo arcilla				P Bray II	Pi y Po mg kg ⁻¹	Pt
				cmol kg ⁻¹				%						
Alfisol	A	0-23	4,75 (9,21)	4,67 (1,28)	0,88 (0,13)	3,69 (1,67)	2,62 (1,26)	1,67 (0,31)	22,0 (4,06)	15,2 (2,83)	62,8 (6,63)	0,62 (0,52)	452 (45,8)	484 (19,7)
	BA	23-48	4,75 (0,16)	3,83 (0,25)	0,86 (0,95)	4,96 (0,75)	3,73 (1,00)	0,94 (0,11)	14,5 (2,93)	13,2 (0,83)	72,3 (2,26)	0,20 (0,04)	404 (43,7)	459 (23,3)
	B	48-86	4,94 (0,19)	4,95 (0,78)	0,61 (0,55)	3,71 (0,66)	2,91 (0,39)	0,75 (0,02)	16,1 (2,96)	10,4 (2,34)	73,5 (1,03)	0,17 (0,02)	395 (40,6)	414 (49,8)
	BC	86-104	4,76 (0,26)	4,05 (0,76)	0,99 (0,21)	3,80 (0,64)	2,91 (0,75)	0,67 (0,05)	14,5 (0,51)	10,8 (1,77)	74,8 (1,35)	0,17 (0,03)	399 (40,3)	409 (59,7)
	CB	104-140	4,91 (0,17)	1,35 (0,69)	1,35 (0,23)	3,52 (0,30)	2,59 (0,30)	0,52 (0,06)	13,8 (4,29)	12,0 (3,85)	74,2 (1,34)	0,19 (0,04)	380 (41,0)	389 (52,0)
Ultisol	A	0-16	4,60 (0,23)	4,97 (2,99)	1,01 (0,89)	5,38 (3,79)	4,24 (3,20)	2,45 (0,53)	13,4 (0,13)	22,1 (3,58)	64,6 (3,70)	2,86 (1,79)	710 (97,6)	796 (173,0)
	BA	16-41	4,61 (0,14)	3,66 (0,16)	0,41 (0,18)	5,84 (0,98)	4,76 (0,67)	1,65 (0,15)	16,5 (2,23)	13,8 (6,75)	69,8 (5,57)	0,58 (0,04)	645 (97,7)	664 (38,1)
	B	41-61	4,55 (0,06)	2,50 (0,36)	0,44 (0,11)	6,60 (2,02)	5,70 (1,61)	1,30 (0,25)	14,5 (0,63)	14,2 (5,28)	71,3 (4,88)	0,19 (0,15)	568 (90,4)	607 (36,4)
	BC	61-88	4,57 (0,08)	2,23 (0,15)	0,50 (0,16)	6,71 (1,23)	5,84 (1,01)	0,99 (0,10)	10,0 (2,20)	15,8 (3,13)	74,3 (5,32)	0,22 (0,05)	516 (80,2)	572 (28,1)
	CB	88-120	4,71 (0,10)	1,67 (0,29)	0,56 (0,12)	7,12 (1,81)	6,23 (1,44)	0,79 (0,07)	9,30 (2,34)	14,3 (1,98)	76,5 (2,72)	0,18 (0,12)	557 (89,6)	568 (44,7)
Oxisol	A	0-19	4,79 (0,40)	4,50 (1,60)	0,74 (0,20)	4,26 (3,54)	3,52 (3,00)	1,67 (0,20)	12,0 (1,58)	15,9 (3,23)	72,1 (4,09)	1,62 (0,74)	613 (89,8)	645 (34,0)
	BA	19-31	4,77 (0,10)	4,81 (0,45)	0,77 (0,11)	4,00 (1,04)	3,04 (0,87)	1,30 (0,47)	11,4 (1,43)	13,5 (1,15)	75,1 (1,23)	0,49 (0,08)	560 (77,5)	614 (56,8)
	B	31-51	4,63 (0,19)	4,15 (2,19)	0,63 (0,05)	5,02 (0,74)	4,12 (0,55)	1,11 (0,30)	9,5 (2,68)	13,2 (2,02)	77,3 (0,66)	0,65 (0,16)	510 (65,5)	589 (60,6)
	BC	51-103	4,85 (0,10)	4,15 (0,37)	0,49 (0,16)	5,54 (2,93)	4,64 (2,60)	0,93 (0,14)	8,7 (4,65)	11,7 (1,23)	79,6 (3,43)	0,43 (0,15)	485 (68,1)	501 (56,4)
	CB	103-138	4,70 (0,14)	2,61 (1,25)	0,57 (0,22)	4,58 (3,40)	3,95 (3,25)	0,80 (0,15)	9,2 (2,25)	10,5 (1,08)	80,3 (2,22)	0,26 (0,13)	466 (61,7)	468 (30,1)

