

Fertilización fosfatada de los principales cultivos bajo siembra directa mecanizada en la región oriental del Paraguay

Phosphorus fertilization in no-till mechanized farming of eastern Paraguay

Cristian Andrés Britos Benítez¹, Héctor Javier Causarano Medina^{1}, Jimmy Walter Rasche Álvarez¹, Ursino Federico Barreto Riquelme² y Francisco Mendoza Duarte³*

¹ Departamento de Suelos y Ordenamiento Territorial, Casa Matriz, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción (FCA-UNA). San Lorenzo, Paraguay.

² Filial Pedro Juan Caballero, FCA-UNA. Pedro Juan Caballero, Paraguay.

³ Filial San Pedro de Ycuamandyyú, FCA-UNA. San Pedro, Paraguay.

*Autor para correspondencia (hector.causarano@agr.una.py).

Recibido: 20/04/2012; Aceptado: 13/08/2012.

RESUMEN

El fósforo es uno de los nutrientes que más limita la producción en sistemas agrícolas bajo siembra directa mecanizada en la Región Oriental de Paraguay. Los objetivos de esta investigación fueron evaluar el efecto de la fertilización fosfatada sobre el rendimiento de trigo, maíz y soja, y determinar el nivel crítico de fósforo en el suelo utilizando el extractante Mehlich-1. Se condujeron cuatro experimentos en los Departamentos de Caaguazú y Amambay. El delineamiento experimental fue bloques al azar con parcelas subdivididas y tres repeticiones. En el ciclo invernal, las parcelas principales se fertilizaron con 0, 50, 100, 200 y 400 kg P₂O₅ ha⁻¹ para crear niveles de fósforo y se sembró trigo. En el ciclo estival, las subparcelas se fertilizaron con 0, 40, 80 y 120 kg P₂O₅ ha⁻¹, y se sembraron soja y maíz. Los cultivos respondieron a la aplicación de fósforo y el grado de respuesta estuvo inversamente relacionado con la concentración de fósforo en el suelo en la profundidad 0–10 cm. El nivel crítico fue 16 mg kg⁻¹ para suelos con 110 a 200 g arcilla kg⁻¹ y 10 mg kg⁻¹ para los suelos con 310 a 600 g arcilla kg⁻¹. En promedio, la dosis de máxima producción fue 69 kg P₂O₅ ha⁻¹. Al agruparse los datos de esta investigación con los de otras investigaciones recientes se estableció el nivel crítico general para fósforo en 11,4 mg dm⁻³. Los resultados contribuyeron para mejorar la recomendación de fertilización fosfatada en la Región Oriental de Paraguay.

Palabras clave: Calibración, fertilización, fósforo, siembra directa.

ABSTRACT

No-till agriculture is increasing in Paraguay and it is necessary to adapt phosphorus fertilizer recommendations for this production system. The main objectives of this work were to determine the effect of P fertilization on wheat, corn and soybeans yields and to calibrate the soil test methodology for extracting P using the Mehlich-1 extractant. Four experiments were conducted in the Departments of Caaguazú and Amambay. The experimental design was a randomized block with split plots and three replications. Main plots were fertilized with 0, 50, 100, 200 and 400 kg P₂O₅ ha⁻¹ to create P levels and wheat was planted. In the summer cycle, the subplots were fertilized with 0, 40, 80 and 120 kg P₂O₅ ha⁻¹, and planted with soybeans and corn. Crops responded to P application and the degree of response was inversely related to P concentration in the soil at a depth of 0–10 cm. The critical soil P level was 16 mg kg⁻¹ in soils with 110 to 200 g clay kg⁻¹ and 10 mg kg⁻¹ in soils with 310 to 600 g clay kg⁻¹. On average, the dose for maximum production was 69 kg P₂O₅ ha⁻¹. By grouping the data of this study with those of other recent research, the critical concentration for phosphorus was set at 11.4 mg dm⁻³. Our results contributed to improve P fertilizer recommendation in the Eastern Region of Paraguay.

