

ABSORCIÓN DE FORMAS DE NITRÓGENO AMONIACAL Y NÍTRICA POR PLANTAS DE PAPA EN LA PRODUCCIÓN DE TUBÉRCULO-SEMILLA

N-NH₄⁺ AND N-NO₃⁻ UPTAKE BY POTATO IN THE TUBER SEED PRODUCTION

ABSORÇÃO DE FORMAS DE NITROGÊNIO AMONIACAL E NITRICA PELA BATATEIRA NA PRODUÇÃO DE TUBÉRCULO-SEMENTE

Héctor M. Coraspe-León*, Takashi Muraoka**, Vinicius Ide Franzini***, Freddy S. Contreras Espinal**** y Paulo C. Ocheuze Trivelin**

* Investigador. INIA. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Estación Experimental Trujillo, estado Trujillo, Venezuela.
Email: hcoraspe@inia.gob.ve

** Profesores. Centro de Energía Nuclear en la Agricultura (CENA)/ Universidad de Sao Paulo (USP), Brasil.

*** Estudiante de Doctorado. Escuela Superior de Agricultura "Luiz de Queiróz" (ESALQ)/ Universidad de Sao Paulo (USP), Brasil.

**** Investigador. Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF).

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar la forma de N (N-NH₄⁺ o N-NO₃⁻) más absorbida por las plantas de papa en la producción de tubérculos-semilla, usando el isótopo ¹⁵N. El experimento fue realizado en condiciones de invernadero durante los meses de agosto a noviembre de 2006 en las instalaciones del Centro de Energía Nuclear en la Agricultura (CENA), Universidad de São Paulo (USP), Brasil. Fue conducido en potes plásticos de 2,3 l de capacidad usando como sustrato arcilla expandida. El diseño experimental empleado fue el de bloques completos al azar con 5 tratamientos, referentes a las épocas de aplicación del NH₄NO₃ marcado: 14, 28, 42, 56 e 70 DDT, y 3 repeticiones. Fue usada la solución nutritiva IAC, modificada en cuanto al suministro de N, K y Ca, sustituyéndose el nitrato de calcio y nitrato de potasio por el nitrato de amonio enriquecido con ¹⁵N. Para determinar la eficiencia de utilización del N del nitrato de amonio de las plantas de papa marcadas con ¹⁵N, se consideró el principio de la dilución isotópica, considerándose el enriquecimiento en % de átomos de ¹⁵N, la cantidad de ¹⁵N en la planta y descontándose la variación natural del isótopo estable ¹⁵N. La forma preferencial de absorción del nitrógeno en la fase inicial de desarrollo fue la amoniacal, tornándose a nítrica después de 56 días (formación de tubérculos). El aprovechamiento de N por las plantas, sin embargo, fue siempre mayor con la forma amoniacal aplicada en todos los estadios, con excepción de los 28 días y al final de ciclo.

Palabras Clave: *Solanum tuberosum*; absorción de nitrógeno; nutrición mineral; solución nutritiva; ¹⁵N; arcilla expandida; semilla de papa.

SUMMARY

The nitrogen is the structural constituent of proteins, several metabolites involved in the synthesis and transference of energy and also of nucleic acids. It is absorbed by plants in the nitrate (NO₃⁻) or ammonium (NH₄⁺) form. The nitrate uptake varies with cultivar and light intensity. The objective of this research was to determine the preferential form of N (N-NH₄⁺ or N-NO₃⁻) absorbed by the potato plants in seed tuber productions, using ¹⁵N isotope. The experiment was carried out in the greenhouse of Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) / USP, Brazil, using 2.3 l plastic pots, with expanded clays as substrate. The experimental design used was a completely randomized with five treatments, corresponding to the labeled NH₄ or NO₃ (¹⁵NH₄ or ¹⁵NO₃) application time: 14, 28, 42, 56 and 70 days after transplanting (DAT), and three replicates. An IAC nutrient solution was used, modified to supply N, K and Ca, substituting calcium nitrate and potassium nitrate by ammonium nitrate labeled with ¹⁵N. The preferential form of nitrogen absorption at the initial developing stage was the ammonium, changing to nitrate after 56 DAT (tuber formation). The N utilization by the plants, however, was always higher with ammonium form applied in all stages, with the exception at 28 DAT and at the end of cycle.

Key Words: *Solanum tuberosum* L.; nitrogen absorption; mineral nutrition; nutrient solution; ¹⁵N; expanded clay; seed tuber.

RECIBIDO: marzo 24, 2008

ACEPTADO: octubre 13, 2008

RESUMO

O N é constituinte estrutural de proteínas, de muitos metabólitos envolvidos na síntese e transferência de energia e mesmo de ácidos nucleicos. O nitrogênio pode ser absorvido pelas plantas na forma de nitrato (NO_3^-) ou amônio (NH_4^+). A absorção de nitrato varia conforme a cultivar e intensidade luminosa como pode ser constatado em diversas culturas. O objetivo deste trabalho foi determinar a forma de N (N-NH_4^+ ou N-NO_3^-) mais absorvida pelas plantas de batata na produção de tubérculos-semente, usando o isótopo ^{15}N . O experimento foi realizado em condições de casa-de-vegetação durante os meses de agosto a novembro de 2006 nas instalações do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Universidade de São Paulo (USP), Brasil. Foi desenvolvido em vasos plásticos de 2,3 l de capacidade usando como substrato argila expandida. O delineamento experimental empregado foi o de blocos completos ao acaso com cinco tratamentos, referentes às épocas de aplicação do NH_4NO_3 marcado: 14, 28, 42, 56 e 70 DAT, e três repetições. Foi usada a solução nutritiva IAC, modificada quanto ao fornecimento de N, K e Ca, substituindo-se o nitrato de cálcio e nitrato de potássio pelo nitrato de amônio enriquecido com ^{15}N . Para determinar a eficiência de utilização do N do nitrato de amônio das plantas de papa marcadas com ^{15}N , baseouse no princípio da diluição isotópica, considerando-se o enriquecimento em % de átomos de ^{15}N , a quantidade de ^{15}N na planta e descontando-se a variação natural do isótopo estável ^{15}N . A forma preferencial de absorção do nitrogênio no estágio inicial de desenvolvimento foi a amoniacal, tornando-se a nítrica após 56 dias (formação de tubérculos). O aproveitamento de N pelas plantas, porém, foi sempre maior com a forma amoniacal aplicada em todos os estádios, com exceção aos 28 dias e no final do ciclo.

Palavras Chave: *Solanum tuberosum*; absorção de nitrogênio; nutrição mineral; solução nutritiva; ^{15}N ; argila expandida; batata semente.

INTRODUCCIÓN

El Nitrógeno (N) es constituyente estructural de proteínas, de muchos metabolitos relacionados con la síntesis y transferencia de energía y también de ácidos nucleicos. El N puede ser absorbido por las plantas en la forma de nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+). La absorción de nitrato y amonio varía conforme la especie, variedad, temperatura, pH e intensidad luminosa como puede ser constatado en diversos cultivos.

