

Diagnóstico de K^+ y NO_3^- en savia para determinar el estado nutricional en papa (*Solanum tuberosum* L. subsp. *andigena*)

Diagnostics of K^+ and NO_3^- in sap to determine nutritional status in potato (*Solanum tuberosum* L. subsp. *andigena*)



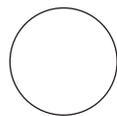
MANUEL IVÁN GÓMEZ S.^{2,1}
STANISLAV MAGNITSKIY¹
LUIS ERNESTO RODRÍGUEZ¹

Determinación en campo de nitratos en savia en papa mediante el método "cardy meter".

Foto: M.I. Gómez S.

RESUMEN

El análisis de savia es una herramienta de diagnóstico nutricional para realizar ajustes oportunos de fertilización en cultivos hortícolas. El objetivo de este estudio fue determinar los niveles de referencia de NO_3^- y K^+ en savia por etapa fenológica y conocer el uso adecuado de esta herramienta de diagnóstico nutricional de N y K en cultivares de papa Diacol Capiro y Pastusa Suprema en la Sabana de Bogotá a los 55, 75, 100, 125 y 150 días después de siembra (dds) en respuesta a cuatro niveles de fertilizante (0, 1.450, 1.900 y 2.375 kg ha⁻¹) y su efecto sobre rendimiento, materia seca e índice de cosecha. La mayor concentración de K^+ en savia de tallos para los dos cultivares se presentó en etapa vegetativa con 4.800 a 5.000 mg L⁻¹, disminuyendo hasta tuberización con 2.725 mg L⁻¹, sin diferencias significativas entre cultivares; contrario al comportamiento de N- NO_3^- , donde se presentó diferencias entre cultivares con una máxima concentración en tuberización con 2.466 mg L⁻¹ en Capiro y 2.200 mg L⁻¹ en Suprema con disminución en madurez fisiológica. Se obtuvieron niveles de referencia en etapa de floración para Capiro mediante ajuste cuadrático de N- NO_3^- y K^+ en savia con 3.280 mg L⁻¹ y de 1.231 mg L⁻¹, respectivamente las cuales se relacionan con la respuesta a la fertilización, rendimiento, materia seca y área foliar. En contraste, para Suprema el N evaluado en savia supone un consumo de lujo con niveles superiores a 1.250 mg N- NO_3^- L⁻¹. Con esta técnica diagnóstica en campo se puede establecer ajustes oportunos en el manejo de la nutrición vegetal nitrogenada y potásica de estos cultivares.



Palabras clave adicionales: análisis en savia, indicadores nutricionales, uso eficiente de K y N.

¹ Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá (Colombia).

² Autor para correspondencia. igomez@unal.edu.co

ABSTRACT

Sap analysis is a nutritional diagnostic tool to provide timely fertilization adjustments in crops. The objective of this study was to determine the reference levels of NO_3^- and K^+ in sap per phenological stage. The study evaluated the proper use of this nutritional diagnostic tool for N and K in Diacol Capiro and Pastusa Suprema potato on the Bogotá Plateau at 55, 75, 100, 125 and 150 days after sowing (das) in response to balanced fertilizer levels (0; 1,450; 1,900 and 2,375 kg ha^{-1}) on the yield, dry matter and harvest index to determine levels for cultivation and phenology. The highest K^+ concentration in sap in the stems occurred at the vegetative stage with 4,800-5,000 mg L^{-1} , decreasing in tuberization with 2,725 mg L^{-1} , without significant differences between cultivars; contrary to the behavior of N-NO_3^- in the stems, where the maximum concentration at tuberization was 2,466 mg L^{-1} Capiro and 2,200 mg L^{-1} Supreme, with decreased values at physiological maturity. The reference levels were obtained at flowering stage for Capiro by quadratic adjustment of N-NO_3^- and K^+ in sap with 3,280 mg L^{-1} and 1,231 mg L^{-1} , respectively, and related with the response to fertilization, yield, dry matter, and leaf area. In contrast for Supreme, the evaluated N, with levels higher than 1,250 $\text{mg N-NO}_3^- \text{L}^{-1}$ in sap, supposed luxury consumption. Using this diagnostic tool in the field, adjustments can be made to the management of nitrogen and potassium nutrition of these cultivars.

Additional key words: sap analysis, nutrient indicators, efficient use of K and N.

Fecha de recepción: 04-03-2017 Aprobado para publicación: 15-04-2017

INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es el tercer producto cultivable para alimento más importante del mundo (De Jong, 2016). En Colombia constituye uno de los productos agrícolas de mayor demanda de fertilizantes con el 7 al 20% de los costos totales de producción para los cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema usados frecuentemente para consumo fresco e industrial (Gómez y Torres, 2012), además, es una de las especies de mayor exigencia nutricional por kg de biomasa seca producida (Kumar *et al.*, 2013)

Los nutrientes minerales que más extrae la papa bajo condiciones de los Andes son potasio, (K^+) y nitrógeno (N) (Gómez y Torres, 2012). Así el diagnóstico vegetal temprano de estos elementos esenciales permite ajustar planes de fertilización con el fin de incrementar producción, reducir costos y disminuir el impacto ambiental (Lefèvre *et al.*, 2012; Kumar *et al.*, 2013).

La savia corresponde a un líquido extraído de tejidos conductores tanto del xilema como del floema de la planta (Cadahía *et al.*, 2008; Gangaiah *et al.*, 2016). Su uso como herramienta de análisis nutricional es usado para diagnosticar de manera rápida y económica deficiencias o excesos de nutrientes (Errebhi *et al.*, 1998; Aguilera *et al.*, 2013). Los reportes para N-NO_3^- en savia de papa son más frecuentes (Badillo-Tovar *et al.*, 2001; Moulin *et al.*, 2012; Aguilera *et al.*, 2014) que evaluaciones para K^+ (Hochmuth, 1994; Kelling *et al.*,

2002) (Tab. 1), debido al mayor impacto ambiental y de sostenibilidad que representa las pérdidas de N en el ecosistema (Goffart *et al.*, 2008; Ziadi *et al.*, 2012).

