

Efecto de la disminución de N total y aumento de NH_4^+ en la fórmula de fertirriego en el cultivo de clavel

Effect of decreasing total N and increasing NH_4^+ in the fertigation formula of carnation crop



ADRIANA DEL P. BARACALDO¹
MANFRED C. DÍAZ¹
VÍCTOR J. FLÓREZ^{1, 3}
CARLOS A. GONZÁLEZ²

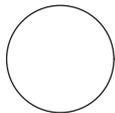
Plantas de clavel estándar, variedad Don Pedro.

Foto: M.C. Díaz

RESUMEN

Una alternativa a la lixiviación de nitrógeno en el cultivo de flores de corte es la optimización de la fórmula de fertirriego. Con el objetivo de estudiar la reducción de nitrógeno y el aumento de la proporción de amonio en la relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$, se evaluaron en condiciones de invernadero dos concentraciones de nitrógeno total (200-140 mg L^{-1} en fase vegetativa y 160-112 mg L^{-1} en fase productiva) y tres relaciones de $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ (5:95, 15:85 y 25:75) en clavel estándar cv. Don Pedro sembrado en sustrato. Se determinaron en tres momentos de cultivo los contenidos elementales del tejido vegetal, el pH y la concentración de nitrato en los lixiviados. Se observó mayores concentraciones de Zn y Cu en el tejido vegetal con la disminución de N total; así mismo, se obtuvieron incrementos de N y Zn y disminución de Mg con el incremento NH_4^+ , que, a su vez, disminuyó el pH en el sustrato. La disminución de N total no afectó significativamente el contenido de N en el tejido de la planta, pero si el contenido de NO_3^- y N total en el lixiviado.

Palabras clave adicionales: *Dianthus caryophyllus* L.; flor de corte; cultivo sin suelo; relación amonio:nitrato; lixiviado.



¹ Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía, Bogotá (Colombia). ORCID Baracaldo, A.P.: 0000-0001-7947-3510; ORCID Díaz, M.C.: 0000-0002-1767-3039; ORCID Flórez, V.J.: 0000-0002-3081-2400

² Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Bogotá (Colombia). ORCID González, C.A.: 0000-0002-2920-8425

³ Autor para correspondencia. vjflorezr@unal.edu.co

ABSTRACT

An alternative to nitrogen leaching in the cultivation of cut flowers is the optimization of the fertigation formula. In order to study the reduction of total nitrogen and the increase in the proportion of ammonium in the $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ ratio, two concentrations of total nitrogen were evaluated under greenhouse conditions (200-140 mg L^{-1} in the vegetative phase and 160-112 mg L^{-1} in the productive phase), along with three $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ ratios (5:95, 15:85 and 25:75) in standard carnation cv. Don Pedro grown on substrate. The elementary contents of the plant tissue, the pH and the nitrate concentration in the leachate were determined at three times during the cultivation. Higher concentrations of Zn and Cu were observed in the plant tissue with the decrease in the total N; likewise, increases of N and Zn and a decrease of Mg were obtained with the increase in NH_4^+ , which in turn decreased the pH in the substrate. The decrease in the total N did not significantly affect the content of N in the plant tissue, but did significantly affect the content of NO_3^- and total N in the leachate.

Additional key words: *Dianthus caryophyllus* L.; cut flower; soilless crop system; ammonium:nitrate ratio; leachate.

Fecha de recepción: 05-06-2018 Aprobado para publicación: 30-11-2018

INTRODUCCIÓN

La agricultura requiere del uso intensivo de fertilizantes nitrogenados: nitrato (NO_3^-), amonio (NH_4^+) o urea ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$). Su aplicación a base de NO_3^- y NH_4^+ genera problemas ambientales como eutrofización de reservorios de agua, contaminación de acuíferos y polución atmosférica. Dicha problemática es un asunto serio de reconocimiento mundial, de preocupación pública y económica (Esteban *et al.*, 2016). Entre las estrategias de los programas del manejo de la fertilización se debe considerar el acervo del NH_4^+ recientemente fijado para reducir sus pérdidas en el suelo e incrementar el uso eficiente del N (Nieder *et al.*, 2011).

Las principales fuentes de nitrógeno tomadas por las raíces de las plantas son NO_3^- y NH_4^+ . Dependiendo de la especie vegetal, etapa de desarrollo y órgano, el contenido de N necesario para el crecimiento óptimo varía entre 1 y 5% de la masa seca de las plantas puesto que constituye proteínas, ácidos nucleicos, clorofila, coenzimas, fitohormonas y metabolitos secundarios. La asimilación de estos iones tiene diferentes costos potenciales con respecto a energía y agua, siendo el NH_4^+ la fuente menos costosa, mientras que el NO_3^- debe ser reducido a NH_4^+ para ser asimilado por la planta; usando el equivalente de 8 a 12 moles de ATP para cada mol de NO_3^- reducido. La asimilación de NH_4^+ requiere de cinco ATPs por cada mol (Hawkesford *et al.*, 2012).