Key words: Calibration, fertilization, phosphorus, no-tillage.

INTRODUCCIÓN

Grandes extensiones de suelos en la Región Oriental del Paraguay presentan signos de degradación física y química. Para contrarrestar esta situación, se vienen implementando sistemas de manejo como la siembra directa y fertilización de cultivos. El fósforo es uno de los nutrientes que limita la producción de cultivos, habiendo déficit de aplicación de P en los suelos de uso agropecuario (Fatecha 2004, MacDonald et al. 2011). Es necesario conocer el nivel de fósforo disponible en el suelo y cuanto fertilizante aplicar para optimizar la producción de cosechas. Para este efecto, se debe establecer el patrón de respuesta del cultivo y su relación con el fósforo disponible en el suelo, este último determinado mediante análisis químico y experimentos a campo que muestran la respuesta de los cultivos a dosis crecientes de fertilización (Raij 1991).

Las recomendaciones de fertilización química para trigo, soja y maíz que se emplean actualmente en Paraguay, fueron elaboradas en la década del 90, para sistemas de producción que empleaban arado y rastra en la preparación de los suelos; o están basadas en recomendaciones utilizadas en los estados de Paraná, San Pablo, Minas Gerais o Rio Grande del Sur, Brasil (Barreto 2008).

Durante los años 2003–2010, la Cámara Paraguaya de Exportadores de Cereales y Oleaginosas (CAPECO) y la Universidad Federal de Santa María (UFSC), Brasil, cooperaron en un proyecto de investigación que buscaba calibrar métodos de análisis de suelos y adecuar las recomendaciones de fertilización a base de nitrógeno, fósforo y potasio para trigo, soja y maíz cultivados en siembra directa. En el marco de esta cooperación, se condujeron siete experimentos en fincas de agricultores en los departamentos de Alto Paraná, Itapúa, Amambay y Misiones (Cubilla 2005).

Durante los años 2009 y 2010, investigadores de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción (FCA/UNA), con el apoyo financiero del Instituto de Biotecnología Agrícola (INBIO) condujeron experimentos similares a los de CAPECO – UFSC en cuatro fincas de agricultores en los Departamentos de Caaguazú y Amambay, donde se cultiva aproximadamente el 26% del trigo, 19% de la soja y 18% del maíz producidos en Paraguay (DCEA 2008).

Este artículo se elaboró en base a las experiencias adquiridas y los datos levantados durante la investigación, que tuvo como objetivos: i) evaluar el efecto de la fertilización fosfatada sobre el rendimiento de trigo, maíz y soja, y ii) determinar el nivel crítico de fósforo en el suelo, de manera a fortalecer la base de datos sobre calibración

de análisis de suelo y recomendaciones de fertilización fosfatada en la Región Oriental del Paraguay.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio abarca los Departamentos de Caaguazú y Amambay de la Región Oriental del Paraguay. El clima de los sitios experimentales es subtropical húmedo, meso térmico, con verano cálido e invierno con heladas ocasionales (Abate, 2000). Los suelos de las áreas experimentales difieren en clase textural y nivel de fósforo, siendo representativos de las áreas de producción de granos donde se practica la siembra directa, como se puede observar en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Departamentos, localidades, orden de suelos, textura del horizonte superficial y número de años en siembra directa en fincas de agricultores donde se condujo experimentación sobre fertilización fosfatada.