El N, es el elemento del suelo más absorbido por las plantas en condiciones normales de cultivo. Por esta razón, es también, el nutrimento que se encuentra más deficiente para la mayoría de los cultivos en todas las

partes del mundo (Black, 1986). La mayor parte del nitrógeno en el suelo se encuentra combinado orgánicamente (Bremner, 1965). Durante el proceso de mineralización de estos compuestos nitrogenados orgánicos ocurre la fase intermedia de formación de aminoácidos y otras formas orgánicas y, a pesar que pueden ser utilizadas por las plantas (Virtanen y Linkola, 1946; Ghosh y Burris, 1949), prácticamente todo el N absorbido del suelo proviene de dos formas de iones inorgánicos, NH_4^+ y NO_3^- (Crocomo *et al.*, 1965; Scarsbook, 1965). Normalmente la planta, en el inicio utiliza el N de la reserva de la semilla, después amonio o nitrato, y finalmente aminoácidos (Ghosh y Burris, 1949).

Las especies y cultivares tienen exigencias diferentes del nutrimento, en relación a la cantidad y a la forma absorbida. El tomate, por ejemplo, es más exigente en calcio, fósforo y potasio que la lechuga, mientras que en papa no existe una definición sobre la mejor composición de la solución nutritiva.

El N puede ser absorbido por las plantas en la forma de nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+). La absorción de NO_3^- varía conforme la variedad e intensidad luminosa como pudo ser constatado en cultivos de lechuga y en otras hortalizas (Rodrigues, 2002).

El N en la forma amoniacal (NH_4^+) no debe sobrepasar 20% de la cantidad total de N en la formulación (Furlani *et al.*, 1999), pero la forma preferencial en la absorción de N, sea nítrica o amoniacal, difiere también con las especies vegetales, conforme observado por Tadano y Tanaka (1976).

El NO_3^- , es particularmente sujeto a lixiviación (Gassert, 1959, 1961; Malavolta, 1967, 1980). Mientras que el NH_4^+ es cargado positivamente, lo que hace que aplicado en el suelo, se adsorba más lentamente debido al intercambio iónico, reduciendo la pérdida por drenaje (Harmsen y Kolenbrander, 1965; Scarsbook, 1965). El NH_4^+ puede ser fijado por las arcillas con predominancia de vermiculita y montmorillonita (Nommik, 1965).

Cerca de 70% de los cationes y aniones absorbidos por las plantas son representados por NH_4^+ y NO_3^- (Jungk, 1970, citado por Osaki *et al.*, 1995b), esto hace que las formas de N absorbidas por las raíces sean muy importantes en términos del balance iónico y desarrollo de la planta. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue determinar la forma de N (N-NH_4^+ o N-NO_3^-) más absorbida por las plantas de papa en la producción de tubérculos-semilla, usando el isótopo ^{15}N .

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento: el experimento fue realizado en condiciones de invernadero durante los meses de agosto a noviembre de 2006 en las instalaciones del Centro de Energía Nuclear en la Agricultura (CENA), Universidad de São Paulo (USP), Brasil.

Unidad experimental: fue desarrollado en potes plásticos de 2,3 l de capacidad, conteniendo cada uno 1,8 kg de arcilla expandida Cinexpan, tipo 0500 con densidad aparente de 830 - 890 kg m⁻³, producida por CINEXPAN Industria y Comercio Ltda. (CINEXPAN, 2006).

Características del sustrato y material de siembra: las propiedades químicas del sustrato (Cuadro 1) fueron determinadas de acuerdo con los métodos analíticos descritos por Raij *et al.* (2001). Fue utilizado material *in vitro*, de la categoría pre-básica de la variedad 'Atlantic', que se caracteriza por altos rendimientos, buena apariencia, gran adaptabilidad y destinada a uso industrial (ELMA CHIPS, 2000).

Características de la solución nutritiva: fue usada la solución nutritiva IAC (Cuadro 2), la cual presenta composición química mostrada en el Cuadro 3, modificándola en el suministro de N, K y Ca, sustituyéndose el nitrato de calcio y nitrato de potasio por el nitrato de amonio enriquecido con ¹⁵N. Se realizó el balance del K y Ca usando KCl y CaCl₂. Fueron transplantadas

inicialmente 4 plántulas por pote y manteniéndose dos después de dos semanas. Durante la primera semana se utilizó una solución nutritiva diluida en 1/5 de la concentración completa (Cuadro 3). En este período, las irrigaciones fueron efectuadas diariamente, completando el pote con la solución nutritiva existente en el recipiente colector.

Grupo de experimentos: el experimento fue dividido en dos grupos de potes definidos como "Absorción de N aplicado en diferentes estadios" y "Aprovechamiento por las plantas de N aplicado en diferentes estadios", cada un formado por 30 potes. Cada grupo fue subdividido en subgrupos de 15 potes referente a las 5 aplicaciones con 3 repeticiones, donde fue aplicado en 15 potes el ¹⁵NH₄NO₃, es decir, marcado en el NH₄⁺ y, en los 15 restantes el NH₄¹⁵NO₃, marcado en el NO₃⁻.

Grupo 1: "Absorción de N aplicado en diferentes estadios": en este grupo se realizó la cosecha de las plantas una semana después de las aplicaciones de la solución con el N marcado. Durante esa semana, la aplicación de los tratamientos fue realizada mediante la irrigación de los potes con el recipiente colector que contenía la solución nutritiva con la fuente de N marcado correspondiente al período de aplicación. En este grupo 1, "Absorción de N aplicado en diferentes estadios", el nitrato de amonio presentaba la molécula de NO₃⁻ marcada con 1,359% de ¹⁵N y en el NH₄ con 1,189% de enriquecimiento.

CUADRO 1. Características químicas del sustrato utilizado en los experimentos

pH*	MO	P	S	K	Ca	Mg	H + Al	SB	CTC	V
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg	dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----						-----%-----
7,0	8,0	18	24	3,4	8,0	2,0	8,0	13,4	21,4	63,0
B	Cu	Fe	Mn	Zn						
-----mg dm ⁻³ -----										
-(1)	0,4	5,0	0,5	0,4						

(1) Valor menor que 0,1

* Relación sustrato: CaCl₂ (1:2,5)

CUADRO 2. Fertilizantes usados para la preparación de la solución nutritiva del IAC, para 10³ l

Fertilizante	Cantidad (g)
Sulfato de magnesio	240
Nitrato de calcio	1 180
Nitrato de potasio	505
Fosfato monobásico de potasio	212
Tenso cocktail® (1)	15

(1) Composición química: B 0,52%; Ca-EDTA 2,57%; Cu-EDTA 0,53%; Fe-EDTA 2,1%; Fe-DTPA 1,74%; Mn-EDTA 2,57%; Mo 0,13%; Zn-EDTA 0,53%.

CUADRO 3. Composición química de la solución nutritiva IAC.

Macronutrientes mmol l ⁻¹	Micronutrientes µmol l ⁻¹
N = 14,79	B = 7,21
P = 1,57	Cu = 12,51
K = 6,23	Fe = 10,31
Ca = 4,99	Mn = 7,01
Mg = 0,99	Mo = 0,20
S = 0,97	Zn = 1,22

Grupo 2: "Aprovechamiento por las plantas de N aplicado en diferentes estadios": en este segundo grupo de potes (con la misma cantidad del grupo anterior) las plantas fueron mantenidas a lo largo del ciclo de desarrollo, efectuándose la cosecha a los 77 días después del trasplante (DDT). Después de transcurrida una semana de la aplicación de la solución marcada (tratamientos), los potes fueron irrigados con agua desionizada por 3 veces consecutivas para retirar cualquier cantidad de solución nutritiva con N marcado. Posteriormente, hasta el final del ciclo los potes continuaron con el suministro de nutrientes mediante solución nutritiva sin N marcado (solución nutritiva convencional descrita en los Cuadros 2 y 3). En este grupo 2 ("Aprovechamiento por las plantas de N aplicado en diferentes estadios"), el exceso de ¹⁵N fue 5,37% y 5,44% para el NO₃⁻ y el NH₄⁺, respectivamente.