Generalmente, el contenido de NO_3^- y K^+ en savia se realiza en peciolos o tallos de papa en base seca o fresca porque son estructuras más sensibles a cambios en la disponibilidad de N y K del suelo o sustrato (Vitosh *et al.*, 1998; Rogozińska *et al.*, 2005; Moulin *et al.*, 2012). Adicionalmente, es necesario la calibración de índices por fenología desde etapas tempranas (Brink *et al.*, 2002; Moulin *et al.*, 2012) para relacionarlos con componentes de rendimiento y establecer niveles de suficiencia (Badillo-Tovar *et al.*, 2001; Moreira *et al.*, 2011; Ziadi *et al.*, 2012; Mohr y Tomasiewicz, 2012) con el fin de realizar ajustes tempranos en los programas de fertilización para optimizar la productividad del cultivo (Cadahía *et al.*, 2008; Moulin *et al.*, 2012).

Las diferencias en la acumulación de nutrientes en savia entre cultivares y subespecies de papa han sido reportados por diferentes autores como se muestra en la tabla 1, para la mayoría de los casos estos resultados han sido obtenidos por etapa fenológica como respuesta a diferentes niveles de fertilización o variación por tipo de suelo. Otros factores que influyen sobre la concentración de nitratos en savia son: (i) hora del día (Vitosh y Silva, 1996; Rogozińska *et al.*, 2005), (ii) partición y formas del nitrógeno en la planta (Kolbe y

Tabla 1. Niveles de NO₃⁻ y K⁺ en savia de peciolo de papa en diferentes estados fenológicos evaluados con medidores de ion selectivo.

Etapa	Subespecie	NO ₃ ⁻ -N savia (mg L ⁻¹)	K ⁺ savia (mg L ⁻¹)	Referencias
(I) Vegetativa	<i>tuberosum</i>	1.200-1.400	4.500-5.000	Hochmuth, 1994
	<i>tuberosum</i>	1.400-1.450		Errebhi <i>et al.</i> , 1998
	<i>tuberosum</i>	1.250-1.500		Badillo-Tovar, 2001
(II) Tuberización	<i>tuberosum</i>	1.000-1.400	4.000-4.500	Hochmuth, 1994
	<i>tuberosum</i>	1.400-2.000		Moreira <i>et al.</i> , 2011
	<i>tuberosum</i>	1.300-1.350		Errebhi <i>et al.</i> , 1998
	<i>tuberosum</i>	1.400-2.750		Badillo-Tovar, 2001
	<i>tuberosum</i>	1.500-2.000	3.000-6.000	Cadahia, 2008
(III) Máxima floración	<i>tuberosum</i>	1.000-1.200	4.000-4.500	Hochmuth, 1994
	<i>tuberosum</i>	1.100-1.150		Errebhi <i>et al.</i> , 1998
	<i>tuberosum</i>	500-1.000	3.000-4.000	Cadahia, 2008
(IV) Llenado de tubérculo	<i>tuberosum</i>	900-1.200	3.500-4.000	Hochmuth, 1994
	<i>tuberosum</i>	850-900		Errebhi <i>et al.</i> , 1998
	<i>tuberosum</i>	900-1.550		Badillo-Tovar, 2001
(V) Maduración	<i>tuberosum</i>	600-900	2.500-3.000	Hochmuth, 1994
	<i>andígena</i>	800-900		Aguilera <i>et al.</i> , 2014
	<i>tuberosum</i>	500-600		Errebhi <i>et al.</i> , 1998
	<i>tuberosum</i>	600-850		Badillo-Tovar, 2001

Stephan-Beckmann, 1997; Mäck y Schjoerring, 2002); (iii) época de siembra (Aguilera *et al.*, 2014), (iv) cultivar y material de propagación (Moreira *et al.*, 2011); (v) disponibilidad de agua en el suelo (vi) fuente de fertilizante (Cadahía *et al.*, 2008; Ziadi *et al.*, 2012).

El objetivo de este estudio fue determinar los niveles de referencia de NO₃⁻ y K⁺ en savia por etapa fenológica y conocer el uso adecuado de esta herramienta de diagnóstico nutricional para N y K en cultivares Capiro y Suprema cultivados en suelos de alta fertilidad en la Sabana de Bogotá.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el año 2015 en el Centro de Investigación en Nutrición en Plantas del Trópico (CENIPLANT), ubicado en Facatativá al occidente de la Sabana de Bogotá (Colombia) (4°49'26,9" N y 74°22'29,7" W a 2.520 msnm). Las condiciones ambientales presentaron clima frío seco con precipitación anual promedio de 850 mm; temperatura media máxima de 18,5°C; temperatura media mínima de 7°C y temperaturas medias de 12,6°C y humedad relativa de 85% (IDEAM, 2015). El suelo de estudio se

clasificó como Andic Eutrudept de acuerdo a la Soil Survey Staff (2010). Se caracterizó como un suelo fluvio lacustres de alta fertilidad y de textura franco arcillosa y altos niveles de N y K disponible (Tab. 2).

Se utilizó un diseño estadístico en medidas repetidas (DMR) con dos factores entre sujetos: dos cultivares (Capiro y Suprema) y cuatro dosis de fertilizantes (0, 1.450, 1.900 y 2.375 kg fertilizante/ha mediante un arreglo en parcelas divididas con tres réplicas. La serie en el tiempo como factor intra sujetos fue adaptada de Valbuena *et al.* (2010) y se asoció a cinco etapas fenológicas críticas de crecimiento del tubérculo: etapa I (50-55 dds), desarrollo de tallos principales e inicio de crecimiento vegetativo, etapa II (70-75 dds), formación de tallos secundarios-inicio de tuberización; etapa III (90-100 dds), floración, máxima tuberización e inicio de llenado; etapa IV (120-125 dds), final de floración-llenado de tubérculo; etapa V (150-160 dds), senescencia, máximo llenado y maduración del tubérculo.

Se comparó un tratamiento control con la oferta edáfica del suelo sin aplicación de fertilizante (nivel 0) y tres niveles de fertilizante (Tab. 3): nivel 1, 75% de la dosis de fertilizante óptima balanceada; nivel 2,

Tabla 2. Propiedades químicas del suelo en el sitio de evaluación

Propiedades del suelo	Valores
pH	5,82
Al, cmol _c kg ⁻¹ , Metodo Yuan, AA*	<0,001
MO, g kg ⁻¹ , Walkey-Black	12,71
CICE, cmol _c kg ⁻¹	19,14
N total, g kg ⁻¹ , Walkley-Black	6,4
P, mg kg ⁻¹ , Bray II-Colorimetría	70,16
K, cmol _c kg ⁻¹ , Acetato de amonio, AA*	0,87
Ca, cmol _c kg ⁻¹ , Acetato de amonio, AA*	15,95
Mg, cmol _c kg ⁻¹ , Acetato de amonio, AA*	2,14
Na, cmol _c kg ⁻¹ , Acetato de amonio, AA*	0,18
S, mg kg ⁻¹ , Fosfato monobásico-Colorimetría	30,01
Saturación de K (%)	4,53
Saturación de Ca (%)	87,35
Saturación de Mg (%)	11,18
Ca/K	18,4
(Ca+Mg)/K	20,87

* Determinación por absorción atómica.

