

FRACCIONAMIENTO DE FÓSFORO EN SUELOS CULTIVADOS CON ARROZ POR LARGOS PERÍODOS DE TIEMPO. I. FÓSFORO INORGÁNICO

Neudis Subero¹, Ricardo Ramírez², Omaira Sequera³ y Julio Parra²

RESUMEN

Los suelos cultivados con arroz, en el sistema de riego del Río Guárico en Venezuela, han sido fertilizados con fosfatos por muchos años. El conocimiento del estado actual de las formas de fósforo en los suelos, así como sus transformaciones en diferentes fracciones, podría permitir mejorar los métodos de diagnóstico de P actualmente en uso. Se tomaron muestras compuestas de suelo de 0 a 20 cm de profundidad, en 43 parcelas, y fueron llevadas al laboratorio para determinar las diferentes fracciones de P. El fósforo inorgánico (Pi) resina más Pi lábil, considerados disponibles, representaron sólo 2,7 a 5,5 % del Pi total (PiT); esto representa una pequeña parte del P aplicado al suelo. En cambio, la suma del moderadamente lábil (PiML) más el ligeramente lábil (PiLL) mostró una tendencia a disminuir con el tiempo y fue 7,1 a 9,3 veces mayor que las dos formas disponibles anteriores. Las formas no disponibles fueron las más abundantes, entre 64,2 y 72,8 % del PiT. Las fracciones Pi ocluida y Pi recalitrante se incrementaron con el pH del suelo.

Palabras clave adicionales: Fósforo disponible, fósforo lábil, fósforo resina

ABSTRACT

Fractions of soil phosphorus under long term rice culture. I. Inorganic phosphorus

Soils cultivated with rice in the irrigation system of Guárico State, Venezuela, have been fertilized with phosphates for many years. The current state of knowledge of the forms of phosphorus in soils and their transformations into different fractions could lead to better diagnostic methods currently in use. Composite soil samples were collected from 0 to 20 cm deep in 43 farmer's plots and the inorganic fractions (Pi) were determined in the laboratory. The Pi resin and Pi labile (both fractions considered available) represented only 2.7 to 5.5 % of total Pi (PiT), thus representing just a small portion of the P applied to the soil, whereas the moderately labile and slightly labile Pi were 7.1 to 9.3 times higher than the available fractions and showed a tendency to decrease with time. The unavailable forms were the most abundant (64.2 to 72.8 % of PiT). The occluded and recalcitrant Pi fractions increased with soil pH.

Additional key words: Available phosphorus, labile phosphorus, resin phosphorus

INTRODUCCIÓN

La aplicación continua de fertilizantes fosfatados para la producción de arroz, en el sistema de riego del Río Guárico de Venezuela, data de muchos años. La dosificación del fertilizante en el país se hace con la ayuda de análisis de suelos, por medio de métodos de extracción conocidos, especialmente Olsen y Bray, cuyos resultados indican el nivel actual del fósforo disponible para la planta. El conocimiento del requerimiento de P por el cultivo y su disponibilidad en el suelo permite corregir su

deficiencia, la cual es la segunda más importante en el país después del nitrógeno.

El P de los fertilizantes fosfatados “solubles” es rápidamente adsorbido o fijado en el suelo, seguido por una inmovilización más lenta bajo otras formas (Hedley et al., 1994). La cuantificación del P fijado así como su distribución en las diferentes fracciones presentes en el suelo permitiría mejorar los métodos de diagnóstico, actualmente en uso, así como el manejo del fósforo aplicado.

Hedley et al. (1982) propusieron una extracción secuencial de P que permite su

Recibido: Febrero 23, 2015

Aceptado: Noviembre 27, 2015

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia. Venezuela. e-mail: nsubero23@hotmail.com

² Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay. e-mail: abisam28@gmail.com

³ Decanato de Agronomía, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Apdo. 400. Barquisimeto. Venezuela.

caracterización en diferentes fracciones y que ha sido usada con éxito en experimentos de corta duración. Este sistema de extracción ha sido aplicado para caracterizar el P en suelos cultivados por muchos años, bajo diferentes condiciones de manejo y de aplicación de fosfatos (Zhang y Mackenzie, 1997; Guo y Yost, 1998).

