

CUANTIFICACION DE LAS FRACCIONES ORGANICAS E INORGANICAS DE FOSFORO EN SUELOS DE LA MESOPOTAMIA ARGENTINA

NG BOSCHETTI¹, CE QUINTERO¹, RA BENAVIDEZ¹, L GIUFFRE²

¹Facultad de Ciencias Agropecuarias U.N.E.R. -CC 24 (3100) Paraná - Entre Ríos, Argentina. Email: gboschet@arnet.com.ar ²Facultad de Agronomía U.B.A. – Av. San Martín 4453 (1417)- Buenos Aires, Argentina.

Recibido 14 de julio de 2001, aceptado 14 de mayo de 2003

QUANTIFICATION OF ORGANIC AND INORGANIC PHOSPHORUS FRACTIONS IN SOILS OF THE ARGENTINEAN MESOPOTAMIA

Surface horizon samples of 13 uncultivated and nonfertilized soils of the Argentinean Mesopotamia, with differing weathering stages, were analyzed for organic and inorganic phosphorus forms to evaluate the effects of different soil development on phosphorous composition. Results indicated that absolute contents of total phosphorus varied from 125 mg P kg⁻¹ in Entisols, to 700 mg P kg⁻¹ in Oxisols and Ultisols. The distribution stable and available phosphorus forms, as well as the inorganic and organic forms, depended on the genesis and of the evolution state of soils. Available phosphorus for plants represented less than 10% of total phosphorus in moderate and highly developed soils, and 20 to 30 % in less developed soils (Entisols and Inceptisol). The most developed soils (Oxisols and Ultisols) had 50 to 70 % of P in unreactive forms while the less developed (Molisols, Entisols and Inceptisols) had 30 to 40 %. Inorganic P extracted with the Anionic Exchange Membrane was closely related to soil organic carbon contents ($r = 0,90$ $p < 0.01$) and the fraction extracted with 1M HCl was related to the exchangeable calcium ($r=0,85$ $p < 0.01$). Organic P extracted with OHNa was positively related to amorphous Fe and Al contents of soils ($r=0,86$ $p < 0.01$). In all soils, labile and moderately labile organic fractions prevailed with respect to the inorganic, fractions being higher in the highly weathered soils.

Key words: soil phosphorus, Hedley fractionation, organic phosphorus, inorganic phosphorus.

INTRODUCCION

En el suelo, el fósforo se encuentra tanto en formas orgánicas como inorgánicas y su disponibilidad para las plantas está condicionada por reacciones fisicoquímicas y biológicas. Para conocer la distribución del fósforo en sus distintas formas, se han utilizado varios métodos químicos de fraccionamiento. Algunos miden la cantidad de fósforo orgánico respecto al contenido total, como el método de Saunders y Williams (1955) y Mehta *et al.* (1954). Otros, utilizan técnicas de fraccionamiento que separan las distintas formas del fósforo por medio de una serie de extractantes químicos aplicados secuencialmente a una muestra de suelo, los cuales solubilizan diferentes compuestos en cada paso. Dentro de estas técnicas, una de las más conocida es la de Chang y Jackson (1957), que separa las distintas fracciones de fósforo inorgánico y estima el fósforo orgánico por la diferencia entre la suma de todas las fracciones inorgánicas ex-

traídas y el fósforo total cuantificado, pero no da información acerca de la labilidad de las fracciones orgánicas.

Una alternativa superadora fue propuesta por Hedley *et al.* (1982), quienes diseñaron un método de fraccionamiento que remueve progresivamente desde las fracciones más lábiles hasta las menos disponibles para las plantas en cada extracción sucesiva. Este esquema permite establecer las proporciones del fósforo lábil y no lábil, dando información acerca de la cantidad y disponibilidad de la porción inorgánica y orgánica del P del suelo. Dicho procedimiento ha mostrado ser adecuado para estudios de génesis de suelos cuando se quiere conocer la distribución del fósforo en las diferentes formas, en suelos de distinta pedogénesis (Sharpley, Smith 1985, Duffera, Robarge, 1996, Urioste *et al.* 1996, Molina *et al.* 1999) y también ha resultado apropiado para reflejar cambios en las fracciones del fósforo, causados por el agregado de fertilizantes y por

distintas prácticas de manejo (Selles *et al.* 1995, Beck, Sanchez 1994).