La discusión del experimento es presentada para cada grupo, (denominados "Aprovechamiento por las plantas del N aplicado en diferentes estadios" y "Absorción de N aplicado en diferentes estadios"), con la finalidad de evidenciar que son diferentes y se complementan. En el primer grupo los datos se refieren al N (forma amoniacal o nítrica) aplicado a determinados estadios de desarrollo de la planta que permaneció hasta la cosecha. Ya en el segundo grupo, es determinada la forma de N que las plantas absorben en los diferentes estadios en el período de una semana.

Riego: después del período inicial (riego con solución nutritiva diluida a 1/5), las irrigaciones fueron realizadas 2 veces por semana, completándose el recipiente colector de la solución nutritiva con agua desionizada, y esta solución aplicada en el pote hasta el sustrato quedar inmerso por un período de 10 min, en seguida se procedía al drenaje del vaso. Durante la realización del experimento, la solución nutritiva fue renovada cada 21 días.

Cosecha: en la época de la cosecha, en ambos grupos, las plantas fueron separadas en parte aérea (PA), raíces y tubérculos. El material fue identificado, acondicionado en bolsas de papel, secado en estufa a 60 °C por 72 horas, pesado en balanza de precisión para determinación de la materia seca (MS) y luego molidas en molino tipo Willey.

Determinaciones de la eficiencia del nitrógeno: el efectuó la determinación de N total por el método de micro Kjeldahl (Malavolta *et al.*, 1997) y el enriquecimiento isotópico de átomos de ¹⁵N fue determinado en espectrómetro de masa (IRMS), en el Laboratorio de Isótopos Estables del CENA/USP, conforme metodología descrita en Barrie y Prosser (1996). La determinación de la eficiencia de utilización del N del nitrato de amonio de las plantas de papa marcadas con ¹⁵N, fue basada en el principio de la dilución isotópica, considerándose el enriquecimiento en % de átomos de ¹⁵N, la cantidad de ¹⁵N en la planta y descontándose la variación natural del isótopo estable ¹⁵N. A partir de las determinaciones, los cálculos fueron realizados a partir de las siguientes fórmulas, considerándose dos plantas por pote:

$$\%NPPF = [(\text{átm. } ^{15}\text{N en exc plant.} - \% \text{ Abund. Nat.}) / \text{átm. } ^{15}\text{N en exc.fert}] \times 100$$

$$Q_{NPPF} = (\% N_{PPF} / 100) \times Q_{ntp}$$

$$R(\%) = (Q_{NPPF} / Q_c) \times 100$$

donde:

$\%N_{PPF}$ = porcentaje de N en la planta proveniente del fertilizante

átm. $\% \text{ }^{15}\text{N}$ en exc plant = átomo $\%$ de ^{15}N en exceso en la planta

$\%$ Abund. Nat. = átomo $\%$ de ^{15}N de abundancia natural (0,366%)

átm. $\% \text{ }^{15}\text{N}$ en exc fert = átomo $\%$ de ^{15}N en exceso en el fertilizante

Q_{NPPF} = cantidad de N en la planta proveniente del fertilizante

Q_{ntp} = cantidad de N total en la planta

$R(\%)$ = porcentaje de N recuperado o aprovechado por la planta, en la forma nítrica o amoniacal, proveniente del fertilizante.

Q_{NA} = cantidad de N aplicado en la solución nutritiva

Diseño experimental: el diseño experimental empleado fue el de bloques completos al azar, con 3 repeticiones y 5 tratamientos, referentes a las épocas de aplicación del NH_4NO_3 marcado: 14, 28, 42, 56 y 70 DDT. En ambos grupos de experimentos la unidad experimental estuvo formada por un pote. Los resultados fueron sometidos a análisis estadísticos, utilizándose el programa estadístico SAS - System for Windows 6.11 (SAS Inst., 1996). Se efectuó el análisis de la varianza y, de acuerdo con el nivel de significancia de la prueba F, se procedió a las comparaciones de medías por Tukey ($P \leq 0,05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aprovechamiento por las plantas del N aplicado en diferentes estadios

Los datos de producción de materia seca (MS) en la planta entera y partes evaluadas son presentados en el Cuadro 4, y como se esperaba no se observaron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) en las aplicaciones de $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ o $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ ya que la fertilización nitrogenada en cuanto a la fuente y dosis aplicadas fueron iguales en todos los potes.

El aprovechamiento total del N (%) en la planta de papa en función de la época de aplicación y de la forma de N usada es mostrado en la Figura 1. Efectos significativos ($P \leq 0,05$) fueron observados entre los tratamientos evaluados. Fue detectado que en la fase inicial del ciclo de crecimiento de la planta y en la fase de máximo desarrollo vegetativo ocurrió mayor aprovechamiento del N-amoniacal, alcanzando al inicio valor superior a 16% y posteriormente 30,1% a los 56 DDT, concordando con lo relatado por Warmcke y Barber (1973), quienes relataron en la fase inicial de crecimiento del maíz, mayor absorción del N-amoniacal.

Por su parte, Anderson *et al.* (1991) verificaron que el maíz presentó mayor producción de MS cuando fue suministrado N exclusivamente en la forma amoniacal.

CUADRO 4. Materia seca producida de la planta entera, parte aérea, raíces y tubérculos de las plantas de papa cultivada en solución nutritiva en función de la época de aplicación del $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ ó $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$.

Días	Materia seca							
	Planta entera		Parte aérea		Raíces		Tubérculos	
	$^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$	$\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$	$^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$	$\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$	$^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$	$\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$	$^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$	$\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$
	g planta⁻¹							
14*	12,85	13,22	5,98	5,90	0,37	0,29	6,50	7,03
28	13,73	13,14	5,45	5,36	0,33	0,33	7,95	7,45
42	12,34	14,09	5,74	6,07	0,31	0,26	6,29	7,76
56	13,75	12,90	5,71	5,64	0,37	0,30	7,66	6,96
70	12,78	13,28	5,06	5,81	0,34	0,33	7,38	7,14

Nota: * Día de la aplicación del $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ ó $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$

