

Crecimiento y producción de lechuga (*Lactuca sativa* L. var. *romana*) bajo diferentes niveles de potasio

Growth and production of lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *romana*) under different levels of potassium



FABIO ERNESTO MARTÍNEZ M.^{1, 2}

GABRIEL ALBERTO GARCÉS V.¹

Síntomas de deficiencia de potasio en hojas de lechuga, var. romana.
Foto: F.E. Martínez M.

RESUMEN

La lechuga es una hortaliza de gran aceptación por el consumidor, sin embargo para var. romana se desconoce la dosis de potasio que garantice un mayor crecimiento y producción. Se evaluó la respuesta en crecimiento y producción de lechuga bajo diferentes niveles de K. El estudio se desarrolló bajo condiciones de cubierta plástica, sembrado con la var. romana; se aplicaron cinco niveles de K (0, 59, 117, 180 o 360 mg L⁻¹) dispuestos en un diseño completamente al azar; cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones. El K se aplicó vía fertirriego con los demás nutrientes en cinco aplicaciones. Se realizaron cinco muestreos, a los 20, 25, 31, 49 y 61 días después del transplante (ddt), para determinar el crecimiento de las plantas, se derivaron algunos índices de crecimiento empleando el modelo logístico del enfoque funcional, y con un muestreo a los 69 ddt se calculó la producción. La deficiencia de potasio generada por su ausencia (0 mg L⁻¹) causó necrosis en los bordes de las hojas adultas, la cual aumentó progresivamente y se expandió de forma intervenal hasta que finalmente alcanzó toda la lámina foliar. Los valores más bajos de número de hojas, área foliar, peso seco de raíz, hojas y total, y de índices de crecimiento se obtuvieron con 0 mg L⁻¹ de K, mientras que la respuesta más favorable, incluyendo producción, se logró con 360 mg L⁻¹ de K. Por lo cual, 360 mg L⁻¹ de K es la dosis más recomendable para el cultivo de lechuga var. romana bajo condiciones de invernadero de cubierta plástica.

Palabras clave adicionales: nutrición, deficiencia de potasio, modelo logístico, tasas de crecimiento.

¹ Facultad de Agronomía, Programa de Maestría en Ciencias Agrarias con énfasis en Fisiología de Cultivos, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (Colombia)

² Autor para correspondencia. femartinezma@gmail.com

ABSTRACT

Lettuce is a vegetable with high consumer acceptance, but the optimal dose of potassium is unknown for var. romana to ensure high growth and yield. The response in growth and yield of lettuce under different levels of K was evaluated. The study was carried out under a plastic greenhouse with var. romana and five levels of K were applied (0; 59; 117; 180, or 360 mg L⁻¹). The plants were arranged in a completely randomized design, each treatment consisted of four replicates. Potassium was applied via fertigation with other nutrients in five applications. The five sampling dates were 20; 25; 31; 49, and 61 days after transplanting (dat) assessed to determine the growth of plants using the functional approach of the logistic model; with a sampling at 69 dat the yield was calculated. Potassium deficiency with K (0 mg L⁻¹) caused necrosis at the margins of mature leaves, which gradually increased and expanded to the interveinal region until finally reaching the entire leaf lamina. The lowest values of leaf number, leaf area, dry weights of roots and leaves and plants in total, and growth indices were obtained with 0 mg L⁻¹ of K, while the favorable response (including yield) was achieved with 360 mg L⁻¹ of K. Therefore, 360 mg L⁻¹ of K is the dose most suitable for the cultivation of lettuce var. romana under plastic greenhouse conditions.

Additional key words: nutrition, potassium deficiency, logistic model, growth rates.

Fecha de recepción: 21-04-2010

Aprobado para publicación: 26-10-2010

INTRODUCCIÓN

La lechuga (*Lactuca sativa* L.), familia Compositae, es una hortaliza de gran importancia dentro del mercado nacional e internacional. En el año 2008, la producción nacional sobrepasó las 50.000 t, en las 2.798 ha cultivadas reportadas, generando un rendimiento nacional de 19 t ha⁻¹. Únicamente en el departamento de Cundinamarca hay un área aproximada de 2.282 ha, con una producción anual de más de 42.000 t, lo que representa una participación del 78% en la producción nacional; cifra que resalta la importancia de este departamento en este sector de la producción (Agronet, 2009). La variedad *romana* proviene del Mediterráneo, de donde deriva su nombre, y es un tipo de lechuga alargada. La madurez se basa en el número de hojas y en el desarrollo de la cabeza; una lechuga con un óptimo de firmeza y alrededor de 35 hojas desarrolladas se considera en estado de madurez (Cantwell y Suslow, 2005).

