

EFFECTO DE LA FERTILIZACIÓN CON FÓSFORO SOBRE EL RENDIMIENTO Y LA ABSORCIÓN DE NUTRIMENTOS DE LA PAPA EN UN ANDISOL DE JUAN VIÑAS, COSTA RICA

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

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

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

Recibido: 22/07/08

Aceptado: 04/10/08

RESUMEN

Se estudió la respuesta del cultivo de la papa a la fertilización fosfórica en un suelo Hydric Hapludands de la Hacienda Juan Viñas. Se aplicaron 0, 150, 300, 450 y 600 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ por 1 y 2 años consecutivos. Se tomaron muestras 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 tejidos se les midió el peso fresco y seco y se les realizó el análisis químico para N, P, Ca, Mg, K, Mn, Zn, Cu, Fe, S y B. Al aplicar P únicamente el primer año del experimento, el rendimiento del cultivo fue inferior y no se apreció ningún 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 600 kg.ha⁻¹ de P₂O₅. La variación de nutrientes en los tejidos no se vio afectada por la adición de P. Los nutrientes móviles (NPK) se redistribuyeron en mayor porcentaje a los tubérculos en un 27-65%, seguidos por los de movilidad variable Cu, Mg y Zn, en un 14-38% y por último el Ca, Mn y Fe que apenas se extrajeron/redistribuyeron en un 2-6%. Para obtener un efecto residual importante de P en el suelo, fue necesario aplicar 450 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ por 2 años consecutivos. Se sugiere que para obtener un adecuado rendimiento de tubérculos en este Andisol es necesaria la aplicación de P en cada ciclo.

ABSTRACT

Effect of phosphorus fertilization on nutrient absorption and potato yield in Andisols of Costa Rica. The effect of P additions on potato yield and nutrient absorption was studied in a Hydric Hapludands soil. P rates of 0, 150, 300, 450, and 600 kg.ha⁻¹ of P₂O₅ were compared during 1 and 2 consecutive crops. Soil samples were taken before planting and after harvest; foliar samples were taken, 48 dap at flowering; aerial biomass was sampled before burning aerial biomass with chemicals, 93 dap; potato yield was estimated at harvesting, 116 dap. Tissue samples were analyzed for N, P, Ca, Mg, K, Mn, Zn, Cu, Fe, S, and B. When P was applied only to the first crop, yields were low and no residual effect of the fertilizer application was noted for any of the rates compared. The addition of P for 2 consecutive years increased yields; maximum yield obtained with 600 kg.ha⁻¹ of P₂O₅ was 16.39 t.ha⁻¹. Nutrient absorption was not affected by the P applied. Macronutrient absorption was K>>N>>Ca>P=Mg and for micronutrients Fe>>>Zn>Mn>B>>Cu. Mobile nutrients (NPK) were distributed to the tubers in 27-65%; nutrients of relative mobility, such as Cu, Mg, and Zn between 14-38%; less mobile elements (Ca, Mn, and Fe) amounted only 2-6% of the tuber weight. To maximize potato yield in Andisols, P should be applied for each crop, since the residual effect of the P-fertilizer is not enough to supply the needs of the crop in soils with high P retention capacity.

1 Autor para correspondencia. Correo electrónico: alfredo@carriari.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

La papa se cultiva en Andisoles de las partes altas de las provincias de Cartago y Alajuela, Costa Rica, suelos que combinan las características adecuadas de textura, estructura y drenaje requeridos por el cultivo, aunque presentan como inconvenientes el retener altas cantidades de P y una topografía irregular que favorece la erosión del suelo (Cásseres 1984, Villalobos 1989, Bolaños 1998).

El cultivo de la papa, requiere de una elevada disponibilidad de P en el suelo, para favorecer el buen desarrollo radicular y aéreo en la etapa del establecimiento de las plántulas; en la época de mayor crecimiento vegetativo necesita N, y al momento del desarrollo de los tubérculos prima la necesidad de K por su activa participación en el transporte de fotosintatos de las hojas y por su importancia en la calidad de los mismos (Bertsch 2003). El P se asimila durante todo el desarrollo vegetativo, pero al igual que el N, la asimilación más intensa ocurre durante el máximo crecimiento de la planta, cuando se promueve un mayor aumento de la formación y el desarrollo de los tubérculos, se acelera su maduración y se incide su calidad (Villalobos 1989). Saldías (2004), menciona que en el mismo sitio de estudio, el cultivar de papa MNF-80 absorbe la totalidad del P en los primeros 45 días de crecimiento y posteriormente lo traslada hacia los tubérculos.

Para producir 20 t.ha⁻¹ de papa se estima que el cultivo absorbe 220, 20, 240, 60 y 20 kg.ha⁻¹ de N, P, K, Ca y Mg (Bertsch 2003); sin embargo, la cantidad de nutrimentos absorbida por 1 t.ha⁻¹ difiere con la variedad a sembrar. De acuerdo con Soto (1999), en el caso de la papa, la eficiencia en la extracción de todos los nutrimentos es inferior al 10% del total disponible en el suelo y en el caso del P algo menos del 3%; por esta razón se requiere aplicar altas cantidades de fertilizante fosfatado (Bertsch y Cordero 1984, Alvarado y Buol 1985).

En Costa Rica, Johanning (1939) encontró que la producción de papa se lograba con solo adicionar P y N. Posteriormente, se determinó que el mayor rendimiento de papa, de la variedad

Morada Negra, se alcanzaba con la adición de 87 kg.ha⁻¹ de P₂O₅, aplicado en banda al momento de la siembra y que otras variedades de papa respondían a dosis de P de 333-412 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ en conjunto con N y K (Benavides 1953, MAI 1950, Miranda 1956). Las recomendaciones del MAI (1960) llegaron a considerar como adecuada la adición de 666-1343 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ en fórmulas con N y K, y en 2 fincas de la zona norte de Cartago se confirmaba que la mayor cosecha de papa se lograba con la aplicación de 1184-1316 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ (Sala 1962). Los elevados valores de P aplicados al cultivo de la papa en la década de los 60, le permitieron a Bianchini (1973) mencionar que: "es común observar aplicaciones entre 156-1500 kg.ha⁻¹ de P₂O₅; que al aumentar la dosis de P disminuye el tamaño de los tubérculos y que aunque el cultivo de la papa demanda altas cantidades de P, la respuesta a este nutrimento no es siempre constante". En la década de los 70, Bianchini (1973) obtiene una producción total de 38 t.ha⁻¹ de papa con 461 kg.ha⁻¹ P₂O₅, aunque solo la mitad fue comercial, y Pérez (1974) obtuvo un rendimiento total de 19,8 t.ha⁻¹ con 811 kg.ha⁻¹ de P₂O₅. En suelos con contenidos de 68, 70 y 90 mg.l⁻¹ de P (extraídos con Olsen modificado), Jackson y Carter (1976) y Jackson et al. (1981), no encontraron respuesta significativa a la adición de P; aunque en el caso del suelo más bajo en P el mayor rendimiento se logró con la adición de 686 kg.ha⁻¹ de P₂O₅. En la misma región de Cartago, Chaverri y Bornemisza (1977) estudiaron la interacción P-Zn en papa, sin encontrar respuesta a la adición de Zn pero si a la aplicación de 480 kg.ha⁻¹ de P₂O₅. En 1981, en un suelo clasificado como Hydric Dystrandepets, de la estación experimental Fraijanes, con un contenido de P disponible de 5 mg.l⁻¹ (extraídos con Olsen modificado) y una retención de P mayor al 90%, se determinó que la respuesta a la fertilización con P fue cuadrática, con máximos de rendimiento al adicionar entre 971 y 1000 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ y que con altas dosis de P se tiende a producir tubérculos de menor tamaño (Palmieri 1983).

