

EFFECTO RESIDUAL DEL FERTILIZANTE FOSFATADO ADICIONADO AL CULTIVO DE LA PAPA EN UN ANDISOL DE JUAN VIÑAS, COSTA RICA

Alfredo Alvarado^{1/*}, Isabel Iturriaga^{**}, Jot T. Smyth^{***}, Edward Portuñal^{*}, Juan M. Ureña^{****}

Palabras clave: Papa, *Solanum tuberosum*, fertilización al suelo, fósforo, efecto residual, Andisoles, Costa Rica.

Keywords: Potato, *Solanum tuberosum*, soil fertilization, phosphorus, residual effect, Andisols, Costa Rica.

Recibido: 22/07/08

Aceptado: 13/10/08

RESUMEN

Se estudió el efecto residual de la aplicación de P como fertilizante al cultivo de la papa en un suelo Hydric Hapludands de la Hacienda Juan Viñas, aplicando 0, 150, 300, 450 y 600 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ por 1 y 2 años consecutivos. Se tomaron muestras de suelo al inicio y final del cultivo, foliares al momento de floración (48 dds), de biomasa aérea antes de la quema de follaje (93 dds) y de tubérculos al momento de la cosecha (116 dds). A las muestras de suelo se les determinó el P disponible mediante los métodos de Olsen modificado, Bray 1 y Mehlich 3. Al aplicar P durante el primer año del experimento, el rendimiento fue bajo y no se apreció efecto residual con ninguna de las dosis. Con la aplicación consecutiva de P durante 2 años, el cultivo respondió de forma creciente al aumento en la dosis de fertilizante alcanzándose el máximo rendimiento de tubérculos (16,39 t.ha⁻¹) con la cantidad de 600 kg.ha⁻¹ de P₂O₅. El método de Olsen modificado se consideró como el mejor para estimar el P disponible en el suelo, ya que fue el que mejor representó la tendencia de este nutriente durante los 2 años de estudio. Para obtener un efecto residual importante fue necesaria al menos, la dosis de 450 kg.ha⁻¹ de P₂O₅, aplicada por 2 años consecutivos, con la que se consiguió un aumento de 2-3 mg.l⁻¹.año⁻¹ de P. La retención de P por parte del suelo fue del 93% durante el primer cultivo y del 91% durante el segundo. El mejor valor de correlación entre las distintas soluciones extractoras se consiguió con Olsen modificado y Mehlich 3 (R²=0,705).

ABSTRACT

Residual effect of phosphorus from fertilizer applied to potatoes in Andisols at Juan Viñas, Costa Rica. The residual effect of P-fertilizer applied to 2 consecutive potato crops growing in a Hydric Hapludands was studied at Hacienda Juan Viñas. Phosphorus rates compared were 0, 150, 300, 450 and 600 kg.ha⁻¹ of P₂O₅, applied to the first crop and to 2 consecutive crops. To avoid fertilizer placement effects, soil samples were taken after plowing the land for planting and after digging the potatoes at harvesting. The samples were analyzed for P using modified Olsen, Bray 1 and Mehlich 3 extractants. The addition of P to the first crop only allowed to obtain low potato yields, without any significant residual effect of the P availability in the soil. After P additions for 2 consecutive crops, yields increased proportionally to the rate of P added, to attain a maximum yield of 16.39 t.ha⁻¹ with the rate of 600 kg.ha⁻¹ of P₂O₅. The Modified-Olsen method best estimated soil P changes due to P-fertilizer additions after the 2 years of fertilization and cropping. To attain measurable soil P residual rates, over 450 kg.ha⁻¹ of P₂O₅ for 2 consecutive years were required; this allowed obtaining an increase of 2-3 mg.l⁻¹.year⁻¹ of P. Phosphorus retention in the soil was 93% during the first year of the experiment, decreasing to 91% during the second year. Among soil P extractants, the best correlation between methods was Modified Olsen and Mehlich 3 (R²=0.705).

1 Autor para correspondencia. Correo electrónico: alfredoal@carari.ucr.ac.cr

* Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

** Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España.

*** Departamento de Suelos, Universidad del Estado de Carolina del Norte, Raleigh, Carolina del Norte, EE. UU.

**** Hacienda Juan Viñas, Cartago, Costa Rica.

INTRODUCCIÓN

Varios autores mencionan que en Costa Rica los productores de papa utilizan dosis de fertilizante mayores a las requeridas por el cultivo, lo que puede provocar una disminución del rendimiento al reducir el tamaño de los tubérculos, contaminar el suelo (efecto residual) y elevar los costos de producción (Jackson et al. 1981, Palmieri 1983, Castro 1985, Soto 1994). A pesar de que el contenido total de P en los Andisoles de Costa Rica oscila entre 800 y 5500 mg.l⁻¹, solo entre 6 y 161 mg.l⁻¹ se encuentran como P disponible en terrenos cultivados con papa, estimado por el método de Olsen modificado (Soto 1998). A diferencia de lo que pueda ocurrir en otras áreas volcánicas que no sean basáltico-andesíticas (caso costarricense), cuando las cenizas son de origen riolítico-dacíticas (situaciones comunes en otros países centroamericanos y Ecuador), el contenido de P total disminuye (Ospina 1974), al igual que ocurre con el P disponible, lo que afecta no solo la posibilidad de respuesta de la papa a la adición de P, sino también el efecto residual del fertilizante adicionado.

En Costa Rica, el P disponible se puede asociar a la mineralogía de la arcilla dominante en los subórdenes de los Andisoles (Canessa et al. 1986). Los Vitrudands son suelos que presentan abundancia de minerales primarios con baja retención de fosfatos (71%) debido al alto contenido de arenas, al bajo contenido de Al activo y bajo valor de pH en NaF. Los Haplustands retienen un 84% del P adicionado, mientras que los Hapludands y los Hydrudands presentan valores de retención de fosfatos de 92%, debido a la mayor predominancia de la fracción de Al activo en el suelo (Henríquez 2005). Ospina (1974), Bertsch (1982), Canessa et al. (1986, 1987), Soto (1998), Alvarado et al. (2001) mencionan que existe una relación entre el P retenido por los suelos volcánicos y su grado de evolución, de manera que cerca del cono volcánico (tiempo cero, baja temperatura, poca vegetación y granulometría arenosa), la ceniza fresca está poco meteorizada y la retención de P es baja debido a la poca formación de materiales de bajo rango de cristalización.