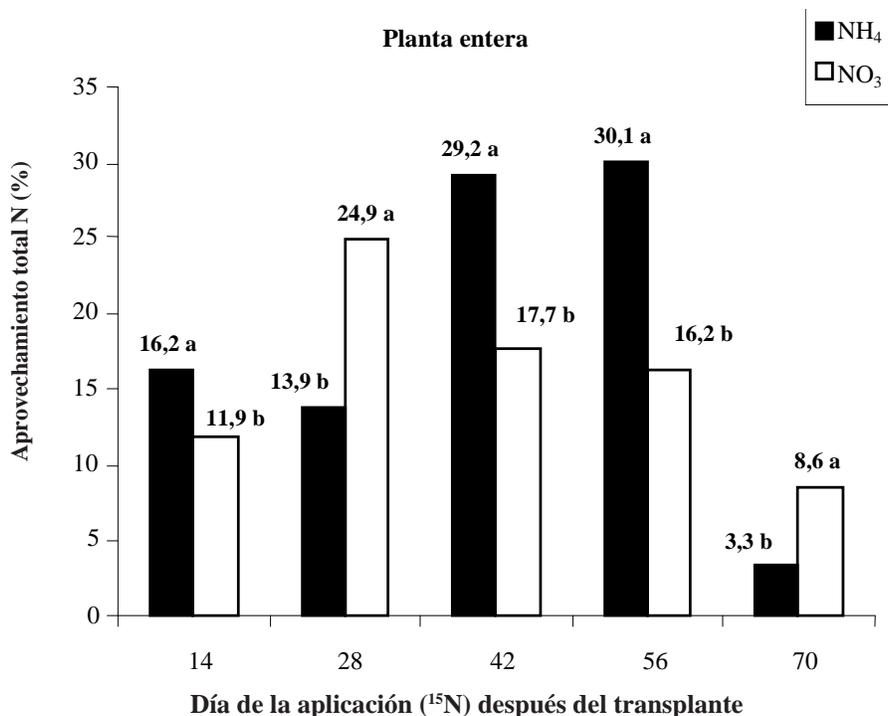


FIGURA 1. Aprovechamiento del N (%) en función de los períodos de aplicación del $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ ó $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$, en la planta entera de papa cosechada al final del ciclo. Valores seguidos por letras distintas en el mismo período, difieren significativamente entre sí por la prueba de Tukey (5%).

Heinrichs *et al.* (2006), al estudiar la forma preferencial de absorción de N, no verificaron diferencias significativas en la absorción de la forma nítrica y amoniacal por plantas de frijol, en arroz observaron mayor aprovechamiento del N-NH₄⁺ independientemente de las 2 épocas en que fue dado el N (en la siembra y 20 días después) y en el maíz ese efecto ocurrió solamente cuando el ¹⁵N fue aplicado en la siembra.

La forma nítrica presentó mejor aprovechamiento a los 28 DDT y al final del ciclo. En la aplicación del N marcado a los 70 DDT la forma nítrica alcanzó más del doble de la amoniacal, siendo los valores encontrados de 8,6% para N-NO₃⁻ y 3,3% para N-NH₄⁺.

El aprovechamiento máximo (24,9%) del N-NO₃⁻ fue registrado a los 28 DDT. No se observó tendencia de mayor absorción del N-NH₄⁺ o del N-NO₃⁻ durante el ciclo de desarrollo de las plantas. Sin embargo, existen evidencias de que las plantas absorben más rápidamente el N-NH₄⁺ que el del N-NO₃⁻ al inicio del crecimiento, y situación opuesta ocurre a medida que las plantas crecen (Brown *et al.*, 1983 a y b).

En relación al aprovechamiento del N en la parte aérea (Figura 2), se observa que ocurrieron diferencias significativas ($P < 0,05$) en la absorción del N (nítrico y amoniacal) a los 28, 42, 56 y 70 DDT. De manera general, la forma preferencial de absorción de las formas de N durante el ciclo de desarrollo de las plantas fue semejante a lo observado en la planta entera.

Cuando se aplicó el NH₄NO₃ marcado a los 28 d, el aprovechamiento del N-NO₃⁻ fue de 9,5% y el del N-NH₄⁺ de 5,4%. En la fase de máximo desarrollo vegetativo, a los 42 y 56 d de la aplicación, el aprovechamiento de la forma amoniacal fue superior a la nítrica variando de 14,2% a 17,8%, mientras que la forma nítrica de 8,8% a 13,1%. Estos valores son similares a los estudiados por Maidl *et al.* (2002), que en experimentos realizados en suelo, con papa de la variedad 'Agria' y usando nitrato de amonio marcado isotópicamente en las 2 moléculas, obtuvieron en 2 estadios de crecimiento de la planta recuperación de N en la parte aérea del orden de 8,3% a 14,2% y de 22,2% a 47%, en cada estadio. Al final del ciclo de crecimiento los mismos autores señalan un total entre 6,1 y 8,4%, valores coincidentes fueron obtenidos en el estudio.

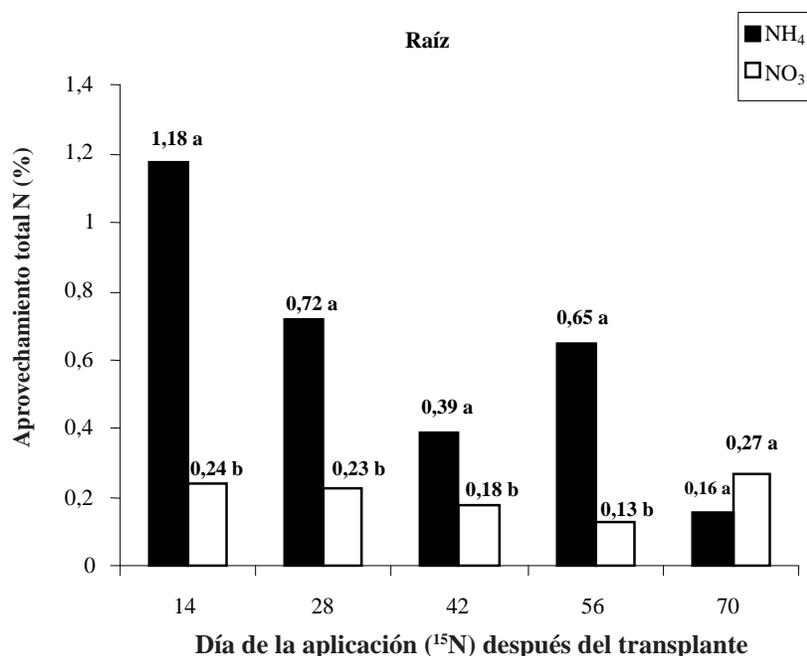


FIGURA 2. Aprovechamiento del N (%) en función de los períodos de aplicación del $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ ó $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$, en la parte aérea de la planta de papa cosechada al final del ciclo. Valores seguidos por letras distintas en el mismo período, difieren significativamente entre sí por la prueba de Tukey (5%).

Ocurrieron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) en el aprovechamiento del N por las raíces proveniente de las aplicaciones de este nutriente en las formas nítrica y amoniacal de la primera hasta la cuarta aplicación del ^{15}N (Figura 3).

El aprovechamiento del N-NH_4^+ en la raíz superó al del N-NO_3^- , aunque fue observado disminución constante del porcentaje de aprovechamiento de la forma amoniacal hasta la aplicación realizada a los 42 d. Al final del ciclo no se observaron diferencias entre las formas.

El aprovechamiento del N (%) en los tubérculos de las plantas de papa en función de la época de aplicación y de la forma usada es presentado en la Figura 4. Hubo diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre los tratamientos evaluados. En la fase inicial del ciclo de crecimiento de la planta ocurrió mayor aprovechamiento del N-amoniacal, presentando al inicio valor superior a 7%. En este órgano se mantuvo el incremento del aprovechamiento de la forma amoniacal hasta la aplicación realizada a los 56 d, cuando alcanzó 15,2%.

El aprovechamiento total en el tubérculo, sumando los de las dos formas de N (N-NH_4^+ e N-NO_3^-), varió de 4,7% a 23,0% (Figura 4). En campo Maidl *et al.* (2002) obtuvieron recuperación superior, variando de alrededor de 30% a 60%.

Absorción de N aplicado en diferentes estadios

Los datos de producción de MS en la planta entera, parte aérea, raíces y tubérculos de las plantas de papa son presentados en el Cuadro 5, y como se esperaba no se observaron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) en las aplicaciones de $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ o $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$, pues la fertilización nitrogenada en la forma y dosis aplicada fueron iguales en todos los potes.

