

Evaluación de la fertilización fosfórica foliar y edáfica sobre el rendimiento de la variedad de papa 'Diacol Capiro' (*Solanum tuberosum* L.)

Evaluating phosphoric foliar and soil fertilisation on 'Diacol Capiro' potato variety yield (*Solanum tuberosum* L.)

Carlos E. Núñez¹, Marcela Santos², Sonia L. Navia³ y José M. Cotes⁴

Resumen: En cuatro localidades se evaluó el efecto de la fertilización fosfórica edáfica y foliar sobre el rendimiento y la gravedad específica en la variedad de papa 'Diacol Capiro'. La evaluación comprendió 20 tratamientos correspondientes a la combinación de dos factores: P edáfico (0, 100, 200, 300 y 400 kg· ha⁻¹ de P₂O₅) y P foliar (0, 5, 10 y 15 kg· ha⁻¹ de P₂O₅), junto con un tratamiento testigo de fertilización comercial. No se encontraron diferencias para la variable gravedad específica en ninguno de los tratamientos evaluados, por lo que se deduce que la variación en los niveles de P no afecta esta variable. En el rendimiento de tubérculo se encontraron diferencias para el factor P edáfico, mientras que no hubo diferencias para el factor P foliar. Dentro del factor P edáfico, en la categoría primera, segunda y rendimiento total de tubérculo se observó que la variedad 'Diacol Capiro' presentó respuesta positiva sólo hasta la dosis de 200 kg· ha⁻¹ de P₂O₅.

Palabras claves adicionales: fósforo, gravedad específica, producción

Abstract: Four experimental sites were selected for evaluating the effect of phosphoric foliar and soil fertilisation on yield and specific gravity; the 'Diacol Capiro' potato variety was used in this study. The evaluation included 20 treatments combining two factors: phosphoric fertilisation of soil (0, 100, 200, 300 and 400 kg· ha⁻¹ of P₂O₅) and foliage (0, 5, 10 and 15 kg· ha⁻¹ of P₂O₅); a control treatment consisting of commercial dose fertilisation (farming practice) was included. No differences in specific gravity were found in any of the factors evaluated; varying phosphorus dose levels thus did not affect this variable. There were differences in tuber yield in response to phosphoric soil fertilisation whereas phosphoric foliar fertilisation did not present any differences. A positive response was only observed with the 'Diacol Capiro' variety up to 200 kg· ha⁻¹ of P₂O₅ dose for first and second tuber size and total tuber yield regarding phosphoric soil fertilisation.

Additional key words: phosphorus, specific gravity, crop production

Introducción

EN COLOMBIA, LAS ZONAS PRODUCTORAS de papa se encuentran distribuidas en 14 departamentos, entre los que se destacan, por su importante contribución a la producción nacional, Cundinamarca, Boyacá, Nariño y Antioquia, cuyos aportes suman alrededor de 89% de la producción nacional anual (Alonso y Hijmans, 2002).

En la cordillera Central y en la parte sur de la cordillera Occidental del país dominan los suelos derivados de cenizas volcánicas, cuyas propiedades físicas y químicas son buenas, en general, pero en algunos casos presentan limitantes de fertilidad por la predominancia de coloides minerales amorfos, también llamados alofanos (Guerrero, 1993). Estos limitantes en fertilidad se presentan por la alta formación de complejos orga-

Fecha de recepción: 01 de septiembre de 2005
Aceptado para publicación: 11 de mayo de 2006

¹ Profesor asociado, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. e-mail: cenzutezl@unal.edu.co

² Ingeniera agrónoma, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. e-mail: msantosc@gmail.com

³ Ingeniera agrónoma, Departamento técnico, Cosmoagro S.A. e-mail: sonia.l.navia@cosmoagro.com

⁴ Profesor asistente, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. e-mail: jmcotes@unalmed.edu.co

no metálicos del tipo alofana-ácidos húmicos de estabilidad muy alta, que reduce la liberación de nitrógeno disponible y la fijación de elementos como fósforo (P), azufre (S), calcio (Ca) y otros elementos nutrientes por parte de las alofanas (Espinoza, 1998).

En suelos de Pasto, Túquerres e Ipiales (Nariño), el P total varía entre 777 y 1.467 mg·kg⁻¹, mientras que en los suelos de la Sabana de Bogotá el promedio reportado es de 1.248 mg·kg⁻¹. En contraste con estas altas reservas de P total, los valores de P disponible son bajos (< 40 ppm, determinado por el método de Bray II) y la deficiencia tiende a acentuarse en los suelos de páramo (Martínez y Jiménez, 1985). La razón para hablar de P disponible es que este elemento no es absorbido por las plantas en todas sus formas químicas, sino, sobre todo, como anión monovalente fosfato (H₂PO₄⁻) y con menor rapidez, como anión bivalente (HPO₄²⁻) (Salisbury y Ross, 1994).

De acuerdo con el Instituto Colombiano Agropecuario (1992) y Muñoz (1998), los niveles críticos de P aprovechable, determinado por el método de Bray II, para los departamentos de Antioquia, Cundinamarca y Boyacá son: a) bajo: < 40 ppm, b) medio: entre 40 y 60 ppm y c) alto: > 60 ppm.

Al solubilizarse en el suelo, el P aplicado forma compuestos con calcio, hierro, aluminio y manganeso. En los suelos derivados de cenizas volcánicas, se enlaza con la superficie reactiva de las alofanas y los complejos de humus-aluminio (Pumisacho y Sherwood, 2002). La materia orgánica del suelo también juega un papel importante en la disponibilidad de P, ya que al parecer provee sitios con baja energía de enlace para los fertilizantes fosfatados allí aplicados (Johnston, 2000).

La deficiencia de P no sólo afecta el crecimiento y desarrollo de la planta, sino que eventualmente puede disminuir la formación de frutos y semillas y causar retrasos en la maduración de la planta (Johnston, 2000). Una deficiencia de P en la planta de papa retarda el crecimiento apical, dando lugar a plantas pequeñas y rígidas, y reduce la formación de almidón en los tubérculos, que se manifiesta con manchas necróticas distribuidas en el tubérculo (Pumisacho y Sherwood, 2002).

Los requerimientos de P en el cultivo de la papa varían entre 40 y 100 kg·ha⁻¹ de P₂O₅, dependiendo especialmente de las características genéticas de la variedad y del rendimiento esperado del cultivo. La mayor demanda nutricional ocurre a partir de los 50 a 60 días

después de la emergencia (dde), época en la cual comienza la tuberización del cultivo (Guerrero, 1993).