En el siguiente piso altitudinal hacia abajo, en el cual la humedad del suelo es alta durante todo el año, esto es que no existen periodos alternos de humedad y sequía, se forma más alófana y esta no evoluciona hacia formas de mayor ordenamiento estructural (arcillas cristalinas); bajo estas condiciones estos suelos son altamente fijadores de P. A mayor distancia del cono volcánico la mayor influencia de un régimen de humedad ústico hace que los materiales amorfos evolucionen a formas cristalinas (arcilla halloisíticas), por lo que la retención de P disminuye.

A largo plazo, el P disponible en Andisoles aumenta conforme se incrementa el número de años que se ha fertilizado el cultivo con cantidades elevadas de P (Soto 1998, Ramírez 2007). En ambos estudios, la correlación entre el contenido de P disponible y los años de uso del terreno adolece de la subjetividad (veracidad) de los datos de años de uso por parte de los informantes; aún así los valores de correlación encontrados en el caso de Ramírez (2007) son relevantes, mencionándose que con la adición de fertilizantes en el tiempo se eleva en 2,5 mg.l⁻¹.año⁻¹ la cantidad de P disponible para los cultivos, en particular cuando se adicionan más de 450 kg.ha⁻¹.año⁻¹ de P₂O₅.

En suelos derivados de cenizas volcánicas el P generalmente limita la producción de los cultivos, dado que su disponibilidad para las plantas es baja y el P aplicado en forma de fertilizante es rápidamente retenido por el suelo (Fassbender 1969; Alvarado y Buol 1985). La retención de P es el proceso por el cual los fosfatos solubles, aplicados en forma de fertilizante, pasan a formas menos disponibles debido a la reacción con partículas orgánicas e inorgánicas del suelo (Henríquez 2005). Dos tipos de mecanismos causan la retención de los fosfatos: 1) su precipitación como fosfatos de baja solubilidad del tipo de las apatitas (Ca₅(PO₄)OH), estrengita (FePO₄.2H₂O), variscita (AlPO₄.2H₂O) y otros fosfatos complejos cristalizados o sus formas amorfas, como consecuencia de la reacción de los iones fosfato con los respectivos cationes en la fase acuosa del suelo y 2) las reacciones de adsorción superficial de los iones fosfato sobre las partículas coloidales

del suelo, como la materia orgánica, arcillas e hidróxidos (Fassbender 1966). La retención del P es reversible, de manera que la cantidad de P desorbido correlaciona con las formas de P lábil en Andisoles, encontrando que los suelos pueden desorber entre 76 y 433 mg.l⁻¹ en un periodo de 70 días (Soto 1998); Henríquez (2005) encontró desorción de P entre 20 y 42 mg.l⁻¹ en un periodo de 8 días. Empleando papa como planta indicadora, Soto (1998) encontró que el P extraído acumulativo aumenta conforme aumenta el uso del suelo debido al efecto residual del fertilizante. Se determinó que el nivel crítico de P en el suelo para el cultivo de la papa bajo estas condiciones era de 35 mg.l⁻¹ extraído con Olsen modificado (Soto 1999) y más recientemente de 55 mg.l⁻¹ (Soto 2001).

Como el movimiento del P en el suelo es limitado, cuando el nutrimento se adiciona como fertilizante se debe localizar donde las raíces lo puedan interceptar. Por eso, 1) la época de aplicación de P en suelos con alta capacidad de retención del nutrimento debe coincidir con las etapas de mayor absorción del P por la planta, 2) el fraccionamiento de la aplicación de P ha demostrado ser una herramienta eficaz para aumentar la eficiencia del fertilizante y 3) la aplicación de P al voleo sobre la superficie del suelo y la incorporación de fertilizante en el suelo antes de sembrar incrementan el contacto del fertilizante con el suelo y aumentan el riesgo de mayor retención (lo que obliga a utilizar dosis muy altas de P para elevar su disponibilidad). La aplicación de P en banda a un lado de la semilla, o incorporarlo en el fondo del surco u hoyo de siembra es la forma agronómica más eficiente de localizar este nutrimento en suelos de baja fertilidad. Esta técnica disminuye el contacto del fertilizante con las partículas de suelo, haciendo que esté disponible por mayor tiempo (Jackson et al. 1981, Álvarez et al. 2001).

La recuperación de P proveniente del fertilizante por los cultivos es baja en muchos suelos tropicales y en particular en Andisoles; Urrutia e Igue (1972) encontraron que el fosfato monocálcico monohidratado y el superfosfato simple se disolvieron más rápido que el fosfato dicálcico

anhidro, lo que puede acelerar su retención en el suelo pero también mejorar su absorción por parte del cultivo. En este mismo tipo de suelos, Suárez e Igue (1974) determinaron que la absorción de P del fertilizante aplicado por parte de la planta, puede incrementarse con el aumento en el tamaño de las partículas del producto y que el efecto residual también se ve favorecido. Aguirre (1993), encontró que para el cultivo de papa con las variedades en la zona alto-andina (Chinchero 3800 msnm, Cusco), la fertilización fosfatada repercutió significativamente en el rendimiento de tubérculos de papa y la superioridad de las fuentes solubles con respecto a las fuentes poco solubles y las fuentes orgánicas; la roca fosfórica molida tuvo mejor resultado que sin ser molida.

En experimentos de campo conducidos en Andisoles de la Sierra Alta de Ecuador (Espinosa 1991), se evaluó la respuesta a la aplicación de P en el cultivo de la papa en las mismas parcelas por 3 ciclos consecutivos. Los resultados obtenidos muestran que los rendimientos en la parcela testigo eran bajos (6,37 t.ha⁻¹) aún cuando el contenido de P en el suelo, extraído con Olsen era de 28 mg.l⁻¹. Por otro lado, existió una apreciable respuesta en rendimientos (32-34 t.ha⁻¹) a las dosis crecientes de P en todos los ciclos, indicando que el efecto residual de P es bajo, aun cuando el análisis de suelo no reflejaba este hecho. El contenido de P se incrementó a 38 y 59 mg.l⁻¹ en las parcelas que recibieron una aplicación de 300 y 450 kg.ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente. Sin embargo, el rendimiento de tubérculos en el tercer ciclo, en las mismas parcelas pero sin aplicación de P, fue de nuevo bajo (13-24 t.ha⁻¹). La misma tendencia se observa tanto en las aplicaciones bajas como en las aplicaciones altas de P. En consecuencia, con los resultados se sugiere que aún aplicaciones de dosis muy altas de P no satisfacen la capacidad de retención de este suelo y el efecto residual es bajo. Para obtener un adecuado rendimiento de tubérculos en este Andisol es necesaria la aplicación de P en cada ciclo (Espinosa 1991).