Bajo condiciones naturales, la deficiencia del potasio se presenta en suelos con un estatus de K muy bajo, especialmente en los arenosos con alta lixiviación, en los suelos rojos lateríticos y en aquellos con una relación (Mg+Ca)/K alta

(Rajendran *et al.*, 2009). El potasio es el catión más abundante en el citoplasma; junto con sus aniones acompañantes, este nutriente hace una contribución principal al potencial osmótico de células y tejidos de especies vegetales glicofíticas (Marschner, 2002). De acuerdo con Samra y Arora (1997), el potasio mejora la calidad y duración del cultivo y también alivia las condiciones de estrés. Además, es activador de muchas enzimas que son esenciales en la fotosíntesis, respiración, síntesis de almidón, proteínas y está involucrado en el transporte de fotoasimilados (Swietlik, 2003). Asimismo, el K es un ión que desempeña un papel fundamental en la osmorregulación celular, y su deficiencia produce pérdida de turgencia y marchitamiento, más acentuado cuando hay déficit hídrico (Bonilla, 2000).

Cuando el K es deficiente, el crecimiento es retardado y la retranslocación neta del K es realizada desde las hojas y tallos maduros, y bajo deficiencia severa estos órganos se vuelven cloróticos y necróticos, dependiendo de la intensidad lumínica a la que las hojas son expuestas. La deficiencia de potasio genera

descomposición del tejido parenquimatoso (Black, 1975). Los tejidos de plantas deficientes de potasio exhiben mayor actividad de ciertas hidrolasas o de oxidasas, como la polifenol oxidasa, que la de tejidos de plantas normales (suficientes); así mismo, se da lugar a algunos cambios químicos importantes, incluyendo una acumulación de carbohidratos solubles, una disminución en el contenido de almidón y una acumulación de compuestos solubles de nitrógeno (Marschner, 2002).

Los efectos nutricionales dependen de la influencia que ejerce cada nutriente en particular sobre los procesos fisiológicos y bioquímicos de la planta (Mengel *et al.*, 2001); sin embargo, evaluar el efecto de los diferentes nutrientes resulta complejo, debido a que el metabolismo celular es regulado por la totalidad de los nutrientes absorbidos y por la intensidad de la asimilación fotosintética (Friedrich y Fischer, 2000).

En lechuga, var. *romana*, son escasos los estudios referidos al manejo nutricional adecuado y a sus implicaciones en el crecimiento y desarrollo de la planta y la producción de cultivo; al ser el potasio el elemento de mayor extracción en esta especie, el objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto de diferentes niveles de este elemento sobre el crecimiento y producción de lechuga variedad *romana* cultivada bajo cubierta plástica.

MATERIALES Y MÉTODOS

La fase de campo de esta investigación se desarrolló en invernadero de plástico perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá; el invernadero se encuentra ubicado a 2.556 msnm, y durante el estudio se presentó en su interior una temperatura promedio de 20°C y una humedad relativa de 80%. La fase de laboratorio se realizó en el laboratorio de fisiología vegetal de la misma Facultad.

Se utilizaron plántulas de lechuga, var. *romana*, de 15 d de germinadas, las cuales fueron trasplantadas a materas plásticas con capacidad para 4 L de sustrato; como sustrato se utilizó turba rubia canadiense; la distancia de siembra fue de 20 x 30 cm. Los tratamientos, dispuestos en un diseño completamente al azar, consistieron en cinco niveles de potasio (0, 59, 117, 180 o 360 mg L⁻¹) con cuatro repeticiones, por tanto, se contó con 20 unidades experimentales (UE). Cada UE estuvo compuesta por 10 plantas.

Los demás elementos del plan de fertilización se aplicaron en igual cantidad para todos los tratamientos; para esto se utilizó la solución de Hoagland y Arnon (1950) modificada (tabla 1), la cual fue mezclada para generar soluciones madre, y luego diluida para realizar las aplicaciones. Tanto las fuentes de potasio como las de los otros elementos fueron distribuidas en

Tabla 1. Niveles de nutrientes para cada tratamiento. Solución nutritiva adaptada de Hoagland y Arnon (1959).