El desempeño de las plantas es óptimo cuando las dos formas principales de N se suministran en una

relación particular. La mejor relación a aplicar varía con factores como etapa fenológica (Cui *et al.*, 2017) y temperatura (Liu *et al.*, 2017). Un desbalance en la relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ puede afectar la solubilidad y disponibilidad de otros nutrientes esenciales para las plantas, debido a cambios en el pH del entorno radical (Helali *et al.*, 2010). La toxicidad (sensibilidad) y tolerancia a NH_4^+ en plantas desde la hipótesis clásica hasta la más reciente es ampliamente abordada por Esteban *et al.* (2016), para quienes los cultivos de papa o remolacha azucarera en general son más sensibles a NH_4^+ que sus respectivos parientes silvestres; sin embargo, arroz, arándanos y cebolla se han adaptado a altas concentraciones y raramente alcanzan umbral de toxicidad por NH_4^+ . Esta relación también está asociada con susceptibilidad o tolerancia a plagas y enfermedades, conforme Žanić *et al.* (2011), para quienes con mayor concentración de N y alta proporción de NO_3^- se aumenta la severidad de la infestación con mosca blanca en el estrato medio de plantas de tomate. Asimismo, dependiendo de la especie, dicha relación afecta indicadores del desarrollo y la nutrición mineral de las plantas. Según González *et al.* (2009), la relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ 0:100 en cebollín favoreció el área foliar y la producción de biomasa; la 20:80 en albahaca incrementó el rendimiento; y en eneldo no se observó diferencias en altura de planta, área foliar y biomasa total en las relaciones estudiadas. Mientras que en tomate la relación $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ 70:30 redujo la concentración de Ca foliar e incrementó la de P, también redujo algunos indicadores de crecimiento sin afectar la productividad, viabilizando el uso de la

fuente amoniacal (Terraza *et al.*, 2012). En lechuga se absorbe preferencialmente más NH_4^+ que NO_3^- ; e incrementos de hasta 30% del N total estimulan el crecimiento, probablemente como consecuencia del aumento en la absorción de P, resultante de un mejor control del pH en la zona radical. Los contenidos foliares de P, Mn, Zn y Cu aumentaron en función del incremento de la fuente amoniacal (Savvas *et al.*, 2006).

Vélez (2012) en un sistema de cultivo en sustrato para clavel estándar cv. Delphi sometido a tres porcentajes de recirculación de drenajes reportó valores entre 70 y 510 mg L^{-1} de NO_3^- en el lixiviado, por encima del máximo permitido por la Organización Mundial de la Salud (50 mg L^{-1}) (WHO, 2011) y por la Agencia para la Protección del Medio Ambiente Norteamérica (10 mg L^{-1}) (EPA, 2009). Y, aunque en el tratamiento con menos nitrógeno en la fórmula de fertirriego utilizada en miniclavel cv. Rony, Casas (2015) reportó una reducción en la concentración de nitrato en el lixiviado, está aún fue superior a 100 mg L^{-1} , por encima del máximo permitido para aguas superficiales que se destinaran a tratamiento y luego consumo humano, según el Decreto 1594 de 1984 (concentración máxima de 10 mg L^{-1}) (OAB, 2019).

Colombia presenta alrededor de 1.120 ha sembradas de clavel (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015) que ha venido implementado el sistema de cultivo en sustrato, con un consumo de 150 a 220 mg L^{-1} de N en la fórmula de fertirriego, en 1 m^3 de agua por cama por semana. El sistema genera una solución salina en el lixiviado, que corresponde entre 20 y 50% del volumen de agua aplicado por cama (Lorenzo *et al.*, 1993). Por lo tanto, este sistema genera impactos ambientales negativos derivados del alto consumo de agua y del vertimiento de sales fertilizantes al medio ambiente. El potencial impacto ambiental en el agroecosistema de la Sabana de Bogotá aún no ha sido dimensionado.

Los esfuerzos por remediar esta situación teniendo en cuenta que la dinámica de la relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ es compleja, dado que la asimilación de NH_4^+ por la planta es menos costosa en términos energéticos (Hawkesford *et al.*, 2012), en condiciones aeróbicas se nitrifica (Coskun *et al.*, 2017), es retenido en función de la capacidad de intercambio catiónico del sustrato (Nieder *et al.*, 2011), la pérdida de NO_3^- por lixiviación representan una amenaza ambiental y a la salud humana (Cameron *et al.*, 2013), las relaciones $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ afectan la disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo o sustrato (Helali *et al.*,

2010), y el contenido de otros nutrientes en el tejido y los componentes de la producción (González *et al.*, 2009). Por tanto, la disminución en la concentración del N total busca optimizar la fórmula de fertirriego y el aumento de la relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ pueden proveer información acerca de una mejor utilización y optimización el uso del N, de manera que se pueda afectar los contenidos de sales en el lixiviado, a fin de mitigar el impacto ambiental.

Es por esto, el objetivo del presente ensayo fue estudiar el efecto de la disminución de N y el aumento de la relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ en la solución de fertirriego utilizada para clavel (*Dianthus caryophyllus* L.), sobre el contenido de elementos en el tejido vegetal, el sustrato y el lixiviado.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en el Centro Agropecuario Marengo (CAM) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, ubicado en Mosquera (Cundinamarca) a 4°42' N y 74°12' W, 2.540 msnm, 12,4°C de temperatura promedio anual, humedad relativa entre 76 y 89% y precipitación promedio anual de 1.124 mm (Ordoñez y Bolívar, 2014). Durante el estudio el promedio de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero fueron de 17,5°C y 76%, respectivamente.

Para el ensayo se utilizó un invernadero tradicional de estructura metálica tipo flexon (Acuña y Ortiz, 2004), con ventilación lateral y cenital pasivas, en el cual se acondicionaron dos naves, de 9×70 m (630 m^2). Se utilizaron seis camas de madera de 7,0 x 0,7 m levantadas a 0,4 m del suelo. Tuvieron doble contenedor de 0,25×0,2 m y al final de la pendiente se ubicó un tanque recolector de lixiviado. Se sembraron esquejes con raíz de clavel estándar (*Dianthus caryophyllus* L.) cv. Don Pedro a densidad 15,5 plantas/ m^2 en un sistema abierto de fertirriego. El sustrato consistió en la mezcla 50% cascarilla de arroz cruda (*in natura*), 15% cascarilla de arroz tostada, 25% de cascarilla de arroz tostada reutilizada y 10% compost, obtenido de los residuos de cultivo de rosa y clavel (v/v/v/v). La CE y el pH de la mezcla osciló entre 0,5 y 1,0 dS m^{-1} y entre 6,8 y 7,0, respectivamente. El manejo agronómico del cultivo se hizo conforme a lo descrito en Flórez *et al.* (2006).