Tiessen y Moir (1993) argumentaron que el método de Hedley et al. (1982) deja de extraer una parte considerable del fósforo orgánico y para mejorar este problema propusieron una extracción reagrupando las fracciones de P con base a sus transformaciones. Ochwah et al. (2005) trabajaron con la extracción secuencial de Tiessen y Moir (1993) en suelos fertilizados con diferentes dosis de P e incubados por diferentes períodos de tiempo y encontraron una recuperación de casi el 100 % del P añadido y, además, que entre el 30 y 60 % del P se transformó en poco lábil al término de un día de incubación. Otros autores (Hernández y López, 1997; Hernández y Bautis, 2005; Fernández y Turrión, 2011) han usado con éxito el fraccionamiento secuencial de Tiessen y Moir (1993) en diferentes condiciones ambientales y experimentales.

El objetivo de este trabajo fue cuantificar la distribución de las fracciones de fósforo inorgánico en suelos cultivados con arroz y fertilizados por varios años en el sistema de riego del Río Guárico.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó con suelos recolectados al momento de la cosecha en parcelas cultivadas con arroz. La selección de las parcelas para el muestreo se hizo por medio de una encuesta para conocer los años de cultivo fertilizado con fosfatos, y se escogieron 43 fincas con una historia de fertilización de 5 a 50 años. Cada muestreo de suelos cubrió una superficie de 2 hectáreas, aproximadamente, dependiendo del tamaño de la melga de relieve plano (tanque) utilizada para el riego del arroz.

El método de muestreo usado fue el de zig-zag tomando 20 sub muestras por melga, de 0 a 20 cm de profundidad, con un tubo de 7 cm de diámetro, las cuales se mezclaron para formar una sola muestra compuesta en cada finca. Los suelos se secaron al aire y se tamizaron con una malla plástica de 2 mm y fueron conservados en frascos

de vidrio para su posterior análisis.

El pH de los suelos se determinó en suspensión agua-suelo (1:2,5), la materia orgánica (MO) por medio de oxidación con dicromato (Heanes, 1984), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) con acetato de amonio (Rhoades, 1982) y el Al intercambiable con KCl 1N (Barnhisel y Bertsch, 1982).

Las fracciones de fósforo de los suelos se extrajeron, en forma secuencial, por medio del procedimiento propuesto por Tiessen y Moir (1993) siguiendo el siguiente esquema:

- **P en resina (PiR)**. Se pesaron 2 g de suelo en un tubo de centrifuga, se agregaron 20 mL de agua destilada y dos tiras de resina de intercambio aniónico de 9 por 62 mm, y luego de 16 h de agitación se removió la resina. Posteriormente, la muestra fue sometida a centrifugación por 10 min y se determinó el Pi resina en el sobrenadante.

- **P inorgánico lábil (PiL)**. Al suelo restante (decantado en el tubo de centrifuga) se agregaron 20 mL de NaHCO₃ 0,5 M (pH 8,5) y se llevó a 16 h de agitación y 10 min centrifugación. En el sobrenadante se determinó el PiL.

- **P inorgánico moderadamente lábil (PiML)**. Al suelo restante se agregaron 20 mL de NaOH 0,1 M, y se llevó a 16 h de agitación y 10 min centrifugación. En el sobrenadante se determinó el PiML.

- **P inorgánico ligeramente lábil (PiLL)**. Al suelo restante se agregaron 20 mL de HCl 1 M, y se llevó a 16 h de agitación y 10 min centrifugación. En el sobrenadante se determinó el PiLL.

- **P inorgánico ocluido (PiO)**. Al suelo restante se agregaron 10 mL de HCl concentrado, luego se llevó a baño maría, lavado con agua y centrifugación por 15 min. En el sobrenadante se determinó el PiO.

- **P inorgánico recalcitrante (PiRC)**. El suelo restante se digirió con H₂SO₄ concentrado y H₂O₂. En el extracto se determinó el PiRC.

El P en los extractos fue determinado según la metodología de Murphy y Riley (1962).