Según Fedepapa (Federación Nacional de Cultivadores de Papa), los fertilizantes y correctivos representaron 21,3% en promedio de los costos totales de producción para el periodo 1990-2003, mientras que la participación promedio en los costos totales de los insecticidas fue 7,9% y de fungicidas, herbicidas y adherentes, 7,6% (Quintero y Acevedo, 2004). Los costos promedio del cultivo de papa corresponden a \$10'000.000 (us\$4.200), de los cuales 18% corresponde a fertilizantes que, en general, son de grado 1:2:1, 1:3:1 y fuentes simples (Cevipapa, 2005). El costo de la fertilización fosfórica corresponde prácticamente a 60% de los costos de fertilización y su eficiencia se considera de 20%; por lo tanto, el impacto económico de la fertilización fosfórica es considerable en el escenario productivo (Barrera, 2003).

Esta situación plantea la necesidad de buscar nuevas alternativas que brinden, en forma adecuada y oportuna, los nutrientes a las plantas para asegurarles un buen desarrollo y una óptima producción. Por esta razón, la aplicación foliar es una de las opciones para evaluar. Se tiene reportes de esta práctica desde 1844 en Francia, donde se aplicaba sulfato ferroso por vía foliar para corregir la clorosis de las plantas, volviéndose luego una práctica intensiva en otras partes del mundo. Sin embargo, pasó mucho tiempo antes de que la ciencia pudiera dar una clara explicación de los mecanismos de penetración; fueron el empleo de radioisótopos y el mejoramiento de las técnicas de laboratorio en los años cincuenta los que ayudaron a entender los procesos de penetración de los elementos nutrientes a través de las hojas (Eibner, 1986, citado por Trinidad y Aguilar, 2000).

Böhm (1977), citado por Franke (1986), reportó que iones en solución, como el ión calcio, son absorbidos por las superficies foliares y usados en el metabolismo. En 1916, en Hawai, Johnson asperjó piñas que presentaban clorosis como síntoma de deficiencia de hierro con una solución de sulfato de hierro, después de unas pocas semanas, las plantas presentaron de nuevo color verde. Los científicos no tomaron las aplicaciones foliares de microelementos como objetivo de estudio sino hasta después de los años cuarenta, cuando las aplicaciones foliares de herbicidas y otros plaguicidas fueron exitosas (Franke, 1986).

Los estudios han demostrado que los nutrientes en solución son absorbidos por las hojas, aunque no en toda

la superficie de la cutícula foliar, pero sí, en áreas puntiformes que coinciden con la posición de los ectodesmos que se proyectan radialmente en la pared celular, por donde se excretan soluciones acuosas y son apropiados para realizar el proceso inverso (Franke, 1986).

La pared externa de las células epidermales está cubierta por la cutícula y una capa de ceras que varía de acuerdo a la especie vegetal. La pared presenta una estructura de fibras entrelazadas con espacios que difieren en tamaño ($< 0,01 \mu\text{m}$) y son permeables al agua y a sustancias disueltas en ella. Luego se encuentra el plasmalema, que consiste de una película bimolecular de lipoides—conocidos como ectodesmos o cordones lipoides—, que se pueden prolongar radialmente hacia la pared epidermal y a través de los cuales se supone que penetran los nutrientes (Franke, 1986).

El mecanismo de desplazamiento de las soluciones nutrientes en la fase inicial a través de los espacios interfibrilares es por difusión por lo que se requiere un gradiente de concentración. Cuando los nutrientes disueltos llegan al plasmalema, comienza un proceso de absorción activa en el que participan transportadores y se requiere el uso de energía, como sucede en el caso de la absorción de nutrientes por las raíces (Franke, 1986).

Varios trabajos se han realizado en fertilización en la variedad 'Diacol Capiro' (Arrieta, 1997; Pacheco, 1998; Cuesta, 1998), todos ellos en el municipio de Mosquera (Cundinamarca), en suelo con alto porcentaje de saturación de sodio.

Arrieta (1997) evaluó el efecto de la inoculación de micorrizas vesículo-arbusculares en combinación con la fertilización química sobre el rendimiento de esta variedad. Se combinaron dos factores: fertilizante compuesto 10-30-10 (600, 900, 1.200 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) y micorrizas (0, 10, 15, 20 g/planta) y un tratamiento testigo absoluto. Los niveles de P encontrados en el suelo donde se realizó el ensayo corresponden a 67 ppm (alto) y el porcentaje de carbono orgánico a 4,3% (medio). En este trabajo no se encontraron diferencias para el factor fertilizante en el rendimiento total de tubérculo, por lo que se deduce que no hubo respuesta a los niveles crecientes de P aplicados. Tampoco se observó efecto de las dosis de micorrizas sobre el rendimiento, respuesta que se atribuyó al alto nivel de P que presentó el suelo al inicio del ensayo.

Pacheco (1998) evaluó el efecto de diferentes niveles de gallinaza (1 y 2 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$), conejaza (1 y 2 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$) y ferti-

lizante compuesto 10-30-10 (600 y 1.200 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) sobre la producción de papa en la variedad 'Diacol Capiro'. El nivel de P en el suelo era 147 ppm (alto) y el porcentaje de carbono orgánico, 3,41% (medio). En el rendimiento total de tubérculo no se presentaron diferencias para los factores conejaza, gallinaza ni fertilizante químico; sin embargo, se encontraron diferencias para la interacción de estos tres factores. Por lo tanto, al igual que el trabajo anterior, la variable de rendimiento no presentó respuesta a niveles crecientes de P, lo que se puede explicar por el alto nivel de este elemento en el suelo.

En el estudio realizado por Cuesta (1998), se evaluó el efecto de la aplicación de gallinaza (1, 2 y 3 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$) y sustancias húmicas (1 y 1,5 $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2}$) en combinación con fertilizante compuesto 10-30-10 (600, 900 y 1.200 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) sobre el rendimiento de tubérculo. El suelo donde se ubicó el ensayo presentaba un nivel de P de 60,6 ppm (alto) y un porcentaje de carbono orgánico de 5,18% (medio). Al igual que en los dos trabajos anteriores, el factor fertilizante químico no presentó diferencias para la variable de rendimiento de tubérculo total y, por lo tanto, no hubo respuesta a los niveles crecientes de aplicación de P.

El presente trabajo tuvo como objeto evaluar en diferentes localidades el efecto de distintos niveles de P, aplicados en forma edáfica y foliar, sobre el rendimiento de tubérculo y la gravedad específica de la variedad de papa 'Diacol Capiro'.

Materiales y métodos

Ubicación

La investigación se realizó en 4 localidades (tabla 1), ubicadas en los departamentos de Cundinamarca (Villapinzón), Boyacá (Toca y Soracá) y Antioquia (San Pedro). De acuerdo al estudio de suelos realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en el departamento de Antioquia (1982), los suelos de la localidad de San Pedro corresponden al orden Inceptisoles y pueden ubicarse en alguno de los grandes grupos Dystrandepts, Placandepts y Dystropepts; los de las localidades de Toca y Soracá, en la clasificación taxonómica el estudio de suelos de Boyacá (IGAC, 1984) corresponden al orden Inceptisoles, gran grupo Dystropepts y los de la localidad de Villapinzón, según el estudio de suelos de Cundinamarca (IGAC, 2004), al orden Alfisoles, gran grupo Hapludalf. Las características físico-químicas de los suelos se presentan en la tabla 2.