Se observa en las Figuras 5 y 6 los valores de absorción del N (%), respectivamente, en la planta entera y en la PA. Para las aplicaciones realizadas a los 28 y 42 DDT no se verificaron diferencias significativas en la absorción del N-NH_4^+ y N-NO_3^- por las plantas, por lo tanto en este período de crecimiento no hay preferencia en la forma de absorción del N, al contrario de lo que se observó con el aprovechamiento de N, ya discutido anteriormente.

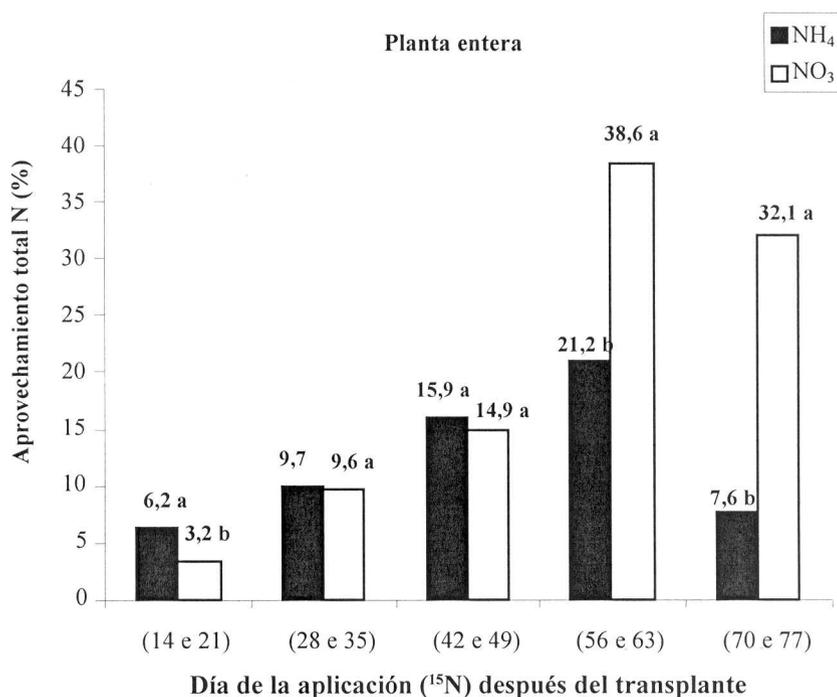


FIGURA 3. Aprovechamiento del N (%) en función de los períodos de aplicación del $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ ó $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$, en la raíz de la planta de papa cosechada al final del ciclo. Valores seguidos por letras distintas en el mismo período, difieren significativamente entre sí por la prueba de Tukey (5%).

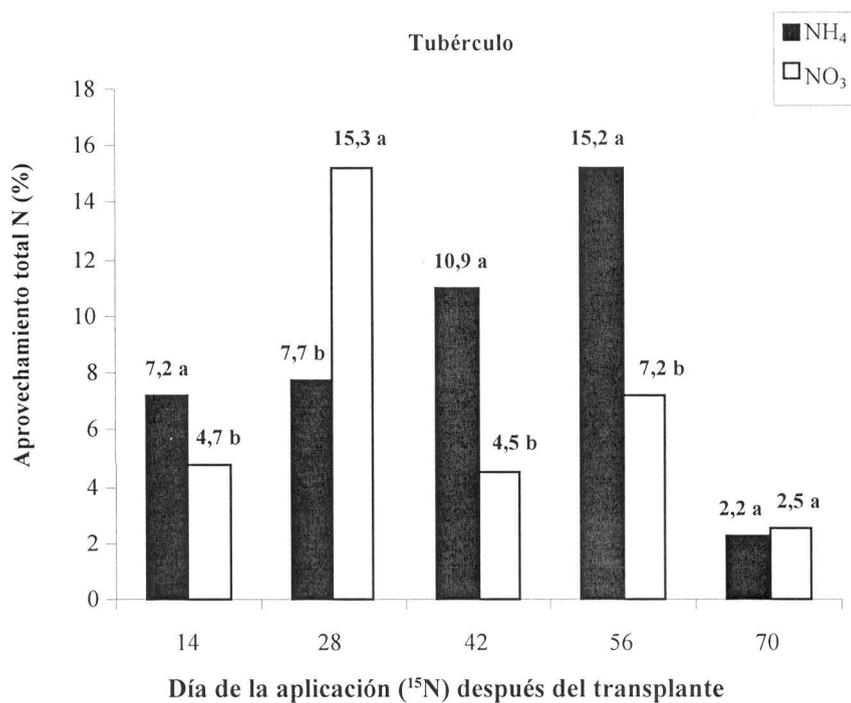


FIGURA 4. Aprovechamiento del N (%) en función de los períodos de aplicación del $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ ó $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$, en el tubérculo de la planta de papa cosechada al final del ciclo. Valores seguidos por letras distintas en el mismo período, difieren significativamente entre sí por la prueba de Tukey (5%).

CUADRO 5. Materia seca producida de la planta entera, parte aérea, raíces y tubérculos de las plantas de papa cultivada en solución nutritiva en función de la época de aplicación del $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ ó $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ y época de cosecha.

Días	Materia seca							
	Planta entera		Parte aérea		Raíces		Tubérculos	
	$^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$	$\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$	$^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$	$\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$	$^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$	$\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$	$^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$	$\text{H}_4^{15}\text{NO}_3$
	g planta ⁻¹							
14* y 21**	0,39	0,43	0,22	0,27	0,17	0,16	0	0
28 y 35	1,41	1,56	1,13	1,30	0,28	0,26	0	0
42 y 49	3,69	3,89	2,91	3,06	0,35	0,38	0,43	0,45
56 y 63	11,31	11,84	5,93	6,17	0,49	0,53	4,89	5,15
70 y 77	17,26	17,86	7,88	8,18	0,60	0,65	8,78	9,03

Nota: *Día de la aplicación del $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ ó $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$

** Día de la cosecha de las plantas

Por otro lado, se nota también en estas figuras, diferencias significativas ($P \leq 0,05$) en las aplicaciones de ^{15}N realizadas a los 14, 56 y 70 DDT de las plántulas de papa (Figuras 5 y 6). Además, se observó en estas figuras que la absorción del N- NH_4^+ en la planta entera (Figura 5) y PA (Figura 6) fue 6,2% y 5,1%, respectivamente, mientras que la de N- NO_3^- fue 3,2% y 3,1% en la fase inicial del ciclo de crecimiento de la planta.

Se notó que con el avance del ciclo de desarrollo de las plantas la forma nítrica pasó a ser significativamente más absorbida, manteniéndose esta tendencia hasta la aplicación de ^{15}N a los 70 d. Este patrón ya señalado en la discusión de la cosecha al final del ciclo sugiere que en plantas en inicio de crecimiento pueden existir sistemas funcionales incompletos para mayor absorción de N- NO_3^- o cambios en las posiciones de carbohidratos en las raíces durante el desarrollo que pueden modificar la forma preferencial de N, como lo señalado por Ku *et al.* (1983) y Monson *et al.* (1986). En la aplicación de ^{15}N realizada a los 70 DAT el aprovechamiento del N- NO_3^- fue 32,1% contra apenas 7,6% del N- NH_4^+ (Figura 5).