La selección de una solución extractora para un nutrimento dado se basa en la mayor o

menor asociación entre la cantidad del nutrimento extraído por la solución y lo que realmente extrae la planta. La correlación de soluciones extractoras se puede utilizar para comparar el comportamiento de una solución con respecto a otra. La importancia y utilidad de asociar soluciones entre sí, radica en que los resultados obtenidos con una metodología pueden transformarse a otra y, por tanto, facilitar la interpretación de los resultados (Cabalceta 1995). Las soluciones Mehlich 3, Olsen modificado, Mehlich 1 y Bray 1 poseen un amplio rango de adaptación a diferentes condiciones de suelo, lo que las hace ser factibles de selección para los procedimientos de análisis de suelo de Costa Rica. La correlación entre Mehlich 3 y Olsen modificado es alta y significativa (Wolf y Baker 1985 y Munter et al. 1987, citados por Cabalceta 1995). Esto se vuelve de importancia por la tendencia actual en muchos laboratorios del mundo a la sustitución de Olsen modificado por Mehlich 3, por la buena correlación que presenta con otras soluciones, por el fácil manejo en la extracción y análisis de las muestras y por ser el procedimiento más económico ya que se puede utilizar en diferentes tipos de suelo y permite extraer simultáneamente todos los nutrimentos (Cabalceta y Cordero 1994).

Para mejorar el manejo del P adicionado al cultivo de la papa, se realizó el presente trabajo con los objetivos específicos de: 1) Estimar el efecto residual que deja el fertilizante fosfatado en el suelo; 2) Determinar la capacidad de retención de P en el suelo; y 3) Comparar el uso de diferentes métodos de extracción del P disponible en el suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y suelos del área de trabajo: El trabajo de campo se realizó en una plantación de papa ubicada en la Hacienda Juan Viñas, cantón de Jiménez, provincia de Cartago a 1500 msnm. Estos suelos están clasificados como Hydric Hapludands o suelos derivados de cenizas volcánicas, en una zona sin época seca definida, en la que llueve entre 2000-4000 l.m⁻² (mm) y con

una temperatura media ambiente entre 17-25°C, condiciones típicas de la zona de vida Bosque Muy Húmedo Montano Bajo (Tosi 1969). Los terrenos escogidos fueron cultivados con caña de azúcar por más de 50 años y por ende tenían bajos contenidos de P, Ca, Mg y K disponibles, pero altos contenidos de materia orgánica y materiales amorfos (Cuadro 1). Los suelos presentan un contenido de bases bajo, normal en Andisoles lixiviados de texturas franco-arenosa/arcillosa en regiones de elevada precipitación pluvial, no presentan problemas de acidez, son bajos en Mg (0,58 cmol.l⁻¹) y P (4 mg.l⁻¹) disponible; este último valor es muy inferior a los 50 mg.l⁻¹ considerado como nivel crítico por Soto (2001) para el cultivo de la papa.

Descripción de las parcelas experimentales:

Las dimensiones de la parcela experimental fueron de 55x30 m en terrenos con una pendiente del 15%. Para la realización del estudio la parcela se dividió en 2 secciones; en cada sección se colocaron 5 tratamientos con 3 repeticiones cada uno. Las distancias de siembra fueron de 30 cm entre plantas y 90 cm entre hileras, que son las distancias que usan los agricultores de la zona. La distancia lineal útil por hectárea fue de 11000 m y en cada metro había 3 plantas, para una densidad de 33000 plantas.ha⁻¹.

Material experimental: Se utilizó semilla de papa de la variedad Floresta, surcando el terreno siguiendo las curvas de nivel, realizándose primeramente una chapea y un picado del suelo. La semilla se depositó manualmente en los surcos a una profundidad de 10 cm y se tapó con ayuda de azadones formando un lomillo. Se realizó una aporca manual con azadón a los 25 días después de la siembra. Se dejó una altura de aporque de unos 25-30 cm para mantener un buen drenaje. El follaje del cultivo se quemó con herbicida a los 95 días después de la siembra. El control de plagas y enfermedades se realizó periódicamente de acuerdo a las necesidades del cultivo, utilizando productos adquiridos por la Hacienda Juan Viñas y recomendados por el Departamento de

Cuadro 1. Análisis químico del suelo del experimento antes de la primera siembra.

Variable	Unidad	Nivel crítico	Suelo del experimento
pH (agua)			5,2
Ca	cmol(+) l ⁻¹	4,0	5,40
Mg	cmol(+) l ⁻¹	1,0	0,58
K	cmol(+) l ⁻¹	0,1	0,11
Acidez Intecambiable	cmol(+) l ⁻¹	0,5	0,18
CICE	cmol(+) l ⁻¹	5,0	6,3
Saturación acidez	%		2,9
Saturación bases	%		97,1
P	mg.l ⁻¹	50*	4
Cu	mg.l ⁻¹	1-20	7
Fe	mg.l ⁻¹	10	81
Mn	mg.l ⁻¹	5	5
Zn	mg.l ⁻¹	3	5
Al amorfo	%		7,2
Fe amorfo	%		2,0
Al+Fe amorfo	%		9,2

*Nivel crítico definidos para papa por Soto (2001).

Protección Vegetal del Ministerio de Agricultura y Ganadería. La cosecha de la papa se realizó manualmente con ayuda de azadones. En función de las curvas de retención de P, realizadas al inicio del proyecto, se escogieron como tratamientos la adición de: 0, 150, 300, 450 y 600 kg.ha⁻¹ de P₂O₅, aplicados en forma de superfosfato triple y una aplicación base de 70,5 kg.ha⁻¹ de nitrato de amonio a la siembra y 51 kg.ha⁻¹ a la aporca y de 50 kg.ha⁻¹ de sulfato de potasio a la siembra y 72 kg.ha⁻¹ a la aporca. La fertilización fosfórica se realizó al momento de la siembra por la alta dependencia que tiene la papa por el P debido a la naturaleza de su sistema radical (Álvarez et al. 2001). El fertilizante fosfatado se colocó en el fondo del surco, de acuerdo a los niveles mencionados en el cuadro 2.