En una porción del sobrenadante se determinó el P orgánico (previa precipitación de la MO en los extractos coloreados), y en la otra porción se obtuvo el P total mediante digestión húmeda; luego, por diferencia se obtuvo el Pi total (PiT).

Se recabó información de los años de fertilización continua en 36 de las 43 parcelas

muestreadas, las cuales se distribuyeron en cinco espacios de tiempo con los siguientes intervalos: 5-15 años (9 parcelas), 16-25 años (5 parcelas), 26-35 años (9 parcelas), 36-45 años (9 parcelas) y 46-50 años (4 parcelas). En cada intervalo se localizaron los promedios de las diferentes fracciones de Pi, para hacer las comparaciones entre rangos de tiempo y dentro de ellos.

Dado que se encontró una alta variabilidad entre las fracciones de fósforo que no permitió establecer un modelo multivariado confiable ($P > 0,05$) para explicar las variaciones entre las distintas fracciones de P en relación con las variables de suelo (MO, pH, CIC, Ca, Al) y del tiempo de fertilización del arroz (años), los datos obtenidos se interpretaron por medio de comparaciones porcentuales y análisis de correlación y regresión.

Cuadro 1. Resumen de análisis químico de 43 muestras de suelos provenientes de parcelas cultivadas con arroz en el sistema de riego del Río Guárico

	MO (%)	pH	CIC ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Ca ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Al ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Máximo	4,00	6,9	14,3	2811,3	38,9
Mínimo	1,70	3,5	0,7	49,6	2,9
Promedio	2,77	5,4	6,1	1204,3	13,1

MO: materia orgánica; CIC: capacidad de intercambio catiónico

En promedio, las fracciones de fósforo inorgánico más abundantes fueron las ocluidas (PiO) y recalitrantes (PiRC) y correspondieron al 40,48 y 27,57 % del fósforo inorgánico total (PiT), respectivamente (Cuadro 2). La sumatoria de estas dos fracciones correspondió al 68,05 % del PiT, una clara evidencia de que la mayor parte del PiT en los suelos estudiados está inmovilizado. La fracción PiML fue la tercera en abundancia con 17,1 % del PiT, valor que es cercano a los encontrados por De Jager (2005) de 15 a 16 % y por Ochwoh et al. (2005) de 12 a 14 %. La contribución del PiLL al PiT fue de 11,39 %, cifra que es más alta que el rango de 1 a 8 % reportado por otros autores (Sattell y Morris, 1992; Ochwoh et al., 2005; Taddesse et al., 2008). Las fracciones menos abundantes fueron las de PiL con 3,16 % y la PiR con 0,38 % del PiT. Estas fracciones son consideradas como disponibles en el suelo para la planta por Hedley et al. (1982) y Tiessen y Moir (1993). Por su parte, Bhattacharyya et al. (2015) determinaron que el P soluble estuvo comprendido entre 2,6 y

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Casi la totalidad de los 43 suelos mostraron contenidos bajos de materia orgánica así como valores bajos de pH (Cuadro 1) aunque sólo dos de ellos mostraron pH's muy bajos (3,5 y 4,2), es decir, se trata de suelos entre ligeramente ácidos y ácidos. Si se considera que el arroz requiere, para un buen desarrollo, niveles de pH de 5,2 a 6,5 (Páez, 2004) el 75 % de los suelos podrían ser considerados aptos para el cultivo.

El 44 % de los suelos resultó con valores de CIC por debajo de $4 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, por lo cual podrían ser considerados de baja fertilidad (Havlin et al., 1999). El 88 % de los suelos resultó con niveles de Al intercambiable por debajo de $22,2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, valores considerados como bajos por Bernier (1999).

3,6 % del PiT en un suelo cultivado por arroz sometido a seis tratamientos de fertilización por 42 años. Taddesse et al. (2008) encontraron que la contribución de la fracción extraída con 0,5 M NaHCO_3 fue 0,45 a 0,65 % del PiT y señalan que esta baja contribución pudiera ser debida al agotamiento de esta forma debido al uso continuo de P por el cultivo. Otros autores encontraron porcentajes más altos, entre 4,3 y 8,8% (Du Preez y Claassens, 1999).