El conocimiento de la proporción de NO_3^- y NH_4^+ en el sistema de cultivo tiene gran importancia en lo que se refiere a la absorción de N por las plantas (Mills *et al.*, 1976). El N es absorbido principalmente por las raíces en las formas de NO_3^- y NH_4^+ . Normalmente el NO_3^- es la forma más absorbida, sin embargo, esto depende de la especie de la planta y algunos factores ambientales deben ser tomados en cuenta. Entre estos factores se

pueden mencionar el pH, la temperatura y el contenido de carbohidratos en las raíces (Marschner, 1995 y Mengel y Kirkby, 2001).

La mayor absorción del N- NH_4^+ al inicio de desarrollo (cosecha a los 21 d) de las plantas ocurrió probablemente por el menor gasto de energía necesario en reducir NO_3^- a NH_4^+ , debido a la menor tasa fotosintética en esa fase inicial de desarrollo. El NO_3^- absorbido por las plantas es reducido a la forma amoniacal y el N es combinado en las cadenas orgánicas del vegetal, formando ácido glutámico y a partir de ahí otros aminoácidos. Estudios han indicado que esa asimilación es limitada en el proceso de reducción del NO_3^- a NH_4^+ , proceso en que la reducción del NO_3^- por acción de la enzima NO_3^- reductasa es la enzima-clave (Rufty *et al.*, 1986, Taiz y Zeiger, 2004).

La absorción de NH_4^+ es favorecida por el pH elevado, mientras que la de NO_3^- es favorecida por el pH bajo. Este efecto ocurre debido a la competencia de H^+ y OH^- que son liberados para el medio externo de la célula por intermedio de un mecanismo que está asociado a la actividad de las ATPasas de las membranas en el proceso de absorción activa de cationes y aniones (Marschner, 1995).

Al final del ciclo (cosecha a los 63 y 77 d), período de llenado de los tubérculos, la absorción del N- NO_3^- en la planta entera y en la PA fue significativamente superior al del N- NH_4^+ (Figuras 5 y 6).

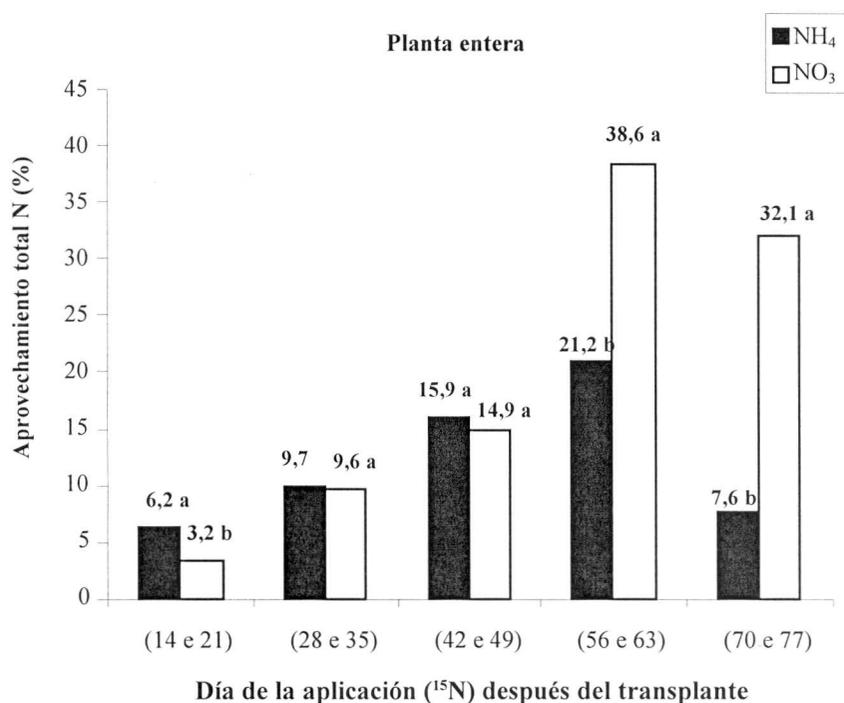


FIGURA 5. Absorción del N (%) en función de los períodos de aplicación del NH₄¹⁵NO₃ ó ¹⁵NH₄NO₃ y época de cosecha (en planta entera). Valores seguidos por letras distintas en el mismo período, difieren significativamente entre sí por la prueba de Tukey (5%)

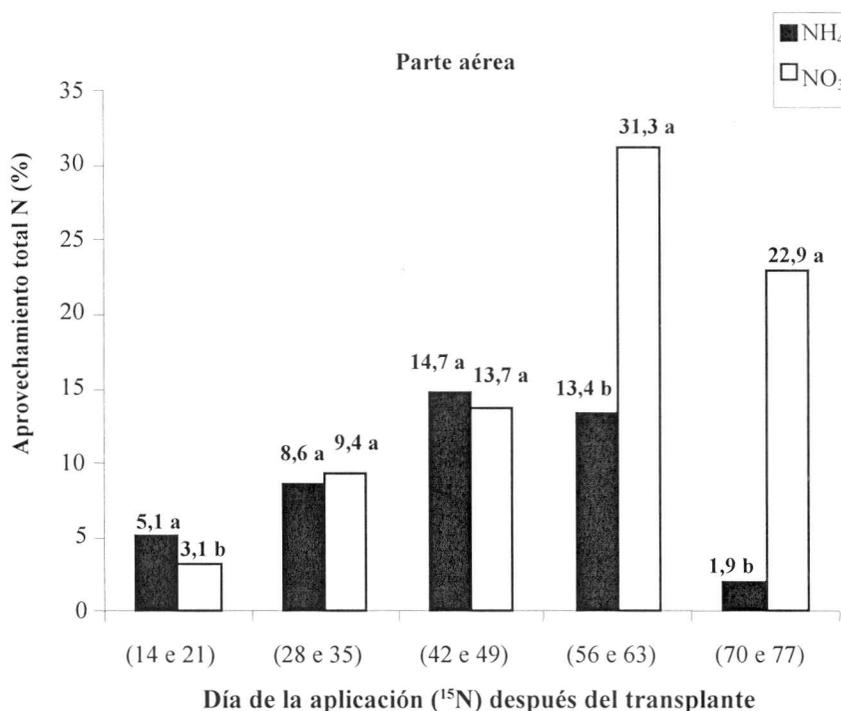


FIGURA 6. Absorción del N (%) en función de los períodos de aplicación del NH₄¹⁵NO₃ ó ¹⁵NH₄NO₃ y época de cosecha (en parte aérea). Valores seguidos por letras distintas en el mismo período, difieren significativamente entre sí por la prueba de Tukey (5%)

Ogata (1963a y b) verificó que el N-NH_4^+ fue mejor para el desarrollo vegetativo, mientras que el N-NO_3^- para el estadio reproductivo, momento este en que los carbohidratos están siendo formados, sugiriendo que el efecto de la fuente de N en el crecimiento de la planta varía dependiendo de la fase fisiológica y componente químico necesario en cada fase.

La absorción del N-NO_3^- y N-NH_4^+ por las raíces son presentados en la Figura 7 y se observó diferencias significativas ($P \leq 0,05$). La forma amoniacal fue significativamente superior en las 2 épocas iniciales de aplicación, con 1,14% y 1,17% de aprovechamiento del N-NH_4^+ . Al final del ciclo, el aprovechamiento del N-NO_3^- en las raíces superó el del N-NH_4^+ , acompañando la tendencia verificada para la planta entera y PA.