Recolección, preparación y análisis de muestras: Previo a la siembra y al momento de la cosecha de cada ciclo de cultivo, se tomaron 10

submuestras de suelo por parcela para conformar una muestra compuesta de 0,5 kg hasta una profundidad de 20 cm. Las submuestras se tomaron en el suelo arado para la siembra o mezclado durante la cosecha, a manera de evitar, en ambos casos, el efecto de posición del fertilizante. Las muestras se secaron al aire y se tamizaron. La disponibilidad del P en el suelo se determinó con las soluciones extractoras; Bray 1 (Bray y Kurtz 1945), Mehlich 3 (Mehlich 1984) y Olsen modificado (Díaz-Romeu y Hunter 1978). Otras variables de suelo (pH en agua, acidez intercambiable, Ca y Mg en KCl 1N, P, K, Zn, Cu, Mn y Fe) se analizaron siguiendo la metodología de Díaz-Romeu y Hunter (1978). El porcentaje de retención de P por el suelo se determinó al representar gráficamente el P adicionado frente al P final extraído del suelo. De esta manera, el mejor modelo de ajuste entre las 2 variables fue 1 lineal $Y=a+bX$, en el que la pendiente (b) indica la cantidad de P extraído por unidad de P adicionada, o

Cuadro 2. Tratamientos de fertilización con P comparados en el presente trabajo.

Tratamiento	P ₂ O ₅ adicionado kg.ha ⁻¹		
	Primer cultivo Año 2004	Segundo cultivo Año 2005	Total
1	0	0	0
2	150	0	150
3	300	0	300
4	450	0	450
5	600	0	600
6	0	0	0
7	150	150	300
8	300	300	600
9	450	450	900
10	600	600	1200

sea, la capacidad tampón de P del suelo (Sobral et al. 1998) y el valor $(1-b)*100$ el porcentaje de P retenido por el suelo (Alvarado y Buol 1985). Para fines del presente trabajo, solo se discutirán los datos de retención de P.

Análisis estadístico: El diseño experimental fue irrestricto al azar, utilizando 6 repeticiones de cada tratamiento para el estudio de la respuesta de la papa a niveles crecientes de fertilización fosfórica, según los tratamientos descritos en el cuadro 2. Para el estudio del efecto residual se realizó un diseño irrestricto al azar, utilizando 3 repeticiones de cada tratamiento aplicado en el año 2004. Para determinar la representatividad de las muestras se realizó, con el programa Infostat (versión 1.0. 2001), un análisis de varianza escogiendo el método Tukey para la comparación de medias con un nivel de significancia de 0,05. Para realizar la correlación entre las soluciones extractoras se usaron todos los valores del contenido de P en el suelo desde el año 2004, independientemente del tratamiento aplicado. Se correlacionaron los 3 métodos de extracción entre sí, de manera que se obtuvieron las correlaciones entre Olsen modificado y Bray 1, Olsen modificado y Mehlich 3 y Bray 1 y Mehlich 3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variación del fósforo en el suelo

Efecto de las aplicaciones durante el primer y segundo cultivo: En el cuadro 3 se presenta la variación en el contenido de P disponible en el suelo en función del fertilizante fosfatado adicionado al primer cultivo y cuando se aplicó por 2 años consecutivos. El efecto residual del P adicionado durante el primer cultivo se nota, con la excepción del método de extracción de Mehlich 3, en que: 1) los valores finales de P disponible son menores que los iniciales y 2) que los otros métodos reflejan una disminución del P disponible, lo que refleja la retención de P en el suelo y el efecto de extracción (absorción) del cultivo (Figura 1), estadísticamente significativa en el caso de Olsen modificado. Ningún método refleja un incremento constante con relación a las dosis del nutrimento adicionadas, por lo que el efecto residual del fertilizante fosfatado se considera nulo.

Cuando se adicionó P por 2 años consecutivos (Cuadro 3), los 3 métodos reflejan el efecto significativo de la adición creciente de P sobre la disponibilidad del nutrimento en el suelo; en este caso, el método de Mehlich 3 lo hace en todos

Cuadro 3. Efecto de la adición de niveles crecientes de P sobre el contenido de P disponible en el suelo.

Tratamiento kg.ha ⁻¹	Olsen modificado (mg.l ⁻¹)		Bray 1 (mg.l ⁻¹)		Mehlich 3 (mg.l ⁻¹)	
	Pi*	Pf*	Pi	Pf	Pi	Pf
P adicionado al primer cultivo (efecto residual)						
0	6,8 A	5,2 AB	6,7 A	2,7 A	2,6 A	3,8 A
150	6,9 A	5,4 AB	8,0 A	2,6 A	3,5 A	4,1 A
300	7,2 A	4,0 A	6,9 A	2,8 A	2,7 A	4,1 A
450	8,2 A	8,7 B	6,8 A	4,1 A	1,9 A	5,4 A
600	7,4 A	5,3 B	5,3 A	3,1 A	2,2 A	4,5 A
P adicionado al primer y segundo cultivo						
0	7,6 A	5,5 A	6,2 A	3,4 A	3,6 A	3,8 A
150	8,0 A	9,2 A	5,4 A	4,0 A	2,1 A	5,9 AB
300	6,7 A	13,2 A	6,8 A	5,4 AB	2,4 A	6,5 B
450	7,7 A	22,2 B	6,6 A	8,8 BC	2,8 A	9,4 C
600	7,8 A	28,4 B	6,3 A	9,9 C	1,2 A	10,9 C

*Pi=P inicial y Pf=P final para cada cultivo. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en cada columna.

los tratamientos, mientras que por Olsen modificado se nota a partir del nivel de 450 kg.ha⁻¹ de P₂O₅, y en el caso del método de Bray 1 los niveles de P disponible no se elevan sino cuando se adicionó más de 300 kg.ha⁻¹ de P₂O₅, lo que concuerda con la elevada capacidad de retención de este nutrimento por el suelo. Los valores de P disponible más altos se estimaron empleando el método de Olsen modificado, sin que se lograra alcanzar los niveles críticos de P en el suelo por el mismo método mencionados por Soto (1999, 2001); quien los estimó como de 35 y 55 mg.l⁻¹ para la obtención de rendimientos superiores a las 30 t.ha⁻¹ de papa en este mismo tipo de suelos, y Núñez et al. (2006) por el método de Bray II en 40 mg.l⁻¹ en Andisoles de Colombia.

Efecto de la aplicación de fertilizante durante 2 cultivos sucesivos: Considerando el efecto del P adicionado sobre la disponibilidad del nutrimento durante los 2 periodos de cultivo se generaron las figuras 1 y 2.

Efecto residual del P adicionado en 2004 (Figura 1)

Olsen modificado. El P extraído por este método concuerda con las cantidades de P adicionado ya que a mayor nivel de P agregado mayor fue el P extraído, sin que las líneas se entrecrucen. El método además refleja una disminución del P disponible con la extracción del nutrimento por el segundo cultivo de papa (2005), lo que también se puede atribuir a que el P fuera retenido ó a que se diluyera debido al efecto de arado del suelo. Esta disminución no corresponde a las dosis crecientes de fertilizantes aplicadas en el 2004, por lo que no existiría residualidad.