La respuesta de la papa a la fertilización con P en Andisoles de Colombia (García 1998,

Muñoz 1998, Barrera 1998, Nústez et al. 2006), Ecuador (Oyarzún et al. 2002) y El Salvador (Román y Hurtado 2002), indica que esta es mejor cuando el fertilizante se aplica en banda debajo de la semilla al momento de la siembra y conforme se cultiva en sitios a mayor altura sobre el nivel del mar; lo último se relaciona al hecho de que el P adicionado se retiene en menor cantidad en los suelos de textura gruesa encontrados cerca de los conos de eyección volcánica. En los experimentos mencionados, se comparó niveles de P_2O_5 de 0-500 $kg\cdot ha^{-1}$ y se empleó diferentes variedades, encontrándose que los mayores incrementos en rendimiento se obtienen con la adición de 200-400 $kg\cdot ha^{-1}$ de P_2O_5 , en particular cuando los suelos tienen menos de 30 $mg\cdot l^{-1}$ de P determinado por el método de Bray II y el fertilizante contiene de 50-150 $kg\cdot ha^{-1}$ de N. Tanto en Colombia como en El Salvador, los investigadores encontraron poco efecto residual de la adición de P, aún después de adicionarlo en plantíos de papa hasta por 4 años consecutivos.

Varios autores han desarrollado niveles críticos de P en el suelo para papa, los cuales varían de 30-60 $mg\cdot l^{-1}$ (Mackay et al. 1966, Christenson y Doll 1968, McCollum 1978, Castro 1985, Cabalceta y Cordero 1994, Soto 1994). La diferencia entre los valores mencionados se debe a que se emplearon varias metodologías de laboratorio, de invernadero y de campo para su definición. El valor de nivel crítico de P en el suelo más reciente para Costa Rica es el encontrado por Soto (2001), quien lo fijó en 50 $mg\cdot l^{-1}$ extraído con el método de Olsen modificado, mientras que en Colombia, Muñoz (1998) lo fija en 30 $mg\cdot l^{-1}$, extraído con el método de Bray II. Castro (1985), recomienda aplicar una dosis de 500 $kg\cdot ha^{-1}$ de P_2O_5 cuando el contenido inicial de P en el suelo varía de 13-26 $mg\cdot l^{-1}$; de 300-500 $kg\cdot ha^{-1}$ de P_2O_5 cuando el contenido inicial de P en el suelo varía de 36-46 $mg\cdot l^{-1}$ y una dosis de 200 $kg\cdot ha^{-1}$ de P_2O_5 en suelos con un contenido inicial de 80 $mg\cdot l^{-1}$ determinado por el método de Olsen modificado.

Al presente, se recomienda utilizar el análisis foliar entre los 40 y 60 días después de

la germinación, como herramienta de diagnóstico para conocer los niveles adecuados de P en papa. Se considera que los valores adecuados de P foliar se encuentran entre 0,23-0,37% MAG (1991), datos similares a los mencionados por Castro (1985) y Bertsch (1998), quienes determinaron el rango de valores adecuados entre 0,29-0,50%.

Para mejorar el manejo del P adicionado al suelo, se realizó el presente trabajo con el objetivo principal de estudiar la respuesta de la papa a niveles crecientes de P en Andisoles de Juan Viñas y su efecto residual en el suelo. Los objetivos específicos fueron: 1) Estudiar la respuesta de la papa a niveles crecientes de P aplicados durante 2 cultivos consecutivos y aplicados sólo al comienzo del primero; 2) Medir el efecto de la adición de P sobre el contenido foliar, biomasa aérea y de tubérculo de nutrimentos de la papa; 3) Calcular la cantidad de nutrimentos extraídos por la papa; 4) Estimar el efecto residual que deja el fertilizante fosfatado en el suelo; 5) Determinar la capacidad de retención de P en el suelo y 6) Comparar el uso de diferentes métodos de extracción del P disponible.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización: 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 en suelos clasificados como Hydric Hapludands o suelos derivados de cenizas volcánicas, en una zona sin época seca definida, en la que llueve entre 2000-4000 $l\cdot m^{-2}$ y con una temperatura media ambiente de 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 disponible, pero altos contenidos de materia orgánica (12,7%) y de materiales amorfos asociados (9,2%). 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 (pH

5,2) y son bajos en Mg ($0,58 \text{ cmol.l}^{-1}$) y P Olsen modificado (4 mg.l^{-1}).

Parcelas experimentales: Las parcelas experimentales fueron de $55 \times 30 \text{ m}$ 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 una. 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 $33000 \text{ plantas.ha}^{-1}$. Para estimar la respuesta del cultivo de la papa a la fertilización fosfórica consecutiva durante 2 años, se utilizaron las secciones I y II de experimentos independientes.

Material experimental: Se utilizó semilla de papa de la variedad Floresta. La siembra se realizó surcando el terreno siguiendo las curvas de nivel, realizando 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 la 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 Protección Vegetal. La cosecha de la papa se realizó manualmente con ayuda de azadones.

Tratamientos: 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 P_2O_5 , aplicados en forma de superfosfato triple y una aplicación base de $70,5 \text{ kg.ha}^{-1}$ de nitrato de amonio (NH_4NO_3) a la siembra, 51 kg.ha^{-1} a la aporca y 50 kg.ha^{-1} de sulfato de potasio (K_2SO_4) a la siembra, 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, incorporado al fondo del surco. Los tratamientos se resumen en el cuadro 1.

Cuadro 1. Tratamientos de fertilización con P comparados en el presente trabajo.