Tiessen y Moir (1993) se refieren al PiR como la forma intercambiable libre, ya que, según señalan, la resina no modifica químicamente la solución del suelo y el Pi extraído con bicarbonato (PiL) sólo introduce pequeños cambios químicos que, de alguna manera, se asemejan a la acción de las raíces, por lo cual éstas dos fracciones estarían disponibles para la planta.

Las fracciones PiR y PiL mostraron un comportamiento irregular y tendieron a disminuir en el tiempo, posiblemente porque son usadas por las plantas (Cuadro 3). En promedio, el PiR

varió entre 1,10 y 0,65 y el PiL entre 10,56 y 6,55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, es decir, la aplicación continua de fertilizantes fosfatados no se tradujo en incrementos sostenidos de éstas formas disponibles, posiblemente debido a la alta dinámica de éstas por la acción de las raíces en el

suelo. El PiL fue aproximadamente 5,1 a 12,6 veces más alto que el PiR lo que pareciera indicar que una mayor proporción del fertilizante aplicado al suelo se transformó en la forma disponible extraíble con NaHCO_3 que extraíble con resina.

Cuadro 2. Resumen de las fracciones de fósforo inorgánico en los suelos cultivados con arroz en el sistema de riego del Río Guárico

	PiR*	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC	PiT
Promedio	1,14	9,38	50,53	33,83	120,22	81,89	296,99
Máximo	12,71	24,41	113,03	135,36	256,33	149,68	691,52
Mínimo	0,18	3,11	15,58	8,48	23,52	34,54	85,41
Porcentaje	0,38	3,16	17,02	11,39	40,48	27,57	100,00

*R=Resina, L=lábil (NaHCO_3), ML=moderadamente lábil (NaOH), LL=ligeramente lábil (HCl 1M), O=ocluido (HCl concentrado), RC=recalcitrante ($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$), T=total

Cuadro 3. Distribución de las fracciones de Pi ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en diferentes períodos de tiempo

Años	PiR*	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC	PiT
5 – 15	1,10	9,33	54,96	42,03	132,56	104,63	339,96
16 – 25	0,68	6,94	43,42	25,04	80,28	56,31	215,61
26 – 35	1,05	10,56	56,00	33,35	130,97	83,23	320,04
36 – 45	0,76	9,61	49,35	30,08	130,29	84,22	304,31
46 - 50	0,65	6,55	44,46	20,96	121,81	72,13	266,55

*R=Resina, L=lábil (NaHCO_3), ML=moderadamente lábil (NaOH), LL=ligeramente lábil (HCl 1M), O=ocluido (HCl concentrado), RC=recalcitrante ($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$), T=total

El PiML no mostró mucha variación en el tiempo, en cambio la tendencia del PiLL fue a decrecer (Cuadro 3) desde 42,03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la primera década hasta 20,96 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la última. La relación PiML/PiLL resultó ser de 1,3 a 2,1 lo que sugiere que parte del fertilizante aplicado en el tiempo se transformó, preferentemente, a la forma moderadamente lábil, extraíble con NaOH 0,1 M.

El PiO fue entre 1,3 y 1,7 veces más alto que el PiRC (Cuadro 3) lo cual sugiere que, aparentemente, una mayor proporción del P aplicado al suelo es inmovilizado como forma ocluida.

El comportamiento del P inorgánico en el suelo (Cuadro 3) mostró, en general, una tendencia a disminuir con el tiempo, posiblemente debido a una restitución poco eficiente del P usado por la planta sumado a las posibles pérdidas atribuidas al manejo de los fertilizantes aplicados.

Si las fracciones de PiR y PiL son consideradas como formas disponibles para la planta en el suelo, la sumatoria de ambas se podría considerar como el fósforo actualmente disponible en el suelo (PiAD). Por otra parte, las fracciones PiML

y PiLL en su condición de lábiles no fácilmente disponibles estarían en capacidad de alimentar a la solución del suelo con P disponible, cuando su concentración baje debido a la acción de la absorción por las raíces; la sumatoria de estas dos fracciones podría ser considerada como la forma P lábil total de Pi en el suelo (PiLT). Finalmente las fracciones PiO y PiRC son formas fijadas o inmovilizadas en el suelo, con poca o ninguna acción sobre el P disponible (Hedley et al., 1982), por lo que la sumatoria de ambas podría ser considerada como el P fijado total (PiFT) en el suelo.