Bray 1. Durante el primer cultivo, el P extraído correlaciona con la cantidad de P adicionado. Sin embargo, al inicio del segundo año (2005) los valores del P extraíble son más altos que los del P inicial, lo que no indica el alto poder de retención de estos suelos; además las líneas se entrecruzan sin ninguna explicación. Al final de

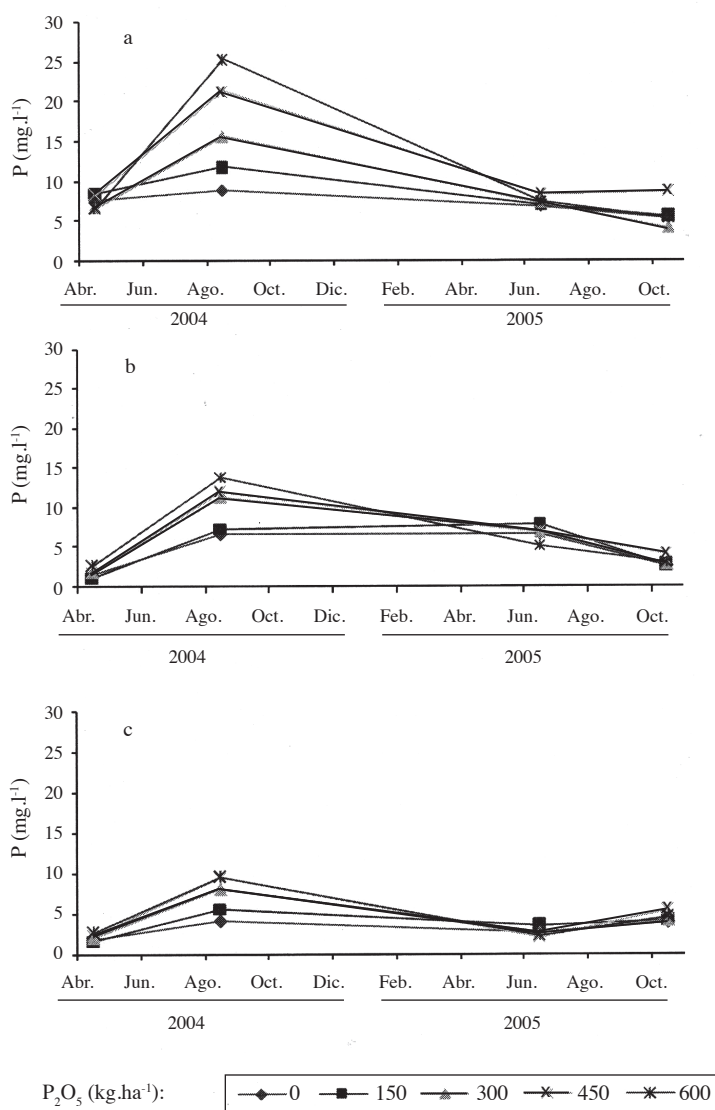


Fig. 1. Variación temporal del P disponible adicionado en el 2004 (efecto residual) después de 2 cultivos consecutivos de papa, extraído mediante los métodos de Olsen modificado (a), Bray 1 (b) y Mehlich 3 (c).

la segunda cosecha, el P disponible descende en relación con el P inicial del segundo año, por lo que el método si refleja la cantidad extraída por el segundo cultivo de papa.

Mehlich 3. Durante el primer cultivo, el P extraído correlaciona con la cantidad de P adicionado.

Al inicio del segundo año (2005), los valores del P extraíbles son casi iguales a los P iniciales, lo que indica el alto poder de retención de estos suelos, aunque las líneas se entrecruzan sin ninguna explicación. Al final de la segunda cosecha, los valores de P extraíble son mayores que los del P inicial del primer cultivo y aumentan con relación

al P inicial del segundo, por lo que el método no refleja la cantidad extraída por los 2 cultivos de papa.

P adicionado en el 2004+2005 (Figura 2)

Olsen modificado. El testigo muestra una disminución de 2 mg.l^{-1} de P desde el primer muestreo

hasta el último, cantidad similar a la que extraen 2 cultivos sucesivos de papa cuando se siembra papa en forma consecutiva por 6 veces a nivel de invernadero (Soto 1998). Con cada adición creciente de P, los niveles del nutrimento en el suelo aumentan en forma proporcional a lo adicionado hasta el final de la cosecha, pero disminuyen a su

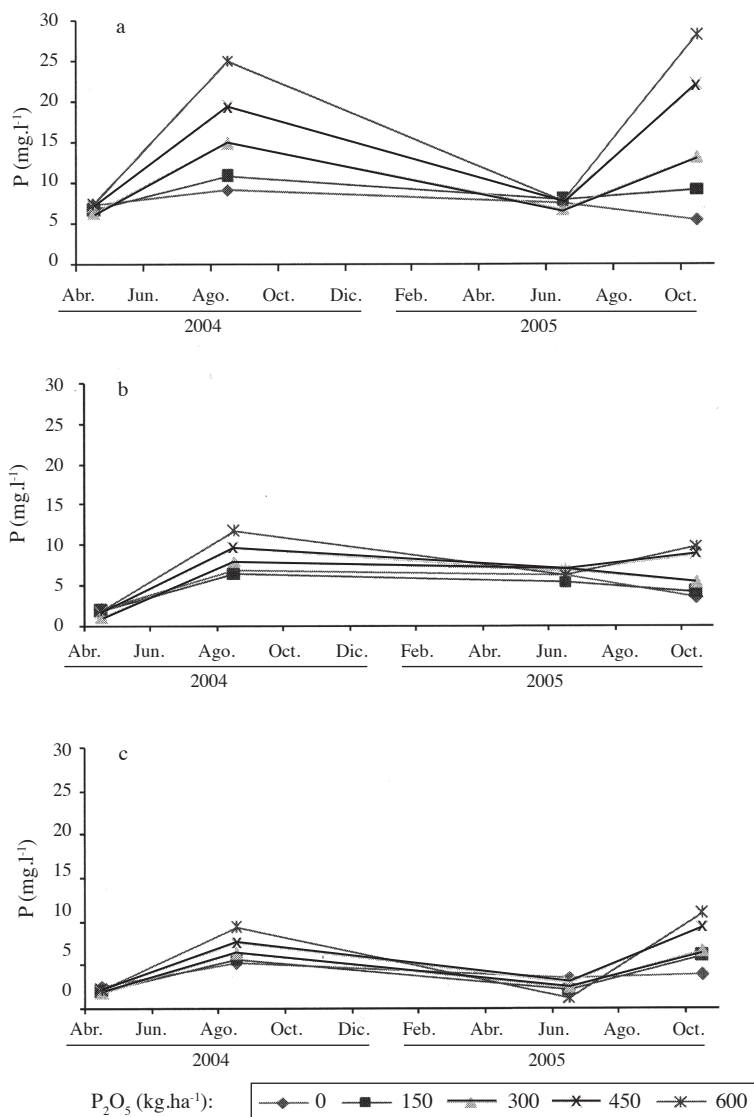


Fig. 2. Variación temporal del P disponible adicionado en el 2004 y en el 2005 después de 2 cultivos consecutivos de papa, extraído mediante los métodos de Olsen modificado (a), Bray 1 (b) y Mehlich 3 (c).