En sus trabajos, Osaki *et al.* (1995a) observaron que durante la fase de crecimiento vegetativo del cultivo de la papa, cultivada en solución nutritiva conteniendo $\text{Na}^{15}\text{NO}_3$ o $(^{15}\text{NH}_4)\text{SO}_4$, la cantidad de N absorbida en las formas de NH_4 y NO_3 fue similar en la PA, mientras que en las raíces hubo mayor aprovechamiento de NO_3^- .

La absorción del N (%) en los tubérculos de las plantas de papa en función de la época de aplicación y de la forma de N usada es mostrada en la Figura 8. Hubo diferencias significativas ($P \leq 0,05$) al final del ciclo, cuando el N-NO_3^- (8,2%) en el tubérculo superó el del N-NH_4^+ (5,17%).

Por su parte, Kato *et al.* (1983) al aplicar N-NO_3^- junto con N-NH_4^+ , verificaron que la distribución de ambas formas de N para los granos de soya fue diferente, el N-NO_3^- contribuyó más para la productividad de los granos. Por otro lado, Pan *et al.* (1986) señalaron que la distribución de N para los granos de maíz no varió con la forma de N usada. La distribución de esas dos formas de N para cada órgano o parte de la planta depende de la especie y de la fase de desarrollo (Osaki *et al.*, 1995a).

Así, a pesar de que no se haya observado diferencias en la producción de MS, se notó que al final del ciclo de la papa hay mayor absorción de la forma nítrica, sugiriendo que probablemente la aplicación de una fuente nitrogenada sin nitrato, como el sulfato de amonio, en esa fase podría disminuir la producción.

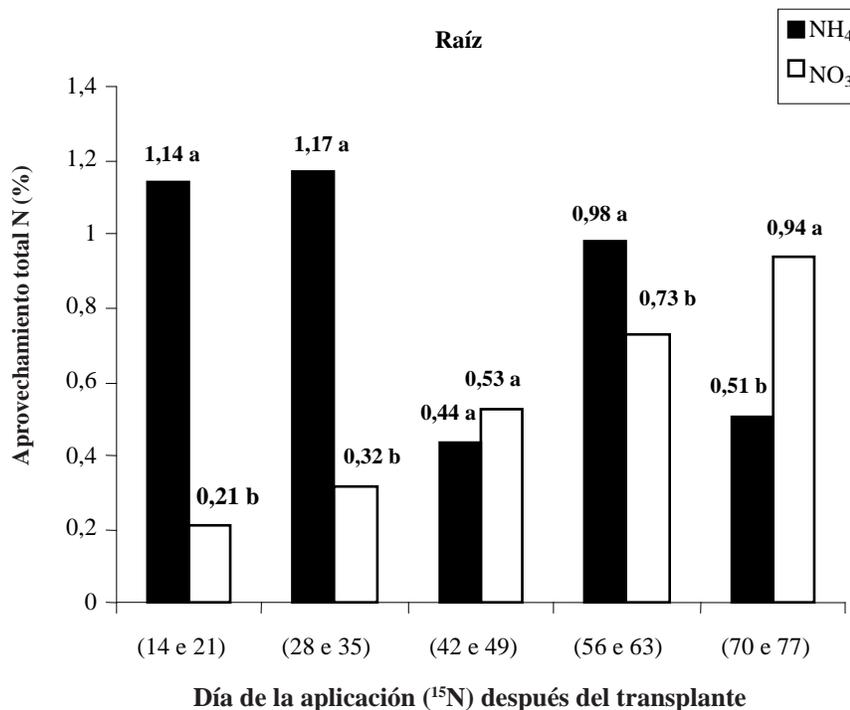


FIGURA 7. Absorción del N (%) en función de los períodos de aplicación del $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ ó $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ y época de cosecha (en raíz). Valores seguidos por letras distintas en el mismo período, difieren significativamente entre sí por la prueba de Tukey (5%).

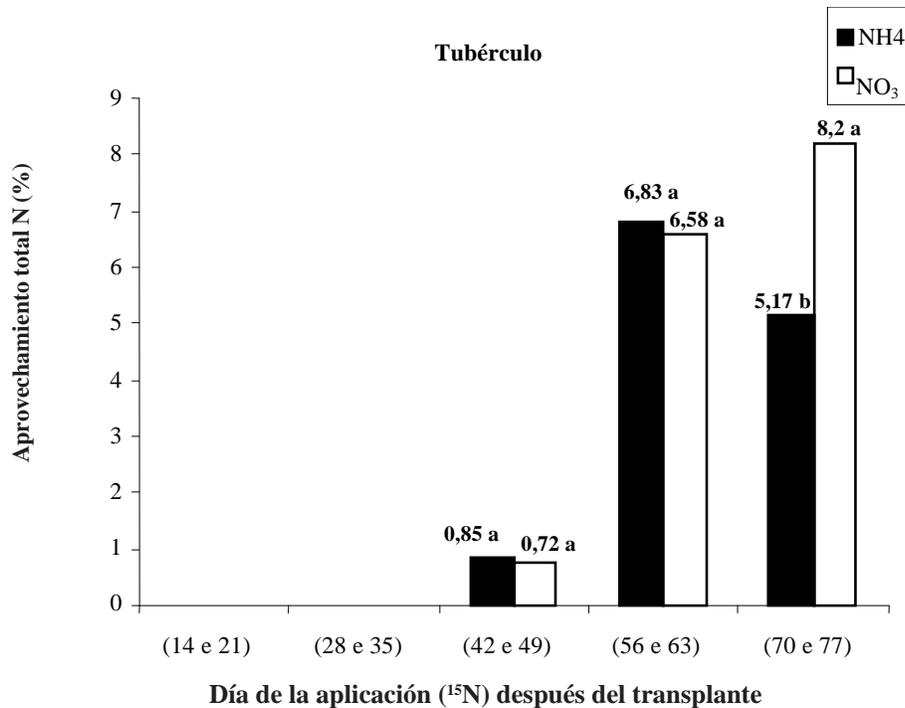


FIGURA 8. Absorción del N (%) en función de los períodos de aplicación del $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ ó $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ y de la época de cosecha (en tubérculos). Valores seguidos por letras distintas en el mismo período, difieren significativamente entre sí por la prueba de Tukey (5%)

CONCLUSIONES

- La forma preferencial de absorción del N en el estadio inicial de desarrollo fue la amoniacal, no existiendo diferencias de las formas en los estadios intermedios (28 y 49 DDT), tornándose a nítrica después de 56 d (formación de tubérculos).
- El aprovechamiento de N por las plantas, sin embargo, fue siempre mayor con la forma amoniacal aplicada en todos los estadios, con excepción a los 28 d y al final del ciclo.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al investigador Dr. Newton do Prado Granja del Instituto Agronómico de Campinas (IAC), Brasil, por el suministro del material *in vitro* para la instalación del experimento y a la empresa CINEXPAN por la arcilla expandida usada como sustrato.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, D. S., R. H. Teyker and A. L. Rayburn. 1991. Nitrogen form effect on corn root morphological and anatomical development. *Journal of Plant Nutrition*. 14:1 255-1 266.
- Barrie, A. and J. S. Prosser. 1996. Automated analysis of light element stable isotope by isotope ratio mass spectrometry. In: Boutton WT, Yamasaki S (Ed.). *Mass spectrometry of soils*. New York: Marcel Dekker. p. 1-47.
- Black, C. A. 1986. *Soil plant relationship*. 2nd ed. New York: John Wiley. 405 p.
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. In: Black CA (Ed.). *Methods of soil analysis*. Madison ASA, pt. 2, p. 1 149-1 176.
- Brown, R. H., L. L. Rigsby and D. E. Akin. 1983a. Enclosure of mitochondria by chloroplasts. *Plant Physiology*. 71:437-439.