Departamento	Localidad	Orden de suelo	Textura Superficial	N° de años en Siembra Directa
Caaguazú	Cnel. Oviedo	Alfisol	Franco arenosa	1
Caaguazú	Campo 9	Alfisol	Franco arenosa	10
Amambay	Yvypé	Oxisol	Arcillo arenosa	10
Amambay	Chiriguelo	Oxisol	Arcillo arenosa	10

Los suelos se agruparon de acuerdo a su contenido de arcilla. Fueron considerados de Clase 1 aquellos suelos con 110 a 200 g kg⁻¹ de arcilla y correspondieron a los experimentos realizados en Cnel. Oviedo y Campo 9, en el Departamento de Caaguazú. Fueron considerados de Clase 2 los suelos con 310 a 600 g kg⁻¹ de arcilla y correspondieron a los experimentos realizados en Chiriguelo e Yvypé, en el Departamento de Amambay.

El delineamiento experimental fue de bloques completamente aleatorizados con arreglo en parcelas divididas, y tres repeticiones. Cada experimento tuvo 180 unidades experimentales de 30 m² cada una. Los cultivos fueron sembrados en siembra directa. Las siembras se realizaron en las épocas recomendadas para cada región, con el principal objetivo de obtener máxima producción del cultivo. Primeramente fue sembrado el trigo en el ciclo de invierno de 2009 y luego soja y maíz en el ciclo estival del mismo año.

Antes de instalar los experimentos se extrajeron muestras compuestas del suelo a una profundidad de 0–10 cm y las mismas fueron analizadas en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción. Los resultados de los análisis sirvieron para detectar los niveles de nutrientes. El control de insectos, enfermedades y malezas se realizó siguiendo las recomendaciones técnicas para cada cultivo, con el objetivo que los mismos puedan expresar su potencial productivo.

Antes de la siembra del trigo, las parcelas principales se fertilizaron con 0, 50, 100, 200 y 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅ en forma de superfosfato triple, con lo que se pretendió crear varios niveles de fósforo en el suelo. Todas las parcelas recibieron fertilización de base con dosis de 60 y 50 kg ha⁻¹ de N y K₂O, en forma de urea y cloruro de potasio, respectivamente.

Posterior a la cosecha del trigo, antes de la siembra de soja y maíz, las subparcelas se fertilizaron con 0, 40, 80 y 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ en forma de superfosfato triple. Ambos cultivos recibieron 50 kg ha⁻¹ de K₂O en forma de cloruro de potasio. El maíz recibió además 180 kg ha⁻¹ de N en forma de urea, aplicado en forma parcelada, 30 kg ha⁻¹ a la siembra y el restante a los 35 días después de la emergencia. Los fertilizantes fueron aplicados al voleo, en forma manual.

Luego de la cosecha de los cultivos agrícolas se colectaron muestras de suelo de las unidades experimentales. Para el efecto, se extrajeron 10 submuestras de cada unidad experimental a una profundidad de 0–10 cm y luego fueron mezcladas, etiquetadas y codificadas para su posterior análisis.

En el laboratorio, las muestras se secaron al aire y fueron pasadas a través de un tamiz de 2 mm, para obtener el material sobre el cual se realizaron los análisis. Para la determinación de fósforo, 5 g de suelo preparado y 50 mL de la solución Mehlich-1 (Mehlich 1953) se colocaron en un frasco de plástico, la suspensión se agitó durante 15 minutos a 100 oscilaciones por minuto y se la dejó reposar por espacio de una noche. Al día siguiente, 2 mL del sobrenadante se transfirió a un tubo de ensayo, al cual también se agregó un reactivo conteniendo molibdato de amonio y ácido ascórbico. La mezcla en el tubo de ensayo se agitó con un vortex y luego se la dejó reposar durante 20 minutos, tiempo en el cual desarrolló una coloración azulada. La intensidad del color indica la concentración de fósforo en la muestra y fue medida en un espectrofotómetro colorimétrico a 740 nm.

Para la evaluación de rendimiento de grano, se cosecharon en forma manual tres metros lineales de las tres hileras centrales de cada unidad experimental y cada cultivo. Quedando establecida de esta manera el área útil

de cada unidad experimental en 1,53 m² para trigo, 3,6 m² para soja y 7,2 m² para maíz. La cosecha de trigo se realizó en setiembre de 2009 y las cosechas de maíz y soja en la primera quincena de marzo del 2010. Luego de la cosecha, las muestras fueron desgranadas, limpiadas, secadas al aire y pesadas. Los rendimientos de grano fueron expresados al 13% de humedad.