valor inicial hasta el inicio de la próxima, lo que podría deberse a la retención del nutrimento en el suelo ó a que al arar el suelo se diluya el efecto del P aplicado. El mismo efecto se nota con la segunda aplicación de P, excepto porque se alcanzan, a partir de la dosis de 450 kg.ha^{-1} de P_2O_5 , valores de P extraíble más altos que los conseguidos en la primera cosecha; el incremento de P en el tiempo en este tipo de Andisoles (aproximadamente $2\text{-}3 \text{ mg.l}^{-1}.\text{año}^{-1}$ de P) es similar al encontrado por Soto (1998) y Ramírez (2007) en fincas dedicadas al cultivo de la papa en la misma zona por más de 50 años.

Bray 1. El comportamiento del P extraíble por este método es similar al encontrado para Olsen modificado, sin embargo se notan algunas diferencias, a saber: a) el testigo no refleja la cantidad de P absorbido por el cultivo, b) las líneas para cada nivel de P adicionado tienden a cruzarse, sin explicación y c) sólo refleja la adición de fertilizante fosfatado al inicio del segundo cultivo a partir de la dosis de 450 kg.ha^{-1} de P_2O_5 , y este valor final es inferior al conseguido el año anterior, por lo tanto es la requerida para tener un efecto residual importante.

Mehlich 3. El testigo tampoco muestra la cantidad de P absorbido por el cultivo. En este método, el entrecruzamiento de las líneas es aún más pronunciado que en el caso de Bray 1 y si se ve reflejada la adición de fertilizante durante el segundo cultivo. El efecto residual se observa

desde la dosis más baja al obtenerse valores de P finales para el segundo cultivo superiores a los del final del primer año.

Fosforo retenido por el suelo en los años 2004 y 2005

Para calcular el porcentaje de retención de P por el suelo se representa el P adicionado al suelo frente al P final extraído (Figura 3). La pendiente (b) de la recta en este caso, indica la cantidad de P extraído por unidad de P adicionada, por lo que $(1-b)*100$ será el porcentaje de P retenido por el suelo (Alvarado y Buol 1985). Para el año 2004, el valor fue de un 93%, concordando con las cifras descritas en la bibliografía para Hydrandepts o Hydrudands (Alvarado 1982 y Canessa et al. 1987), suelos que presentan valores de retención de fosfatos superiores al 92%, debido a la mayor predominancia de la fracción de aluminio activo en el complejo de cambio, lo que favorece la formación de compuestos no asimilables para la planta, reduciendo drásticamente su disponibilidad.

Como en la Hacienda Juan Viñas ocurre un régimen de humedad del suelo údico (ausencia de una época seca definida), tiende a formarse alófana, con poca formación de arcillas cristalinas. Así, los suelos de esta región son altamente fijadores de P, debido a los elevados contenidos de materiales amorfos, lo que según Canessa et al. (1986) se debe a la pérdida de sílice por lixiviación, principal proceso activo que da origen a un ambiente ácido. El suelo también contiene

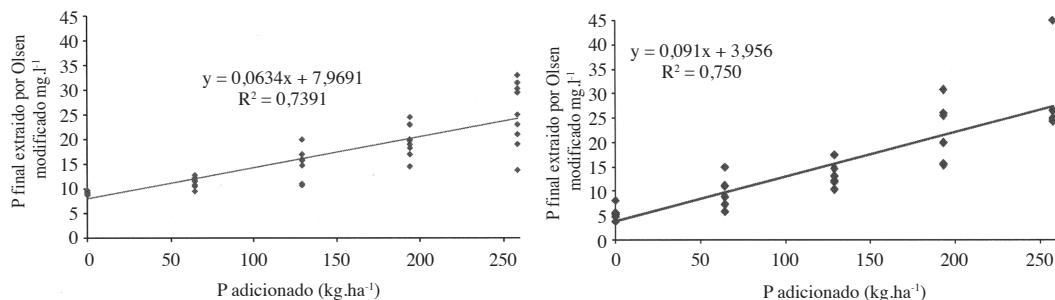


Fig. 3. Fosforo retenido por el suelo en los años 2004 y 2005.

un alto porcentaje de materia orgánica (12,7%) y de Al+Fe amorfos (9,2%), fracciones a las que se adhiere mucho del P disponible. El mismo tipo de análisis para el segundo año de fertilización del cultivo (2005), mostró una tendencia similar (Figura 3). En este caso la retención fue del 91%, con un aumento del P disponible al incrementar el número de años que se ha fertilizado el cultivo, concordando con lo descrito por Soto (1998); se requerirían más años de estudio para poder verificar este dato con mayor certeza.

Dado que el método de extracción por Olsen modificado fue el que presentó mejores coeficientes de determinación para los 2 años (Figura 4), se considera como el mejor método a la hora de determinar el porcentaje de P retenido por el suelo. No se discutirán los resultados encontrados con las soluciones extractoras de Mehlich 3 y Bray 1 ya que aunque con el método de Mehlich 3 se encontró un coeficiente de determinación alto para el año 2005 ($R^2=0,7365$, lo que implica un porcentaje de retención de P por el suelo del 97%), durante el 2004 el coeficiente obtenido fue bajo ($R^2=0,526$), por lo que no se consideró conveniente utilizarlo a la hora de la discusión (Figura 4).

Correlación entre los métodos de extracción de P

Al considerar todos los valores de P extraíble por los 3 métodos comparados (datos de muestreos realizados por tratamiento y repetición al inicio y al final de cada uno de los 2 años de estudio) se estableció la correlación entre ellos (Figura 5). Se considera que la mejor relación entre métodos ocurre cuando el coeficiente de determinación R^2 es 1 (correlación perfecta). Se nota que la mejor correlación se encontró entre los métodos de Olsen modificado y Mehlich 3 ($R^2=0,7049$) valor inferior al encontrado previamente por Cabalceta (1995) en Andisoles de Costa Rica ($R^2=0,884$). Los valores de correlación más bajos se presentaron entre Olsen modificado y Bray 1 ($R^2=0,4850$) y entre Bray 1 y Mehlich 3 ($R^2=0,5385$).