Tratamiento	P_2O_5 adicionado kg.ha^{-1}		
	Año 2004	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

Recolección, preparación y métodos de análisis de muestras de tejidos: Al momento de la floración (48 dds), se tomaron muestras foliares siguiendo las recomendaciones de Castro (1985). La hoja muestreada fue la cuarta de arriba hacia abajo, la cual corresponde a la hoja madura más nueva encontrada en la época de cada muestreo, muestreando 10 plantas al azar de los surcos centrales de cada parcela. Antes de la quema del follaje, se recogieron muestras de la biomasa aérea, tomándose y pesándose 5 plantas al azar de los camellones centrales de cada parcela. A la cosecha se tomaron muestras de tubérculos de 15 plantas de cada tratamiento de los camellones centrales de cada parcela. Se pesaron en el campo con ayuda de una balanza y de ellas se utilizaron 5 tubérculos, escogidos al azar, para realizarles el análisis químico. Las muestras foliares se secaron en estufa a 70°C por 72 h, se molieron y tamizaron considerando primero los testigos y después

los niveles crecientes de fertilizante aplicado para evitar contaminación; así, se trasladaron para su análisis a los laboratorios de servicio del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. El mismo proceso se llevó a cabo con los tubérculos, aunque antes se limpiaron bien para eliminar todo el suelo y se cortaron para mejorar y facilitar el secado. Las muestras se analizaron para N, P, Ca, Mg, K, S, Fe, Cu, Zn, Mn, y B por combustión húmeda, siguiendo la metodología descrita por Operation Manual, Microwave Accelerated Reaction System (2001) y Manual Digestion Application Notes (2001). La absorción total de nutrimentos de la biomasa aérea y de los tubérculos, se obtuvo al multiplicar la concentración de cada nutrimento por el peso seco de la biomasa determinado en muestras de cada tipo estudiadas en el laboratorio.

Determinación del rendimiento: Para determinar el rendimiento de tubérculo, de la biomasa aérea, de la biomasa total y de la cantidad de nutrimentos absorbida en cada cosecha, se consideró una población de 33000 plantas.ha⁻¹. Se midió solamente el rendimiento total de tubérculo, dado que en una prueba preliminar (no incluida en este trabajo) la separación por tamaño de las papas no fue estadísticamente significativa.

Análisis estadístico de los resultados: El diseño experimental empleado consistió en un diseño irrestricto al azar, utilizando 6 repeticiones de cada tratamiento. En el estudio del efecto

residual se utilizó un diseño irrestricto al azar, con 3 repeticiones de cada tratamiento aplicado en el primer año de estudio. Para determinar la representatividad de las muestras se realizó un análisis de varianza, escogiendo el método Tukey para la comparación de medias con un nivel de significancia de 0,05 con el programa Infostat. (versión 1.0. 2001). Las variables sobre las que se realizó la evaluación son: contenido de P disponible en el suelo por los métodos de Bray1, Mehlich3 y Olsen modificado, antes y después de cada año de cultivo, rendimiento de biomasa aérea, altura de planta antes de quemar el follaje para la cosecha, biomasa aérea y tubérculos y rendimiento, biomasa aérea, biomasa total de tubérculos y concentración de N, P, K, Ca, Mg, Cu, B, Fe, Mn y S en hojas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento del cultivo

En el cuadro 2 se muestra los valores de rendimiento promedio de tubérculo por tratamiento, encontrados en las parcelas a las que se les aplicó P durante los años 2004 y 2005 y a las que no se les aplicó el nutrimento durante la cosecha del 2005 (efecto residual del P adicionado en el 2004); los valores de rendimiento obtenidos se consideran altos para la zona de estudio, aunque inferiores al nivel promedio nacional. El análisis de varianza y la comparación de medias, indican que el efecto residual del P sobre el rendimiento

Cuadro 2. Efecto de la adición de niveles crecientes de P en el rendimiento de la papa en el 2005.

Tratamiento (kg.ha ⁻¹) de P ₂ O ₅	Efecto residual 2004	P adicionado en el 2004+2005
	Rendimiento (t.ha ⁻¹)	Rendimiento (t.ha ⁻¹)
0	10,67A*	9,70B
150	12,72A	10,71AB
300	12,23A	11,09AB
450	11,66A	11,48AB
600	11,59A	16,39A

*Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

de papa no fue significativo, mientras que si lo fue la respuesta del cultivo a la adicción de P durante 2 años; la respuesta al P en el cultivo de la papa en Andisoles se conoce desde hace bastante tiempo (Johanning 1939) y se sigue estudiando hasta el presente (Barrera 1998).

Las parcelas a las que se aplicó fertilizante durante el primer año pero no durante el segundo año, no mostraron respuesta al aumento de la dosis de fertilizante del primer año, obteniéndose el rendimiento máximo cuando se aplicó 150 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ en el año 2004, es decir no afectó la residualidad del fertilizante adicionado, tal y como se ha demostrado en otros estudios (Espinosa 1991). En cambio las parcelas fertilizadas durante 2 años consecutivos mostraron una respuesta creciente al aumento en la dosis del fertilizante fosfatado. Las cantidades más elevadas de papa (16,39 t.ha⁻¹) se obtuvieron con la dosis más alta de fertilizante aplicada (600 kg.ha⁻¹ de P₂O₅).

Los rendimientos encontrados para esta variedad fueron inferiores a los encontrados por Soto (1994) y para otras variedades a nivel nacional (Sala 1962, Castro 1985, Saldias 2004). Lo anterior puede deberse a que la semilla utilizada en el presente trabajo tenía bajo potencial de rendimiento ya que provenía de una semilla comercial utilizada en 5 cultivos anteriores. El rendimiento promedio de las parcelas sin adicción de P durante el segundo cultivo y con la aplicación de este fue de 13,21 y 12,44 t.ha⁻¹ de

tubérculo, respectivamente; estas diferencias no son estadísticamente significativas. El resultado promedio encontrado en el primer año del experimento (2004) fue similar (13,23 t.ha⁻¹).

En la figura 1 se muestra las curvas de respuesta del cultivo de la papa en función de los niveles de P adicionado en el 2004 y durante los años 2004 y 2005. Con el efecto residual del P se aprecia una tendencia cuadrática, en la que el mejor tratamiento fue la adicción de 300 kg.ha⁻¹ de P₂O₅; cuando se aplicó P por 2 años consecutivos, la respuesta se comporta según un modelo lineal, dándose el mejor tratamiento con la adicción de 600 kg.ha⁻¹ de P₂O₅, por lo que se considera que aún no se ha alcanzado el nivel máximo de rendimiento en esta finca. Otros autores encontraron datos similares en suelos similares, por ejemplo Sala (1962), quien obtuvo una respuesta lineal significativa en uno de sus experimentos hasta un máximo de 1184 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ y Pérez (1974) que menciona una respuesta lineal con un máximo en 810 kg.ha⁻¹ de P₂O₅; sin embargo, Palmieri (1983), consiguió el mejor ajuste cuadrático altamente significativo con un punto de inflexión de respuesta a la adicción de alrededor de los 1000 kg.ha⁻¹ de P₂O₅.