Existen antecedentes del estudio de las fracciones en que se encuentra el P en suelos altamente meteorizados de la provincia de Misiones (Vazquez *et al.* 1998, Fernandez López, *et al.* 2002), sin embargo es poco lo que se conoce al respecto, de otros suelos de la región Mesopotámica. Es por ello que se plantearon como objetivos cuantificar las formas orgánicas e inorgánicas del fósforo en superficie de algunos suelos de la Mesopotamia Argentina y relacionar dichas fracciones con las características físico-químicas de los mismos. El trabajo se realizó bajo la hipótesis de que la proporción del fósforo total que está retenida en las distintas formas cambia con el grado de desarrollo de los suelos.

MATERIALES Y METODOS

Se tomaron muestras superficiales de 10 suelos de la provincia de Entre Ríos, uno de la provincia de Corrientes y dos de Misiones. Los suelos fueron seleccionados teniendo en cuenta que fueran representativos de la variabilidad de las características físico-química de los suelos de la región. La clasificación taxonómica y principales características de los mismos se presentan en la Tabla 1. Mas detalle sobre estos suelos pueden verse en Quintero *et al.* (1999).

Como puede apreciarse, se trata de suelos disímiles, derivados de materiales originales muy diferentes y con gran variabilidad en sus características edáficas. Los suelos dominados por la fracción arena (suelos N° 10 a 13) presentaron los valores más bajos en la mayoría de las características evaluadas, con bajos contenidos de carbono orgánico y de materiales de Fe y Al amorfos, además de baja retención de agua y disponibilidad de cationes intercambiables. Los suelos rojos del norte mesopotámico (suelos N° 1, 5 y 6) a pesar de poseer un contenido de arcilla superior al 50% presentaron una baja capacidad de intercambio catiónica y un elevado contenido de Fe y Al amorfos, lo que concuerda con las características de estos suelos cuyo material arcilloso está dominado por óxidos y sesquióxidos.

Las muestras fueron extraídas a una profundidad de 10 cm, de áreas no fertilizadas, secadas al aire y tamizadas por 2 mm para la realización de los análisis físicos, químicos y fisico-químicos, mientras que para el análisis de las fracciones de P, fueron pasadas por un tamiz de 0,5 mm. El método de fraccionamiento utilizado fue el de Hedley *et al.* (1982) modificado por Tiessen y Moir (1993). Las formas de fósforo cuantificadas fueron: 1) fósforo muy lábil (extraído con membrana de intercambio aniónica – P-MIA), que representa el P inorgánico en la solución del suelo o el adsorbido muy débilmente sobre hidróxidos o carbonatos. 2) Fósforo lábil (Po-NaHCO₃ y Pi-NaHCO₃), involucra el P inorgánico (Pi) adsorbido débilmente y el P orgánico (Po) fácilmente hidrolizable. 3) Fósforo modera-

Tabla 1. Principales características físicas y químicas de los suelos estudiados.

Table 1. Main physical and chemical characteristics of the studied soils.