Tabla 1. Localidades donde se realizaron las evaluaciones de fósforo foliar y edáfico.

Departamento	Municipio	Finca	Ubicación		Altitud (msnm)	Temperatura media (°C)	Precipitación (mm)
			Latitud norte	Longitud oeste			
Cundinamarca	Villapinzón	Opalito	05° 06,225´	73° 42,710´	2.715	12,2	729,4
Boyacá	Toca	La Ircania	05° 34,907´	73° 11,249´	2.770	13,3	658,4
Boyacá	Soracá	El Chayne	05° 30,707´	73° 18,062´	2.971	13,3	965,7
Antioquia	San Pedro	San Esteban	06° 25,3´	75° 36,642´	2.565	14,1	1434,0

Fuentes: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y Empresas Públicas de Medellín (EPM).

Tabla 2. Análisis de suelos de las cuatro localidades del ensayo.

Municipio	Finca	pH	CO	P	K	Ca	Mg	Na	Al
			%	ppm			meq·100 g ⁻¹		
Soracá	El Chayne	4,52	2,64	222,3	0,83	4,19	0,55	0,17	0,90
Toca	La Ircania	5,90	2,40	21,5	0,28	12,30	1,12	0,22	0,00
Villapinzón	Opalito	5,01	3,53	28,7	0,77	5,74	2,39	0,06	0,27
San Pedro	San Esteban	4,65	14,06	72,9	0,90	5,84	1,94	0,17	0,86

Municipio	Finca	CIC	Mn	Zn	Fe	Cu	B	Textura
		meq·100 g ⁻¹			ppm			
Soracá	El Chayne	25,1	v	3,1	425	5,7	0,46	Franca
Toca	La Ircania	15,6	36,2	3,9	136	2,3	0,29	Franca
Villapinzón	Opalito	20,3	13,98	1,90	398	1,18	0,4	Franco arcillo - arenosa
San Pedro	San Esteban	42,9	1,5	5,5	236	1,2	0,55	Areno - francosa

Métodos de análisis: carbono orgánico (CO): método de Walkley-Black; Ca, Mg, Na, K: extracción con acetato de amonio 1N pH 7; Al (acidez intercambiable): extracción con KCl 1M; capacidad de intercambio catiónico (CIC): desplazamiento del NH₄ intercambiado con NaCl 1M; P aprovechable: método de Bray II; Mn, Zn, Fe, Cu: extracción con DTPA; boro (B): extracción con fosfato monobásico (azometina-H).

Diseño experimental

El diseño experimental que se utilizó fue de bloques completos al azar con estructura factorial 5 x 4 + 1, tres repeticiones, en la modalidad de series de experimentos (diferentes localidades e igual época). El primer factor corresponde a las dosis de P edáfico (0, 100, 200, 300, 400 kg·ha⁻¹ de P₂O₅); la fuente de P edáfico fue superfosfato triple (46% de P₂O₅). El segundo factor corresponde a las dosis de P foliar (0, 5, 10 y 15 kg·ha⁻¹ de P₂O₅), utilizando como fuente Fosfacel® 21-52-0. Adicionalmente, se incluyó un testigo relativo de fertilización comercial, utilizando una fórmula compuesta de grado 12-34-12 en dosis de 1.500 kg·ha⁻¹ en aplicación edáfica, equivalente a 510 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ (tabla 3).

La fertilización con nitrógeno (N) y potasio (K) fue igual para todos los tratamientos (150 kg·ha⁻¹ de N y 150 kg·ha⁻¹ de K₂O) y se utilizaron como fuente de estos elementos la urea (46% N) y el sulfato de potasio

Tabla 3. Estructura de tratamientos evaluados en el ensayo.

Fósforo edáfico	Fósforo foliar	(kg·ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)			
		0	5	10	15
(kg·ha ⁻¹ P ₂ O ₅)	0	1	2	3	4
	100	5	6	7	8
	200	9	10	11	12
	300	13	14	15	16
	400	17	18	19	20
	510	21*			

* Testigo comercial

(50% K₂O, 16% S). La distancia de siembra en las parcelas fue, para todos los tratamientos, de 1,0 m entre surcos y 0,4 m entre sitios de siembra.

Las dosis de fertilización foliar se fraccionaron en 6 u 8 aplicaciones, dependiendo del desarrollo de las variedades en las localidades de evaluación. Las aplicaciones se reali-

zaron con una frecuencia semanal, comenzando a los 20 dde, y en las siguientes proporciones: 8 aplicaciones (5%, 10%, 10%, 10%, 15%, 15%, 20% y 15% de P), 6 aplicaciones (15%, 15%, 15%, 20%, 20% y 15% de P).

Debido a que la fuente foliar de P (Fosfacel®) contenía N (21%), en las aplicaciones foliares este elemento se ajustó para todos los tratamientos, utilizando urea (46% N) como fuente de N, de tal forma que el único elemento que presentó variación en el ensayo fue el P.

Variables evaluadas

Rendimiento de tubérculo: En la cosecha se pesaron los tubérculos en sus diferentes categorías: primera (diámetro > 7 cm), segunda (entre 4 y 7 cm), tercera (< 4 cm) y se determinó el rendimiento total y por categorías de tamaño, realizando conversiones a toneladas por hectárea.

Gravedad específica (GE): en la cosecha se tomaron muestras al azar de 5 tubérculos de categoría primera por parcela para

determinar la GE en el laboratorio por el método de peso en agua y peso en aire: $GE = P_{\text{aire}} / (P_{\text{aire}} - P_{\text{agua}})$.

El análisis estadístico de las variables evaluadas se realizó a través de análisis de varianza (Anova), pruebas de comparación múltiple de Tukey y análisis combinado, usando el paquete estadístico SAS v.8.2.

Resultados y discusión

Soracá (Boyacá)

En esta localidad se presentaron diferencias en el factor P edáfico para las variables: peso de tubérculo de primera (PT1), peso de tubérculo de segunda (PT2) y peso de tubérculo total (PTT). No se presentaron diferencias en el factor P foliar ni en la interacción P edáfico por P foliar (tabla 4).

En PT1 se observó que niveles de P edáfico de 100, 200, 300 y 400 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ fueron iguales entre sí

Tabla 4. Probabilidad de F (P > F) de los análisis de varianza de las variables evaluadas en la variedad 'Diacol Capiro' en cuatro localidades.