CONCLUSIONES

El efecto residual que dejó el fertilizante fosfatado transcurrido 1 año de su aplicación fue muy bajo, mientras que aplicándolo durante 2 cultivos consecutivos se consiguió un aumento

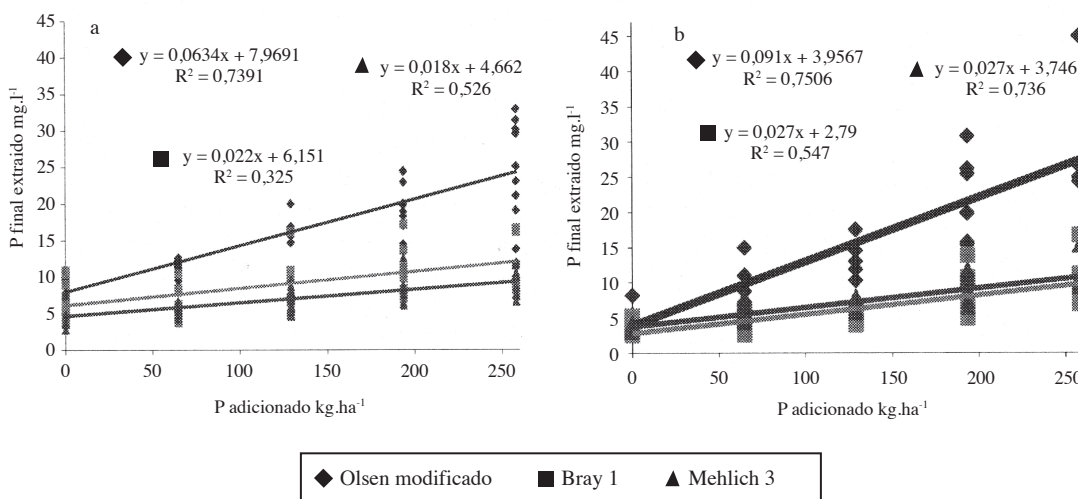


Fig. 4. Porcentaje de retención de P en el suelo en el año 2004 y 2005 determinados por 3 métodos de extracción en el año 2004 (a) y 2005 (b).

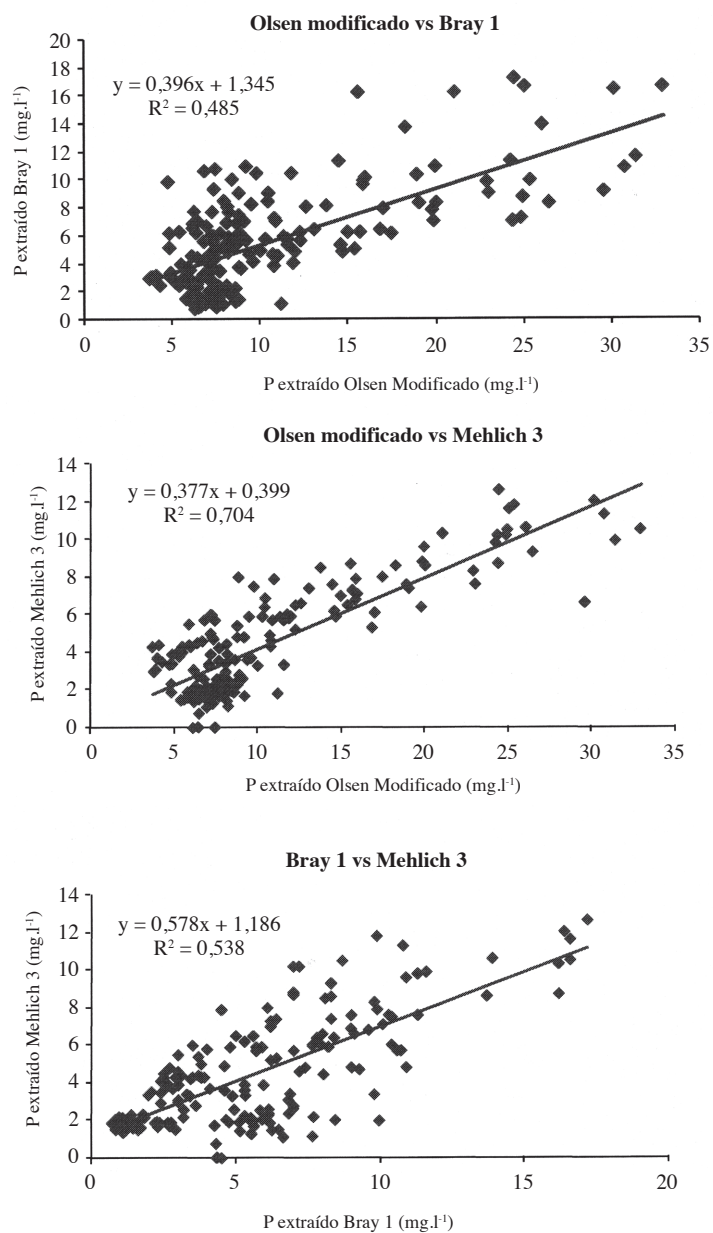


Fig. 5. Correlación entre los métodos de extracción de P en los suelos del área de estudio.

de 2-3 mg.l⁻¹.año⁻¹ de P calculado por el método de Olsen modificado a partir de la dosis de 450 kg.ha⁻¹ de P₂O₅. Este incremento en residualidad adquiere importancia para recomendar dosis de P solamente después de un cierto número de años, dependiendo de los niveles críticos de los diferentes cultivos.

El P retenido por el suelo durante el año 2004 fue de 93% y durante el segundo año de 91%, retención muy alta. La retención disminuyó en un 2% de un año a otro por el uso de la tierra.

El mejor método de extracción de P para explicar la tendencia de este nutrimento en el suelo durante 2 cultivos consecutivos de papa, fue Olsen modificado pues permitió estimar: 1) incrementos de P en el suelo con la adición de dosis de fertilizante con un rango mayor de diferencia entre dosis que los otros, 2) la alta retención de P de estos suelos; 3) cuando se aplicó el fertilizante durante 2 años consecutivos, fue el único método que mostró una disminución de 2 mg.l⁻¹ de P desde el primer muestreo hasta el último y 4) con este método, fue a partir de la dosis de 600 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ donde se observó un incremento del P extraíble final en el segundo cultivo.

Los valores de correlación entre las distintas soluciones extractoras fueron de mayor a menor: Olsen modificado y Mehlich 3 (R²=0,7050), Bray 1 y Mehlich 3 (R²=0,5385) y Olsen modificado y Bray 1 (R²=0,4850).