SUELO N° Tipo	Grupo Suelo	Are.	Arc.	CO	CC	Al	Fe	CO ₃ ⁼	Ca	Mg	Na	K	CIC	SB	pH	Pe	CMAF
1. Hapludox	1	96	728	19,4	323	3,6	6,1	5,0	6,2	1,5	0,1	0,3	16,8	8,1	4,8	1,8	1,013
2. Cromudert (Bt)	2	44	599	17,2	519	2,6	1,3	11,0	36,7	5,5	1,0	1,1	51,5	44,3	7,7	3,2	570
3. Pelludert	2	34	294	42,0	409	2,0	3,1	5,2	16,0	3,6	0,4	0,7	31,8	20,7	5,4	10,5	486
4. Cromudert	2	67	471	33,0	465	2,3	1,3	12,0	40,8	3,9	0,2	1,9	51,6	46,8	7,5	6,3	473
5. Kandihumult	1	60	528	29,6	272	2,5	4,2	4,0	5,6	2,0	0,1	0,2	16,0	6,9	5,0	2,6	603
6. Kandiudult	1	165	514	16,4	273	1,9	4,3	5,0	8,8	2,1	0,2	1,3	16,1	12,4	6,6	2,2	547
7. Pelludert	2	67	473	41,8	422	2,0	1,7	2,8	23,5	3,5	0,4	0,6	38,3	28,0	5,8	7,1	408
8. Ocracualf	2	33	433	32,0	422	1,4	1,6	23,2	20,0	3,8	1,3	0,8	29,4	25,9	6,6	6,4	391
9. Argiudol	2	155	421	31,1	375	2,1	1,1	10,6	33,0	2,2	0,1	2,3	35,7	37,6	7,5	10,1	515
10. Hapludol	3	767	128	12,4	108	0,8	0,8	4,7	5,0	1,7	0,2	0,2	10,2	7,1	5,4	7,3	213
11. Haplumbrept	3	902	48	7,6	52	0,6	0,9	4,8	1,6	0,6	0,2	0,1	4,3	2,5	5,6	4,8	175
12. Udifluent	3	911	39	3,8	47	0,4	0,2	3,0	1,3	0,4	0,1	0,2	3,6	2,0	5,9	6,5	134
13. Udipsament	3	895	47	6,8	40	0,4	0,1	4,3	1,8	0,5	0,1	0,2	3,7	2,6	5,4	6,8	54
Media		323	363	22,5	287	1,7	2,0	7,4	15,4	2,4	0,3	0,8	23,8	18,8	6,1	5,8	429
CV %		119	63	58	60	56	89	77	92	65	112	93	72	86	16	48	59

Are.: Arena y Arc.: Arcilla, pipeta de Robinson. CO: Carbono orgánico, Walkley-Black (Jackson, 1976). CC: Capacidad de campo, olla de presión de Richards (Granton *et al.*; 1998). Al: Aluminio amorfo y Fe: Hierro amorfo, oxalato de amonio (Bartels, 1996). CO₃⁼: carbonato de calcio, calcímetro amonio (Bartels, 1996). Ca, Mg, Na y K intercambiables y CIC: Capacidad de intercambio catiónico pH 7 (Jackson, 1976); SB: Suma de bases. pH: suelo:agua 1:2,5 p/v. P: fósforo extraíble, Bray y Kurtz 1. CMAF: Capacidad máxima adsorción fosfatos (Quintero *et al.*, 1996).

damente lábil (Pi-NaOH y Po-NaOH) que es el Pi unido a la superficie de las arcillas o de los óxidos e hidróxidos de Fe y Al y el Po asociado a compuestos orgánicos tales como ácidos fúlvicos y húmicos. 4) Fósforo inorgánico ligado a minerales fosfatado de calcio (Pi-HCl 1M). 5) Fósforo orgánico e inorgánico en forma muy estable (Po-HCl concentrado y Pi-HCl concentrado). 6) Fósforo residual (P-H₂SO₄), que es el que queda como remanente después de las extracciones citadas anteriormente.

También se determinó el P total por digestión con H₂SO₄ concentrado y H₂O₂ al 30%, a fin de verificar que el P total así cuantificado sea coincidente con la suma de los contenidos de P de cada una de las fracciones. En todos los casos la concentración de fósforo inorgánico en los extractos fue determinado colorimétricamente por el procedimiento del Murphy y Riley (1962), después del ajuste del pH a 5,4 usando paranitrofenol como indicador.

Para el análisis de los resultados, los suelos fueron agrupados en base a sus materiales parentales, fertilidad, poder de adsorción de P y estado de evolución genética, de manera que quedaron configurado tres grupos.

Grupo 1: suelos 1-5 y 6, que provienen de materiales basálticos, con un alto poder de fijación de fósforo, fertilidad media y muy intemperizados.

Grupo 2: los suelos 2-3-4-7-8 y 9, originados a partir de loess y limos loessoides, ricos en carbonato de calcio, con alta fertilidad y una capacidad de adsorción de fósforo de media a baja.