Localidad	Variable	Bloque	Testigo	P _{edaf}	P _{foliar}	P _{edaf} · P _{foliar}
Soracá (Boyacá)	PT1	0,0007*	0,8161	0,0154*	0,1852	0,7240
	PT2	0,0646	0,1064	2,4E-07*	0,7595	0,6274
	PT3	0,1908	0,2548	0,1820	0,7444	0,7710
	PTT	0,0005*	0,3434	6,2E-05*	0,3308	0,8847
	GE	0,1889	0,9851	0,4004	0,8114	0,0828
Toca (Boyacá)	PT1	0,0001*	0,6023	4,7E-05*	0,9978	0,4007
	PT2	0,1047	0,8502	0,6300	0,0838	0,4584
	PT3	0,3171	0,9119	0,7509	0,4479	0,8424
	PTT	0,0002*	0,6182	0,0002*	0,6643	0,5429
	GE	0,5032	0,5534	0,6745	0,5860	0,7910
Villapinzón (Cundinamarca)	PT1	0,0806	0,2691	0,0084*	0,2792	0,4372
	PT2	0,0206	0,0269	0,0057*	0,8191	0,9864
	PT3	0,1833	0,6524	0,3919	0,7906	0,6680
	PTT	0,0894	0,7146	0,0011*	0,3560	0,8652
	GE	0,0150*	0,5511	0,4895	0,2274	0,6290
San Pedro (Antioquia)	PT1	0,5261	0,9254	0,5902	0,9681	0,9317
	PT2	0,0776	0,0761	0,2365	0,8755	0,7748
	PT3	0,5499	0,0924	0,0389*	0,6083	0,5908
	PTT	0,8485	0,1011	0,0008*	0,5020	0,6681
	GE	0,5827	0,6862	0,7733	0,1568	0,6935

* Diferencia estadística (α = 0,05)

PT1, peso de tubérculo de primera; PT2, peso de tubérculo de segunda; PT3, peso de tubérculo de tercera; PTT, peso de tubérculo total; GE, gravedad específica; Testigo, corresponde al tratamiento T1 (testigo comercial), 510 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ edáfico; P_{edaf}, factor fósforo edáfico; P_{foliar}, factor fósforo foliar y P_{edaf} · P_{foliar} = factor fósforo edáfico x factor fósforo foliar.

e iguales al testigo comercial (τ_c). Sólo los niveles de 200 y 300 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 fueron superiores al nivel 0 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 , lo que hace suponer que el nivel más alto (400 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5) y la dosis aplicada como el testigo comercial (510 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5) resultaron relativamente adversos para la respuesta de la variable, ya que fueron iguales al nivel 0 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 (figura 1). Este resultado es particularmente interesante si se tiene

en cuenta que el nivel de P en el suelo en esta localidad era muy alto, de 222,3 ppm (tabla 2).

En PT2 se observó que los niveles de P edáfico de 300 y 400 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 fueron iguales entre sí e iguales al τ_c . A su vez, éstos fueron superiores a los niveles de 0, 100 y 200 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 (figura 1). Este resultado evidencia que los mayores niveles de P edáfico favorecieron la producción de papa de categoría segunda.

Al considerar la producción total (PTT), se observó que los niveles de P edáfico de 200, 300 y 400 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 fueron iguales entre sí e iguales al τ_c , todos ellos superiores al nivel de 0 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 . El nivel de 100 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 fue igual a los niveles de 0 y 200 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 , pero inferior a los niveles de 300 y 400 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 y τ_c . Esto indica que el rendimiento de tubérculo se incrementó por la aplicación de P edáfico, pero no presentó respuesta creciente a partir de los 200 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 (figura 1).

De acuerdo a las escalas de niveles críticos del ICA (1992), al inicio del ensayo el suelo de esta localidad presentaba un nivel alto de P (222,3 ppm) y bajo porcentaje de carbono orgánico (2,64%) (tabla 2). Estas condiciones explican por qué no se observó respuesta al P foliar en esta localidad, ya que cualquier suplemento adicional al nivel de mantenimiento del cultivo es suntuoso y la planta posiblemente no lo toma.

La diferencia en el rendimiento entre el nivel de 0 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 y los niveles de 200, 300, 400 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 y τ_c del factor P edáfico, a pesar del alto nivel de P de esta localidad, puede explicarse por el elevado nivel de hierro (Fe) encontrado allí que pudo repercutir en la disponibilidad del P, ya que el Fe aumenta su solubilidad a medida que disminuye el pH –en el caso de esta localidad fue de 4,52 (tabla 2)– y puede formar compuestos insolubles con el P nativo o el P aplicado en los fertilizantes (Guerrero, 2000).

Toca (Boyacá)

En esta localidad se presentaron diferencias significativas en el factor P edáfico para las variables PT1 y PTT. No se presentaron diferencias en el factor P foliar ni en la interacción P edáfico por P foliar (tabla 4).

En PT1 se observó que los niveles de P edáfico de 100, 200, 300 y 400 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 fueron iguales entre sí e iguales al testigo comercial (τ_c). Todos fueron superiores

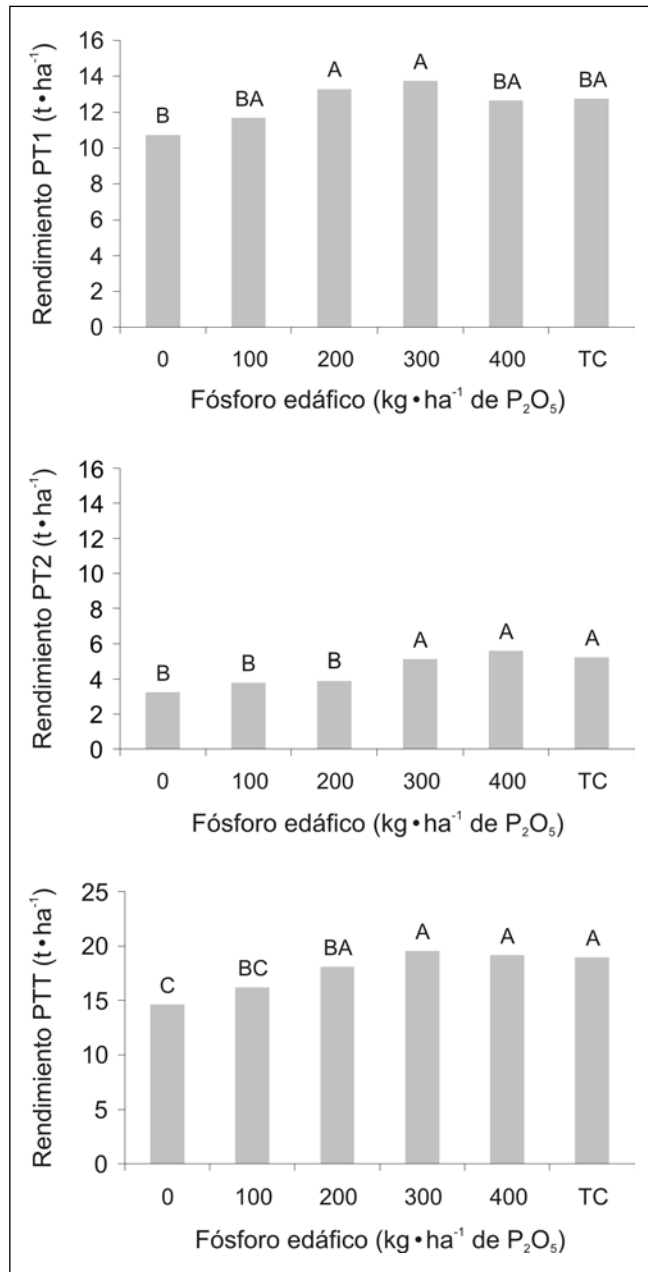


Figura 1. Rendimiento de las variables PT1, PT2 y PTT bajo diferentes niveles de P edáfico, en la variedad 'Diacol Capiro' en la localidad de Soracá (Boyacá). Agrupamientos con las mismas letras son estadísticamente iguales, según clasificación de Tuckey ($\alpha = 0,05$).

res al nivel de 0 kg· ha⁻¹ de P₂O₅ (figura 2). Este resultado evidencia la respuesta de la variable a la aplicación de P edáfico, pero ésta no es directamente proporcional al incremento de los niveles, siendo similar a lo encontrado en la localidad de Soracá.