Se establecieron seis tratamientos correspondientes a modificaciones en el contenido de N de la fórmula

convencional aplicada comercialmente al cultivo de clavel (200-160 mg L⁻¹ de N total para las fases vegetativa y productiva del cultivo, respectivamente, manteniendo una relación NH₄⁺:NO₃⁻ de 15:85). En esta fórmula el N total se redujo en 30% y la relación NH₄⁺:NO₃⁻ se disminuyó o aumento en 10% (Tab. 1). En las soluciones de fertirriego la CE se mantuvo entre 1,5 y 2,5 y el pH entre 5,5 y 6,0; las concentraciones de los demás elementos (mg L⁻¹) en las fases vegetativa y reproductiva fueron: P, 30; K, 150; Ca, 120; Mg, 40; Fe, 3; Cu, 1; Zn, 0,5; B, 1; Mo, 0,1; S osciló entre 2 y 116 mg L⁻¹ en razón al balance estequiométrico de la fórmula para el ajuste de NH₄⁺. El cálculo de las soluciones nutritivas contempló los aportes de agua (CE = 0,6 y pH = 7,0) y los contenidos de Mn en el sustrato a base de cascarilla de arroz tostada (Martínez y Roca, 2011).

La determinación de la variable masa seca se registró en tres muestreos de carácter destructivo de la planta a las 16, 21 y 26 semanas después de siembra (SDS). En estas semanas se tomaron tres muestras de sustrato y una de lixiviado por tratamiento. La muestra de sustrato consistió en 1 kg aproximadamente por unidad experimental y 1 L aproximadamente de lixiviado en el canal de la cama por tratamiento. Se transportaron en condiciones refrigeradas. En tejido vegetal y sustrato se determinaron los contenidos de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn y B de acuerdo con la metodología descrita por Carrillo *et al.* (1994); así como el pH del sustrato. En el lixiviado se determinó NO₃⁻, NH₄⁺, PO₄³⁻, K⁺, HCO₃⁻, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, pH y CE de acuerdo con Rice *et al.* (1967). Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia. El balance de nitrógeno fue calculado teniendo en cuenta el contenido de N en la

fórmula de fertirriego, volumen total de lixiviado y la masa seca del último muestreo.

Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado en arreglo factorial con dos niveles de nitrógeno total y tres relaciones NH₄⁺:NO₃⁻ (Tab. 1). Los seis tratamientos tuvieron tres réplicas y la unidad experimental consistió en 2 m de cama con 46 plantas. El análisis inferencial se realizó por medio de análisis de varianza (Anova) y comparación múltiple de Tukey, con nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Se verificó normalidad y homogeneidad de varianza en los residuales por medio de las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente, para validar el modelo ajustado. Todos los análisis fueron realizados con el *software* estadístico SAS v. 9.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido de nutrientes en el tejido vegetal

Disminución de nitrógeno total

Las concentraciones de N total en la fórmula de fertirriego evaluadas no presentaron diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de P, K, Ca, Mg, Fe, Mn y B en el tejido de la planta (datos no mostrados). Sin embargo, se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en algunos estadios fenológicos para N, Cu y Zn (Tab. 2).

El muestreo a las 21 SDS, las plantas del tratamiento con menor concentración de N (140-112N) muestran un contenido significativamente menor de N con respecto al tratamiento con mayor concentración (200-160N) (Tab. 2); de manera contrastante se encontró

Tabla 1. Concentraciones y relaciones NH₄⁺:NO₃⁻ de nitrógeno evaluadas en la fórmula de fertirriego utilizada en el cultivo de clavel cv. Don Pedro sembrado en sustrato.

Tratamientos	NH ₄ ⁺ : NO ₃ ⁻	Fase vegetativa			Fase productiva		
		NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N total	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N total
	%	(mg L ⁻¹)					
5% N-NH ₄	5:95	10	190	200	8	152	160
15% N-NH ₄	15:85	30	170		24	136	
25% N-NH ₄	25:75	50	150		40	120	
30% menos N	5% N-NH ₄	7	133	140	5,6	106,4	112
	15% N-NH ₄	21	119		16,8	95,2	
	25% N-NH ₄	35	105		28	84	

un contenido significativamente mayor de Cu en 140-112N (Tab. 2). Con lo cual, se visualiza una posible relación inversa entre N y Cu. También se constató una concentración significativamente mayor de Zn en el tratamiento 140-112N, en comparación con el tratamiento 200-160N (Tab. 2). Reportes sobre el tema donde se evalúan diferentes dosis de NPK en clavel cv. Master, por ejemplo, la dosis más baja de fertilización (75 mg L⁻¹ de NPK), Singh *et al.* (2015) reportaron el menor porcentaje de N en el tejido foliar (1,8%); la aplicación de la dosis más alta de fertilización, El-Naggar (2009) encontró mayor contenido de N foliar en clavel cv. Red Sim. La relación N:Cu descrita en el presente estudio fue abordada por Broadley *et al.* (2012), donde concentraciones altas de N promueven la deficiencia de Cu. Navarro y Navarro

(2003) afirman que en pastos la adición de dosis crecientes de fertilizantes nitrogenados en suelos con deficiencia de Cu origina descensos en la concentración de Cu; sin embargo, al adicionar Cu al suelo, incluso en presencia de fertilizantes nitrogenados, se incrementa el contenido de Cu en la planta. Asimismo, de acuerdo con Broadley *et al.* (2012), en condiciones de alto suministro de N, el contenido de Cu de las raíces se incrementa proporcionalmente a su concentración externa, aunque se inhibe drásticamente su transporte a la parte aérea.