Se aplicaron funciones lineales o polinomiales de segundo grado, para expresar la relación entre las dosis de fertilización fosfatada y el rendimiento de los cultivos, y la función de Mitscherlich para expresar la relación entre la concentración de fósforo en el suelo y el rendimiento relativo de los cultivos.

El rendimiento relativo (RR) fue calculado dividiendo rendimientos de la parcela testigo por el rendimiento máximo, como puede apreciarse en la siguiente ecuación:

$$RR (\%) = \frac{\text{Rendimiento de la parcela testigo}}{\text{Rendimiento máximo en el experimento}} \times 100 \quad (1)$$

En la ecuación (1), el rendimiento de la parcela testigo corresponde al intercepto en la ecuación de regresión entre las dosis de fósforo aplicado y el rendimiento del cultivo. El valor de rendimiento máximo se calculó de diferentes maneras según fuere la respuesta del cultivo a la aplicación del fertilizante. En el caso de respuesta lineal positiva, el rendimiento máximo correspondió al valor estimado por la ecuación de regresión en el máximo de la dosis de fósforo aplicado; en caso de respuesta negativa, el rendimiento máximo correspondió al intercepto en la ecuación de regresión. En el caso de respuesta polinomial de segundo grado, se utilizó la técnica de la derivación para determinar el valor de X cuando Y alcanza el punto máximo, luego se reemplazó el valor de X en la función polinomial para determinar el rendimiento máximo.

La función de Mitscherlich tiene la siguiente forma:

$$y = A (1 - 10^{-bx}) \quad (2)$$

Donde “y” representa el rendimiento relativo, “A” es el valor máximo de “y”, “b” es el coeficiente de eficiencia, y “x” es la concentración de fósforo en el suelo expresada en mg kg⁻¹.

A partir de la función de Mitscherlich ajustada a los datos se determinó el nivel crítico de fósforo en el suelo, que se definió como la proyección del 90% del rendimiento relativo sobre la abscisa, y corresponde a la concentración por debajo de la cual existe una alta probabilidad de respuesta a la fertilización.

Una vez calculado el nivel crítico se establecieron las clases de fertilidad. El 90% del rendimiento relativo estableció el nivel crítico sobre la abscisa; este valor

divido por tres permitió establecer fajas equidistantes para las clases "muy baja", "baja" y "media". La clase "alta" se encuentra comprendida entre el nivel crítico y el nivel crítico multiplicado por dos. A partir del límite superior de la clase "alta" inicia la clase "muy alta".

De manera a contribuir para una mejor calibración de análisis de fósforo en la Región Oriental de Paraguay, se integraron los datos de esta investigación con los de Cubilla (2005), que reporta datos para los departamentos de Alto Paraná, Itapúa, Amambay y Misiones. Para el efecto, se ajustaron las concentraciones de fósforo en el suelo de manera a expresarlas en mg dm^{-3} , considerando densidad aparente de $1,26 \text{ g cm}^{-3}$ para los suelos de Cnel. Oviedo y $1,09 \text{ g cm}^{-3}$ para los demás. Las densidades aparentes fueron medidas en laboratorio sobre muestras tamizadas y secadas al aire.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 1, 2 y 3 se observa el nivel o punto crítico de fósforo en el suelo. Cuanto menor sea la concentración de P en el suelo, mayor será la probabilidad de respuesta del cultivo a la fertilización.