100% como dosis de fertilizante óptimo balanceado y el nivel 3 con el 125% de la dosis de fertilizante óptima. La recomendación de fertilización propuesta se realizó teniendo en cuenta el balance en la relación suelo-planta. Se fraccionó el 55% del N en siembra y el 45% a los 45 dds; el 80% del P a la siembra y el 20% a los 45 dds; el 12% del K a la siembra y el 88% a los 45 dds. Para el Mg y elementos menores se aplicó el 63% a la siembra y el 37% a los 45 dds; se usaron las siguientes fuentes granuladas: N-P, DAP (18-46-0), Nitrox-S (28-4-0); K, KCl (0-0-60); Mg, Kieserita (25% MgO), Nutricomplet; B, Zn, Cu, Mn y Fe, fuente compleja de micronutrientes con base en sulfatos.

La siembra se realizó en parcelas de 50 m² (135 plantas), con una distancia entre surcos de 1 m y 0,37 m entre plantas, un área útil de cosecha de 36 m² con un área experimental de 1.200 m², para una densidad de 27.000 plantas/ha. Las prácticas culturales de riego, manejo de arvenses y manejo fitosanitario se realizaron de manera uniforme y comparables con el manejo comercial. Para cada etapa fenológica y unidad experimental se evaluaron cinco plantas mediante análisis destructivo en hojas, tallos y tubérculos materia fresca (Pf), materia seca (Ps). El Ps se determinó pesando muestras de 200 g de material vegetal fresco a peso constante en una estufa de secado a 70°C durante 72 h, adaptado de Moreira *et al.* (2011).

Tabla 3. Aporte de nutrientes minerales en los tratamientos con fertilización edáfica.

Nutriente kg ha ⁻¹	Nivel 1 1.450	Nivel 2 1.900	Nivel 3 2.375
N	123	164	205
P ₂ O ₅	216	288	360
K ₂ O	176	235	294
Mg	60	80	99
S	113	150	188
B	1,7	2,3	2,9
Zn	3,5	4,6	5,8
Mn	4,2	5,6	7,0

Se extrajo en campo el jugo celular de los tallos y de los tubérculos en las diferentes etapas fenológicas para cinco plantas por unidad experimental, se tomó una alícuota de extracto de savia de 0,5 mL en tres tallos principales de la quinta a sexta hoja verdadera del ápice y se evaluaron cuatro tubérculos por planta de calidad "primera" con diámetro entre 6-9 cm. La medición del N-NO₃⁻ y K⁺ en savia se realizó de forma directa en campo entre las 8 y 10 am (Vitosh y Silva, 1996), usando el método de electrodo selectivo de iones, ISE evaluado por Goffart *et al.* (2008) y Carson *et al.* (2016) mediante equipos portátiles Horiba LAQUA twin® (Horiba Europe, Leichlingen, Alemania) Ion-K⁺ e Ión N-NO₃⁻.

Los datos reportados fueron valores promedios de tres réplicas con el error estándar de la media. Los datos de las variables fueron analizados mediante análisis de varianza donde se evaluaron las interacciones de los factores fenología x dosis de fertilizante x cultivares, y para las medias de las variables se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey ($P \leq 0,05$), además, se ajustaron las curvas de regresión utilizando el programa estadístico INFOSTAT versión 2014.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

K⁺ y N-NO₃⁻ en savia por etapa fenológica y cultivar

Se encontraron diferencias altamente significativas ($P < 0,0002$) en la concentración de K⁺ en savia de tallos en Capiro con 4.750 mg L⁻¹, mientras para Suprema fue de 5.037 mg L⁻¹, siendo mayor en etapas iniciales a los 55 dds y para los tratamientos fertilizados con

interacciones entre el cultivar y fenología tanto para K^+ ($P < 0,004$) como para NO_3^- ($P < 0,0001$). Capiro mostró una mayor sensibilidad a las variaciones de K^+ (Fig. 1A) en comparación a Suprema (Fig. 1Bb), esta última no presentó diferencias significativas de K^+ en savia al incremento de la fertilización debido probablemente a la baja traslocación a los órganos vertederos y menor requerimientos de fertilización en suelos fértiles. Las concentraciones en etapas iniciales fueron similares a las reportadas por Hochmut *et al.* (1994) y Rosen *et al.* (1996) e inferiores a 6.000 mg L^{-1} en savia fresca de peciolo si se compara con lo reportado por Cadahia (2008) para la subsp. *tuberosum*.

A partir de los 55 dds para Capiro y Suprema hasta los 100 dds en floración se observó una disminución drástica en las concentraciones de K^+ en savia de tallo con valores de 2.316 y 2.516 mg L^{-1} respectivamente, disminución en las concentraciones de K se pueden relacionar con procesos de translocación el inicio de la etapa de llenado, máxima tuberización y floración; períodos importantes para el diagnóstico nutricional de estos cultivares, coincidiendo con las etapas fenológicas críticas para la toma de análisis de savia en papa como lo referencia Hochmut *et al.* (1994) y Cadahía (2008). Las mayores concentraciones de K^+ en savia en las primeras etapas del cultivo se debe probablemente a una acumulación inicial de asimilados en estructuras vegetativas de hojas y tallos, necesarias para el crecimiento e inicio de tuberización, donde la concentración de K^+ fue menor a medida que se desarrolla el cultivo, posiblemente como consecuencia

de un efecto de dilución por crecimiento y transporte a órganos vertederos confirmando lo planteado por Kelling *et al.* (2002).