Para el caso de Zn, cantidades elevadas de compuestos nitrogenados influye en el movimiento del elemento en el suelo; también puede provocar deficiencia de Zn a causa de la cinética de absorción propia de los dos

Tabla 2. Contenidos de N, Cu, Zn y Mg en el tejido vegetal de plantas completas de clavel cv. Don Pedro, con disminución del N total e incrementos en el componente de N-NH₄⁺ en la fórmula de fertirriego.

Tratamiento	Semana después de siembra			
	16	21	26	
N* (mg L ⁻¹)	N (%)			
	200 - 160	2,80 a	1,89 a	2,32 a
	140 - 112	2,92 a	1,17 b	2,74 a
	Cu (mg kg ⁻¹)			
	200 - 160	7,99 a	7,91 a	6,41 a
	140 - 112	8,03 a	9,15 b	7,12 a
	Zn (mg kg ⁻¹)			
	200 - 160	60,97 a	76,75 a	51,68 a
140 - 112	72,93 b	72,32 a	60,46 a	
N-NH ₄ ⁺ (%)	N (%)			
	5	2,69 a	1,60 a	2,29 a
	15	2,94 b	1,50 a	2,62 b
	25	2,95 b	1,48 a	2,67 b
	Mg (%)			
	5	0,40 a	0,37 a	0,30 a
	15	0,35 b	0,30 b	0,28 a
	25	0,34 b	0,31 b	0,33 a
	Zn (mg kg ⁻¹)			
	5	67,18 a	61,02 a	56,57 a
	15	59,15 a	68,72 a	55,80 a
	25	74,52 a	93,86 b	55,84 a

Promedios seguidos por la misma letra en la columna, indican una diferencia significativa según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

* Concentraciones de N total (mg L⁻¹) para las fases vegetativa y productiva del cultivo, respectivamente.

elementos (Navarro y Navarro, 2003). Sin embargo, en semillas de canola Gao y Ma (2015) observaron que la concentración de Zn disminuyó con el menor suministro de N e incrementó con altos niveles de N. Rehman *et al.* (2018) indican que la aplicación de N aumenta la concentración y absorción de Zn en semillas de cereales; aunque, Kumar *et al.* (1985) encontraron efecto sinérgico en plantas de mijo perla entre las aplicaciones de N sobre las concentraciones de Zn en hojas y tallos, y antagónico en raíz.

Aumento de nitrógeno amoniacal

El aumento de N-NH_4^+ en la relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ de la fórmula de fertirriego no presentó diferencias estadísticamente significativas en los contenidos de P, K, Ca, Cu, Fe, Mn y B en el tejido de la planta (datos no mostrados). Sin embargo, en los contenidos de N, Mg y Zn se evidencian diferencias estadísticamente significativas en algunos estadios fenológicos evaluados (Tab. 2).

En las 16 y 26 SDS las plantas con más contenido de NH_4 , 15 y 25%, respectivamente, de manera consecuente presentaron porcentajes significativamente mayores de N en el tejido de la planta (Tab. 2). Asimismo, en la 21 SDS, las plantas sometidas a mayor porcentaje de NH_4^+ (25%) presentaron contenidos significativamente mayores de Zn, con respecto a los tratamientos con 5 y 15% de NH_4^+ (Tab. 2). Contrario a lo visto con Mg a las 16 y 21 SDS, cuando con el menor porcentaje de NH_4^+ (5%) se observaron los mayores contenidos del ion (Tab. 2).

En estudios con adición de NH_4^+ en las soluciones nutritivas formuladas con NO_3^- , Lorenzo *et al.* (2000) encontraron en rosa bajo hidroponía una mayor tasa de absorción de N durante la elongación del tallo y comportamiento similar en la absorción de K, mientras que la concentración de P aumenta solo en las raíces de las plantas. Choi *et al.* (2011) también encontraron que al aumentar la relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ (65:35 y 100:0) se presentaron mayores porcentajes de N total en el tejido de las plantas de fresa, en comparación con la solución de menor proporción de NH_4^+ . Por otra parte, Abasi *et al.* (2016) evaluaron el efecto de cinco relaciones $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ (0; 0,038; 0,074; 0,11 y 0,14) en tulipán, y contrario a lo encontrado en el presente estudio, las plantas con mayor proporción de NH_4^+ (0,14) presentaron concentraciones significativamente más bajas de N en los bulbos de las plantas (0,84%); los autores afirman que las plantas fertirrigadas con NO_3^- generalmente tienen una concentración alta de

N en comparación con las fertirrigadas con NH_4^+ . Sin embargo, Mengel y Kirkby (2001) señalan que las plantas fertilizadas con NH_4^+ tienen una mayor concentración de N en los tejidos de la parte aérea.

A mayores concentraciones de NH_4^+ en la solución nutritiva se disminuye la absorción de cationes como K, Ca y Mg. Con la relación $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ de 70:30 la solución nutritiva para tomate, Terraza *et al.* (2012) encontraron 0,59% de Mg foliar, significativamente menor que en los tratamientos con relaciones 100:0 y 85:15, con 1,07 y 1,05%, respectivamente, de Mg foliar. Para Abasi *et al.* (2016) las concentraciones de N en bulbo y de Ca, Mg y K en la parte aérea del tulipán se vieron significativamente afectadas por la fuente de N. En general, en las plantas fertilizadas con NH_4^+ se observaron concentraciones más bajas de los cuatro elementos, con 0,84, 1,10, 0,80 y 0,53%, respectivamente. En la mayoría de los casos, el ajuste osmótico en plantas fertilizadas con NH_4^+ se afecta negativamente debido a la reducida absorción de tales cationes (Guo *et al.*, 2007).