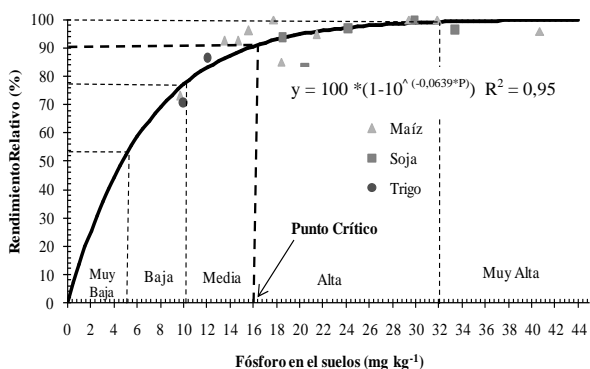


Figura 1. Relación entre el Rendimiento Relativo de trigo, soja y maíz, y la concentración de fósforo en la camada superficial del suelo (0–10 cm), extraído con Mehlich-1, en suelos con 110 a 200 g kg^{-1} de arcilla, en el Departamento de Caaguazú.

Independientemente de la clase textural, en trabajos de calibración realizados en Paraguay, para varios cultivos en suelos laboreados, se encontró 12 mg kg^{-1} de nivel crítico para el fósforo (Fatecha 1999). Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que el nivel crítico para la Clase 1 fue 16 mg kg^{-1} y para la Clase 2 fue $9,5 \text{ mg kg}^{-1}$; cuando se consideraron todos los suelos el nivel crítico fue $11,5 \text{ mg kg}^{-1}$. Es decir, cuando fueron agrupados suelos de diversas clases texturales se obtuvo resultado similar al de Fatecha (1999). Resultados similares también fueron reportados por Cubilla (2005) y Barreto (2008).

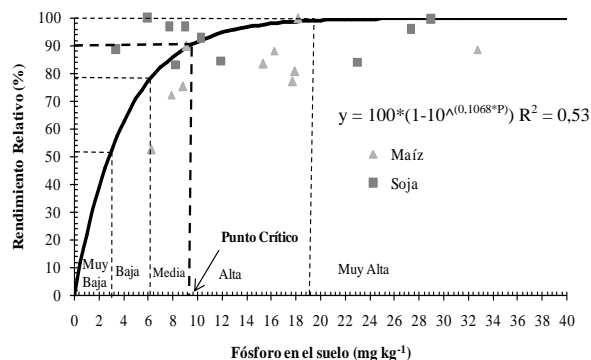


Figura 2. Relación entre el Rendimiento Relativo de soja y maíz, y la concentración de fósforo en la camada superficial del suelo (0–10 cm), extraído con Mehlich-1, en suelos con 310 a 600 g kg^{-1} de arcilla, en el Departamento de Amambay.

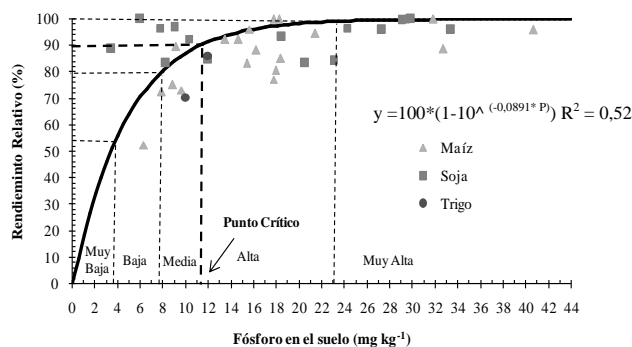


Figura 3. Relación entre el Rendimiento Relativo de soja y maíz, y la concentración de fósforo en la camada superficial del suelo (0–10 cm), extraído con Mehlich-1, en suelos con 110 a 600 g kg^{-1} de Arcilla, Departamentos de Caaguazú y Amambay.

La adición de dosis crecientes de fertilizante fosfatado produjo cambios en la concentración de fósforo en el suelo. Conociendo la relación entre fertilizante aplicado y la concentración de fósforo en el suelo fue posible calcular cuántos kg ha^{-1} de P_2O_5 se deben aplicar para elevar 1 mg kg^{-1} la concentración de P en el suelo, y a partir de ahí, estimar la necesidad de P_2O_5 para elevar la concentración de P en el suelo hasta el nivel de suficiencia para las plantas.