Capiro incrementó la concentración de K^+ en savia desde los 100 dds hasta los 150 dds alcanzando valores de 3.300 mg L^{-1} con diferencias significativas por variación en la dosis del fertilizante (Fig. 1A), mientras para Suprema la concentración de K^+ fue similar y tiende a incrementarse a partir de los 125 dds hasta los 150 dds lo cual relaciona con el llenado más tardío dada a su tuberización continua y una acumulación de K^+ más al final del ciclo respecto a Capiro que presenta una tuberización más temprana debido a su hábito de crecimiento determinado. Suprema no evidenció cambios de K^+ en savia respecto a niveles de fertilización (Fig. 1B) probablemente por una menor eficiencia y baja traslocación con alta disponibilidad de N y K (Tab. 2) asociado posiblemente a un crecimiento vegetativo indeterminado limitando la tuberización y el crecimiento del tubérculo.

El incremento en la acumulación de K^+ en la etapa de maduración en ambos cultivares coincide con el máximo crecimiento del tubérculo, mayor acumulación materia seca y conversión de almidón, los cuales como órganos vertederos demandan mayor translocación de asimilados de la parte aérea; contrario al comportamiento de algunos cultivares de subsp. *tuberosum* que presentan ciclo más corto y menos tubérculos, favoreciendo un mayor crecimiento de los vertederos y una disminución gradual de K en savia

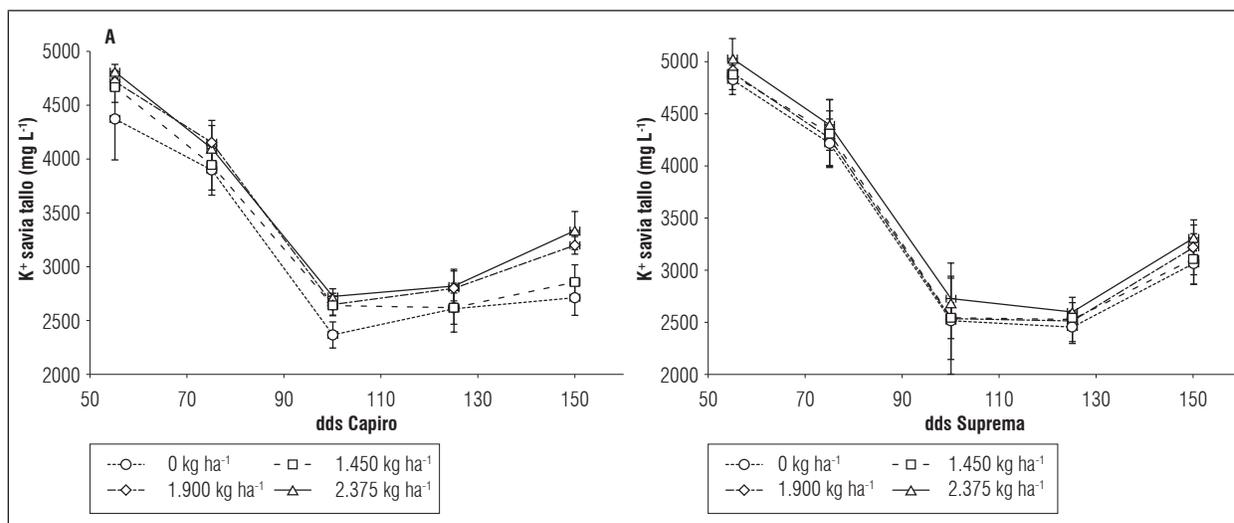


Figura 1. Variación de K^+ en savia fresca de tallo medida en campo en el ciclo del cultivo de Capiro (A) y Suprema (B) en respuesta a la fertilización en suelos de alta fertilidad de la Sabana de Bogotá. Promedios con letras distintas, para cada etapa fenológica, indican diferencia significativa según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

de peciolo con niveles hasta de 2.500 mg L⁻¹ en maduración como lo reportó Hochmuth (1994).

La dinámica en la concentración de N- NO₃⁻ en savia de tallo por fenología en ambos cultivares fue contrario al K⁺, incrementándose desde los 55 dds en etapa vegetativa con 1.812 mg L⁻¹ en Capiro y con diferencias significativas por variación de los niveles de fertilización (Fig. 2A), mientras en Suprema los N-NO₃⁻ aumentó desde 1.450 mg L⁻¹ sin cambios por efecto de la fertilización (Fig. 2B). A los 100 dds se presentaron los máximos niveles de nitratos en savia de 2.467 mg L⁻¹ y 2.200 mg L⁻¹ para Capiro y Suprema respectivamente, etapas que coinciden con máximo crecimiento vegetativo, floración, máxima tuberización. Después de los 100 y 125 dds para Capiro y Suprema respectivamente se presentó un descenso en los niveles de nitratos hasta 1.185 mg L⁻¹ para Capiro por efecto de la traslocación y hasta 1.433 mg L⁻¹ para Suprema (Fig. 2) que coincide con un mayor crecimiento vegetativo por su hábito indeterminado en condiciones de alta disponibilidad de NO₃⁻ debido posiblemente a la reducción y asimilación primaria del N en aminoácidos que determina el máximo crecimiento aéreo y coincide con el mayor índice de área foliar evaluado. Mäck y Schjoerring (2002) demostraron en subsp. *tuberosum* que la actividad en la reducción del nitrato vía nitrato reductasa (NR) y asimilación del NH₄⁺ vía glutamato sintasa (GS) se presenta mayormente en tallos y favorece un mayor

crecimiento vegetativo en detrimento del crecimiento y desarrollo de tubérculos.

Las menores concentraciones de N- NO₃⁻ en savia de tallo para los cultivares evaluados en etapas iniciales (Fig. 2) pueden sugerir acumulación de formas orgánicas de N necesarias para el crecimiento vegetativo de hojas y tallos, diferenciación de estolones a tubérculos o partición de N a sitios de crecimiento como nuevos brotes. La disminución de nitratos y conversión a formas proteicas a medida que incrementa el crecimiento del tubérculo en etapas finales ha sido explicado por Kolbe y Stephan-Beckmann (1997); Goffart *et al.* (2008) y Ruza *et al.* (2013).

Capiro presentó en etapa de máximo llenado y maduración diferencias significativas como respuesta a los niveles de fertilización con disminuciones drásticas en las concentraciones de N en savia hasta 800 mg L⁻¹ (sin fertilización) y hasta 1.200 mg L⁻¹ (1.900 kg ha⁻¹ de fertilizante), debido al efecto de la fertilización sobre el incremento en PS y PF de la planta, lo cual puede también generar un fenómeno de dilución o efectos por la partición de N hacia tubérculos. Este comportamiento fue similar al encontrado en savia de peciolo por Vitosh (1998) y por Badillo-Tovar (2001) en etapas de llenado para subsp. *tuberosum* y por Aguilera *et al.* (2014) en subsp. *andigena* con rangos entre 900 y 1.500 mg L⁻¹ y entre 800-900 mg L⁻¹, respectivamente.