Savvas *et al.* (2006) en lechuga hidropónica con recirculación encontraron que las concentraciones de K, Ca, Mg y Fe en el tejido foliar no se vieron afectadas, mientras que P, Mn, Zn y Cu mejoraron al aumentar la proporción de NH_4^+ . En suelos neutros o alcalinos la acidificación de la rizosfera con la aplicación de amonio puede mejorar la movilización de fosfatos de calcio poco solubles y en consecuencia aumentar la absorción de P; asimismo aumenta la absorción de micronutrientes como B, Fe, Mn y Zn (Neumann y Römheld, 2012); para Alloway (2008) dicho efecto acidificante marcado aumenta la disponibilidad de Zn. Por lo tanto, el efecto del aumento en la proporción de NH_4^+ sobre el ion Zn puede atribuirse al impacto del NH_4^+ sobre el pH de la rizosfera (Tab. 2 y Fig. 2).

Contenido de NO_3^- en lixiviados

El NO_3^- en el lixiviado no presentó diferencia significativa con los aumentos de NH_4^+ (datos no mostrados) pero sí con disminución de nitrógeno total. A las 16 y 26 SDS el contenido de NO_3^- en el tratamiento 140-112 N fue significativamente menor en comparación con 200-160 N, alcanzando 49,5 y 41,1% menos NO_3^- en el lixiviado, respectivamente en cada muestreo (Fig. 1). No se presentó diferencia significativa a la 21 SDS, probablemente debido al cambio de fórmula entre la fase vegetativa y productiva.

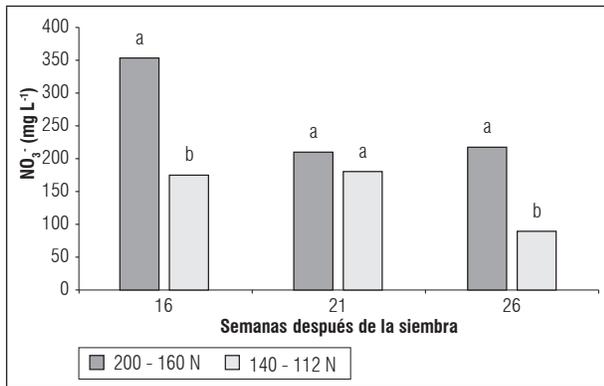


Figura 1. Valores promedio del contenido de nitrato en el lixiviado de un sistema de cultivo sin suelo con plantas de clavel cv. Don Pedro con disminución del N total en la fórmula de fertirriego. Análisis de forma independiente del porcentaje de NH₄⁺. Promedios con letras distintas indican una diferencia significativa con la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

Al respecto, Thompson *et al.* (2013) encontraron que mayores aplicaciones de N en plantas de tomate, entre 463 a 479 kg ha⁻¹ de N, el porcentaje de lixiviación de NO₃⁻ aumento de 31 a 37%, respectivamente; demostrando que al reducir la concentración del N en función del aplicado vs. absorbido se disminuye considerablemente la pérdida de NO₃⁻ por lixiviación. De forma similar, Gheysari *et al.* (2009) encontraron que la mayor lixiviación de N durante el ciclo de cultivo en maíz coincide con la mayor aplicación de riego y dosis altas de N. El mismo patrón fue observado por Liang *et al.* (2011) en avena, donde la concentración de NO₃⁻ en el lixiviado se incrementó de 11,3 a 17,2 mg L⁻¹ con el aumento dosis de N. Otros factores como la fuente del fertilizante, forma y momento de aplicación pueden influir en la lixiviación (Broschat, 1995). La magnitud de la pérdida de iones por lixiviación es proporcional a la concentración del elemento en la solución del suelo y a la cantidad de agua drenada (Ghiberto *et al.*, 2009).

Hong *et al.* (2014) mostraron que la producción de tomate en sistemas intensivos pueden llevar lixiviar cantidades de N cercanos a 788,6 kg ha⁻¹ en todo el ciclo, unos 65,7 kg ha⁻¹ por d. Bar-Yosef *et al.* (2009) mencionan observaciones semejantes en cuanto a la forma soluble de N en el lixiviado, aunque se aplicaran diferentes dosis y modos de fertilización; mientras Thompson *et al.* (2013), indican que la alta eficiencia en el uso de N es resultado de una concentración relativamente baja de N en el lixiviado.

pH en el sustrato

La reducción de pH en el sustrato fue estadísticamente significativa a las 16 y 21 SDS con el incremento de NH₄⁺ (Fig. 2). En geranio, petunia e *Impatiens*, Dickson *et al.* (2016) observaron que dichos cambios varían con la especie y la relación NH₄⁺:NO₃⁻ aplicada. La solución 0% NH₄⁺ mostró una reacción básica en todas las especies, con valores mayores en petunia en comparación con las otras dos especies; la solución 10% NH₄⁺, mostró una reacción neutra en geranio e *Impatiens* y básica en petunia. Finalmente la solución 20% NH₄⁺, en geranio e *Impatiens* presentaron una reacción ácida y en petunia sin diferencia al pH neutro. De manera similar, ensayos en *Ozothamnus diosmifolius* (Silber, 2009) indican que el aumento en la concentración de NH₄⁺, por vías N total y relación NH₄⁺:NO₃⁻, resultan en una marcada disminución de pH, entre 4 y 5, con la concentración 150 N total y relación 3:1. A pesar de la toxicidad provocada por las altas concentraciones de NH₄⁺ en la solución del suelo que disminuye el pH (Silber, 2009; Esteban *et al.*, 2016), como en el presente estudio se utilizó un sustrato con tendencia a valores de pH altos (pH ~7) (Vélez *et al.*, 2014), la reducción de pH en el sustrato por aplicación de NH₄⁺ habría generado un efecto benéfico al cultivo, con valores alcanzados en los tratamientos con mayor porcentaje de amonio próximos a 6,6, lo cual es descrito ampliamente en la literatura (Taiz y Zeiger, 2002; Neumann y Römheld, 2012), la franja de pH donde se aumenta la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes.