Comportamiento de las variables de crecimiento

Biomasa aérea (BA): En el cuadro 3 se incluye los valores de rendimiento promedio de BA por

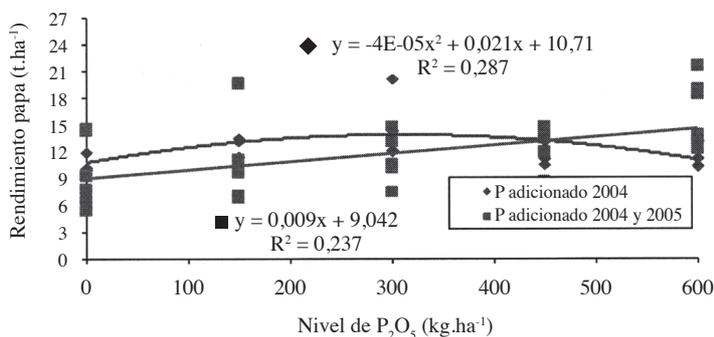


Fig. 1. Respuesta del cultivo de la papa a la adicción de fósforo durante 1 y 2 años consecutivos.

Cuadro 3. Efecto de la adición de niveles crecientes de P en la producción de biomasa aérea de la papa.

Tratamiento (kg.ha ⁻¹) P ₂ O ₅	P adicionado en el 2004 (efecto residual)	
	Biomasa aérea (t.ha ⁻¹)	
0	13,87A*	14,67A
150	12,49A	15,67A
300	17,60A	14,50A
450	14,34A	16,83AB
600	17,26A	20,83B

*Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

tratamiento. El análisis de varianza y la comparación de medias, indican que el efecto residual del P (cuando no se aplicó durante el año 2005) no afectó de forma significativa la cantidad de BA producida, lo que viene a corroborar que la residualidad del fertilizante adicionado fue baja o nula, mientras que la adición de P durante los años 2004 y 2005 incrementó significativamente la producción de BA, siendo los valores de BA encontrados con el nivel de 600 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ significativamente superiores a todos los demás comparados.

La respuesta máxima en producción de BA se obtuvo con la aplicación de 300 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ durante el 2004, mientras que con la fertilización consecutiva durante 2 años, se destacó un máximo de 20,83 t.ha⁻¹ como el mejor tratamiento

(Cuadro 3). Se podría inferir que dosis inferiores a 600 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ no satisfacen la necesidad del cultivo para maximizar su producción de BA en este suelo, lo que coincide con lo mencionado por Palmieri (1983), quien obtuvo un rendimiento de 22,5 t.ha⁻¹ con 600 kg.ha⁻¹ de P₂O₅.

Al correlacionar la BA con la producción de tubérculos (PT) no se encontró ninguna relación significativa entre las variables, tanto cuando las correlaciones se efectuaron considerando los valores de las parcelas con efecto residual de P, o cuando se estimaron en parcelas a las que se adicionó P por 2 años consecutivos (Figura 2); en ambos casos los coeficientes de determinación son muy bajos. La relación PT/BA indica cuantas unidades de PT se producen por unidad de BA y entre más alto el valor, más eficiente es la

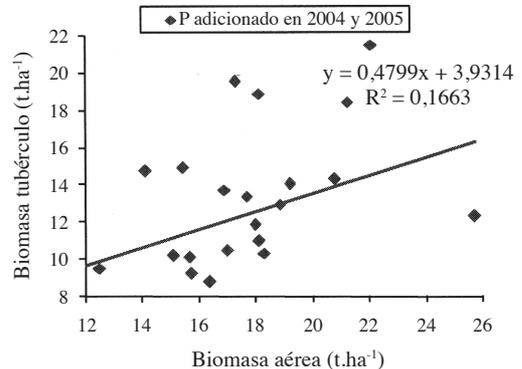
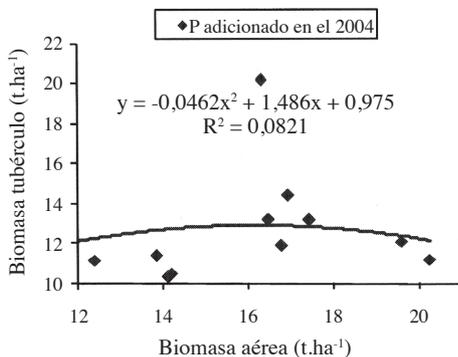


Fig. 2. Relación entre la BA y la producción de tubérculos cuando se adiciona P al cultivo de papa en 1 y 2 años consecutivos.

variedad. De los datos mencionados por Bertsch (2003) para 9 variedades de papa en Costa Rica, se calcula que la relación PT/BA oscila entre 1,98 (≈ 2) y 6,91 (≈ 7), mientras que en el presente trabajo este valor fue de 1,10, valor más bajo que el de 2,29 mencionado por Bertsch (2003) para la variedad Floresta. Como mencionan varios autores (Villalobos 1989, Bertsch 1998, Elías y Castellvi 2001), la alta producción de BA provoca una reducción de PT, lo que ayuda a explicar los bajos rendimientos obtenidos en este trabajo y de alguna manera la falta de correlación con la adición de P, al enmascarar su efecto en la PT.

Biomasa total (BT): Al igual que en los casos anteriormente mencionados, la BT del segundo cultivo tampoco se vio afectada por el efecto residual del P adicionado en el primer cultivo y fue significativamente superior solo cuando se aplicó la dosis mayor de P_2O_5 durante los años 2004 y

2005 (Cuadro 4). Los rendimientos máximos de BT, se encontraron con la dosis de $300 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 aplicada en el 2004 ($33,19 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) y con la dosis mayor de fertilizante aplicada por 2 años consecutivos ($37,33 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Altura de la planta: No se encontró respuesta significativa de la variable altura de planta al efecto residual del P adicionado durante el primer cultivo de papa; de otra manera, el efecto residual de los tratamientos de P adicionados 1 año antes fue nulo con relación a la altura de la planta medida 1 año después de su aplicación, indiferentemente del nivel de P aplicado. Sin embargo, cuando se adicionó el P en forma consecutiva por 2 años todos los tratamientos con P fueron significativamente superiores al testigo, pero iguales entre sí, ajustándose a un modelo cuadrático ($R^2=0,6322$) (Cuadro 5). Algo similar encontró Sala (1962), quien menciona un incremento significativo entre

Cuadro 4. Efecto de la adición de niveles crecientes de P en la producción de biomasa total seca de la papa.

Tratamiento ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1} P_2O_5$)	P adicionado en el 2004 (efecto residual)	P adicionado en el 2004+2005
	Rendimiento ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Rendimiento ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)
0	24,54A*	24,33B
150	25,22A	26,67B
300	33,19A	25,33B
450	26,00A	28,33B
600	28,85A	37,33A

*Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

Cuadro 5. Efecto de la adición de niveles crecientes de P sobre la altura de la planta de papa.

Tratamiento ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1} P_2O_5$)	P adicionado en el 2004 (efecto residual)	P adicionado en el 2004+2005
	Altura planta (cm)	Altura planta (cm)
0	82,33A*	74,83B
150	73,40A	89,70A
300	73,07A	92,87A
450	80,73A	98,67A
600	85,73A	97,73A

*Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

el testigo y el primer nivel de P adicionado, ajustándose sus datos a un modelo lineal.