En la producción total (PTT) se observó que los niveles de P edáfico de 100, 200, 300 y 400 kg· ha⁻¹ de P₂O₅ fueron iguales entre sí e iguales al TC y, a excepción del nivel de 100 kg· ha⁻¹ de P₂O₅, fueron superiores al nivel de 0 kg· ha⁻¹ de P₂O₅. Esto indica que el rendimiento de tubérculo respondió a la aplicación de P edáfico, pero no presentó respuesta creciente a partir de 200 kg· ha⁻¹ de P₂O₅ (figura 2).

Esta localidad presentó bajo nivel de P (21,5 ppm) y bajo porcentaje de carbono orgánico (2,4%) (tabla 2), contrastante con la localidad anterior, en donde el nivel de P era alto; sin embargo, la respuesta en el rendimiento sólo se presentó hasta los 200 kg· ha⁻¹ de P₂O₅. Este

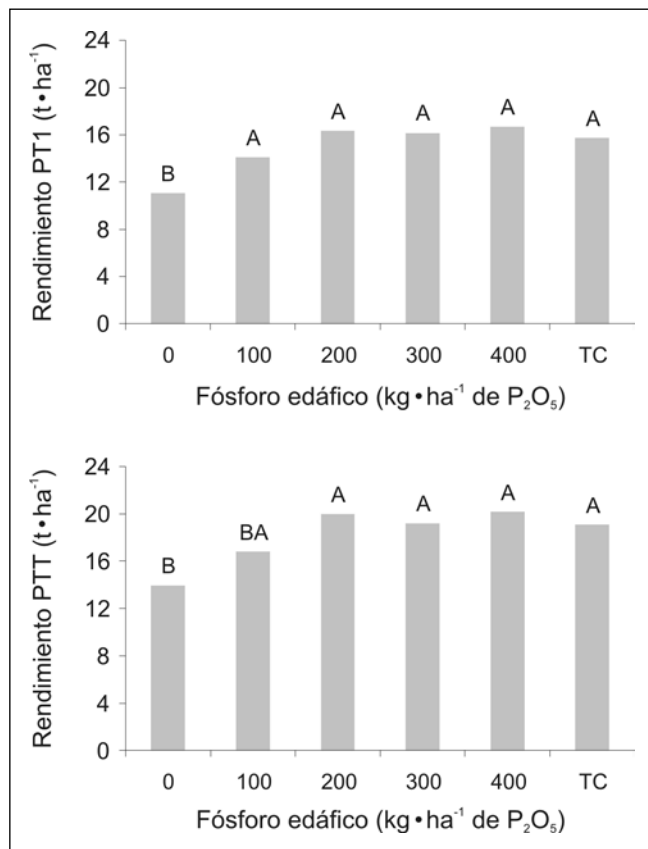


Figura 2. Rendimiento de las variables PT1 y PTT evaluado en 5 niveles de P edáfico en la variedad 'Diacol Capiro' en la localidad de Toca (Boyacá). Agrupamientos con las mismas letras estadísticamente iguales, según clasificación de Tuckey ($\alpha = 0,05$).

resultado se puede explicar considerando que los suelos de esta localidad pertenecen taxonómicamente al orden Inceptisoles, gran grupo Dystropepts (IGAC, 1984), en los que la fijación de P por materiales amorfos (alofanas) no se presenta, como en el caso de los Andisoles (Pumisacho y Sherwood, 2002).

Villapinzón (Cundinamarca)

En esta localidad se presentaron diferencias significativas en el factor P edáfico para las variables PT1, PT2 y PTT. No se presentaron diferencias en el factor P foliar ni en la interacción P edáfico por P foliar (tabla 4).

En PT1 se observó que los niveles de P edáfico de 100, 200, 300 y 400 kg· ha⁻¹ de P₂O₅ fueron iguales entre sí; de igual manera ocurrió entre el nivel de 0 kg· ha⁻¹ de P₂O₅ y el TC. El nivel de 200 kg· ha⁻¹ de P₂O₅ fue el único nivel edáfico que superó al nivel 0 y al TC (figura 3). En PT2 se observó que los niveles de P edáfico de 300 y 400 kg· ha⁻¹ de P₂O₅ fueron iguales entre sí e iguales al TC. A su vez, éstos fueron superiores a los niveles de 0 y 100 kg· ha⁻¹ de P₂O₅ (figura 3).

En la producción total (PTT), se observó que los niveles de P edáfico de 100, 200, 300 y 400 kg· ha⁻¹ de P₂O₅ fueron iguales entre sí e iguales al TC y, a partir del nivel de 200 kg· ha⁻¹ de P₂O₅, fueron superiores al nivel de 0 kg· ha⁻¹ de P₂O₅. Esto indica que el rendimiento de tubérculo se incrementó por la aplicación de P edáfico, pero la variable no presentó respuesta creciente a partir de 200 kg· ha⁻¹ de P₂O₅ (figura 3).

De acuerdo con el ICA (1992), el P de esta localidad era bajo (28,7 ppm), al igual que el porcentaje de carbono orgánico (3,53%), por lo que no se presenta el problema de fijación del P por parte de la materia orgánica mencionado anteriormente (Johnston, 2000). Esta localidad también presenta una clasificación taxonómica diferente al orden Andisoles, por lo que el fenómeno de fijación de P por materiales amorfos no es una limitante, situación que puede explicar la ausencia de respuesta en la variable de rendimiento de tubérculo a niveles mayores de 200 kg· ha⁻¹ de P₂O₅.

San Pedro (Antioquia)

En esta localidad se presentaron diferencias en el factor P edáfico para las variables peso de tubérculo de tercera (PT3) y PTT. No se presentaron diferencias en el factor P foliar ni en la interacción P edáfico por P foliar (tabla 4).