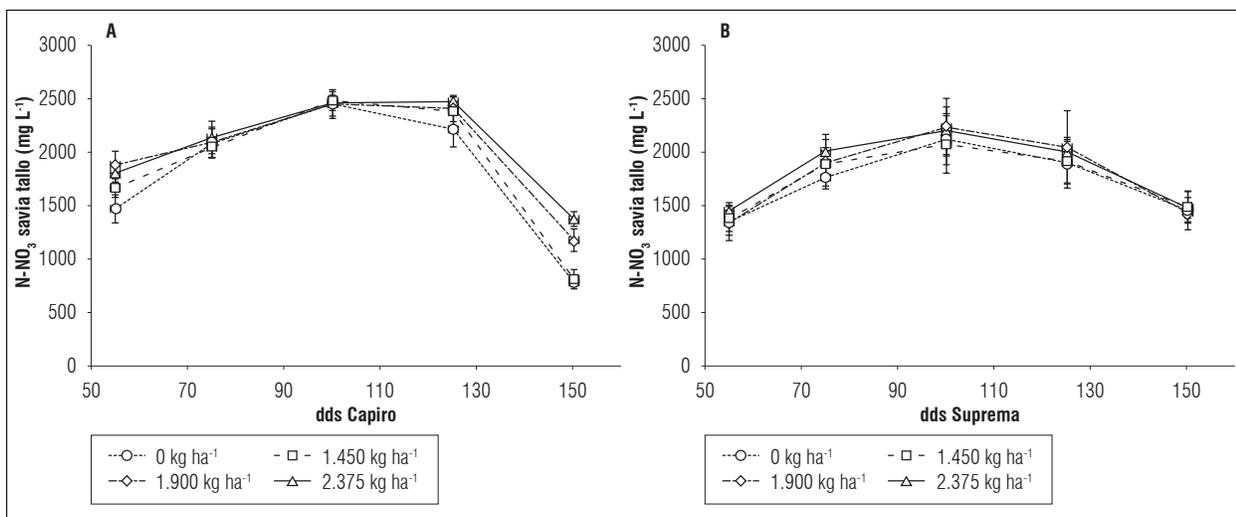


Figura 2. Variación de NO₃⁻ en savia fresca de tallo medida en campo en el ciclo de cultivo de Capiro (A) y Suprema (B) en respuesta a la fertilización en suelos de alta fertilidad de la Sabana de Bogotá. Promedios con letras distintas, para cada etapa fenológica, indican diferencia significativa según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

La mejor respuesta de Capiro a la fertilización puede mostrar una mejor eficiencia en la conversión y uso del N que en Suprema, porque Capiro a medida que aumentó la acumulación de asimilados disminuyó los niveles de N inorgánico en savia y fue la que presentó un mayor crecimiento de tubérculo, lo cual genera el efecto de dilución y mayor traslocación de K. Suprema no presentó cambios del N en savia cuando se incrementó el nivel de fertilización con mayor acumulación de nitrato en la parte aérea, probablemente por la menor demanda nutricional de N y excesos de N disponible en el suelo, lo que puede favorecer un consumo de lujo inhibiendo la movilidad del K al tubérculo por un excesivo crecimiento vegetativo en detrimento de un menor crecimiento y desarrollo de tubérculos.

Diferencias entre cultivares y fenología en la concentración de N en savia fueron reportados también por Waterer (1997) y Ziadi *et al.* (2012). Waterer (1997) reportó que la concentración de $N-NO_3^-$ en cuatro cultivares de papa fue menor hacia el final de ciclo en comparación con plantas jóvenes, sin embargo en la etapas fenológicas iniciales los cultivares se comportaron de manera diferente, siendo los cultivares Nordona Ranger y Norkotah los que presentaron un incremento a inicio de floración, en cambio el cv. Alpha tiende a disminuir la concentración de $N-NO_3^-$ desde etapas vegetativas.

Mantener bajas las concentraciones $N-NO_3^-$ hacia el final de ciclo es necesario debido a que un exceso de nitrógeno provoca una disminución de la materia seca en tubérculos por la baja potencia fuente vertedero que puede restringir la acumulación de carbohidratos en tubérculo y disminuir la calidad para uso industrial. Los problemas fisiológicos por acumulación de N en la planta han sido discutidos ampliamente por Mäck y Schjoerring (2002), Ziadi *et al.* (2012) y Ruza *et al.* (2013).

El efecto del fertilizante desde etapas tempranas y la sensibilidad en el cambio de N o K en savia mediante el método de "Cardy meter" encontrado en este estudio fue comparable a lo reportado por Rosen *et al.* (1996) y por Mohr y Tomasiewicz (2012) para el cv. Russet Burbank subsp. *tuberosum* y por Aguilera *et al.* (2014) en el cv. Waycha en subsp. *andigena*, además ha correlacionado método Cardy Meter con análisis de tejido en otras especies como en *Brassica rapa* (Gangaiah *et al.*, 2016) y en tomate por Carson *et al.* (2016). Lo anterior convierte a este método de campo en una herramienta importante para conocer

la eficiencia de la fertilización en el cultivo y realizar ajustes tempranos de estos nutrientes en etapa vegetativa.

$N-NO_3^-$ y K^+ savia y su relación con peso seco y rendimiento

Se presentó una correlación positiva entre el peso seco y fresco de los tubérculos (r^2 0,98 para Capiro y r^2 0,95 para Suprema) y la concentración de NO_3^- y K^+ en savia de tallos, por lo cual, para fines de pronóstico se analizó únicamente el rendimiento. Por otro lado, evaluaciones de K^+ y $N-NO_3^-$ en savia de tubérculos no presentó una relación significativa con respecto al Pft para ambos cultivares, lo cual muestra que para este estudio el órgano fuente no fue el mejor indicador de las condiciones nutricionales para realizar ajustes de la fertilización debido probablemente a que el tubérculo no es sensible a cambios en fertilización porque la parte aérea presenta mayor dinámica metabólica de K y N en procesos fotosíntesis, respiración y actividad enzimática, posiblemente esto explica la relación directa del N y K en savia de tallo con el rendimiento que presentó Capiro (Fig. 3A), coincidiendo con reportes hechos por Vitosh *et al.* (1998).