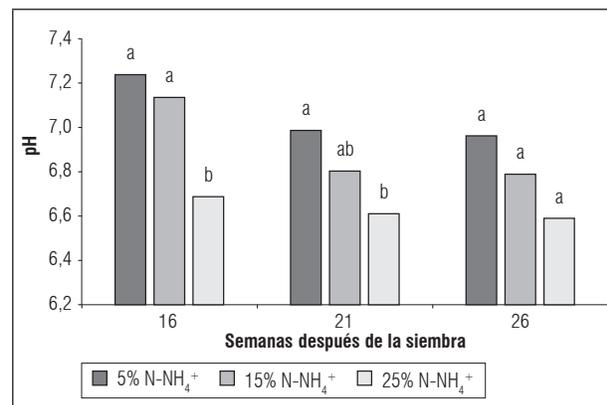


Figura 2. Cambios de pH en el sustrato por incremento de NH₄⁺ en el fertirriego de clavel cv. Don Pedro. Análisis independiente del nitrógeno total. Promedios con letras distintas indican una diferencia significativa según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

Balance de nitrógeno

El contenido de N en el tejido vegetal no presentó diferencia significativa entre tratamientos mientras que el contenido de N lixiviado fue significativamente mayor en el tratamiento con la dosis alta de N (200-160N) (Tab. 3). Lo anterior evidencia una posible sobrefertilización nitrogenada en razón que a pesar de disminuir la concentración del N aplicado no se presenta un menor contenido de N en el tejido vegetal; observándose además pérdida de N en el lixiviado. Al contrario, Cabrera (2003) determinó en *Ilex* y *Lagerstroemia*, especies ornamentales leñosas, una relación directa entre la concentración de N aplicado y el porcentaje de este ion en el tejido foliar; sin embargo, las pérdidas de N por lixiviación cambiaron de 17,4% con la concentración más baja de N (15 mg L⁻¹) a 52% con las concentraciones mayores (210 y 300 mg L⁻¹), resultados similares a los encontrados en el presente estudio.

Tabla 3. Contenido de nitrógeno en tejido y lixiviado para clavel cv. Don Pedro sometido a una disminución del 30% del N total en la fórmula de fertirriego.

Nitrógeno	200 - 160N*	140 - 112N*
	(kg ha ⁻¹)	
Fertilización	1.932	1.551
Tejido vegetal	218,6 a	209,5 a
Lixiviado	1.381,9 a	740,1 b

*Concentración de N total (mg L⁻¹) en la fórmula de fertirriego para las fases vegetativa y productiva del cultivo.

Promedios con letras distintas en la fila, indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

CONCLUSIONES

La reducción de nitrógeno total e incremento de la relación NH₄⁺:NO₃⁻ modificó los contenidos de nutrientes en el tejido vegetal de clavel. Con el menor contenido de N total en la fórmula de fertirriego se aumentaron significativamente los contenidos de Cu y Zn. El incremento de NH₄⁺ elevó significativamente los contenidos de N y Zn, y redujo Mg; también disminuyó significativamente el pH del sustrato.

La reducción de N total al 30% disminuye significativamente la pérdida de N por lixiviación a la semana 16 (49,5% <NO₃) y 26 (41,1% <NO₃) después de la siembra.

Los contenidos de N en el tejido de clavel no se vieron afectados significativamente por la reducción de N total, pero se logra una disminución significativa en la pérdida de N por lixiviación resultando en mayor eficiencia en el uso de nitrógeno.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Asociación Colombiana de Exportadores de Flores - Asocolflores, el Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana - Ceniflores, la Gobernación de Cundinamarca y a la Universidad Nacional de Colombia, entidades cofinanciadoras y ejecutoras del proyecto "Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca", en el cual se desarrolló la presente investigación. A la empresa Brenntag Colombia S.A. por el suministro de las soluciones nutritivas.

Conflicto de intereses: el manuscrito fue preparado y revisado con la participación de los autores, quienes declaran no tener algún conflicto de interés que coloque en riesgo la validez de los resultados aquí presentados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abasi, H., M. Babalar, H. Lessani y R. Naderi. 2016. Effects of nitrogen form of nutrient solution on uptake and concentration macro element and morphological trait in hydroponic tulip. *J. Plant Nutr.* 39(12), 1745-1751. Doi: 10.1080/01904167.2016.1201110
- Acuña C., J.F. y D.M. Ortiz P. 2004. Estructuras de invernadero: la experiencia colombiana. pp. 83-107. En: Acuña C., J.F., D.L. Valera M. y J.C. Avendaño (eds.) Invernaderos: la experiencia iberoamericana. Programa Cyted, Almería, España.
- Alloway, B.J. 2008. Zinc in soils and crop nutrition. 2a ed. IZA; IFA, Paris.
- Bar-Yosef, B., N.S. Mattson y H.J. Lieth. 2009. Effects of NH₄:NO₃:urea ratio on cut roses yield, leaf nutrients content and proton efflux by roots in closed hydroponic system. *Sci. Hortic.* 122(4), 610-619. Doi: 10.1016/j.scienta.2009.06.019
- Broadley, M., P. Brown, I. Cakmak, Z. Rengel y F. Zhao. 2012. Function of nutrients: micronutrients. pp. 191-248. En: Marschner, P. (ed.). Mineral nutrition of higher plants. 3a ed. Elsevier, Amsterdam. Doi: 10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8
- Broschat, T.K. 1995. Nitrate, phosphate, and potassium leaching from container-grown plants fertilized by