Elemento	Niveles de K (mg L ⁻¹)				
	0	59	117	180	360
N	90	90	90	90	90
P	40	40	40	40	40
Ca	27	27	27	27	27
Mg	12	12	12	12	12
S	14	14	14	14	14
Fe	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Cu	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Mn	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Zn	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
B	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

cinco aplicaciones vía fertirriego. Las fuentes de potasio utilizadas en el ensayo fueron nitrato de potasio y cloruro de potasio, según el caso. Las plantas fueron irrigadas diariamente, el agua de riego no presentó niveles considerables de K (tabla 2).

Se realizaron cinco muestreos, a los 20, 25, 31, 49 y 61 d después del trasplante (ddt), tomando una planta por UE en cada muestreo, y se determinaron las siguientes variables: número de hojas; peso seco de raíz y hojas: medición directa con balanza de precisión 0,01 g después de someter las muestras a 75 °C durante 72 h, y área foliar: medición directa mediante medidor de área foliar Licor3000 (Licor Inc., Lincoln, NE). En un sexto muestreo, a los 69 ddt, se tomaron cinco plantas por UE, se pesaron en fresco y se determinó el rendimiento en kg ha⁻¹, teniendo en cuenta que las plantas se sembraron a una densidad de 166.667 plantas/ha. Además, se realizó una descripción cualitativa de los síntomas de deficiencia de K manifestados por las plantas de lechuga y se hizo un registro fotográfico del desarrollo de ellos.

A través del modelo de crecimiento logístico y mediante el enfoque funcional, se determinaron los siguientes parámetros de crecimiento: tasa absoluta de crecimiento, tasa relativa de crecimiento, tasa de asimilación neta, índice de área foliar y tasa de crecimiento de cultivo (Carranza *et al.*, 2009) (tabla 3).

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza (Anova) y la prueba de Duncan al 5%; para esto se utilizó el programa estadístico SAS 9.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Expresión de síntomas de deficiencia de potasio

Las plantas de lechuga con 0 mg L⁻¹ de K manifestaron síntomas visuales de deficiencia, evidenciados principalmente en el porte de la planta y en el follaje; con la aplicación de 59, 117, 180 y 360 mg L⁻¹ de K no se presentaron síntomas visuales de deficiencia ni mayores efectos sobre el porte y calidad de hojas (figura 1A); esto puede

Tabla 2. Concentración de elementos en el agua de riego.

PARÁMETRO	RESULTADO		METODO ANALÍTICO
pH	7,01		Potenciómetro
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0,07		Conductímetro
ELEMENTOS-UNIDADES	mg L ⁻¹	meq L ⁻¹	
Potasio (K ⁺)	0,38	0,01	Abs. atómica (met. interno)
Calcio (Ca ⁺⁺)	7,4	0,37	Abs. atómica (met. interno)
Magnesio (Mg ⁺⁺)	0,71	0,06	Abs. atómica (met. interno)
Sodio (Na ⁺)	0,9	0,04	Abs. atómica (met. interno)
SUMA CATIONES		0,48	SUMATORIA
Bicarbonatos	17	0,28	Volumetría (met. interno)
Cloruros	4,3	0,12	Volumetría (met. interno)
Fosforo	0	0	Colorimétrico (met. Interno)
Azufre	1,4	0,08	Abs. atómica (met. interno)
SUMA ANIONES		0,48	Abs. atómica (met. interno)
Boro	0,09		
Hierro (pH real)	0,21		
Hierro pH 2.0	0,22		
Alcalinidad (mg kg ⁻¹ CaCO ₃)	14		
Dureza (mg kg ⁻¹ CaCO ₃)	20		
RAS		0,08	

Tabla 3. Descripción de los parámetros de crecimiento medidos durante el estudio.

Índice	Descripción	Fórmula	Unidades
TAC	Tasa absoluta de crecimiento	dW/dt	$g\ d^{-1}$
TRC	Tasa relativa de crecimiento	$(1/W)(dW/dt)$	$g\ g^{-1}\ d^{-1}$
IAF	Índice de área foliar	L_A/P	Adimensional
TCC	Tasa de crecimiento del cultivo	$(1/P)(dW/dt)$	$g\ cm^{-2}\ d^{-1}$
TAN	Tasa de asimilación neta	$(1/L_A)(dW/dt)$	$g\ cm^{-2}\ d^{-1}$

dW/dt = variación de la masa en función del tiempo; W = masa seca total; L_A = Área foliar; P = Área de suelo.

ser debido a que el potasio es importante para el desarrollo del tallo y las hojas (Rajendran *et al.*, 2009). La deficiencia de este elemento restringe la activación de ATPasas bombeadoras de protones enlazadas a la membrana, limitando así mismo la extensión celular (Marschner, 2002). Además, el K actúa en la producción del ATP, en la síntesis de almidón y proteínas, y en el proceso de fotosíntesis y el metabolismo de los carbohidratos (Samra y Arora, 1997); la deficiencia de este elemento causa limitaciones en estos procesos, resultando en un menor crecimiento de las plantas de lechuga.