De acuerdo con el criterio anterior y como un promedio general para todos los años, el uso del PiAD para la planta sería 11,14 veces mayor que el uso de solamente el PiR (Cuadro 3). La consideración de PiAD como indicador del valor del P disponible en el suelo para la elaboración de recomendaciones de fertilizantes fosfatados podría ser aconsejable, pero necesariamente debería ser calibrado en experimentos de campo para comprobar su validez y eficiencia, y a su vez compararlo con el comportamiento de las soluciones extractoras de P disponible actual-

mente en uso.

La porción de PiAD (Cuadro 4), en promedio de las cinco décadas representa una pequeña parte del PiT (3,17 %), lo que demuestra que sólo una pequeña cantidad del fertilizante fosfatado aplicado, en diferentes períodos de tiempo, se mantiene disponible en el suelo. Este comportamiento guarda relación con el encontrado por Takahashi y Anwar (2007) en un suelo Andosol cultivado con trigo donde el P disponible tuvo sólo un incremento moderado con la fertilización durante 23 años.

El PiLT mostró variaciones en el tiempo, con una tendencia a disminuir, con un cambio de 96,99 a 65,42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Cuadro 4). En promedio general, el PiLT fue 8,46 veces más alto que el PiAD, una indicación de que una mayor porción del fertilizante aplicado al suelo pasa a formar parte de la fracción lábil no fácilmente disponible; un resultado parecido fue publicado por Schmidt et al. (1996) en un suelo ácido franco arcilloso fertilizado con fosfatos por 11 años, donde el exceso de P aplicado paso a formar parte del PiML.

Cuadro 4. Distribución de los promedios ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) sumados de las fracciones disponibles (PiAD), lábiles (PiLT), fijadas (PiFT) y total (PiT) en diferentes períodos de tiempo

Años	PiAD	PiLT	PiFT	PiT
5-15	10,43	96,99	237,19	344,61
16-25	7,62	68,46	136,59	212,67
26-35	12,61	89,35	214,20	316,16
36-45	10,37	79,43	214,51	304,31
46-50	7,20	65,42	193,94	266,56

Las formas no disponibles de P en los suelos (PiFT) fueron las más abundantes en el período de tiempo estudiado, con un valor máximo de 237,19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Cuadro 4) y un aparente descenso durante los años de fertilización. En promedio durante los años evaluados más de dos tercios del Pi en el suelo correspondió al PiFT (69,0 % del PiT), un poco más de la cuarta parte del PiT correspondió a las formas lábiles no fácilmente disponibles (PiLT) con 27,7 % y solamente 3,3 % del PiT correspondió al PiAD, es decir, al P fósforo actualmente disponible.

Lo anterior parece indicar que una alta proporción del fósforo aplicado al suelo fue inmovilizado en formas ocluidas o fijadas, hecho éste atribuido a que con el tiempo el fósforo puede ser adsorbido o fijado por efecto de la deshidratación o reorientación de los cristales de las fracciones químicas del suelo (Solórzano, 1997).

Al analizar el comportamiento de las fracciones de Pi en el tiempo de fertilización se puede observar que los niveles alcanzados en la segunda década (Cuadro 3) son notablemente más bajos que los correspondientes a las otras décadas. Más aun, si se considera que los resultados del período 16-25 años presentaron valores atípicos (posiblemente atribuido al menor tamaño de su muestra) la tendencia generalizada se corresponde con un descenso

sostenido en las diferentes fracciones.