- several methods. *HortScience* 30(1), 74-77. Doi: 10.21273/HORTSCI.30.1.74
- Cabrera, R.I. 2003. Nitrogen balance for two container-grown woody ornamental plants. *Sci. Hortic.* 97(3-4), 297-308. Doi: 10.1016/S0304-4238(02)00151-6
- Cameron, K.C., H.J. Di y J.L. Moir. 2013. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Ann. Appl. Biol.* 162(2), 145-173. Doi: 10.1111/aab.12014
- Carrillo, I.F., B. Mejía y H.F. Franco. 1994. Manual de laboratorio para análisis foliares. Cenicafe, Chinchiná, Colombia.
- Casas O., N.R. 2015. Evaluación de la modificación del contenido de nitrógeno en una fórmula de fertirriego usada en el cultivo de miniclavel variedad Rony cultivado en sustrato. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- CCB, Cámara de Comercio de Bogotá. 2015. Manual flores y follajes: programa de apoyo agrícola y agroindustrial. Vicepresidencia de Fortalecimiento Empresarial, Bogotá.
- Choi, J.M., A. Latigui y C.W. Lee. 2011. Growth and nutrient uptake responses of 'Seolhyang' strawberry to various ratios of ammonium to nitrate nitrogen in nutrient solution culture using inert media. *Afr. J. Biotechnol.* 10(59), 12567-12574. Doi: 10.5897/AJB11.1104
- Coskun, D., D.T. Britto, W. Shi y H.J. Kronzucker. 2017. How plant root exudates shape the nitrogen cycle. *Trends Plant Sci.* 22(08), 661-673. Doi: 10.1016/j.tplants.2017.05.004
- Cui, J., C. Yu, N. Qiao, X. Xu, Y. Tian y H. Ouyang. 2017. Plant preference for NH_4^+ versus NO_3^- at different growth stages in an alpine agroecosystem. *Field Crop Res.* 201(3), 192-199. Doi: 10.1016/j.fcr.2016.11.009
- Dickson, R.W., P.R. Fisher, W.R. Argo, D.J. Jacques, J.B. Sartain, L.E. Trenholm y T.H. Yeager. 2016. Solution ammonium: nitrate ratio and cation/anion uptake affect acidity or basicity with floriculture species in hydroponics. *Sci. Hortic.* 200(2016), 36-44. Doi: 10.1016/j.scienta.2015.12.034
- El-Naggar, A.H. 2009. Response of *Dianthus caryophyllus* L. plants to foliar nutrition. *World J. Agric. Sci.* 5(5), 622-630.
- Esteban, R., I. Ariz, C. Cruz y J.F. Moran. 2016. Review: mechanisms of ammonium toxicity and the quest for tolerance. *Plant Sci.* 248(2016), 92-101. Doi: 10.1016/j.plantsci.2016.04.008
- Flórez R., V.J., R. Parra R., M. Rodríguez S., D.E. Nieto C. 2006. Características y fundamentos del proyecto "Producción más limpia de rosa y clavel con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá". pp. 3-40. En: Flórez R., V.J., A. de la C. Fernández M., D. Miranda L., B. Chaves C. y J.M. Guzmán P. (eds.). Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Gao, Y.M. y B.L. Ma. 2015. Nitrogen, phosphorus, and zinc supply on seed and metal accumulation in canola grain. *J. Plant Nutr.* 38(3), 473-483. Doi: 10.1080/01904167.2014.963121
- Gheysari, M., S.M. Mirlatifi, M. Homae, M.E. Asadi y G. Hoogenboom. 2009. Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates. *Agric. Water Manag.* 96(6), 946-954. Doi: 10.1016/j.agwat.2009.01.005
- Ghiberto, P.J., P.L. Libardi, A.S. Brito y P.C.O. Trivelin. 2009. Leaching of nutrients from a sugarcane crop growing on an ultisol in Brazil. *Agric. Water Manag.* 96(10), 1443-1448. Doi: 10.1016/j.agwat.2009.04.020
- González G., J.L., M. de las N. Rodríguez M., P. Sánchez G. y E. Araceli G. 2009. Relación amonio/nitrato en la producción de hierbas aromáticas en hidroponía. *Agric. Téc. Méx.* 35(1), 5-11.
- Guo, S., Y. Zhou, Q. Shen y F. Zhang. 2007. Effect of ammonium and nitrate nutrition on some physiological processes in higher plants - growth, photosynthesis, photorespiration, and water relations. *Plant Biol.* 9(1), 21-29. Doi: 10.1055/s-2006-924541
- Hawkesford, M., W. Horst, T. Kichey, H. Lambers, J. Schjoerring, I. Møller y P. White. 2012. Functions of macronutrients. pp. 135-189. En: Marschner, P. (ed.). Mineral nutrition of higher plants. 3a ed. Elsevier, Amsterdam. Doi: 10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6
- Helali, S.M., H. Nebli, R. Kaddour, H. Mahmoudi, M. Lachaâl y Z. Ouerghi. 2010. Influence of nitrate-ammonium ratio on growth and nutrition of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Soil* 336(1), 65-74. Doi: 10.1007/s11104-010-0445-8
- Hong, E.M., J.Y. Choi, W.H. Nam, M.S. Kang y J.R. Jang. 2014. Monitoring nutrient accumulation and leaching in plastic greenhouse cultivation. *Agric. Water Manag.* 146, 11-23. Doi: 10.1016/j.agwat.2014.07.016
- Kumar, V., V.S. Ahlawat y R.S. Antil. 1985. Interactions of nitrogen and zinc in pearl millet: 1. Effect of nitrogen and zinc levels on dry matter yield and concentration and uptake of nitrogen and zinc in pearl millet. *Soil Sci* 139, 351-356. Doi: 10.1097/00010694-198504000-00009
- Liang, X.Q., L. Xu, H. Li, M.M. He, Y.C. Qian, J. Liu, Z.Y. Nie, Y.S. Ye e Y. Chen. 2011. Influence of N fertilization rates, rainfall, and temperature on nitrate leaching from a rainfed winter wheat field in Taihu watershed. *Phys. Chem. Earth.* 36(9-11), 395-400. Doi: 10.1016/j.pce.2010.03.017
- Liu, G., Q. Du y J. Li. 2017. Interactive effects of nitrate-ammonium ratios and temperatures on growth, photosynthesis, and nitrogen metabolism of tomato seedlings. *Sci. Hortic.* 214(1), 41-50. Doi: 10.1016/j.scienta.2016.09.006
- Lorenzo, H., M.C. Cid, J.M. Siverio y M. Caballero. 2000. Influence of additional ammonium supply on some