AGRADECIMIENTO

Este trabajo se enmarcó dentro del Proyecto Papa del Programa de Apoyo para el Manejo de Nutrimentos (NuMASS), realizado en forma conjunta entre el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica y la Universidad del Estado de Carolina del Norte y financiado por la Agencia Internacional de los Estados Unidos (USAID). Se agradece a la Hacienda Juan Viñas la colaboración prestada y a la Empresa Abonos del Pacífico la donación de las materias primas empleadas como fertilizante en el presente trabajo.

LITERATURA CITADA

- AGUIRRE G. 1993. Evaluación de fuentes de fósforo en el rendimiento del cultivo de papa, con énfasis en roca fosfatada y fuentes orgánicas. *Anales Científicos Universidad Nacional Agraria La Molina*. pp. 223-232. 14/01/2006. http://tumi.lamolina.edu.pe/resumen/anales/1999_92.pdf.
- ALVARADO A. 1982. Phosphate adsorption in Andepts from Guatemala and Costa Rica as related to other soil properties. Ph.D. Thesis. Raleigh, North Carolina State University. 82 p.
- ALVARADO A., BERTSCH F., BORNEMISZA E., CABALCETA G., FORSYTHE W., HENRÍQUEZ C., MATA R.A., MOLINA E., SALAS R. 2001. Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica. *ACCS*. San José, Costa Rica. 112 p.
- ALVARADO A., BUOL W. 1985. Field estimation of phosphate retention by Andepts. *Soil Sci. Am. J* 49:911-914.
- ÁLVAREZ S., ETCHEVERS J., ORTIZ C., NÚÑEZ E., MARTINEZ G., CASTELLANO J. 2001. Nutrición con fósforo de plántulas de maíz y papa. *Terra* 19 (1):55-65.
- BERTSCH F. 1982. Fertilidad de nueve suelos clasificados como Typic Dystrandept en Costa Rica. Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 122 p.
- BRAY R.H., KURTZ L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:69-45.
- CABALCETA G. 1995. Correlación de soluciones extractoras de fósforo en suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 19(1):29-37.
- CABALCETA G., CORDERO A. 1994. Niveles críticos de fósforo en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 18(2):147-161.
- CANESSA J., SANCHO F., ALVARADO A. 1986. Retención de fosfatos en Andepts de Costa Rica. I. Relaciones entre la retención de fosfatos, el pH en NaF y el aluminio activo. *Turrialba* 36(4):431-438.
- CANESSA J., SANCHO F., ALVARADO A. 1987. Retención de fosfatos en Andepts de Costa Rica. II. Respuesta a la fertilización fosfórica. *Turrialba* 37(2):211-218.

- CASTRO A. 1985. Fertilización fosfórica de la papa en cinco suelos de la zona norte de Cartago. Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 53 p.
- DÍAZ-ROMEY R., HUNTER A. 1978. Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero. CATIE. Turrialba, Costa Rica. p. 8-27.
- ESPINOSA J. 1991. Efecto residual de fósforo en Andisoles. Revista. Fac. Agron. Maracay 17:39-47.
- FASSBENDER H. 1966. La adsorción de fosfatos en suelos fuertemente ácidos y su evaluación usando la isoterma de Langmuir. Fitotecnica Latinoamericana 3(1/2):203-198.
- FASSBENDER H. 1969. Estudio del fósforo en América Central IV. Capacidad de retención de P y su relación con características edáficas. Turrialba 19(1):497-505.
- HENRÍQUEZ C. 2005. Sorción y desorción de fósforo en un andisol de Costa Rica dedicado al cultivo del café, caña de azúcar y bosque. Agronomía Costarricense 29(3):97-105.
- JACKSON M., CARTÍN L., AGUILAR J. 1981. Uso y manejo de fertilizantes en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.) en Costa Rica. San José, Costa Rica. Agronomía Costarricense 5 (1/2):15-19.
- MEHLICH A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant; a modification of Mehlich 2 extractant. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 15:1409-1416.
- ÑÚSTEZ C.E., SANTOS M., NAVVIA S.L., COTES J.M. 2006. Evaluación de la fertilización fosfórica foliar y edáfica sobre el rendimiento de la variedad de papa 'Diacol Capiro' (*Solanum tuberosum* L.). Agronomía Colombiana 24(1):111-121.
- OSPINA O. 1974. El fósforo en Andosoles. pp. 99-136. In: H. Medina (ed). El fósforo en zonas tropicales, Tercer coloquio sobre suelos, Publicación de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Suelos Ecuatoriales.
- PALMIERI V. 1983. Respuesta de la papa (*Solanum tuberosum* L.) a la fertilización con nitrógeno y fósforo en la zona de Fraijanes, Alajuela. Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 93 p.
- RAMÍREZ L. 2007. Utilización de indicadores para estimar el efecto de la capacidad de uso de las tierras sobre la sostenibilidad agrícola. Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 158 p.
- SOBRAL L., AQUINO B., COX F. 1998. Mehlich 3 phosphorus buffer coefficients. Commun. Soil Sci. Plant. Anal. 29(11-14):1751-1761.
- SOTO J.A. 1994. Efecto de dosis y fuentes de fósforo sobre la producción de papa en siembras sucesivas. Dirección de Investigaciones Agrícolas. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Informe anual.
- SOTO J.A. 1998. Formas de fósforo y su liberación en Andisoles de la región central oriental de Costa Rica. Tesis Doctorado, Universidad de Córdoba. España. 155 p.
- SOTO J.A. 1999. Estado actual de la fertilidad de los suelos volcánicos y la fertilización de algunos cultivos hortícolas en la región oriental de Costa Rica. pp 37. In: Memoria de XI Congreso Nacional Agronómico. III Congreso Nacional de Suelos. San José, Costa Rica.
- SOTO J.A. 2001. Valores críticos de fósforo, potasio y azufre, y respuesta al nitrógeno para papa en la zona norte de Cartago. Resultados de investigación 1999-2000; difusión para agricultores. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José. Costa Rica. Plegable 2 p.
- SUÁREZ D., IGUE K. 1974. Efecto del tamaño de granos en la absorción de fósforo en suelos volcánicos. Turrialba 24(2):180-186.
- TOSI J.A. 1969. Mapa ecológico según la clasificación de zonas de vida del mundo de L. R. Holdridge. Centro Científico tropical. San José. Costa Rica.
- URRUTIA J., IGUE K. 1972. Reacciones de los fosfatos monocalcico y dicálcico anhidro en suelos volcánicos. Turrialba. 22(2):144-149.