Con los resultados obtenidos del rendimiento de la BA y la altura de planta se verifica el efecto positivo que tiene la adición de P por 2 años consecutivos sobre las variables de crecimiento de la papa. Sin embargo, no se encontró significancia estadística, al correlacionar estas 2 variables de crecimiento, probablemente debido a la dificultad de medir la altura de planta en una región con alta pluviosidad, lo que causa un mayor error de lectura de la altura de la planta por volcamiento.

Concentración de nutrimentos en varios tejidos

En los tubérculos: La concentración de los diferentes nutrimentos estudiados en la biomasa de tubérculos no se vio afectada por la adición de niveles crecientes de P al suelo durante el 2004 para ningún nutrimento (Cuadro 6), excepto para el B, cuya diferencia de 5-7 mg.kg⁻¹ no es fisiológicamente relevante. Al adicionar P en forma consecutiva por 2 años, los únicos nutrimentos que aumentaron su concentración en los tubérculos de manera significativa fueron el N y el P (Cuadro 6). Estos resultados eran de esperar

Cuadro 6. Efecto de la adición de niveles crecientes de P en la concentración de nutrimentos en los tubérculos de papa.

Nutrimento	Unidades	Tratamiento kg.ha ⁻¹ P ₂ O ₅				
		0	150	300	450	600
P adicionado 2004 (efecto residual)						
N		1,75 A*	1,63 A	1,46 A	1,64 A	1,54 A
P		0,24 A	0,26 A	0,20 A	0,26 A	0,26 A
Ca	%	0,04 A	0,03 A	0,04 A	0,04 A	0,03 A
Mg		0,09 A	0,10 A	0,09 A	0,10 A	0,10 A
K		2,96 A	2,86 A	2,74 A	2,92 A	3,11 A
S		0,17 A	0,17 A	0,15 A	0,16 A	0,17 A
Fe			65 A	36 A	32 A	30 A
Cu	mg.kg ⁻¹	10 A	9 A	9 A	8 A	9 A
Zn		27 A	24 A	22 A	23 A	27 A
Mn		6 A	4 A	4 A	2 A	3 A
B		6 AB	6 AB	6 AB	5 A	7 B
P adicionado en 2004+2005						
N		1,70 A	1,90 A	1,78 AB	1,95 B	1,82 AB
P		0,23 A	0,28 BC	0,27 AB	0,32 C	0,30 BC
Ca	%	0,04 A	0,04 A	0,04 A	0,04 A	0,04 A
Mg		0,10 A	0,10 A	0,10 A	0,10 A	0,10 A
K		3,15 A	3,04 A	2,96 A	3,19 A	2,96 A
S		0,17 A	0,20 A	0,18 A	0,20 A	0,19 A
Fe			43 A	36 A	36 A	41 A
Cu	mg.kg ⁻¹	10 A	10 A	10 A	10 A	10 A
Zn		28 A	29 A	27 A	30 A	28 A
Mn		5 A	5 A	4 A	2 A	3 A
B		6 A	6 A	6 A	6 A	5 A

*Los valores en cada fila seguidos por una misma letra son estadísticamente iguales.

para el nutrimento adicionado (P) y también para el caso del N, debido a que la interacción NP es común en el cultivo de la papa (Sala 1962, Bianchini 1973, Palmieri 1983, Bertsch 1998, Barrera 1998).

La poca variación en la concentración de nutrimentos a nivel de tubérculos, bajo las 2 condiciones comparadas, deja entrever que la adición de P influye poco en su dinámica de acumulación en los tubérculos. Los valores de concentración de P del presente trabajo se aproximan a los mencionados para la misma variedad por Bertsch (2003).

Para todos los tratamientos, e independientemente de si se adicionara P al primer cultivo o durante los 2 cultivos, el orden de la concentración de los nutrimentos en los tubérculos fue para los macronutrimentos: $K \gg N \gg P > S > Mg > Ca$ y para los micronutrimentos: $Fe \gg Zn > Cu > Mn > B$, resultados que se repiten durante los 2 años de estudio y son muy similares a los encontrados por Bertsch (2003) para la misma variedad.

En la biomasa aérea (BA): La adición de P como fertilizante al suelo no hizo variar la concentración de ningún nutrimento en la BA, fuera que se adicionara al primer cultivo o en forma consecutiva al primer y segundo cultivo, como se observa en el cuadro 7. La única excepción a lo mencionado, fue la encontrada con el efecto residual del primer cultivo sobre la concentración del S, diferencia que no es significativa desde un punto de vista fisiológico (Cuadro 7).

Para todos los tratamientos, e independientemente de si se adicionara P 1 o 2 veces consecutivas, el orden de la concentración de los nutrimentos en la biomasa aérea fue para los macronutrimentos: $K \gg N \gg Ca > Mg = S > P$ y para los micronutrimentos: $Al > Fe \gg Zn > Mn > B > Cu$. Los resultados son iguales a los encontrados para el primer año de experimentación y muy similares en la mayoría de los nutrimentos a los descritos por Bertsch (2003) para la misma variedad exceptuando el Al, S y B de los que no se dispone de datos comparativos. El valor que más se aleja del de referencia es el Zn, lo que puede deberse a

contaminación de la muestra por la aplicación de Mancozeb® sólo unos días antes de ser tomadas. El P, Mg y N están por debajo de los valores comparados en todos los tratamientos, lo que también influyó en el bajo rendimiento obtenido.

En el tejido foliar: El cuadro 8 revela la existencia de algunas diferencias significativas en algunos nutrimentos, sin que el hecho se relacione con la dosis de fertilizante adicionado. En general, todos los valores encontrados para la mayoría de los nutrimentos para los 2 años de experimentación (datos del 2004 no presentados) se encontraron dentro del rango de suficiencia mencionado para el cultivo de la papa por Mills y Jones (1996); únicamente se consideran ligeramente bajos los valores de Mg y P y altos los de Fe. En el caso de P foliar, tan sólo se obtuvieron los niveles críticos considerados por Bertsch (1998) a partir de la dosis de $450 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 , aplicada por 2 años consecutivos. El valor del Mg tampoco alcanzó en ningún caso el nivel óptimo considerado por Bertsch (1998) porque el contenido en el suelo estaba por debajo del nivel crítico considerado para el cultivo de papa, problema característico de la mayoría de suelos cañeros al ser terrenos que han estado sembrados de caña desde hace muchos años en forma continua (caso del presente trabajo). Los bajos niveles encontrados de estos 2 nutrimentos ayudan a explicar los bajos rendimientos obtenidos, aunque el factor principal, se considera que fue la calidad de la semilla empleada.

Aunque no se encontró un aumento estadísticamente significativo en la concentración de P en el tejido foliar y el incremento en la dosis de fertilizante fosfatado, otros estudios si lo demuestran (Bianchini 1973). No se halló ninguna correlación entre la concentración de nutrimentos a nivel foliar y de biomasa aérea o de tubérculos (datos no presentados), lo cual es normal debido a que las muestras fueron tomadas en diferentes etapas fenológicas del cultivo y a que los componentes de las 2 últimas fracciones tienen funciones diferentes a las del tejido foliar. Si se compara este análisis con el análisis químico

Cuadro 7. Efecto de la adición de niveles crecientes de P en la concentración de nutrimentos en la biomasa aérea del cultivo de la papa.