Números entre paréntesis indican el desvío estándar
Numbers in parenthesis indicate the standard deviation

Tabla 2. Fraccionamiento secuencial de P modificado de Hedley y designación de las fracciones.
Table 2. The modified Hedley sequential P fractionation and fraction designations.

Reactivo	Fracción	Interpretación
NaHCO ₃ 0,5M pH 8,5.	Pi-bic	Pi lábil
	Po-bic	Po lábil (microbial)
NaOH 0,1M	Pi-NaOH	Pi moderadamente lábil retenido por quimioadsorción superficial en compuestos de Fe y Al
	Po- NaOH	Po moderadamente lábil ligado a ácidos húmicos y fúlvicos
NaOH 0,1M, ultrasonido	Pi-ult	Pi protegido físicamente en microagregados
	Po-ult	
HCl 1M	Pi-HCl	Po protegido físicamente en microagregados
		Pi muy poco soluble, ligado al calcio
HCl conc.	Pi-res	Pi residual, muy estable
HCl conc. + H ₂ O ₂ al 30%	Po-res	Po residual, químicamente estable

de mayor altitud sobre el nivel del mar.

De cada suelo se extrajeron muestras de sus primeros cinco horizontes, las que fueron secadas y tamizadas por tamiz de 2 mm. En ellas se determinó: textura, método de Bouyoucos; carbono orgánico, método de Walkley-Black; pH, en suspensión suelo agua 1:2,5; fósforo, Bray II; acidez y aluminio intercambiables con KCl; cationes intercambiables, con acetato de amonio (Page *et al.* 1982), calcio y magnesio por complejometría con EDTA. El contenido de P total se obtuvo empleando la metodología de Bowman (1988). Los valores promedios de las propiedades de los suelos se encuentran en la Tabla 1.

Se procedió al fraccionamiento de fósforo según el método desarrollado por Hedley *et al.* (1982) con una pequeña modificación final propuesta por Sattell y Morris (1992). La secuencia del fraccionamiento y la designación de las fracciones se detallan en la Tabla 2.

Con los datos obtenidos se realizó el análisis de variancia para determinar las diferencias entre las fracciones de P del suelo entre los órdenes estudiados. Las comparaciones por profundidades se realizaron por la prueba rangos múltiples de Duncan ($P < 0,05$). Además, se realizaron correlaciones y regresiones entre propiedades de suelo y fracciones de P ($n = 45$).

RESULTADOS Y DISCUSION

En todos los casos el contenido de Pt fue máximo en superficie, disminuyendo en profundidad (Tabla 2), coincidiendo con la

variación del Po y en concordancia con lo expresado por Schlesinger *et al.* (1988). El contenido superficial del Pt varió de 484 mg kg⁻¹ en Alfisoles a 645 mg kg⁻¹ en Oxisoles y 796 mg kg⁻¹ en Ultisoles, lo que coincide con lo encontrado por varios autores en suelos muy meteorizados (Fassbender, Bornemisza 1987), hallándose los menores contenidos para los Alfisoles ubicados en las regiones naturales de pediplanos parcialmente disectados, cubiertos con vegetación herbácea y de menor altitud, comparativamente al resto de los ordenes de suelos más intemperizados emplazados en las regiones de mayor altitud sobre el nivel del mar. De la misma manera Agbenin y Tiessen (1995) hallaron en toposecuencias del nordeste de Brasil menores contenidos de Pt en posiciones inferiores de la pendiente para cada porción de tamaño de partícula estudiada.