En todos los experimentos se observó aumento en la concentración de fósforo en relación directa con el aumento de las dosis de P_2O_5 aplicadas. Esto se debe a que cuando se adiciona P al suelo se induce al aumento de P en la fase sólida y también en la solución del suelo. El fósforo del suelo aumenta hasta una concentración máxima, que se denomina capacidad de adsorción máxima de P, y es característica de cada suelo (Anghinoni y Bissani 2004, citado por Cubilla 2005). La

capacidad de adsorción máxima de los suelos estudiados no pudo ser determinada con los datos experimentales, debido a que la relación entre P aplicado y P en el suelo fue lineal.

La **Tabla 2** muestra la ecuación que expresa la relación entre cantidad de fertilizante fosfatado aplicado y la concentración de fósforo en el suelo, coeficiente de

determinación y cantidad de fertilizante que se debe aplicar para elevar 1 mg kg⁻¹ la concentración de fósforo en los suelos estudiados. Se observa que dentro de una misma clase textural, la necesidad de P₂O₅ para elevar 1 mg kg⁻¹ la concentración de fósforo aumenta en relación directa al contenido de arcilla, probablemente debido al efecto inmovilizador de la fracción arcilla en los suelos.

Tabla 2. Ecuación que expresa la relación entre cantidad de fertilizante fosfatado aplicado y la concentración de fósforo en el suelo, coeficiente de determinación y cantidad de fertilizante para elevar 1 mg kg⁻¹ la concentración de fósforo en suelos de Caaguazú y Amambay, 2009.

Experimento	Contenido Arcilla ---g kg ⁻¹ ---	R ²	Ecuación	Necesidad de P ₂ O ₅ para elevar 1 mg kg ⁻¹ de P ---kg ha ⁻¹ ---
Cnel. Oviedo	120	0,96	y = 11,67 + 0,064x	16
Campo 9	180	0,85	y = 18,74 + 0,028x	36
Yvypé	440	0,72	y = 11,86 + 0,040x	25
Chiriguelo	450	0,79	y = 6,15 + 0,025x	36

La **Figura 4** integra los datos de la **Figura 3** con los de Cubilla (2005); para el efecto, se ajustaron las concentraciones de fósforo en el suelo de manera a expresarlas en mg dm⁻³, considerando una densidad aparente de 1,26 g cm⁻³ para los suelos de Cnel. Oviedo y 1,09 g cm⁻³ para los demás.

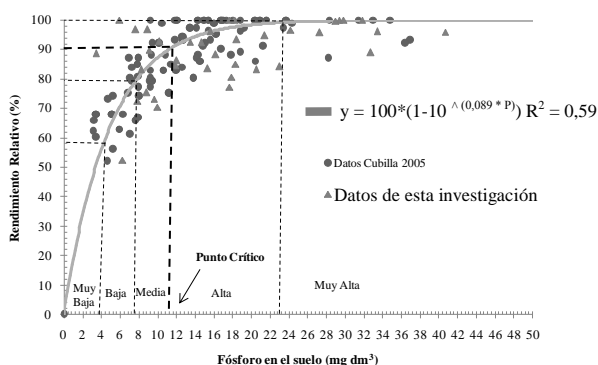


Figura 4. Relación entre el Rendimiento Relativo de trigo, soja y maíz, y la concentración de fósforo en la camada superficial del suelo (0–10 cm), extraído con Mehlich-1, en suelos de con 110 a 600 g kg⁻¹ de Arcilla, Departamentos de Alto Paraná, Itapúa, Amambay, Misiones y Caaguazú.