En Capiro el K^+ en savia de tallo para los diferentes tratamientos presentó un modelo cuadrático positivo (r^2 0,77) respecto al rendimiento y un nivel óptimo de K^+ de 3.280 mg L^{-1} con un rango de suficiencia de 3.000 a 3.300 mg L^{-1} en la etapa de llenado, el cual relaciona con los máximos rendimientos (Fig. 3A). Lo anterior sugiere que el K^+ en savia de tallo puede ayudar a diagnosticar en campo el estado nutricional de este elemento y proyectar la producción de manera oportuna mediante ajustes en el manejo de la fertilización potásica, cuando se encuentren en rangos de 2.600 a 3.000 mg L^{-1} (Fig. 3A). En contraste Suprema no presentó una variación significativa de K respecto al rendimiento por la alta disponibilidad de K en estos suelos de alta fertilidad (Fig. 3 B), de tal manera que se requieren otros estudios en ambientes con un mayor potencial productivo para este cultivar para determinar niveles óptimos de referencia.

La relación directa entre K^+ en savia y rendimiento se explica por ser el elemento de mayor extracción que funcionalmente favorece de manera directa el transporte y conversión de asimilados para el crecimiento del tubérculo, similar a lo reportado por Gómez y Torres (2012) y Lefèvre *et al.* (2012) para subsp. *andigena* en la Sabana de Bogotá y Huancayo (Perú) respectivamente. Estos rangos de suficiencia de K^+ en savia

de tallo encontrados en Capiro fueron inferiores a los citados por Hochmuth (1994) y Kelling *et al.* (2002) con reportes entre 3.500 a 4.500 mg L⁻¹ de K en savia para el final de floración y llenado para cultivares de la subsp. *tuberosum*.

Por otro lado, los contenidos de N-NO₃⁻ en savia de tallo disminuyeron a medida que se incrementaron los Pft en ambos cultivares a partir de un modelo cuadrático negativo ($P < 0,001$). Los mayores rendimientos se relacionan con un rango entre 800 a 1.231 mg L⁻¹ de N-NO₃⁻ en etapa de llenado, valores superiores a este rango, disminuyen de manera importante el

crecimiento del tubérculo sugiriendo una toxicidad por exceso de nitrato en detrimento del rendimiento (Fig. 3B), coincidiendo con lo reportado por Brink *et al.* (2002) para subsp. *tuberosum*. Por esto, es necesario mejorar la conversión de formas inorgánicas a orgánicas que promueven la asimilación de N a proteínas en estos cultivares de tipo *andigena* mediante el ajuste de la dosis balanceadas de nutrientes y así evitar consumos de lujo o toxicidades. Los efectos negativos por consumos de lujo en papa, exceso de nitratos y su manejo son discutidos por Ziadi *et al.* (2012) y Ruza *et al.* (2013).

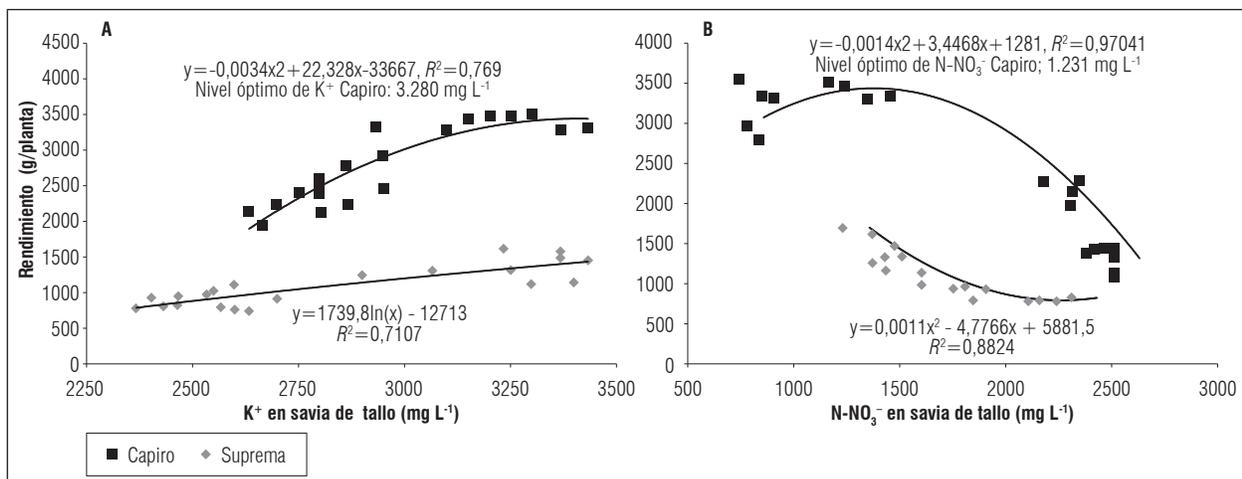


Figura 3. Relación entre las concentraciones K⁺ (A) y N-NO₃⁻ (B) en savia de tallo medida en campo y el rendimiento, Pft medido desde etapa de floración a maduración para Capiro (cuadro) y Suprema (rombo) en suelos de alta fertilidad de la Sabana de Bogotá.