Para conocer el comportamiento de las fracciones promedio de Pi con relación al pH de los suelos, éstos se agruparon en 11 rangos con intervalos de 0,1 unidades (Cuadro 5) y los valores de cada fracción se ajustaron a un modelo de regresión lineal. Los coeficientes regresores para pH y las fracciones PiL, PiML y PiLL no fueron significativos. Es conocido que el máximo disponible de P en el suelo ocurre a valores de pH entre 5,5 y 7,0 (Havlin et al., 1999), decreciendo al bajar o subir el pH fuera del rango señalado. La falta de asociación entre el pH y las fracciones de Pi disponibles y lábiles, en nuestro trabajo, podría atribuirse a que el rango de pH en los suelos trabajados se ubicó en los límites óptimos.

Las ecuaciones lineales de regresión calculadas para la asociación entre pH-PiO y pH-PiRC mostraron coeficientes de determinación (R^2) significativos ($P \leq 0,05$) e indicaron que el 48 y 37 % de la variación en PiO y PiRC, respectivamente, pueden ser atribuidas a las variaciones del pH en suelo (Figura 1).

Por otra parte, para conocer el comportamiento de las fracciones promedio de Pi con relación al contenido de Al en el suelo, este último fue agrupado en cinco clases: <5, 5-10, 10-15, 15-20 y >20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Cuadro 6) Los coeficientes de regresión calculados para la asociación con PiR,

PiL, PiML y PiLL no fueron significativos, evidenciando que el comportamiento de las fracciones de Pi señaladas no fueron influenciadas por los cambios del Al en el suelo. En cambio las fracciones PiO y PiRC estuvieron estrechamente relacionadas con el comportamiento del Al en el

suelo (Figura 2), lo cual fue corroborado por los altos coeficientes de determinación obtenidos (superiores a 0,83). La relación fue negativa, indicando que los niveles del Pi ocluido y Pi recalcitrante disminuyeron a medida que aumentó el nivel de aluminio en el suelo.

Cuadro 5. Distribución de las fracciones promedio de fósforo inorgánico ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en rangos de pH con intervalos de 0,1 unidades

pH	PiR*	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
3,5-5,0	1,06	11,16	50,04	29,33	62,70	69,63
5,10-5,19	0,76	9,69	45,26	21,16	78,74	53,96
5,20-5,29	0,44	9,39	39,47	20,03	38,27	41,17
5,30-5,39	0,46	7,50	40,70	30,89	87,45	73,23
5,40-5,49	0,47	9,10	51,73	33,81	153,94	103,36
5,50-5,59	0,65	8,72	64,86	41,18	179,22	100,10
5,60-5,69	0,35	3,55	27,38	13,91	83,45	55,53
5,70-5,79	1,14	8,48	53,19	41,38	122,25	99,45
5,80-5,89	1,65	14,23	71,19	53,84	171,03	84,15
5,90-5,99	1,00	5,13	33,48	21,27	193,58	107,44
6,00-6,99	3,27	12,34	61,03	57,69	152,58	100,03

*R=Resina, L=lábil (NaHCO_3), ML=moderadamente lábil (NaOH), LL=ligeramente lábil (HCl 1M), O=ocluido (HCl concentrado), RC=recalcitrante ($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$), T=total

Cuadro 6. Fracciones de Pi ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) distribuidos en diferentes rangos de aluminio en el suelo

Al ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	PiR*	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
0-5	0,87	7,92	44,78	28,34	157,25	94,41
5-10	0,83	7,04	47,71	29,17	137,93	91,31
10-15	1,43	11,15	62,92	48,67	116,73	92,25
15-20	0,85	10,48	53,39	31,20	101,32	75,20
20-25	0,57	13,46	51,90	36,04	70,03	48,63
25-30	0,35	6,54	28,21	15,06	79,24	53,34

*R=Resina, L=lábil (NaHCO_3), ML=moderadamente lábil (NaOH), LL=ligeramente lábil (HCl 1M), O=ocluido (HCl concentrado), RC=recalcitrante ($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$), T=total