En la Investigación de Cubilla (2005), el coeficiente “b” de la ecuación de Mitscherlich fue 0,089 y el coeficiente de determinación (R²) fue 0,75. En esta Investigación, el coeficiente “b” fue 0,089 y el R² fue 0,52. Por lo tanto, la función que representa la relación entre rendimiento relativo y concentración de fósforo en el suelo es la misma para ambos estudios pero los datos generados en esta investigación tuvieron mayor dispersión. El coeficiente “b” de la función que representa la integración de ambos estudios fue también 0,089 y el R² fue 0,59.

Como se observa en la **Figura 4**, al integrar los datos de ambas investigaciones, el nivel crítico de fósforo en el suelo es 11,4 mg dm³. Las fajas de fertilidad se presentan en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Fajas de fertilidad de fósforo en la camada superficial (0 –10 cm), en suelos con 110 a 600 g kg⁻¹ de Arcilla, extraído con Mehlich-1. Departamentos de Alto Paraná, Itapúa, Amambay, Misiones y Caaguazú.

Faja de Fertilidad	Concentración de P en el suelo (mg dm ³)
Muy Baja	≤ 3,8
Baja	3,9 – 7,6
Media	7,8 – 11,4
Alta	11,5 – 22,8
Muy Alta	>22,8

CONCLUSIONES

En general, los cultivos de trigo, maíz y soja responden a la aplicación de fertilización fosfatada en suelos de los Departamentos de Caaguazú y Amambay. El grado de respuesta a la fertilización fosfatada está directamente relacionado con el historial de aplicación de fósforo y la concentración de fósforo en el suelo.

El nivel crítico, definido como la concentración de fósforo en el suelo por debajo de la cual la probabilidad de respuesta a la aplicación de fertilizantes aumenta, es de 16 mg kg⁻¹ para suelos de clase textural 1 (110 a 200 g arcilla kg⁻¹) y 10 mg kg⁻¹ para clase textural 2 (310 a 600 g arcilla kg⁻¹). La integración de datos de esta investigación con los de Cubilla (2005) permite definir el nivel crítico de P en el suelo, extraído con Mehlich-1, en 11,4 mg P dm⁻³.

AGRADECIMIENTO

Al Instituto de Biotecnología Agrícola (INBIO) por el financiamiento que hizo posible esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Abate, J. 2000. La situación ambiental del Paraguay (en línea). Asunción, PY. Consultado 26 mar. 2012. Disponible en www.paraguay.com.py/htm.
- Barreto R, UF. 2008. Recomendações de fertilização fosfatada e potássica para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai. Tese Dr. Santa Maria UFSM, RS Universidade Federal. 234 p.
- Cubilla, M C. 2005. Calibração visando recomendações de fertilização fosfatada para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai. Tese Maestrado. Santa Maria, BR, Universidade Federal de Santa Maria. 167p.
- Dirección de Censo y Estadísticas Agropecuarias (DCEA, PY). 2008. Censo Agropecuario Nacional. Asunción, PY.
- Fatecha, A. 1999. Guía para la fertilización de cultivos anuales y perennes de la región oriental del Paraguay. San Lorenzo, PY, Sociedad Paraguaya de Ciencias de Suelos, 33 p. Boletín Técnico N°1
- Fatecha, D.A. 2004. Clasificación de la fertilidad, acidez activa (pH) y necesidad de cal agrícola de los suelos de la región oriental del Paraguay. Tesis de graduación. San Lorenzo, PY, Facultad de Ciencias Agrarias – Universidad Nacional de Asunción.
- MacDonald, G.K ; Bennett, E.L.; Potter, P.A.; Ramankutty, N. 2011. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. PNAS. 108(7): 3086-3091, doi: 10.1073/pnas.1010808108
- Mehlich, A. 1953. Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄ by North Carolina Soil Testing Laboratories. Raleigh. En línea. University of North Carolina. Consultado 2 feb 2012. Disponible en <http://soils.rs.uk.y.edu/M3vsM1.htm>.
- Raij, B. van.1991.Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba, Brasil, Ceres/Potafos. 343 p.