Grupo 3: suelos 10-11-12 y 13, que derivan de arenas depositadas por el río Uruguay, poco evolucionados, de baja fertilidad y de muy baja ca-

pacidad de adsorción de P.

La relación entre las diferentes fracciones de fósforo y las propiedades físicas y químicas de los suelos fueron analizadas con un análisis de correlación empleando el Programa SAEG 5,0 de la U.F.V. (Universidad Federal Visçosa) - Brasil.

RESULTADOS Y DISCUSION

El contenido total de fósforo de los suelos, así como la cantidad en cada fracción, se presentan en la Tabla 2. La suma de las fracciones difieren en no más del 9 % del valor del fósforo total determinado por la digestión H₂SO₄-H₂O₂, indicando que el procedimiento de extracción secuencial cuantificó todo el fósforo presente en los suelos.

Los valores absolutos de fósforo total variaron desde un promedio de 125 mg de P kg⁻¹ de suelo en los Entisoles y el Inceptisol, hasta alrededor de 700 mg de P kg⁻¹ en Oxisoles y Ultisoles (Tabla 2). Estos contenidos son considerados de medios a bajos, si se los compara con los valores presentados en un estudio de Cross y Schlesinger (1995), donde se analizaron nueve órdenes de suelos.

Los suelos estudiados tuvieron diferencias en la distribución del fósforo en las fracciones, acorde con la variabilidad físico química que presentaron, resultado de la distinta evolución genética de cada uno de ellos, ya que se trata de siete Ordenes de suelos del Soil Taxonomy (Tabla 1). Tiessen, *et al.* (1984), mostraron que las formas del fósforo en los

Tabla 2. Contenido de P en las diferentes fracciones orgánicas e inorgánicas, de suelos de la Mesopotamia Argentina.

Table 2. Content of organic and inorganic P fractions of soils of the Argentinean Mesopotamia.

Suelo	Grupo de Suelo	Pi MIA	Pi NaHCO ₃	Po NaHCO ₃	Pi NaOH	Po NaOH	Pi HCl 1M	Pi HCl Con.	Po HCl Con.	Po Total	P Resid.	P Suma	P Total
mg kg ⁻¹													
1	1	12	4,8	12,8	34,8	162,9	12	225,4	7,5	183	126,6	599	589
2	2	17	3,2	5,7	15,5	47,5	49,6	46,8	15,9	69	83,5	284	267
3	2	31	5	25,6	2,3	102,6	14,6	34,2	26,5	155	78	320	313
4	2	18	4,3	14,9	4,6	91,9	66,6	55	33,7	141	102	391	390
5	1	15	1	26,3	9,3	153,2	5,4	76	75	255	85	447	438
6	1	13	3,4	19,7	29,4	87,9	22,7	274	31	139	188,5	670	664
7	2	24	2,9	16	2,3	89,6	10,6	33,8	23,5	129	75	278	269
8	2	20	3,5	11,4	5	65,9	26,3	31	23,5	101	79	266	256
9	2	26	10,3	7,1	5,4	109,3	153,8	73,3	46,4	163	130,5	562	547
10	3	16	1,7	12,4	1,5	78,9	15	16,5	6,8	98	34,2	183	169
11	3	10	3,9	28,5	8,6	41	8,8	22,2	6,8	76	12,3	142	130
12	3	0,5	6,3	11,3	10,1	32,3	6,8	20,2	5,1	49	12,6	109	100
13	3	0,2	2,9	13,9	6,1	27,9	4,4	19,9	3,4	45	14,6	95	96
Media		15,6	4,1	15,8	10,4	83,9	30,5	71,4	23,5	123	79	334	325
CV %		57	56	46	100	50,4	136	115	87	48	66	57	58

suelos son función de sus propiedades, las cuales varían en forma interdependiente y en distinta magnitud, según el estado de evolución de los mismos. Es por ello, que los cambios debidos al avance en el desarrollo de un suelo, como la acumulación de la materia orgánica, el descenso del pH o la reducción de la saturación de bases, se reflejan en cambios reconocibles en la distribución del P del suelo, tales como la disminución del P extraíble con ácido y la acumulación de este elemento en formas secundarias.