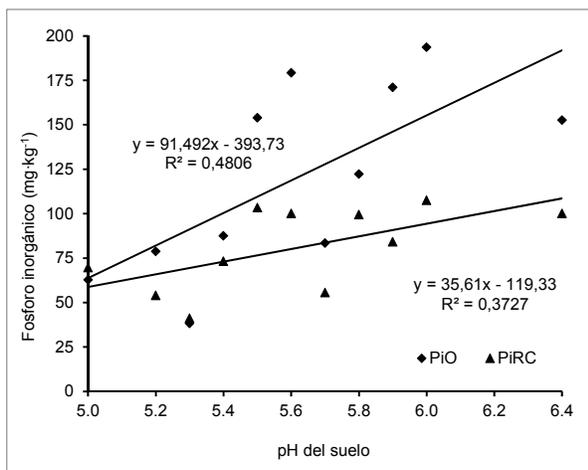


Figura 1. Relación del P inorgánico ocluido y recalcitrante con el pH del suelo

Es conocido que el P aportado al suelo por los fertilizantes pasa rápidamente a ser adsorbido por las superficies de los óxidos e hidróxidos de Al y Fe seguida por una lenta inmovilización en otras formas y también en el interior de las partículas del suelo (Linguist et al., 1997; Doberman et al., 2002; Fernández y Turrión, 2011).

En los suelos estudiados, se encontraron bajos niveles de aluminio intercambiable y cantidades significativas de calcio, por lo que se formarían preferentemente fosfatos de calcio, con un menor valor de K_{ps} , respecto a los fosfatos de aluminio. Los compuestos formados en este tipo de suelos presentarían menor reversibilidad en el equilibrio debido a los ciclos de inundación y secado a que han sido sometidos, por lo cual se requerirían extractantes muy fuertes para liberar el P ocluido y recalcitrante.

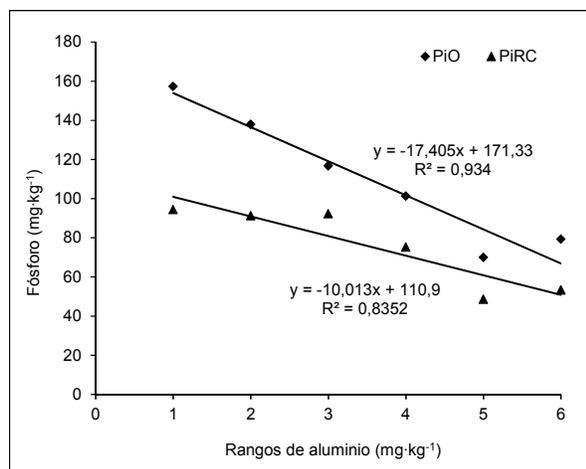


Figura 2. Efecto del aluminio sobre las fracciones de P inorgánico ocluido (PiO) y recalcitrante (PiRC)

CONCLUSIONES

La fracción de fósforo inorgánico más abundante en los suelos estudiados fue la moderadamente lábil y las menos abundantes las PiR y PiL.

La fertilización del arroz con fosfatos durante años no se tradujo en incrementos de las formas lábiles, y las fracciones Pi mostraron una tendencia a decrecer con el tiempo, especialmente en las dos últimas décadas.

El pH y Al de los suelos no estuvieron relacionados con el comportamiento de las formas lábiles (PiL, PiML y PiLL), mientras que sí existió relación con las formas no disponibles (PiO y PiRC) mediante funciones de carácter lineal y significativas.

AGRADECIMIENTO

Al FONACIT por otorgar el financiamiento, a la Asociación de Productores de Arroz del Estado Guárico por la ayuda durante el proceso de muestreo, a la Fundación Ciepe y al CDCH-UC.