Nutrimento	Unidades	Tratamiento kg.ha ⁻¹ P ₂ O ₅				
		0	150	300	450	600
P adicionado 2004 (efecto residual)						
N*		3,29 A*	3,08 A	3,08 A	3,02 A	3,12 A
P		0,16 A	0,18 A	0,15 A	0,15 A	0,17 A
Ca	%	1,11 A	0,95 A	1,09 A	1,04 A	1,06 A
Mg		0,32 A	0,26 A	0,29 A	0,29 A	0,30 A
K		6,13 A	5,92 A	5,22 A	5,59 A	5,36 A
S		0,31 B	0,27 AB	0,25 A	0,28 AB	0,26 A
Fe		622 A	682 A	681 A	745 A	862 A
Cu		21 A	18 A	18 A	17 A	17 A
Zn	mg.kg ⁻¹	206 A	139 A	189 A	153 A	144 A
Mn		158 A	103 A	143 A	110 A	111 A
B		77 A	49 A	85 A	54 A	54 A
Al		995 A	1154 A	1112 A	1238 A	1436 A
P adicionado en 2004+2005						
N		3,09 A	2,95 A	2,94 A	2,99 A	2,94 A
P		0,16 A	0,15 A	0,16 A	0,16 A	0,16 A
Ca	%	1,18 A	1,31 A	1,17 A	1,16 A	1,25 A
Mg		0,27 A	0,29 A	0,30 A	0,27 A	0,34 A
K		5,72 A	5,48 A	5,80 A	5,54 A	5,05 A
S		0,29 A	0,30 A	0,30 A	0,30 A	0,30 A
Fe		978 A	825 A	865 A	833 A	680 A
Cu		22 B	18 A	17 A	16 A	15 A
Zn	mg.kg ⁻¹	208 A	180 A	171 A	181 A	189 A
Mn		163 A	163 A	147 A	154 A	146 A
B		77 A	75 A	64 A	77 A	79 A
Al		1638 A	1357 A	1410 A	1349 A	1093 A

*Los valores en cada fila seguidos por una misma letra son estadísticamente iguales.

realizado a la BA, los nutrimentos varían en su concentración, los nutrimentos móviles como el N, disminuyen en las hojas con bastante rapidez, después de iniciarse la tuberización y en menor magnitud lo hacen los nutrimentos P y K. Por su baja movilidad el Ca prácticamente no disminuye, el Cu, el B y el Zn apenas si varían.

Total de nutrimentos absorbidos por el cultivo:

Debido al poco efecto ejercido por la adición de P sobre la absorción de nutrimentos en los diferentes componentes de la biomasa del cultivo de la papa, a continuación se presenta la cantidad absorbida en forma relativa, sin considerar el efecto de los niveles de P agregados al suelo (Cuadro 9). La

Cuadro 8. Efecto de la adición de niveles crecientes de P en la concentración foliar de nutrientes en el cultivo de la papa.

Nutrimiento	Unidades	Tratamiento kg.ha ⁻¹ P ₂ O ₅				
		0	150	300	450	600
		P adicionado 2004 (efecto residual)				
N		5,60 A*	5,96 A	5,99 A	5,91 A	5,84 A
P		0,25 A	0,28 A	0,26 A	0,27 A	0,27 A
Ca	%	1,33 AB	1,55 B	1,22 A	1,43 AB	1,35 AB
Mg		0,42 AB	0,45 B	0,35 A	0,42 AB	0,41 AB
K		7,09 A	7,38 A	6,92 A	7,29 A	7,11 A
S		0,38 A	0,39 A	0,40 A	0,38 A	0,38 A
Al		468 A	121 A	236 A	347 A	123 A
Fe		310 A	132 A	191 A	238 A	132 A
Cu	mg.kg ⁻¹	21 A	22 AB	25 B	21 AB	22 AB
Zn		170 A	128 A	163 A	140 A	144 A
Mn		194 A	165 A	174 A	176 A	155 A
B		41 A	42 A	48 A	42 A	43 A
		P adicionado en 2004+2005				
N		5,66 A	5,32 A	5,63 A	5,60 A	5,52 A
P		0,26 A	0,25 A	0,28 A	0,29 A	0,29 A
Ca	%	1,20 A	1,46 B	1,40 B	1,40 B	1,48 B
Mg		0,39 A	0,40 AB	0,45 B	0,44 AB	0,44 AB
K		6,95 B	6,40 A	6,39 A	6,45 AB	6,51 AB
S		0,38 A	0,36 A	0,38 A	0,38 A	0,38 A
Al		279 A	338 A	173 A	186 A	129 A
Fe		210 A	244 A	160 A	167 A	140 A
Cu	mg.kg ⁻¹	63 A	16 A	16 A	15 A	14 A
Zn		173 A	168 A	159 A	161 A	170 A
Mn		175 A	184 A	177 A	182 A	171 A
B		42 A	44 A	45 A	43 A	41 A

*Los valores en cada fila seguidos por una misma letra son estadísticamente iguales.

cantidad total de nutrientes absorbidos cuando se adicionó el elemento en forma consecutiva por 2 años, fue ligeramente superior a la absorbida cuando sólo se contó con el P aplicado por 1 año debido a que los rendimientos en materia seca fueron mayores. Los nutrientes que más absorbió el cultivo de la papa fueron K>>N>>Ca>P>Mg y

la secuencia de absorción de los micronutrientes fue Fe>>>Zn>Mn>B>>Cu, orden que, excluyendo al Zn, se mantiene durante los 2 años de estudio y es igual a lo mencionado por Bertsch (2003) para la misma variedad.

Indiferentemente de que se adicionara P 1 o 2 veces consecutivas, la cantidad relativa de

Cuadro 9. Cantidad total de nutrimentos absorbidos (promedio de todos los tratamientos) y su relación porcentual por componente de la biomasa en el cultivo de la papa.