- nutritional aspects in hydroponic rose plants. *J. Agric. Sci.* 134(4), 421-425. Doi: 10.1017/S0021859699007728
- Lorenzo, P., E. Medrano y M. García. 1993. Irrigation management in perlite. *Acta Hort.* 335, 429-434. Doi: 10.17660/ActaHortic.1993.335.52
- Martínez, P.-F. y D. Roca. 2011. Sustratos para el cultivo sin suelo: materiales, propiedades y manejo. pp. 37-78. En: Flórez R., V.J. (ed.). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Mengel, K. y E.A. Kirkby. 2001. Principles of plant nutrition. 5a ed. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda.
- Navarro, S. y G. Navarro. 2003. Química agrícola. 2a ed. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Neumann, G. y V. Römheld. 2012. Rhizosphere chemistry in relation to plant nutrition. pp. 347-368. En: Marschner, P. (ed.). Mineral nutrition of higher plants. 3a ed. Elsevier, Amsterdam. Doi: 10.1016/B978-0-12-384905-2.00014-5
- Nieder, R., D.K. Benbi y H.W. Scherer. 2011. Fixation and defixation of ammonium in soils: a review. *Biol. Fertil. Soils* 47, 1-14. Doi: 10.1007/s00374-010-0506-4
- OAB, Observatorio Ambiental de Bogotá. 2019. Documentos e investigación: Decreto 1594 de 1984: En: <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/con-lacomunidad//decreto-1594-de-1984>; consultado: mayo de 2018.
- Ordoñez D., N. y A. Bolívar G. 2014. Levantamiento agrológico del Centro Agropecuario Marengo (CAM). Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Bogotá.
- Rehman, A., M. Farooq, L. Ozturk, M. Asif y K.H.M. Siddique. 2018. Zinc nutrition in wheat-based cropping systems. *Plant Soil* 422(1-2), 283-315. Doi: 10.1007/s11104-017-3507-3
- Rice, E.W., R.B. Baird, A.D. Eaton y L.S. Clesceri. 1967. Standard methods for the examination of water and wastewater. 12a ed. American Public Health Association; American Water Works Association, Washington DC.
- Savvas, D., H.C. Passam, C. Olympios, E. Nasi, E. Moustaka, N. Mantzos y P. Barouchas. 2006. Effects of ammonium nitrogen on lettuce grown on pumice in a closed hydroponic system. *HortScience* 41(7), 1667-1673. Doi: 10.21273/HORTSCI.41.7.1667
- Silber, A. 2009. Impact of solution-NH₄ concentrations on soilless-grown plants: benefits and constraints. *Acta Hort.* 819, 373-380. Doi: 10.17660/ActaHortic.2009.819.45
- Singh, A., N. Laishram, Y.C. Gupta, B.P. Sharma, B.S. Dilla y S.K. Bhardwaj. 2015. Influence of NPK fertigation and foliar application on flower quality, media physico-chemical properties and foliar nutrient content in carnation (*Dianthus caryophyllus*) cv. Master. *Indian J. Agric. Sci.* 85(11), 1461-1465.
- Taiz, L. y E. Zeiger. 2002. Plant physiology. 3a ed. Sinauer Associates Publishers, Sunderland, USA.
- Terraza, S.P., P.L. Murrieta, M.V. Romero y S.H. Verdugo. 2012. Plant growth and tomato yield at several nitrate/ammonium ratios and bicarbonate concentrations. *Rev. Fitotec. Mex.* 35(2), 143-153.
- Thompson, R.B., M. Gallardo, J.S. Rodríguez, J.A. Sánchez y J.J. Magán. 2013. Effect of N uptake concentration on nitrate leaching from tomato grown in free-draining soilless culture under Mediterranean conditions. *Sci. Hort.* 150, 387-398. Doi: 10.1016/j.scienta.2012.11.018
- USEPA, United States Environmental Protection Agency. 2009. National primary drinking water regulations. EPA 816-F-09-004. Washington, DC.
- Vélez C., N.A. 2012. Comportamiento de macronutrientes en un sistema de cultivo sin suelo para clavel estándar cv. Delphi con recirculación de drenajes en la sabana de Bogotá. Tesis de maestría. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Vélez C., N.A., V.J. Flórez R. y A.F. Flórez R. 2014. Comportamiento de variables químicas en un sistema de cultivo sin suelo para clavel en la Sabana de Bogotá. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín* 67(2), 7281-7290. Doi: 10.15446/rfnam.v67n2.44170
- WHO, World Health Organization. 2011. Guidelines for drinking-water quality. 4a ed. Geneva, Suiza.
- Žanić, K., G. Dumičić, M. Škaljac, S.G. Ban y B. Urlić. 2011. The effects of nitrogen rate and the ratio of NO₃⁻:NH₄⁺ on *Bemisia tabaci* populations in hydroponic tomato crops. *Crop Prot.* 30(2), 228-233. Doi: 10.1016/j.cropro.2010.11.004