El contenido de P orgánico total fue mayor en los suelos más intemperizados (Tabla 2) Según Cross y Schlesinger (1995) el pool de fosfatos primarios disminuye y la suma de las fracciones orgánicas incrementa durante el proceso evolutivo de los suelos. A medida que avanza el desarrollo de los mismos, se va produciendo una acumulación de fósforo orgánico en el horizonte superficial, que generalmente va acompañada de un incremento en el contenido de fósforo total, resultado del ciclado biológico del fósforo contenido en los residuos de plantas (Walbridge *et al.*, 1991). Además, los cambios que acompañan a la evolución de los suelos, como el lavado de bases, la remoción de carbonatos y el incremento de la actividad del Fe y Al, influyen en la estabilización de la materia orgánica y del fósforo orgánico a ella asociado (Tiessen, *et al.* 1984, Sharpley *et al.* 1987).

Las formas lábiles de fósforo, que son estimadas por la suma del P extraído con la

membrana de intercambio aniónico más el extraído con bicarbonato de sodio, mostraron valores bajos, tanto en términos absolutos como en porcentaje del total. Esto evidencia que la cantidad de fósforo que está disponible para las plantas es una mínima porción del total, siendo menor al 10% en los suelos moderada y altamente desarrollados (Grupo 1 y 2) y entre un 20% al 30% en los menos evolucionados. Las diferentes características de los suelos influyen la solubilidad y las reacciones de adsorción – desorción del fósforo, afectando la cantidad disponible para las plantas (Havlin, *et al.* 1999). Los suelos del grupo 1, presentaron una menor proporción de fósforo en las formas lábiles, atribuido a la presencia de Al y Fe amorfos que ofrecen una superficie de retención de P, que lo mantiene en las formas moderadamente lábiles. A medida que avanza la intemperización en los suelos, se produce un incremento en la actividad del Fe y el Al, y cambios de las formas primarias del fósforo a secundarias. Esas transformaciones, se manifiestan en un aumento del P soluble en hidróxido de sodio y en una disminución de la cantidad de P extraído con HCl diluido (Sharpley *et al.*, 1987). Estos resultados coinciden con lo expuesto por Guo *et al.* (2000), respecto a que los suelos con bajos pH y dominancia de óxidos de Fe y Al, tienen altas cantidades de fósforo en las formas orgánicas e inorgánicas extraíbles con álcalis y muy bajos valores de fósforo extraído con ácido diluido.

Según Lindsay y Vlek (1977), una alta

Tabla 3. Matriz de correlación entre las fracciones de fósforo y las características de los suelos.

Table 3. Correlation coefficients between P fractions and the soil characteristics.

	C.O.	pH	% Ca Int.	Al+Fe Amorfos	Arcilla
P-MIA	0.90**	0.29	0.55*	0.28	0.40
Pi-NaHCO₃	0.18	0.40	0.47	-0.08	-0.02
Po- NaHCO₃	0.03	-0.56*	-0.56*	0.18	-0.20
Pi- NaOH	-0.03	-0.10	-0.28	0.68**	0.53*
Po-NaOH	0.43	-0.28	-0.05	0.86**	0.70**
Pi-HCl 1M	0.33	0.72**	0.85**	-0.04	0.25
Pi- HCl Con.	-0.04	-0.05	-0.10	0.76**	0.60*
Po- HCl Con.	0.42	0.13	0.25	0.41	0.46
P-Res.	0.42	0.36	0.41	0.73**	0.80**
P-Total	0.37	0.18	0.27	0.82**	0.77**

C.O.: carbono orgánico, % Ca Int. : porcentaje saturación de calcio del complejo de cambio