Los valores de Pt calculados por la sumatoria de las fracciones individuales fueron menores que el Pt valorado en las muestras digeridas solamente para Pt, ésto se atribuye a que existen algunas formas muy recalcitrantes de Pi y Po que no serían totalmente extraídas durante el fraccionamiento (Cross, Schlesinger 1995).

La concentración de fósforo inorgánico más lábil (Pi-bic) alcanzó, en los primeros

horizontes, a 1,49 mg kg⁻¹ en los Alfisoles, 3,52 en los Oxisoles y 8,63 mg kg⁻¹ en los Ultisoles ($P < 0,0004$), corroborando el bajo contenido de P disponible para las plantas, inferior a los niveles considerados críticos para gran parte de los cultivos (Ferreira de Novais, Smyth, 1999; Simard, Sen Tran 1993). La fracción Po-bic, de gran importancia para la nutrición de las plantas en suelos tropicales y subtropicales (Beck, Sánchez 1994), presentó valores de 18,8 mg kg⁻¹ en el horizonte superficial de los Alfisoles, 28,3 mg kg⁻¹ en los Ultisoles y 24 mg kg⁻¹ en los Oxisoles, disminuyendo más acentuadamente en profundidad respecto al Pi-bic (Fig 1a), con diferencias significativas hasta el tercer horizonte.

El Pi-NaOH no presentó diferencias entre órdenes en el horizonte superficial. En los Alfisoles varió desde la superficie hacia la profundidad, de 51 a 69 mg kg⁻¹, superando a los Oxisoles en la última profundidad ($P < 0,014$), teniendo los Ultisol un comportamiento intermedio (Fig. 1b). El Pi-NaOH se incrementó, del 11 al 17% del total con la profundidad en

los Alfisoles, a diferencia de los otros órdenes que presentaron tendencias inversas. El Po-NaOH presentó los mayores valores para los Oxisoles y Ultisoles, con diferencias significativas hasta la tercer profundidad, inclusive, correspondiendo los menores valores al Alfisol. Van Getsel (1991) consideró que esta fracción se halla protegida del ataque microbiano por la adsorción a las partículas de arcilla, presentándose, en nuestro estudio, los mayores valores para Oxisoles y Ultisoles, con diferencias significativas hasta el tercer horizonte, inclusive, correspondiendo los menores valores a los Alfisoles.

El fósforo inorgánico ocluido en microagregados (Pi-ultra), quimioadsorbido en el interior de fosfatos amorfos de Fe y Al, presentó con mayores valores en Alfisoles que en los otros suelos (Fig 1c). Las formas de Po-ocluido (Po-ultra), consideradas protegidas del ataque microbiano, resultaron de mayor importancia en Oxisoles y Ultisoles, en promedio 68 mg kg⁻¹ y 54 mg kg⁻¹, respectivamente, superando a las formas