Nutrimento	Unidades	Total absorbido	Acumulado en la biomasa (%)	
			Aérea	Tubérculos
P adicionado 2004 (efecto residual) 11,9 t ha ⁻¹				
N		91	62	38
P		8	35	65
Ca	kg.ha ⁻¹	20	96	4
Mg		7	72	28
K		165	62	38
Fe		1362	94	6
Cu		52	62	38
Zn	g.ha ⁻¹	356	85	15
Mn		237	96	4
B		130	90	10
P adicionado en 2004+2005 12,4 t.ha ⁻¹				
N		98	61	39
P		9	35	65
Ca	kg.ha ⁻¹	25	97	3
Mg		8	74	26
K		172	63	37
Fe		1695	95	5
Cu		55	63	37
Zn	g.ha ⁻¹	428	86	14
Mn		313	98	2
B		162	93	7

los nutrimentos en los 2 tejidos comparados (biomasa aérea y tubérculos) fue similar, siendo que los nutrimentos Ca, Fe, Mn y B fueron los que se acumularon menos en los tubérculos, y por lo tanto se exportaron en menor cantidad; por el contrario, aunque tan solo se absorbió 8 kg.ha⁻¹ de P, cantidad muy baja debido a los procesos de retención del suelo y bajo requerimiento del cultivo (Soto 1999), se exportó el 68% del total absorbido (Cuadro 9). Esto supone el mayor porcentaje extraído, concordando con lo encontrado por Soto (1998). Dado que en el presente trabajo sólo se aplicó al suelo NPK (Ca), más pequeñas cantidades de varios

elementos en forma foliar, la mayoría de los micronutrimentos absorbidos fueron proporcionados en forma natural por el suelo.

En la figura 3, se compara la cantidad relativa de nutrimentos absorbida por cada componente de la biomasa durante los 2 años de estudio, independientemente de la cantidad de P aplicada. Se observa como los nutrimentos de mayor movilidad NPK son los que se distribuyen en mayor porcentaje a los tubérculos de 27-65% (el largo de la barra blanca es mayor), seguidos de los de movilidad variable Cu, Mg y Zn, con 14-38% y por último el Ca, Mn y Fe que apenas

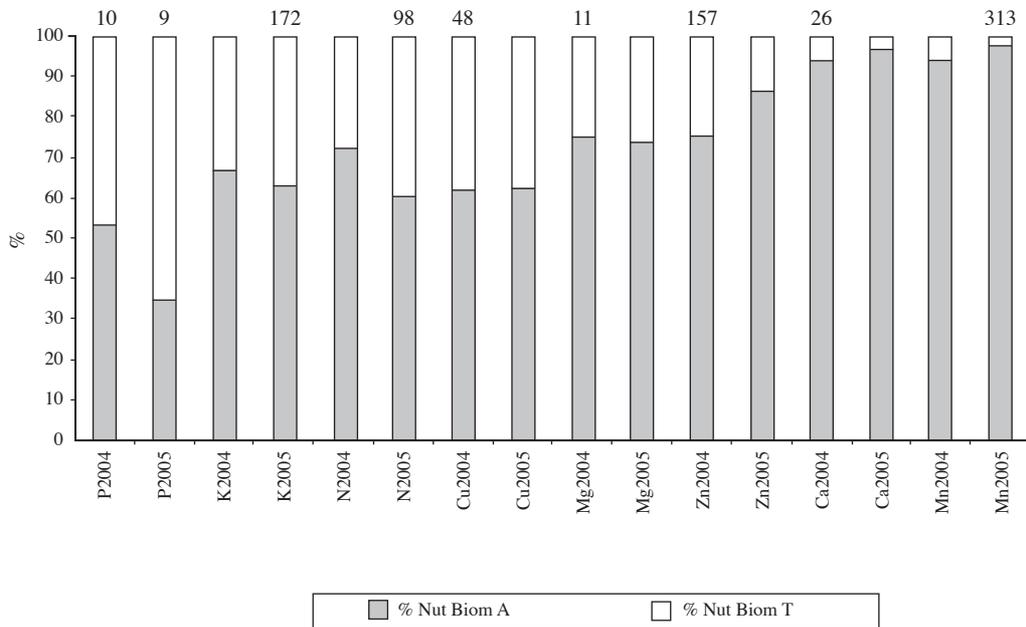


Fig. 3. Cantidad relativa de nutrientes asociados a la biomasa aérea y a la biomasa de tubérculos (nutrientes exportados) en el cultivo de la papa durante los ciclos de producción 2004 y 2005.

se extraen de 2-6% (largo de la barra blanca es menor). Las diferencias relativas entre años para cada nutriente fueron mínimas.

Se calculó la cantidad de nutrientes en la biomasa total requeridos para esta variedad para producir 1 t.ha⁻¹ de papa (Cuadro 10). Los

resultados, tanto para el efecto residual como adicionando el fertilizante por 2 años consecutivos, fueron algo superiores a los descritos por Bertsch (2003), lo que puede deberse a condiciones climáticas, edáficas o de manejo diferentes. Los requerimientos se atenúan cuando se fertilizó

Cuadro 10. Cantidad de nutrientes absorbidos por el cultivo de papa.

Nutriente	Unidades	P adicionado 2004 (efecto residual)	P adicionado en 2004+2005
N		7,32	7,42
P		0,64	0,68
Ca	kg.ha ⁻¹	1,61	1,89
Mg		0,56	0,61
K		13,26	13,02
Fe		109,49	128,31
Cu		4,18	4,16
Zn	g.ha ⁻¹	28,62	32,40
Mn		19,05	23,69
B		10,45	12,26

por 2 años consecutivos aunque la diferencia no es estadísticamente significativa. Los resultados fueron muy superiores a los encontrados por Saldías (2004) en la misma finca, pero con la variedad MNF-80, debida a que las diferentes variedades tienen requerimientos nutricionales diferentes (Bertsch 2003).

CONCLUSIONES

En la década de los años de 1940, las cantidades de P adicionadas en Andisoles eran de 50-100 kg.ha⁻¹ de P₂O₅, incrementándose hasta 1000-1500 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ durante 1970-1980, con una racionalización de la cantidad aplicada a niveles de 450-600 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ en las últimas décadas. Estas tendencias se corroboran tanto para Andisoles de Costa Rica como de América Latina.

La cantidad de P a adicionar depende de factores como: 1) la cantidad de P total y orgánico, que determinan su disponibilidad para el cultivo en los diferentes Andisoles; 2) la cantidad de P disponible que aumenta con los años de uso del terreno a una rata de 2 mg.l⁻¹.año⁻¹ de P cuando se fertiliza con niveles mayores a 450 kg.ha⁻¹.año⁻¹ de P₂O₅; 3) debe ser menor en suelos de textura franco arenosa que en otros de texturas más finas; y 4) puede ajustarse a niveles críticos de P en el suelo y foliar confiables.

Para encontrar una respuesta significativa en el rendimiento de tubérculos, biomasa aérea, biomasa total y altura de planta fue necesario aplicar el fertilizante fosfatado al comienzo de cada cultivo, ya que el efecto residual que deja el P tras un año de su aplicación fue muy bajo.

Para obtener un rendimiento máximo de 16,39 t.ha⁻¹ de papa, es necesario aplicar 600 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ por 2 años consecutivos.

La variación en la concentración de nutrimentos en los tejidos estudiados no se vio afectada por la adición de P, manteniéndose el siguiente orden en los tubérculos: K>>N>>P>S>Mg>Ca y Fe>>Zn>Cu>Mn>B y en la biomasa aérea K>>N>>Ca>Mg=S>P y Al>Fe>>Zn>Mn>B>Cu.