Coefficientes Significativos: * = P < 0,05 ; ** = P < 0,01

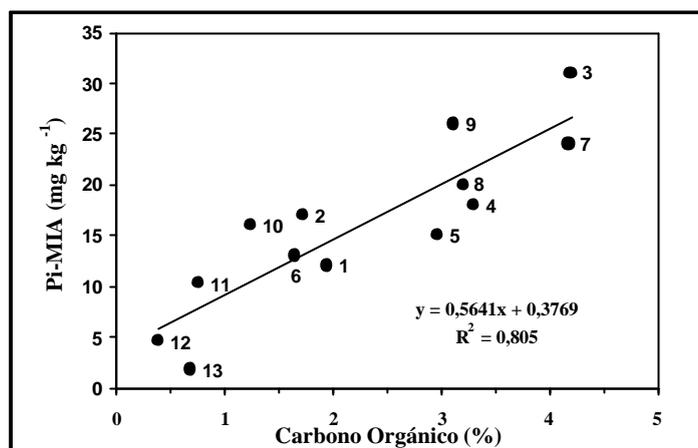


Figura 1. Fósforo extraído con membrana de intercambio aniónica (P-MIA) y carbono orgánico (Los números indican la muestra de suelo).

Figure 1. Phosphorus extracted with Anionic Exchange Membrane (P-MIA) and Organic Carbon (Numbers indicate soil sample).

saturación de bases mantiene el P del suelo en formas estables ligado al calcio, que son las solubles en ácido. Por ello, los suelos del grupo 2, que son los de saturación de bases superiores al 70%, tuvieron los valores más altos de fósforo inorgánico extraído con HCl 1M. Como porcentaje del contenido total, la fracción P-HCl representó desde un máximo del 28% en un Molisol de pH 7,5 y con un complejo de intercambio totalmente saturado en bases, hasta un mínimo del 1% en un Oxisol de pH 4,8.

Los suelos con mayor grado de evolución (Grupo 1), mostraron una alta proporción de fósforo no reactivo (Pi-HCl concentrado, Po-HCl concentrado y P-Residual), significando entre un 50 - 70% del P total, mientras que en los menos evolucionados (Grupo 3), fue menor al 40%. Los suelos altamente intemperizados poseen bajas cantidades de materia orgánica y abundancia de sesquióxidos activos, por lo que tienen altas cantidades de P inorgánico secundario adsorbido, lo que sumado al pH bajo y la elevada actividad del Fe y el Al, conducen a una muy baja solubilidad de las formas secundarias del P (Tiessen, *et al.* 1984).

En la Tabla 3 pueden observarse los coeficientes de correlación entre las cantidades de P en las diferentes fracciones y las características de los suelos.

La estrecha relación entre el fósforo inmediatamente disponible para las plantas (extraído con membrana de intercambio aniónica)

con el contenido de carbono orgánico del suelo, indica el importante efecto de la materia orgánica sobre la disponibilidad de fósforo (Figura 1). Los compuestos orgánicos en los suelos incrementan el P disponible porque recubren los óxidos de Fe y Al, formando una cubierta protectora que reduce la adsorción del fósforo o por el reemplazo de los aniones $H_2PO_4^-$ en los sitios de adsorción por aniones orgánicos tales como citrato, oxalato, tartrato o malato (Havlin *et al.* 1999, Staunton, Leprince 1996). Sin embargo, la materia orgánica no sólo afecta el intercambio aniónico, también interviene en la dinámica del P por la formación de complejos órgano-fosfatados que son fácilmente atacables por los microorganismos del suelo y de esta manera al mineralizarse contribuyen al fósforo disponible.

Se obtuvo un alto coeficiente de correlación cuando se asoció el contenido de fósforo en la fracción moderadamente lábil, con el contenido de Fe y Al amorfos de los suelos ($r=0,86^{**}$). El hidróxido de sodio remueve el fósforo que está retenido fuertemente por quimiosorción a la superficie de los compuestos de Fe y Al, por lo que los valores más altos de fósforo en esta fracción, tanto orgánico como inorgánico, se encontraron en los suelos del grupo 1, que poseen la mayor cantidad de Fe y Al amorfos (Figura 2). Guo *et al.* (2000), informaron que en los suelos altamente intemperizados, el Pi-NaOH estuvo directamente relacionado con el contenido de minerales