- Brown, R. H., J. H. Bouton, L. L. Rigsby and M. Rigler. 1983b. Photosynthesis of grass species differing in carbon dioxide fixation pathways. VII. Ultra structural characteristic of panicum species in the laxa group. *Plant Physiology*. 71:425-431.
- CINEXPAN. 2006. Produtos. Disponível en: <http://www.cinexpan.com.br/index.html> Acceso en: 18 sept.
- Crocomo, D. J., A. M. L. Neptune y H. Reyes-Zumeta. 1965. Absorción de iones por las plantas. Maracaibo: LUZ; Facultad de Agronomía. 187 p.
- Elma Chips. 2000. Manual de recomendações técnicas para produção da cultivar 'Atlantic'. 5.ed. Itu. 15 p.
- Furlani, P. R., D. Bolonhesi, L. C. P. Silveira e Fanquin V. 1999. Cultivo hidropônico de plantas. Campinas: Instituto Agronômico. (Boletim Técnico, 180). 52 p.
- Gassert, J. K. R. T. 1959. Soil nitrogen. IV Transformations and movement of fertilizer nitrogen in a light soil. *Journal of Science Food and Agriculture*. 10:192-197.
- Gassert, J. K. R. T. 1961. Transformation, leaching and uptake of fertilizer nitrogen applied in autumn and spring to winter wheat on a heavy soil. *Journal of Science of Food and Agriculture*. 12:375-380.
- GHOSH, B. P. and R. H. BURRIS. 1949. Utilization of nitrogen compounds by plants. *Soil Science*. 70:187-203.
- Harmsen, G. H. and G. J. Kolenbrander. 1965. Soil inorganic nitrogen. In: Bartholomew WV, Clarck FE (Ed.). *Soil nitrogen*. Madison: SSSA, p. 43-71.
- Heinrichs, R., G. J. Gava, E. J. Corazza, R. R. C. Duete, F. C. A. Villanueva e T. Muraoka. 2006. Forma preferencial de absorção de nitrogênio ($^{15}\text{NH}_4^+$ ou $^{15}\text{NO}_3^-$) pelas culturas de soja, feijão, arroz e milho. *Científica*. 34:25-30.
- Kato, T., M. Yamagata and S. Tsukahara. 1983. Uptake and partitioning of ^{15}N -ammonium and ^{15}N -nitrate applied at the various stages in soybean. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 54:25-29.
- Ku S., B. M., R. K. Monson, R. O. Littlejohn, H. Nakamoto, D. B. Fisher, G. E. Edwards. 1983. Photosynthetic characteristic of C_3 - C_4 intermediate Flaveria species. I. Leaf anatomy, photosynthetic response to O_2 and CO_2 and activities of key enzymes in the C_3 and C_4 pathways. *Plant Physiology*. 71:944-948.
- Maidl, F. X., E. Brunner and E. Sticksel. 2002. Potato uptake and recovery of nitrogen ^{15}N -enriched ammonium nitrate. *Geoderma*. 105:167-177.
- Malavolta, E. 1967. Manual de química agrícola. 2.ed. São Paulo: Agronômica Ceres. 393 p.
- Malavolta, E. 1980. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres. 215 p.
- Malavolta, E., G. C. Vitti e S. A. Oliveira. 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: Potafos. 319 p.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2. ed. London: Academic Press, 889 p.
- Mengel, K. and E. A. Kirkby. 2001. Principles of plant nutrition. 5. ed. Dordrecht: Kluwer Academic, 849 p.
- Mills, H. A., A. V. Barker, D. N. Maynard. 1976. Effects of nitrapyrin on nitrate accumulation in spinach. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, v.101, n.3, p. 202-204,
- Monson, R. K., B. D. Moore, M. S. B. Ku and G. E. Edwards. 1986. Co-function of C_3 and C_4 photosynthetic pathways in C_3 , C_4 and C_3 - C_4 intermediate Flaveria species. *Planta*. 168:493-502.
- Nommik, H. 1965. Ammonium fixation and other reactions involving a nonenzymatic immobilization of mineral nitrogen in Soil. In: Bartholomew WV, Clarck FE (Ed.). *Soil nitrogen*. Madison: SSSA. p. 200-251.
- Ogata, S. 1963a. The nutri-physiological significances of NH_4^- and NO_3^- N for the plant growth (Part 1). Effect of NH_4^- and NO_3^- N concentration on the growth of oat plants. *Journal of Science Soil Manure*. 34:313-317.

- Ogata, S. 1963b. The nutri-physiological significances of NH_4^- and NO_3^- N for the plant growth (Part 2). Effect of NH_4^- and NO_3^- N on the composition of organic constituents and the enzymatic activity of various parts of oat plants. *Journal of Science Soil Manure*. 34:318-322.
- Osaki, M., J. Shirai, T. Shinato and T. Tadano. 1995a. ^{15}N -allocation of $^{15}\text{NH}_4^-$ -N and $^{15}\text{NO}_3^-$ -N to nitrogenous compounds at the vegetative growth stage of potato plants. *Soil Science and Plant Nutrition*. 41:699-708.
- Osaki, M., J. Shirai, T. Shinato and T. Tadano. 1995b. Effects of ammonium and nitrate assimilation on the growth and tuber swelling of potato plants. *Soil Science and Plant Nutrition*. 41:709-719.
- Pan, W. L., J. L. Camberato, W. A. Jackson and R. H. Moll. 1986. Utilization of previously accumulated and concurrently absorbed nitrogen during growth in maize. Influence of prolificacy and nitrogen source. *Plant Physiology*. 82: 247-253.
- Raij, B. Van, J. C. Andrade, H. Cantarella e J. A. Quaggio. 2001. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico. 285 p.
- Rodrigues, L. R. F. 2002. Cultivo pela técnica de hidroponia: técnicas de cultivo hidropônico e de controle ambiental no manejo de pragas, doenças e nutrição vegetal em ambiente protegido, Jaboticabal: FUNEP. 726 p.
- Rufty, T. W. Jr., J. F. Thomas, J. L. Remmleer, W. H. Campbell and R. J. Volk. 1986. Intracellular localization of nitrate reductase in roots. *Plant Physiology*. 82:675-680.
- SAS Institute. 1996. SAS/STAT: User's guide, version 6.11. 4th ed. Cary. v. 2, 842 p.
- Scarsbook, C. E. 1965. Nitrogen availability. **In:** Bartholomew WV, Clarck FE (Ed.). *Soil nitrogen*. Madison: SSSA. p. 486-501.
- Tadano, T. and T. Tanaka. 1976. Composition of adaptability to ammonium and nitrate among crop plants (Part I). Selective absorption between and responses to ammonium and nitrate of crop plants during early growth stage. *Studies on the comparative plant nutrition*. *Journal of Science Soil Manure*, Tokyo, v. 47, p. 321-328.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2004. *Fisiologia vegetal*. 3.ed. Porto Alegre: Artmed. 719 p.
- Virtanen, A. J. H. and H. Linkola. 1946. Organic nitrogen compounds as nitrogen nutrition for higher plants. *Nature*. 1:158-515.
- Warmcke, D. D. and S. A. Barber. 1973. Ammonium and nitrate uptake by corn (*Zea mays* L.) as influenced by nitrogen concentration and $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio. *Agronomy Journal*. 65:950-953.