Los valores de los nutrimentos en el tejido foliar, así como en el resto de los tejidos, estuvieron dentro del rango de suficiencia considerados para papa, exceptuando el contenido de Mg y P en el tejido foliar y biomasa aérea del que sólo se consiguió alcanzar el nivel óptimo de P en el tejido foliar a partir de la dosis de 450 kg.ha⁻¹ de P₂O₅.

La cantidad de nutrimentos extraída por la papa fue mayor cuando se fertilizó por 2 años consecutivos que cuando únicamente se fertilizó en el primer cultivo debido a que se obtuvieron rendimientos de materia seca superiores.

Los nutrimentos que más absorbió el cultivo de la papa fueron K>>N>>Ca>P> Mg y la secuencia de absorción de los micronutrimentos fue Fe>>>Zn>Mn>B>>Cu.

Los nutrimentos Ca, Fe, Mn y B fueron los que se acumularon poco en los tubérculos, y por lo tanto se exportaron en menor cantidad; por el contrario, aunque solo se absorbió 8 kg.ha⁻¹ de P, cantidad muy baja debido a los procesos de retención del suelo y bajo requerimiento del cultivo, se exportó el 68% del total absorbido. Los nutrimentos de mayor movilidad NPK fueron los que se distribuyeron a los tubérculos en 27-65%, seguidos de los de movilidad variable Cu Mg Zn, en 14-38% y por último el Ca, Mn y Fe que apenas se extrajeron en 2-6%.

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

- ALVARADO A., BUOL W. 1985. Field estimation of phosphate retention by Andepts. *Soil Sci. Am. J.* 49:911-914.
- BARRERA L. 1998. Fertilización del cultivo de la papa en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. pp. 63-83. In: Fertilización de cultivos de clima frío. Monómeros Colombo Venezolanos. Bogotá, Colombia.
- BENAVIDES O. 1953. La necesidad del abonamiento racional del cultivo de la papa. Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 14 p.
- BERTSCH F. 1998. La fertilidad de los suelos y su manejo. ACCS. San José, Costa Rica. 157 p.
- BERTSCH F. 2003. Absorción de nutrimentos por los cultivos. ACCS. San José, Costa Rica. 307 p.
- BERTSCH F., CORDERO A. 1984. Fertilidad de Typic Dystrandeps de Costa Rica. II. Aniones (N, P, B, S, Mo), materia orgánica y textura. *Turrialba* 34(2):199-205.
- BIANCHINI G. 1973. Ensayos de la fertilización química en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.) en Costa Rica. Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 61 p.
- BOLAÑOS A. 1998. Introducción a la olericultura. EUNED. San José, Costa Rica. p. 327-331.
- CABALCETA G., CORDERO A. 1994 Niveles críticos de fósforo en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 18(2):147-161.
- CÁSSERES E. 1984. Producción de hortalizas. IICA. San José, Costa Rica. 387 p.
- 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.
- CHAVERRIB., BORNEMISZA E. 1977. Interacción fósforo-zinc en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en la zona de Pacayas. *Agronomía Costarricense* 1(2):83-92.
- CHRISTENSON D., DOLL E. 1968. Effect of phosphorus source and rate on potato yields and phosphorus content of petioles and tubers. *Agricultural Experiment Station, Michigan State University, East Lansing* 50(4):616-624.
- ELÍAS C., CASTELLLI S. 2001. *Agro-meteorología*. Mundi Prensa. Madrid, España. p. 343-344.
- ESPINOSA J. 1991. Efecto residual de fósforo en Andisoles. *Revista Facultad Agronomía Maracay* 17:39-47.
- GARCÍA B. 1998. Fertilización del cultivo de la papa en el departamento de Nariño. pp. 23-42. In: Fertilización de cultivos de clima frío, Monómeros Colombo Venezolanos. Bogotá, Colombia.
- JACKSON W., CARTER G. 1976. Nutrient uptake by russet Burbank potatoes as influenced by fertilization. *Agron. J.* 68:9-12.
- 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.
- JOHANNING L. 1939. Experiencia sobre el cultivo de la papa, efectuado en el campo de ensayos del Colegio Nacional de Agricultura en San Pedro de Montes de Oca. Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 14 p.
- MACKAY D., MACCACHERN D., BISHOP B. 1966. Optimum nutrient levels in potato leaves (*Solanum tuberosum* L.). *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30(1):73-76.
- MAG. (Ministerio de Agricultura y Ganadería) 1991. Aspectos técnicos sobre cuarenta y cinco cultivos agrícolas de Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica. 13 p. 15/1/2006. http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/tec-papa.pdf.
- MAI. (Ministerio de Agricultura e Industrias). 1950. Memoria anual. Sección de Papas. p. 175-178.
- MAI. (Ministerio de Agricultura e Industrias). 1960. Memoria anual. Sección de Papas. p. 17-18.
- MANUAL DIGESTION APPLICATION NOTES. 2001. Milestone, Microwave Laboratory Systems. USA.
- McCOLLUM R. 1978. Analysis of potato growth under differing P regimes. I. Tuber yields and allocation of dry matter and P. *Agron. J.* 70:51-57.
- MILLS H., JONES J. 1996. Plant analysis handbook II, a practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide. MicroMacro Publishing, Inc. Athens, Georgia, USA. 368 p.

- MIRANDA H. 1956. Influencia del fósforo sobre el rendimiento de la papa en Costa Rica. Tesis de maestría. Turrialba, Costa Rica, IICA. 89 p.
- MUÑOZ R. 1998. Fertilización de la papa en Antioquia. pp. 43-61. In: Fertilización de cultivos de clima frío, Monómeros Colombo Venezolanos. Bogotá, Colombia.
- 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.
- OPERATION MANUAL. MICROWAVE ACCELERATED REACTION SYSTEM. 2001. MARS 5. CEM Corporation Innovators in Microwave Technology. USA.
- OYARZÚN P. CHAMORRO F., CÓRDOVA J., MERINO F., VALVERDE F., VELÁZQUEZ J. 2002. pp. 51-82. In: M. Pumisacho y S. Sherwood (eds). El cultivo de la papa en Ecuador. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). CIP. Quito-Ecuador.
- 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.
- PÉREZ C. 1974. Respuesta de la papa (*Solanum tuberosum* L.) a la fertilización con N-P-K. Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 93 p.
- ROMÁN C., HURTADO G. 2002. Cultivo de la papa. Guía técnica. CENTA. San Salvador, El Salvador. 36 p. 13/1/2006. <http://www.agronegocios.gob.sv/comoproducir/guiascenta/papa.pdf>.
- SALA J. 1962. Ensayos de fertilización en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.). Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 107 p.
- SALDIAS M. 2004. Curvas de absorción de nutrimentos en papa *Solanum tuberosum* cv MNF80. Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 67 p.
- 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 San José, Costa Rica.
- 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.
- 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.
- VILLALOBOS L. 1989. Cultivo de la papa. EUNED. San José. Costa Rica. 58 p.