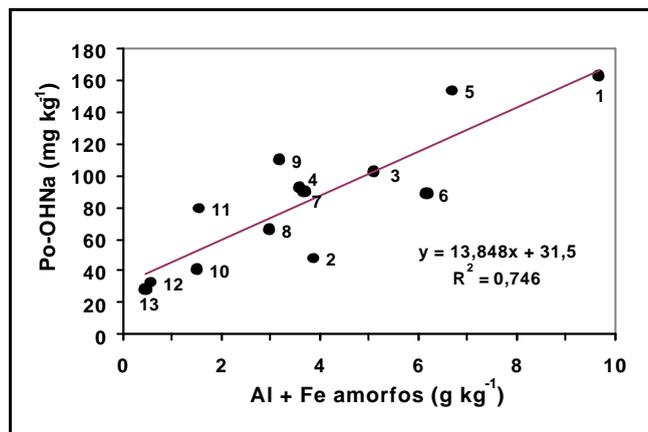


Figura 2. Po-NaOH y contenidos de Fe y Al amorfos (Los números indican la muestra de suelo).
Figure 2. Po-NaOH and contents of amorphous Fe and Al (Numbers indicate soil sample).

amorfos de los suelos y de óxidos de Fe y Al. También Sharpley *et al.* (1987), comparando los contenidos de P en las diferentes fracciones de 102 suelos, registró, que con un incremento en el grado de intemperización de los suelos aumentaron las formas de P ligadas a Al y Fe.

La cantidad de P soluble en HCl 1 M estuvo directamente relacionada con el porcentaje de calcio en el complejo de cambio del suelo y con el pH. En la Figura 3 puede observarse que cuando el porcentaje de Ca intercambiable es superior al 70 % aumenta marcadamente el P extraído con HCl 1 M, corroborando lo expresado anteriormente respecto a que una alta saturación en calcio del com-

plejo de cambio, contribuye a mantener el P del suelo en formas estables ligadas a éste elemento.

CONCLUSIONES

Los suelos mesopotámicos tienen contenidos de fósforo total en superficie de medios a bajos, no superando los 700 mg kg⁻¹ de P.

La distribución del fósforo en las formas disponibles y estables, como así también en las formas orgánicas e inorgánicas, dependió de la génesis y del estado de evolución de los suelos. Con el aumento en el grado de intemperización de los mismos, se reduce a menos del 10 % el fósforo en las fracciones

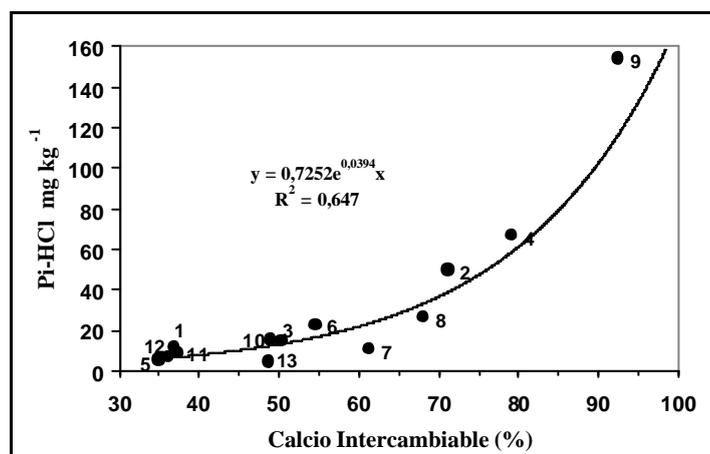


Figura 3. Pi-HCl y contenido de calcio intercambiable (Los números indican la muestra de suelo).
Figure 3. Pi-HCl and exchangeable calcium content (Numbers indicate soil sample).

más lábiles, acompañado de un aumento del que se encuentra en las formas no reactivas, que llega a ser superior al 60 % del P total.