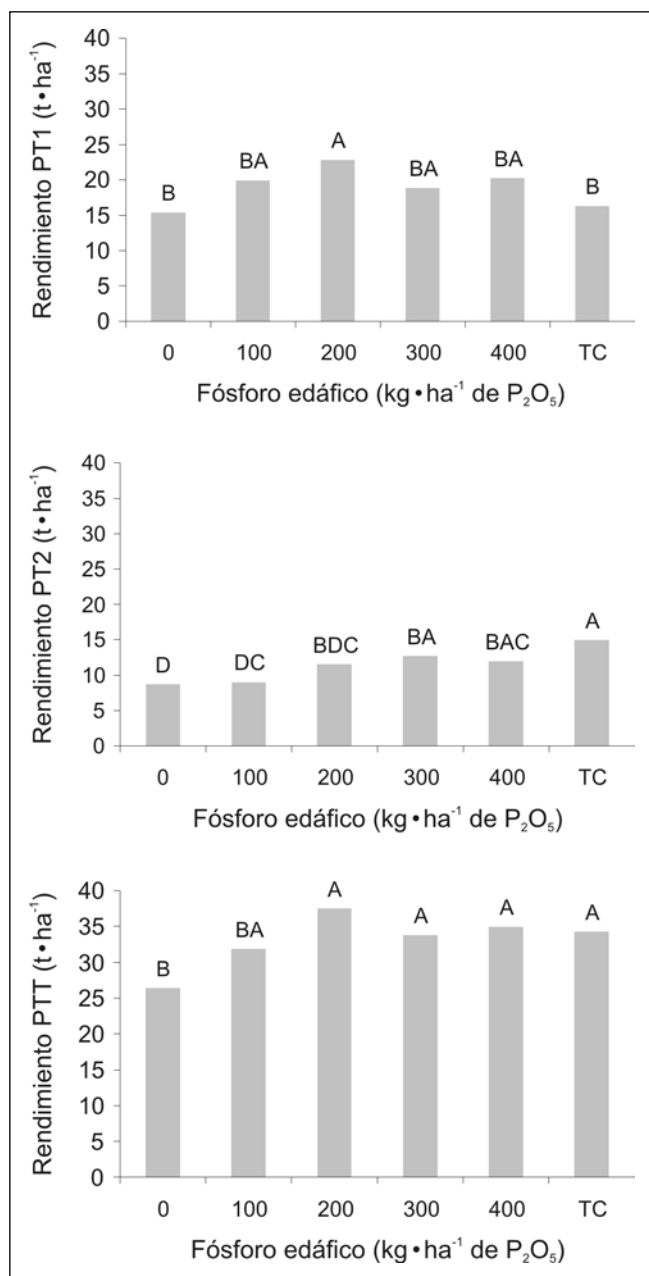


Figura 3. Rendimiento de las variables PT1, PT2 y PTT bajo diferentes niveles de P edáfico, en la variedad 'Diacol Capiro' en Villapinzón (Cundinamarca). Agrupamientos con las mismas letras son estadísticamente iguales, según clasificación de Tuckey ($\alpha = 0,05$).

En la producción total (PTT), se observó que los niveles de P edáfico de 100, 200, 300 y 400 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ fueron iguales entre sí y superiores al nivel de 0 kg·ha⁻¹ de P₂O₅. El TC presentó una respuesta igual a los niveles de 300 y 400 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ y superior a los niveles de 0, 100 y 200 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ (figura 4). En términos generales, se puede decir que la variable rendimiento de tubérculo respondió a la aplicación de

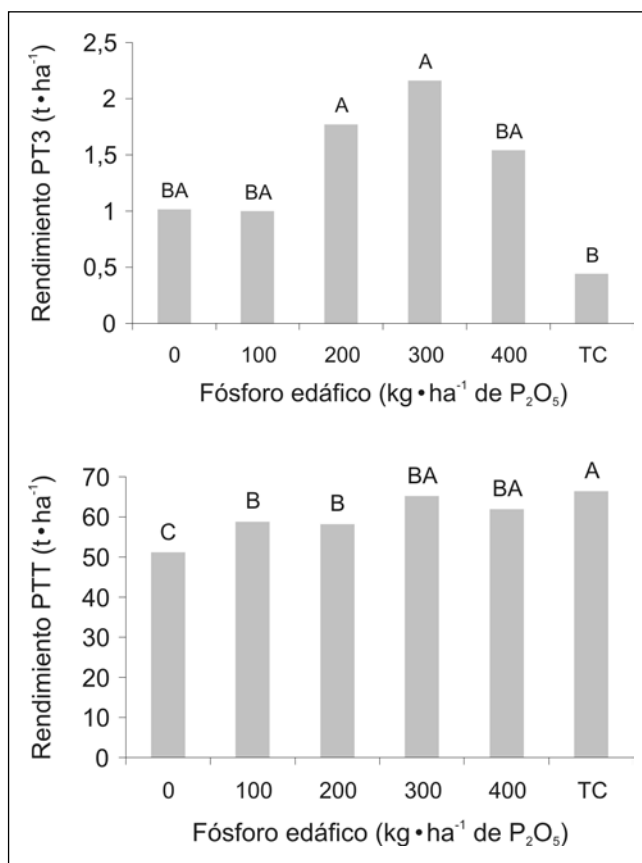


Figura 4. Rendimiento de las variables PT3 y PTT bajo diferentes niveles de P edáfico, en la variedad 'Diacol Capiro' en San Pedro (Antioquia). Agrupamientos con las mismas letras son estadísticamente iguales, según clasificación de Tuckey ($\alpha = 0,05$).

P edáfico, aunque no presentó respuesta proporcional al incremento del P aplicado, similar a lo observado en las otras localidades.

Esta respuesta en la producción total de tubérculo (PTT) se presentó con condiciones en el suelo de alto nivel de P (72,9 ppm) y alto porcentaje de carbono orgánico (14,1%) (tabla 2) y, aunque un nivel mayor de materia orgánica puede disminuir la disponibilidad de P, esto no representó una limitante para observar altos rendimientos (superiores a 50 t·ha⁻¹), incluso en el nivel de 0 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ (figura 4). Como en el caso de las localidades de Boyacá, el cultivo se ubicó en un suelo perteneciente al orden Inceptisoles (IGAC, 1982), por lo que los materiales amorfos no fueron limitantes para la disponibilidad de P, como sucede en suelos del orden Andisoles (Pumisacho y Sherwood, 2002).

Es de resaltar que esta localidad presentó los valores más altos de rendimiento, demostrándose las óptimas

condiciones de crecimiento y la adaptación de la variedad a este ambiente, que además presentó la mayor precipitación de las cuatro localidades evaluadas en este trabajo de investigación (tabla 1), asegurando una mayor disponibilidad de agua para el crecimiento y llenado de los tubérculos.

Análisis combinado de la evaluación de fertilización fosfórica edáfica y foliar

En este análisis se consideró la fuente localidad como efecto aleatorio, teniendo en cuenta que todas las localidades de evaluación son representativas de las regiones productoras en los departamentos donde se desarrolló el proyecto.