LITERATURA CITADA

- Barnhisel, R. y P. Bertsch. 1982. Aluminum. In: A.L. Page (ed.). Methods of Soil analysis. Chemical and Microbiological Properties. Book series 9. ASA, SSSA. Madison, WI. pp. 275-300.
- Bhattacharyya, P., A. Kumar, M. Shahid, R. Tripathi, S. Mohanty, A. Kumar, R. Raja, B. Bihari, B. Lal, P. Gautam, Ch. Kumar, K. Singha y P. Kumar. 2015. Effects of 42-year long-term fertilizer management on soil phosphorus availability, fractionation, adsorption-desorption isotherm and plant uptake in flooded tropical rice. The Crop Journal 3(5): 387-395.
- Bernier, R. 1999. Análisis de suelo. Metodología e interpretación. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), CRI Remehue. Osorno, Chile. Serie Actas N° 2. 12 p.
- De Jager, P. y A. Claassens. 2005. Long term phosphate desorption kinetics of an acid sandy clay soil from Mpumalanga, South Africa. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 36: 309-319.
- Doberman, A., G. Thomas y T. Niels. 2002. Phosphorus fertilizer effects on phosphorus pools in acid upland soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 66: 652-660.
- Du Preez, H. y A. Claassens. 1999. Changes in inorganic and organic phosphorus in soil under maize (*Zea mays*) cultivation. S. Afr. J. Plant Soil 16: 207-213.
- Fernández, S. y M. Turrión 2011. Fraccionamiento secuencial de fósforo en el suelo. Comparación de dos métodos. Venesuelos 19: 5-11.
- Guo, F. y R. Yost. 1998. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. Soil Science 163: 822-833.
- Havlin, J., J. Beaton, J. Tisdale y W. Nelson. 1999. Soil fertility and fertilizers. Prentice Hall. Upper Saddle Rive, NJ.
- Heanes, D. 1984. Determination of total organic C in soil by and improved chromic acid digestion and spectrophotometric procedure. Soil Science Plant Analysis 15:1179-1213.
- Hedley, M., J. Stewart y B. Chauhan. 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.
- Hedley, M., G. Kirk y M. Santos. 1994. Phosphorus efficiency and the forms of soil phosphorus utilized by upland rice cultivars.

- Plant and Soil 158: 53-62
13. Hernández, I. y M. Bautis. 2005. Cambios en el contenido de fósforo en el suelo superficial por la conversión de sabanas en pinares. *Bioagro* 17: 69-78.
 14. Hernández, I. y D. López. 1997. Distribución del fósforo en una sabana de *Trachypogon* de los llanos altos centrales venezolanos. *Acta Biológica Venezolana* 17: 58-65.
 15. Linnquist, B. A., P. W. Singleton y K. G. Cassman. 1997. Inorganic and organic phosphorus dynamics during buildup and decline of available phosphorus in an Ultisol. *Soil Sci.* 162: 254-264.
 16. Ochwoh, V., A. Claassens y P. Jager. 2005. Chemical changes of applied and native phosphorus during incubation and distribution into different soil phosphorus pools. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 36: 535-556
 17. Páez, O. 2004. El cultivo del arroz en Venezuela. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Serie Manuales de Cultivo. INIA N° 1. Maracay. 202 p.
 18. Murphy, J. y J. Riley. 1962. A modified single method for determination of phosphates in natural waters. *Anal. Chem. Act.* 27: 31-36.
 19. Rhoades, J. 1982. Cation Exchange Capacity. in: *Methods Of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* Book series 9. ASA, SSSA. Madison WI. pp. 149-157.
 20. Sattell, R. R. y R. A. Morris. 1992. Phosphorus fractions and availability in Sri Lanka Alfisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1510-1515.
 21. Schmidt, J., S. Buol y E. Kamprath. 1996. Soil phosphorus dynamics during seventeen years of continuous cultivation: Fractionation analyses. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 60: 1168-1172.
 22. Solórzano, P. 1997. Fertilidad de suelos, su manejo en la producción agrícola. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Alcance 51. 207 p.
 23. Tadesse, A., A. Claassens y P. de Jager. 2008. Long term phosphorus desorption using dialysis membrane tubes filled with iron hydroxide and its effect on phosphorus pools. *J. Plant Nutr.* 31: 1507-1522.
 24. Takahashi, S. y M. Anwar. 2007. Wheat grain yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after years of annual fertilizer application to an Andosol. *Field Crops Research.* 101: 160-171.
 25. Tiessen, H. y J. Moir. 1993. Characterization of available P by sequential extraction. In: M. Carter (ed.). *Soil Sampling and Methods of Analysis.* Canadian Society of Soil Science. Lewis Pub. Boca Raton, Fl. pp. 75-86.
 26. Zhang, T. y A. Mackenzie. 1997. Changes of soil phosphorus fractions under long-term corn monoculture. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 61: 485-493.