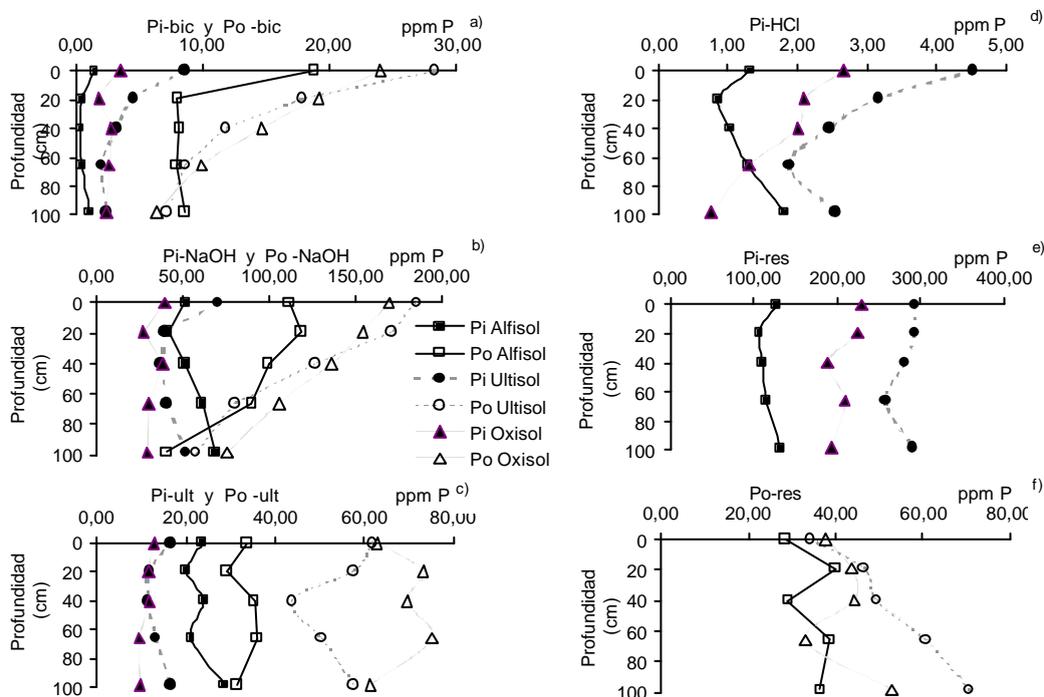


Figura 1. Distribución de fracciones de fósforo en suelos ácidos de Misiones (Argentina).

Figure 1. Phosphorus fraction distribution in acid soils of Misiones (Argentina).

lábiles. El Po-ultra de los Oxisoles fue superior que el de los Alfisoles, a excepción del horizonte C. Los Ultisoles presentaron un comportamiento similar a los Oxisoles en todos los horizontes, salvo en el BC, parte inferior del horizonte kándico, donde los valores fueron intermedios con los kándicos de los Alfisoles (Tabla 2).

El P de la fracción HCl fue muy bajo, variando de 1 a 4 mg kg⁻¹. Los mayores contenidos hallados en superficie correspondieron a Ultisoles y Oxisoles que a Alfisoles ($P < 0,0001$). En profundidad, los Alfisoles tuvieron más Pi-HCl que en superficie, probablemente debido a la mayor cantidad de fosfatos primarios que en los suelos más meteorizados (Tiessen, Steward 1983). El Pi-HCl, correspondiente al Pi más estable en minerales primarios de baja solubilidad como la apatita, fue mínimo, debido a su remoción en suelos muy intemperizados durante los procesos de meteorización química propios de su pedogénesis (Cross, Schelesinger 1995). Smeck (1985) al relacionar las formas de P del suelo y la intensidad de la meteorización, encontró en suelos jóvenes, predominio de P ligado a minerales primarios, en suelos con moderada meteorización de P en compuestos orgánicos y el adsorbido a minerales secundarios, y en suelos altamente meteorizados de P en fracciones inorgánicas resistentes, ocluidas o formas orgánicas muy estables.

El Pi-res alcanzó los valores más elevados en los horizontes A y BA de los Ultisoles con 293 mg kg⁻¹ seguido por los Oxisoles, con 230 mg kg⁻¹. La forma Pi-res menos soluble presentó los contenidos más bajos en los Alfisoles (128 mg kg⁻¹), con diferencias significativas para todas las profundidades. Estos valores concuerdan con los de Burnham y López-Hernández (1982) quienes hallaron, en los suelos con mayor grado de meteorización (Ultisoles y Oxisoles) fracciones más insolubles unidas a arcillas y sesquióxidos. Los Alfisoles, menos meteorizados, no presentaron un patrón determinado, debido a que admiten, para ser incluidos en este orden, una mayor variación en saturación de bases y mineralogía de arcillas. El Pi-res es, según Lilienfein *et al.* (1999), el reservorio interno de Pi ligado al Fe. Agbenin y Tiessen (1995) hallaron, en suelos de Brasil, aumentos de esta fracción en