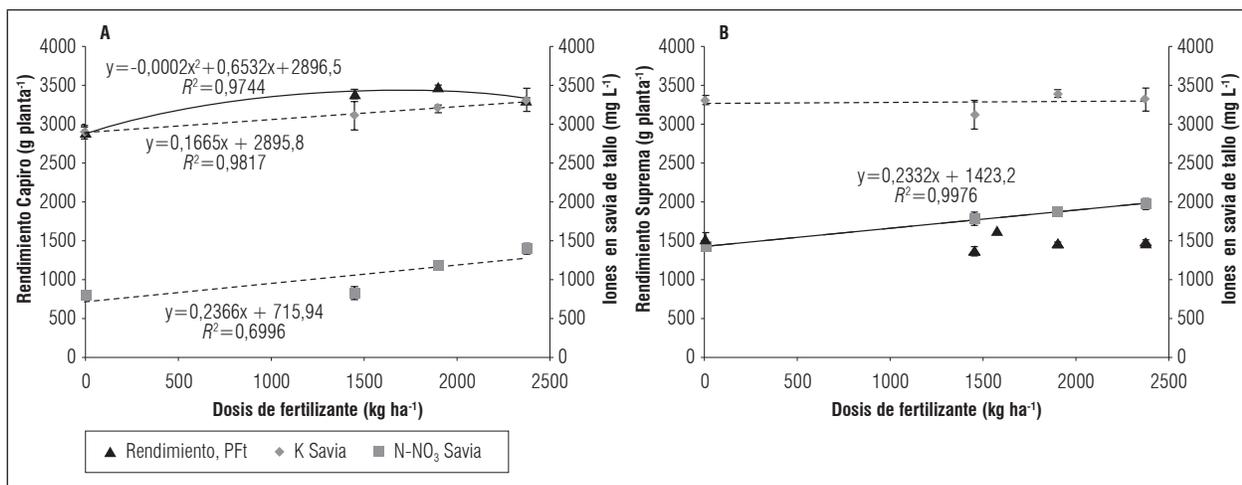


Figura 4. Respuesta en rendimiento en Capiro (A) y Suprema (B) a la fertilización y su relación con concentración de K⁺ y N-NO₃⁻ en savia de tallo en suelos de alta fertilidad de la Sabana de Bogotá.

Existe una respuesta diferencial entre los cultivares a la fertilización, donde el mayor potencial de rendimiento lo expresó Capiro en dosis que oscilaron entre 1.425 y 1.900 kg ha⁻¹ de fertilizante con un incremento en rendimiento del 17 y 20%, respectivamente (Fig. 4A), posiblemente por su mejor eficiencia en suelos de alta disponibilidad de N y K que favorece una mejor potencia fuente-vertedero; además, de posibles mecanismos para mejor asimilación de N aún no estudiados en estos cultivares.

Para Capiro la variación en las dosis de fertilización se relacionó directamente con el cambio en la concentración de N-NO₃⁻ (r^2 0,69) y K⁺ (r^2 0,98) con niveles de 3.200 mg L⁻¹ para K⁺ y de 1.188 mg L⁻¹ para N-NO₃⁻ (Fig. 4A), donde el incremento de fertilización es proporcional al aumento en la concentración de K⁺ etapa de llenado e igual manera el incremento de N-NO₃⁻ en savia por efecto de fertilización nitrogenada y potásica. Lo anterior coincide con resultados presentados por Kelling *et al.* (2002) y Rogozińska *et al.* (2005) para subsp. *tuberosum*.

En contraste Suprema presenta una respuesta nula en rendimiento a la fertilización en suelos de alta fertilidad, pero fue sensible al incremento de nitratos de N-NO₃⁻ hasta 1.400 mg L⁻¹ por aumento de las dosis de fertilizante (r^2 0, 99) (Fig. 4B) que evidencia el consumo de lujo y la acumulación en detrimento de la producción afectando el metabolismo traslocación y almacenamiento de carbohidratos en el tubérculo en detrimento del potencial de rendimiento. Dosis altas de N a la fertilización aplicada de 123 hasta 205 kg ha⁻¹, posiblemente favorece la brotación de tallos secundarios, condición que puede inhibir la tuberización y disminuir el crecimiento y desarrollo de tubérculos, efectos similares coinciden con los reportados por Pérez (2015).

Se comprobó en este estudio que los contenidos de nitratos y potasio en savia son afectados por diversos factores como la fertilización y el tipo de cultivar en suelos de alta fertilidad, estas variaciones también han sido discutidas ampliamente para esta especie por Cadahía (2008) y Rogozińska *et al.* (2005).

CONCLUSIONES

Se determinó que el análisis de savia en tallos en los cultivares evaluados es una herramienta de diagnóstico temprano del estatus nutricional y puede usarse como pronóstico para el manejo de la producción con

ajustes en la fertilización principalmente para Capiro en suelos de alta fertilidad con niveles de referencia óptimos entre 4.500 a 4.700 mg kg⁻¹ para K y entre 1.500-1.700 mg kg⁻¹ para N evaluado desde etapas vegetativas a los 55 dds, donde niveles superiores a 5.000 mg kg⁻¹ de N y mayores a 1.900 mg kg⁻¹ de K pueden representar consumos de lujo en ambos cultivares. Para el cv. Capiro, después de máxima floración, los niveles óptimos en savia que relacionan con los mayores rendimientos fueron 3.280 mg kg⁻¹ para K⁺ y 1.281 mg kg⁻¹ para NO₃⁻. Esta técnica en campo puede ser utilizada para identificar aplicaciones excesivas de fertilizantes nitrogenados por ello de acuerdo a los niveles encontrados se debe mantener una relación K⁺/NO₃⁻ de 2:1 en etapas iniciales y de 3:1 en etapas de producción para favorecer altos rendimientos con una dosis óptima de fertilizante balanceado de 1.633 kg para Capiro, mientras Suprema presentó respuesta nula a la fertilización en suelos con excesos de N, por ello es importante el diagnóstico y manejo diferencial de la fertilización por cultivar de acuerdo al hábito de crecimiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a Ingeplant SAS por la financiación al soporte técnico de los Ing. Agrón. Elías Silva y Andrea Barragán. Además agradecemos al agricultor Carlos Rojas por su apoyo en el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, J., P. Motavalli, M. Gonzales y C. Valdivia. 2014. Evaluation of a rapid field-test method for assessing nitrogen status in potato plant tissue in rural communities in the Bolivian Andean highlands. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 45, 347-361. Doi: 10.1080/00103624.2013.857680
- Badillo-Tovar T., V., J.Z. Castellanos, P. Sánchez, A. Galvis, E. Álvarez, J.X. Uvalle, D. González y S.A. Enríquez. 2001. Niveles de referencia de nitrógeno en tejido vegetal de papa var. Alpha. *Agrocienc. nov-dic.*, 615-623.
- Brink, P., P. Combrink y F. Knight. 2002. Evaluation of petiole nitrate measurement as an aid for N fertilization of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) on sandy soils. *S. Afr. J. Plant Soil* 19, 1-7. Doi: 10.1080/02571862.2002.10634428
- Carson, L., M. Ozores-Hampton y K. Morgan. 2016. Correlation of petiole sap nitrate-nitrogen concentration measured by ion selective electrode, leaf tissue nitrogen concentration, and tomato yield