En la variable gravedad específica no se encontraron diferencias por efecto de los factores de fertilización fosfórica evaluados en ninguna de las localidades; por lo tanto, se corrobora que este elemento no afecta su respuesta.

Los resultados encontrados en las cuatro localidades indican que no hubo respuesta a la aplicación de P foliar, y los niveles evaluados de este factor no afectaron la respuesta del P edáfico, lo que indica que, bajo las condiciones de experimentación del presente trabajo, la fertilización fosfórica foliar no es una alternativa promisoría para aumentar la eficiencia de la fertilización de este elemento en el cultivo de la papa. Esta respuesta

experimental fue reportada en los resultados en frijol del trabajo de Fregoni (1986), en los que el P aplicado por vía foliar tardó un periodo de 8 días para ser absorbido en un 50%, lo que se constituye en un factor limitante para esperar una respuesta eficiente de la aplicación foliar de este elemento nutriente.

En las variables de rendimiento se encontraron diferencias entre localidades, lo que es explicable ya que el proyecto cubrió diversidad de ambientes (Cundinamarca, Boyacá y Antioquia). Es muy importante resaltar las diferencias que se presentan en el factor P edáfico para las variables PT1, PT2 y PTT (tabla 5):

- En la variable PT1 se encontró que las respuestas en los niveles de 100, 200, 300 y 400 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ fueron iguales entre sí e iguales al TC (testigo comercial), siendo superiores al nivel de 0 kg·ha⁻¹ P₂O₅ (figura 5).
- En la variable PT2 la mejor respuesta se presentó en el TC, mientras que los niveles de 200, 300 y 400 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ fueron iguales entre sí y superiores al nivel de 0 kg·ha⁻¹ de P₂O₅. El nivel de 100 kg·ha⁻¹ P₂O₅ presentó una respuesta igual a los niveles de 0 y 200 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ e inferior a los niveles de 300 y 400 kg·ha⁻¹ P₂O₅ (figura 5).
- En el rendimiento total de tubérculo (PTT) se observó que las respuestas en los niveles de 200, 300 y 400 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ fueron iguales entre sí e iguales a las del TC, siendo superiores en el nivel de 100 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ y las de éste, a su vez, superiores a las del nivel de 0 kg·ha⁻¹ P₂O₅ (figura 5).

Tabla 5. Probabilidad de F (P > F) del análisis de varianza combinado de las variables evaluadas en la variedad 'Diacol Capiro'.

Variable	Bloque	Localidad	Testigo	P _{edaf}	P _{foliar}
PT1	0,1060	1,7E-66*	0,8636	0,0022*	0,7837
PT2	0,0044*	2,6E-40*	0,0073*	0,0005*	0,7310
PT3	0,2245	2,2E-31*	0,6467	0,0888	0,7513
PTT	0,0092*	8,9E-99*	0,0751	0,0000*	0,6376
GE	0,1092	3,3E-08*	0,8068	0,6448	0,3010

Variable	P _{edaf} · P _{foliar}	Loc · P _{edaf}	Loc · P _{foliar}	Loc · P _{edaf} · P _{foliar}	Loc · Testigo
PT1	0,9584	0,7639	0,9798	0,9535	0,8647
PT2	0,6192	0,5941	0,9741	0,9782	0,0978
PT3	0,6188	0,1103	0,8897	0,7962	0,2006
PTT	0,7033	0,0498*	0,4382	0,9054	0,4124
GE	0,6778	0,6887	0,2447	0,2997	0,8306

* Diferencia estadística (α = 0,05)

PT1, peso de tubérculo de primera; PT2, peso de tubérculo de segunda; PT3, peso de tubérculo de tercera; PTT, peso de tubérculo total; GE, gravedad específica; Loc, localidad; Testigo, corresponde al tratamiento 21 (testigo comercial), 510 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ edáfico; P_{edaf}, factor fósforo edáfico; P_{foliar}, factor fósforo foliar; P_{edaf} · P_{foliar} = factor fósforo edáfico x factor fósforo foliar; Loc · P_{edaf} = localidad x factor fósforo edáfico; Loc · P_{foliar} = localidad x factor fósforo foliar; Loc · P_{edaf} · P_{foliar} = localidad x factor fósforo edáfico x factor fósforo foliar; Loc · Testigo = localidad x testigo comercial.

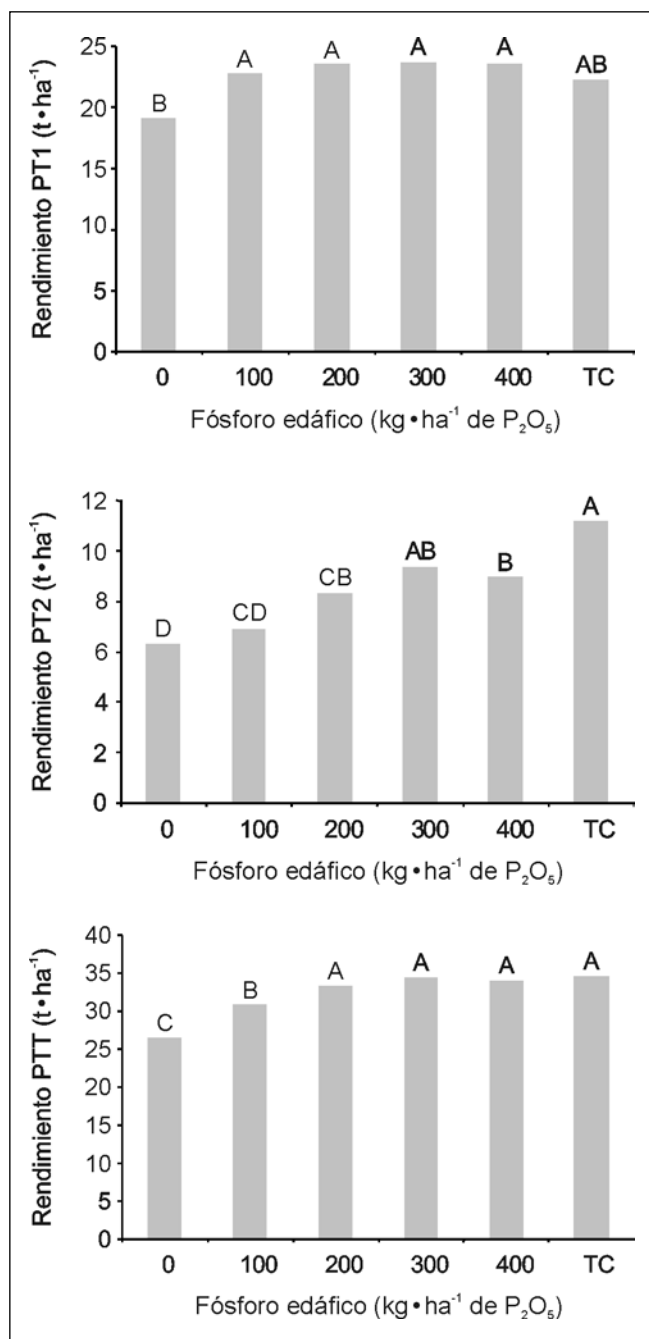


Figura 5. Rendimiento promedio en cuatro localidades de las variables PT1, PT2 y PTT bajo diferentes niveles de P edáfico, de la variedad 'Diacol Capiro'. Agrupamientos con las mismas letras son estadísticamente iguales, según clasificación de Tuckey ($\alpha = 0,05$).