coincidencia con el contenido de Fe total, encontrándola encapsulada físicamente y dominando dentro de las fracciones estudiadas. El Pi-res presentó una tendencia decreciente en los primeros horizontes, produciéndose un ligero incremento en profundidad de todos los suelos (Fig 1e), coincidiendo con la sección inferior de los horizontes kándicos y óxicos. Los elevados contenidos de Pi-res presentaron un paralelismo con el Al amorfo que, en Ultisoles fue, en promedio, de 1459 mg kg⁻¹ (datos no presentados) y menores contenidos para Alfisoles (1029 mg kg⁻¹) y Oxisoles (949 mg kg⁻¹), coincidiendo con otros autores que hallaron que la sorción de P estaba relacionada linealmente con el Al y Fe amorfos (Yuan, Lavkulich 1994).

El porcentaje de Pi-res con respecto al Pt aumentó con la profundidad de 38 a 43% en Alfisoles, de 42 a 53% en Ultisoles y de 36 a 40% en Oxisoles, lo cual refleja la menor disponibilidad y el aumento de formas recalcitrantes y de difícil transformación (Hedley *et al.* 1982) y concuerda con el grado de evolución de dichos suelos. El Po-residual se considera incluido en ácidos húmicos y humus, por lo que es muy estable y presentó valores elevados, entre 25 y 70 mg kg⁻¹ sin diferencias significativas entre suelos (Fig 1f). El carbono orgánico (CO) se correlacionó significativamente con todas las formas de fósforo orgánico e inorgánico lábiles (Pi-bic, Po-bic, Po-NaOH). El mayor contenido de fósforo orgánico determina un aumento de las formas de mayor asimilabilidad (Po-bic, y Po-NaOH), que por posterior mineralización se transformarían en Pi-bic (Smeck 1985; Cross, Schelesinger 1995). Los análisis de regresión indicaron que CO explicó el 43% de la variancia de Po-bic y Po-NaOH ($P < 0,0001$) y un 36% de la de Pi-bic ($P < 0,0001$), acorde a los siguientes modelos de regresión:

$$\text{Po-bic} = 3,40 + 9,45 \text{ CO}; r^2=0,43.$$

$$\text{Po-NaOH} = 44,56 + 61,6 \text{ CO}; r^2=0,43.$$

$$\text{Pi-bic} = -0,61 + 2,73 \text{ CO}; r^2=0,36.$$

La acidez y el Al intercambiables de estos suelos se correlacionaron positivamente ($P < 0,001$) con el Po-ultra y en forma inversa con el Pi-HCl y el Pi-res. Las dos primeras correlaciones son atribuidas al lavado de bases y al aumento de la actividad del Fe y Al. La alta

meteorización provocó el cambio de formas de Pi primario a secundario e influyeron en la estabilización de la MO y del Po asociado (Tiessen *et al.* 1984). Las ecuaciones de regresión entre tales atributos obtenidas fueron:

$$\text{Po-ultra} = 4,13 + 12,51 \text{ Al}; r^2=0,39 \quad (P < 0,0001)$$

$$\text{Po-ultra} = -0,57 + 11,09 \text{ H}; r^2=0,36 \quad (P < 0,0001)$$

La relación inversa entre la acidez y el Al intercambiables con Pi-res, se debería a una mayor relación con las formas inertes de P (Agbenin, Tiessen 1995) y no a formas solubles como las de acidez o Al intercambiables. Las ecuaciones de regresión halladas entre ellas fueron:

$$\text{Pi-res} = 260,45 - 9,53 \text{ H}; r^2=0,12 \quad (P < 0,0077)$$

$$\text{Pi-res} = 251,86 - 9,94 \text{ Al}; r^2=0,09 \quad (P < 0,018)$$

La arcilla se correlacionó inversamente con las formas de P más lábiles, contrariamente a lo encontrado por algunos autores (Fassbender, Bornemisza 1987). En suelos tropicales las partículas de caolinita se unen con los óxidos de Fe formando microagregados muy estables y el comportamiento físico es de un tamaño mayor que las arcillas. En tal situación, por estar estrechamente relacionados los fenómenos de adsorción con la superficie de las partículas, suelos texturalmente arcillosos presentaron correlaciones altamente significativas entre el P lábil y las fracciones arena o limo e inversas con la arcilla.