En todos los suelos, las fracciones orgánicas de fósforo lábil y moderadamente lábil predominaron respecto a las inorgánicas, siendo mayores los contenidos de las formas orgánicas del P en los suelos más evolucionados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Geól. Carlos J. Vesco por la asistencia en la clasificación de los suelos. Esta investigación fue financiada por la SICTFRH-UNER

REFERENCIAS

- Bartels, J. M. 1996. Methods of soil Analysis. Part. 3. Chemical Methods. SSSA, ASA. Madison, Wisconsin, USA.
- Beck M, Sanchez P. 1994. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a typic Paleudult. *Soil Sci.* 34:1424-1431.
- Chang S C, Jackson M L. 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.* 84: 133-141.
- Cross A. F. and W. H. Schlesinger. 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.
- Duffera M, Robarge W P. 1996. Characterization of organic and inorganic phosphorus in the Highland Plateau Soils of Ethiopia. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27: 2799-2814.
- Fernández López C, Vazquez S, Dalurzo H C. 2002. Formas de fósforo en suelos altamente meteorizados del sur de la provincia de Misiones. *Ciencia del Suelo* 20: 81-87.
- Granton M D Benavidez R A, Valenti R A, Arévalo E S. 1998. Características hídricas de los suelos. Métodos de laboratorio y estimaciones: su evaluación y aplicaciones para suelos de Entre Ríos. XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Villa Carlos Paz, Córdoba. 19-20
- 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.
- Havlin J L, Beaton J D, Tisdale S L, Nelson W L. 1999. Phosphorus. p. 154-195. En *Soil fertility and fertilizers. An Introduction to Nutrient management*. Sixth edition. Prentice Hall, New Jersey, USA. 499 p.
- Hedley M J, Stewart J B, Chauhan B S. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:970-976.
- Jackson M L. 1976. Determinación de los cationes metálicos canjeables de los suelos. p. 123-189. En: *Análisis Químico de Suelos*. Ediciones Omega S. A., Barcelona, España. 662 p.
- Lindsay W L, Vlek P L G. 1977. Phosphate minerals. p. 99-144. En Dixon J B and Weed S B (ed). *Minerals in soil environments*. Soil Sci. Soc. Am. Madison, WI.
- Mehta N C, Legg O J, Goring C A I, Black C A. 1954. Determination of organic phosphorus in soils : I. Extraction methods. *Soil Sci. Am. Proc.* 18: 443-449.
- Molina N C, Blanco R, Cabrera A, Arcia J. 1999. Contenidos y formas de fósforo en suelos desarrollados sobre materiales aluviales de Tucumán (Argentina). *Ciencia del Suelo* 17: 49-53.
- Murphy J, Riley H P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.* 27:31-36.
- Quintero C E, Boschetti N G, Benavidez R A. 1996. Estimación de la capacidad máxima de adsorción de fosfatos en suelos de Entre Ríos (Argentina). *Ciencia del Suelo* 14: 79-82.
- Quintero C E, Boschetti N G, Benavidez R A. 1999. Phosphorus retention in some soils of the Argentinean Mesopotamia. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30, 1449-1461.
- Saunders W M F, Williams E G. 1955. Observations on the determination of total organic phosphorus in soil. *J. Soil Sci.* 6: 254-267.
- Selles F, Campbell C, Azentner R P. 1995. Effect of cropping and fertilization on plant and soil phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 140-144.
- Sharpley A N, Smith S J. 1985. Fractionation of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 127-130.
- Sharpley, A. N. ; Tiessen, H. ; Cole, C. V. 1987. Soil phosphorus forms extracted by soil tests as a function of pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 362-365.
- Staunton S, Leprince F. 1996. Effect of pH and some organic anions on the solubility of soil phosphate: implications for P bioavailability. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 231-239.
- 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.
- Tiessen H, Moir J O. 1993. Characterization of available P by sequential extraction. pp. 75-86. En *Soil Sampling and Methods of analysis*. Carter M R (Ed.). CSSS Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Urioste A M, Bono A A, Buschiazzi D E, Hevia

- G G, Hepper E N. 1996. Fracciones de fósforo en suelos agrícolas y pastoriles de la Región Semiárida Pampeana Central (Argentina). *Ciencia del Suelo* 14:92-95.
- Vázquez H, Dalurzo A, Lifschitz A, Morales L. 1998. Fósforo total, orgánico e inorgánico en Ultisoles, Alfisoles y Oxisoles del sur de Misiones (Argentina). *Ciencia del Suelo* 16:47-48.
- Walbridge M R, Richardson C J, Swank W T. 1991. Vertical distribution of biological and geochemical phosphorus subcycles in two southern Appalchian forest soils. *Biogeochemistry* 13:61-85.