- in Florida. *J. Plant Nutr.* 39(12), 1809-1819. Doi: 10.1080/01904167.2016.1187743
- Cadahía, C. 2008. La savia como índice de fertilización. Cultivos agroenergéticos, hortícolas, ornamentales y frutales. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- De Jong, H. 2016. Impact of the potato on society. *Amer. J. Potato Res.* 93(5), 415-429. Doi: 10.1007/s12230-016-9529-1
- Errebhi, M., C. Rosen y D.E Birong. 1998. Calibration of a petiole sap nitrate test for irrigated 'Russet Burbank' potato. *Comm Soil Sci. Plant Anal.* 29 (1-2), 23-35. Doi: 10.1080/00103629809369926
- Gangaiah, C., A. Ahmad, H. Nguyen y T. Radovich. 2016. A correlation of rapid Cardy meter sap test and ICP spectrometry of dry tissue for measuring potassium (K⁺) concentrations in Pak Choi (*Brassica rapa* Chinesis Group). *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 47 (17), 2046-2052. Doi: 10.1080/00103624.2016.1208752
- Goffart, J.P., M. Olivier y M. Frankinet. 2008. Potato crop nitrogen status assessment to improve N fertilization management and efficiency: Past-present-future. *Potato Res.* 51(3-4), 355-383. Doi: 10.1007/s11540-008-9118-x
- Gómez, M.I. y P. Torres. 2012. Absorción, extracción y manejo nutricional del cultivo de papa. *Rev. Papa (Fedepapa)* 26(1), 20-25.
- Hochmuth, G.J. 1994. Plant petiole sap-testing for vegetable crops. University of Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agriculture Sciences, EDIS, Gainesville, FL, USA.
- IDEAM. 2015. Reportes meteorológicos y climáticos estación Villa Inés 2012-2015. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá, Colombia.
- Kelling, K.A., E. Panique, P.E. Speth y W. Stevenson. 2002. Effect of potassium rate, source and application timing on potato yield and quality. *Proc. Idaho Potato Conference*
- Kolbe, H. y S. Stephan-Beckmann. 1997. Development, growth and chemical composition of the potato crop (*Solanum tuberosum* L.). I. Leaf and stem. *Potato Res.* 40, 111-129. Doi: 10.1007/BF02407567
- Kumar, C.V., S.S. Prakash, G.M. Prashantha, M.B. Mahendra Kumar, S. Lohith y T. Chikkaramappa. 2013. Dry matter production and yield of potato as influenced by different sources and time of fertilizer application and soil chemical properties under rained conditions. *Res. J. Agric. Sci.* 4(2), 155-159.
- Lefèvre, I., J. Ziebel, C. Guignard, J.F. Hausman, R.O. Gutiérrez Rosales, M. Bonierbale, L. Hoffmann, R. Schafleitner y D. Evers. 2012. Drought impacts mineral contents in Andean potato cultivars. *J. Agron. Crop Sci.* 198(3), 196-206. Doi: 10.1111/j.1439-037X.2011.00499.x
- Mäck, G., J. Schjoerring, 2002. Effect of NO₃- supply on metabolism of potato plants (*Solanum tuberosum* L.) with special focus on the tubers. *Plant Cell Environ.* 25, 999-1009. Doi: 10.1046/j.1365-3040.2002.00892.x
- Mohr, R.M. y D.J. Tomaszewicz. 2012. Effect of rate and timing of potassium chloride application on the yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L. 'Russet Burbank'). *Can. J. Plant Sci.* 92(4), 783-794. Doi: 10.4141/cjps2011-195
- Moreira, M.A., P.C. Rezende, P.R. Cecon y R.F. Araújo. 2011. Seleção de índices para o diagnóstico do estado de nitrogênio de batata-semente básica. Maringá. *Acta Scient. Agron.* 33(2), 335-340. Doi: 10.4025/actasciagron.v33i2.5724
- Moulin, A.P., Y. Cohen, V. Alchanatis, N. Tremblay y K. Volkmar. 2012. Yield response of potatoes to variable nitrogen management by landform element and in relation to petiole nitrogen - A case study. *Can. J. Plant Sci.* 92(1), 771-781. Doi: 10.4141/cjps2011-005
- Pérez, J. 2015. Efecto de diferentes dosis de N y K sobre el rendimiento y fritura en papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad pastusa suprema. Trabajo de grado. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Rogozińska, I., E. Pawelzik, J. Poberezný y E. Delgado. 2005. The effect of different factors on the content of nitrate in some potato varieties. *Potato Res.* 48, 167-180. Doi: 10.1007/BF02742374
- Rosen, C.J., M. Errebhi y W. Wang. 1996. Testing petiole sap for nitrate and potassium: A comparison of several analytical procedures. *HortScience* 31(7), 1173-1176.
- Ruza, A., I. Skrabule y A. Vaihode. 2013. Influence of nitrogen on potato productivity and nutrient use efficiency. *Proc. Latvian Acad. Sci. Sect. B. Natural Exact Appl. Sci.* 67(3), 247-253.
- Soil Survey Staff. 2010. Keys to soil taxonomy. 9th ed. USA: United States Department of Agriculture (USDA), Soil Conservation Service. Washington, USA.
- Valbuena, R., G. Roveda, A. Bolaños, J. Zapata. C. Medina, P. Almanza y D. Porras. 2010. Escalas fenológicas de las variedades de papa Parda Pastusa, Diacol Capiro y Criolla "Yema de Huevo" en las zonas productoras de Cundinamarca, Boyacá, Nariño y Antioquia. *Corpoica, Produmedios*, Bogotá, Colombia.
- Vitosh M.L., J.T. Ritchie, B. Basso y S. Stornaiuolo. 1998. Nitrate-N and nitrogen partitioning in potatoes under different fertilizer management. Department of Crop and Soil Sciences, Michigan State University, East Lansing, MI, USA. Doi: 10.1080/00103629609369622
- Vitosh, M.L. y G.H. Silva. 1996. Factors affecting potato petiole sap nitrate tests. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 27(5-8), 1137-1152.
- Waterer, D. 1997. Petiole sap NO₃-N testing as a method for monitoring nitrogen nutrition of potato crops. *Can. J. Plant Sci.* 77(2), 273-278. Doi: 10.4141/P96-091
- Ziadi, N., B. J. Zebarth, G. Bélanger y A.N. Cambouris, 2012. Soil and plant tests to optimize fertilizer nitrogen management of potatoes. pp. 187-207. En: He, Z., R.P. Larkin y C.W. Honeycutt (eds). Sustainable potato production: Global case studies. Springer, The Netherlands. Doi: 10.1007/978-94-007-4104-1_11