Los anteriores resultados indican claramente que la variedad 'Diacol Capiro', en las localidades de experimentación, respondió a la fertilización edáfica de P y que el rendimiento de tubérculo no responde por encima del nivel de 200 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ (figura 5); resultado que está de acuerdo con lo encontrado en los trabajos

de Arrieta (1997), Pacheco (1998) y Cuesta (1998), en los que, trabajando con la misma variedad en condiciones de la Sabana de Bogotá (Mosquera), no se presentaron respuestas en rendimiento por encima de dosis de 180 kg·ha⁻¹ de P₂O₅. Esto controvierte las prácticas tradicionales de fertilización realizadas por el agricultor, que en esta variedad aplica por lo general niveles superiores a 400 kg·ha⁻¹ de P₂O₅, implicando mayores costos de producción.

El presente trabajo plantea la necesidad de estudiar bajo condiciones similares la respuesta de diferentes variedades de papa a niveles crecientes de P, con especial atención en los niveles superiores a 200 kg·ha⁻¹ de P₂O₅, lo que ayudaría a comprender lo que hoy se conoce acerca de la fertilización fosfórica de papa en Colombia.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por la financiación dada para el proyecto a través del Centro Virtual de Investigación de la Cadena Agroalimentaria de la Papa [Cevipapa] (contrato cv-05-002-03) y a la Compañía Cosmoagro SA por el apoyo en el desarrollo de la investigación. Igualmente, a los agricultores Carlos y Paulo Casallas, Celestino y Miguel Corrales, Gonzalo Castro y Francisco Jaramillo, quienes brindaron su apoyo en los campos de cultivo.

Literatura citada

- Alonso, J. y R. Hijmans. 2002. World potato atlas. Colombia. International Potato Center. En: http://www.cipotato.org/wpa/samerica/colombia_c.htm; consulta: marzo 2005.
- Arrieta, B. 1997. Efecto de la inoculación de micorrizas vesículo-arbusculares (MVA) sobre la respuesta a la fertilización química (10-30-10) en el cultivo de la papa. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 42 p.
- Barrera, L. 1998. Fertilización del cultivo de la papa en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. En: Guerrero, R. (ed.). Fertilización de cultivos en clima frío. Monómeros Colombo Venezolanos SA (EMA), Bogotá. pp. 47-67.
- Barrera, L. 2003. Consideraciones agronómicas y económicas con la fijación de fosfatos en suelos paperos. En: IV Taller papas colombianas. Documentos técnicos. Bogotá.
- Cevipapa. 2005. Censo nacional del cultivo de la papa. Colombia. En: Centro virtual de investigación de la cadena agroalimentaria de la papa (Cevipapa), <http://www.cevipapa.org.co/estadisticas/estadisticas.php#>; consulta: marzo 2005.
- Cuesta, M. 1998. Evaluación del efecto de diferentes niveles de gallinaza y sustancias húmicas en combinación con fertilización química en el rendimiento de la variedad de papa 'Diacol Capiro'. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 39 p.

- Espinoza, J. 1998. Fijación de P en suelos derivados de ceniza volcánica y fertilización fosfórica del cultivo de la papa. pp. 103-111. En: Guerrero, R. (ed.). Fertilización de cultivos de clima frío. Segunda edición. Monómeros Colombo Venezolanos SA (EMA). Bogotá. 423 p.
- Franke, W. 1986. The basis of foliar absorption of fertilizers with special regard to the mechanisms. pp. 17-25. En: A. Alexander (ed.). Foliar fertilization. Martinus Nijhoff Publishers, The Netherlands.
- Fregoni, M. 1986. Some aspects of epigeal nutrition of grapevines. pp. 205-221. En: A. Alexander (ed.). Foliar fertilization. Martinus Nijhoff Publishers, The Netherlands.
- Guerrero, R. 1993. Fertilidad de los suelos de clima frío en Colombia. pp. 43-53. En: Guerrero, R. (ed.). Fertilización de cultivos en clima frío. Primera edición. Monómeros Colombo Venezolanos SA (EMA), Bogotá. 195 p.
- Guerrero, R. 2000. La acidez del suelo: su naturaleza, sus implicaciones y su manejo. pp. 144-145. En: Silva, F. (ed.). Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Tercera edición. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá.
- Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. 1992. Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación. Manual de asistencia técnica N°25. 64p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. 1982. Estudio de suelos del departamento de Antioquia y su aptitud de uso. Subdirección Agrológica, Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], Bogotá. 81 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. 1984. Estudio de suelos del departamento de Boyacá. Subdirección Agrológica, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Bogotá. 67 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. 2000. Estudio de suelos del departamento de Cundinamarca. Tomo II. Subdirección Agrológica, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Bogotá.
- Johnston, A.E. 2000. Soil and plant phosphate. International Fertilizer Industry Association, Paris.
- Martínez, M.J. y B.R. Jiménez. 1985. Dinámica del P en condiciones de campo en un páramo de Cundinamarca. Trabajo de grado. Facultad de Agrobiología, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá. 105 p.
- Muñoz, R. 1998. Fertilización de la papa en Antioquia. En: Guerrero, R. (ed.). Fertilización de cultivos en clima frío. Monómeros Colombo Venezolanos SA (EMA), Bogotá. pp. 28-46.
- Pacheco, A. 1998. Evaluación del efecto de diferentes niveles de gallinaza y conejaza en combinación con fertilización química sobre el rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad 'Diacol Capiro', bajo condiciones adversas de sales. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 41 p.
- Pumisacho, M. y S. Sherwood. 2002. El cultivo de la papa en Ecuador. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) - Centro Internacional de la Papa (CIP). Quito, 231 pp.
- Quintero, L.E. y X. Acevedo. 2004. Costos de producción de papa en Colombia. Observatorio agro cadenas Colombia. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Documento de trabajo N° 40, Bogotá. En: http://www.agrocadenas.gov.co/documentos/Costos/No40_costospapa.pdf 18 p.; consulta: junio 2005.
- Salisbury, F.B. y C.W. Ross. 1994. Fisiología vegetal. Cuarta edición. Grupo Editorial Iberoamericano, México. pp. 127-148.
- Trinidad, A. y D. Aguilar. 2000. Fertilización foliar, un respaldo importante en el rendimiento de los cultivos. Terra 7(3), 247-255. En: <http://www.chapingo.mx/terra/contenido/17/3/art247-255.pdf>; consulta: marzo 2005.