El Pi residual fue el de mayor importancia cuantitativa en los Ultisoles, Oxisoles y Alfisoles, aumentando en profundidad. En base a la secuencia evolutiva de dichos suelos, de los menos (Alfisoles) a los más evolucionados (Ultisoles y Oxisoles), los fosfatos fueron transformándose a formas secundarias (inorgánicas y orgánicas de NaOH y de ultrasonido) que predominaron sobre las más lábiles, debido al aumento de los contenidos de Fe y Al amorfos durante los procesos de alteración del material original que estabilizaron el P bajo formas secundarias. Por ello, el Po-NaOH fue la segunda fracción en importancia, disminuyendo con la profundidad. El Po-bic constituyó una reserva de P disponible para el vegetal. A pesar del origen basáltico de estos suelos el contenido de fosfatos primarios solubles en CIH, fue muy bajo llegando a menos del 1% del Pt, ya que se perdieron a través de los procesos de pedogénesis. En general para

todas las fracciones los menores contenidos de P se encontraron en los Alfisoles de posiciones altitudinales menores.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Nordeste.

REFERENCIAS

- Agbenin J O, Tiessen H. 1995. Phosphorus forms in particle-size fractions of a toposequence from Northeast Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1687-1639.
- Beck M A, Sanchez P A. 1994. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1424-1431.
- Bowman, R. A. 1988. A rapid method to determine total phosphorus in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1301-1304.
- Burnham C P, López-Hernández D. 1982. Phosphate retention in different soil taxonomic classes. *Soil Sci.*, 134: 376-380.
- Cross A F, Schelesinger W H. 1995. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma* 64:197-214.
- Fassbender H W, Bornemisza E. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Laboratorio. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, Editorial IICA. San José, Costa Rica. 420 p.
- Ferreira de Novais R, Smyth T. J. 1999. Fósforo em solo e planta em condições tropicais Vinosa, M. G. UFV. DPS: 399 p.
- Guo F, Yost R S, Hue N V, Evensen C I, Silva J A. 2000. Changes in phosphorus fractions in soils under intensive plant growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1681-1689.
- Hedley M J, Stewart J, and Chauhan B. 1982. Changes in Inorganic and Organic Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:970-976.
- Lilienfein J, Wilcke W, Neufeldt H, Ayarza M A M, Zech W. 1999. Sustainable land management for the Oxisols of the Latin American savannas. Chapter 14. Series: CIAT publications, 312 pág.
- Page A L, Miller R H, Keeney D R. 1982. Methods of soil analysis, Part 2, Chemical and microbiological properties, Second edition, *Soil Sci. Soc. Am.*, Madison, Wisconsin, USA.
- Sattell R, Morris R. 1992. Phosphorus Fractions and Availability in Sri Lankan Alfisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1510-1515.

- Schlesinger W H, Bruijnzeel L A, Bush M B, Klein E M, Mace K A, Raikes J A, Whittaker R J. 1988. The biogeochemistry of phosphorus after the first century of soil development on Rakata Island, Krakatan, Indonesia. *Biogeochemistry* 40: 37-55.
- Simard R.R., Sen Tran, T. 1993. Evaluating plant-available phosphorus with the electro-ultrafiltration technique. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:404-409.
- Smeck, N E. 1985. Phosphorus dynamics in soils and landscape. *Geoderma* 36:185-199.
- Tiessen H, Stewart J W B, Cole C V. 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 853-858.
- Van Getsel M, Ladd J N, Amato M. 1991. Carbon and nitrogen mineralization from two soils of contrasting texture and microaggregate stability: influence of sequential fumigation, drying and storage. *Soil Biol. and Biochem.* 23: 313-322.
- Vazquez S, Morales L A. 2000. Adsorción de fósforo por suelos ácidos de Misiones (Argentina). *Ciencia del Suelo* 18: 89-94.
- Yuan G, Lavkulich L M. 1994. Phosphate sorption in relation to extractable iron and aluminum in Spodosols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 343-346.