Similar a lo reportado por Barker y Pilbeam (2007) y Bernal *et al.* (2008), la deficiencia de K se presentó especialmente en las hojas adultas, las cuales mostraron una necrosis perimetral que se fue expandiendo progresivamente de forma intervenal y finalmente alcanzó toda la lámina foliar (figura 2A). Las hojas nuevas también mostraron síntomas como pudriciones secas en los márgenes (figura 2D); esto puede deberse a que en respuesta a la deficiencia de K se incrementa al doble la producción de especies reactivas de oxígeno H_2O_2 , gracias a la inducción del transporte de alta afinidad en condiciones de



Figura 1. Efecto de niveles de potasio en solución nutritiva sobre el porte de plantas de lechuga, var. romana: 1A. 0 mg L⁻¹ de K; 1B. 59 mg L⁻¹ de K; 1C. 117 mg L⁻¹ de K; 1D. 180 mg L⁻¹ de K y 1E. 360 mg L⁻¹ de K.



Figura 2. Efecto de la deficiencia de potasio, 0 mg L^{-1} de K en solución nutritiva, sobre la calidad de hojas y la formación de cabeza de plantas de lechuga, var. romana.

bajos contenidos de K (Shin y Schachtman, 2004). Estas especies reactivas de oxígeno causan daños en membranas y degradación de clorofilas y son responsables del desarrollo de clorosis y necrosis (Cakmak, 2005).

Marschner y Cakmak (1989) observaron que plantas bajo deficiencia de K fueron sensibles a los incrementos en la intensidad lumínica y desarrollan síntomas como clorosis y necrosis foliar. Estas observaciones apoyan la idea de que el daño fotooxidativo en los cloroplastos, catalizado por especies reactivas de oxígeno, desempeña un papel fundamental en la aparición de los síntomas característicos de la hoja K.

Se presentaron malformaciones y limitaciones en la expansión de hojas nuevas y un crecimiento irregular de estas (figura 2B), lo que afectó la estructura de las cabezas de las plantas (figura 2C); esto puede deberse a problemas en la extensión celular, ya que para este evento se requiere la acumulación de K y azúcares reductores en las células como soluto, para generar un potencial osmótico interno que promueva la extensión celular. La expansión

celular en las hojas está estrechamente relacionada con su contenido de K. En hojas en expansión de plantas de fríjol que sufren de deficiencia de potasio, la turgencia, el tamaño celular, y el área foliar fueron significativamente menores que en hojas en expansión sin deficiencia de K (Marschner, 2002).

Crecimiento

Número de hojas

La figura 3A muestra que durante el ciclo productivo, las plantas sin aplicación de potasio tuvieron el menor número de hojas en relación con los demás tratamientos, presentando diferencias significativas desde el día 30, cuando hubo una diferencia promedio de 15 hojas, comparado con la dosis máxima, y hasta el día 61, con una diferencia final de 10 hojas con respecto a 180 y 360 mg L^{-1} de K; esto puede deberse a que en estados de deficiencia severa de este elemento, los cloroplastos y mitocondrias colapsan, afectándose procesos como la síntesis de azúcares, almidón, lípidos y ascorbato, por

tanto, el proceso de crecimiento disminuye (Mengel *et al.*, 2001); además, el K actúa sinérgicamente con las giberelinas en puntos de crecimiento, por lo que bajo deficiencia de K, la acción de esta hormona se ve afectada (Marschner, 2002), lo cual, muy posiblemente, inhibe el crecimiento y desarrollo de hojas.

La dosis de 59 mg L⁻¹ presentó un bajo número de hojas, sin ser estadísticamente diferente a la mayor adición de K, pero sí al tratamiento testigo. Las dosis intermedias de K correspondientes a 117 mg L⁻¹ y 180 mg L⁻¹ tuvieron un comportamiento similar, sin mostrar diferencias con la aplicación de 360 mg L⁻¹, que mostró los valores más altos durante todo el ciclo, para esta variable. Estos resultados coinciden con los reportados por Martínez y Sarmiento (2008) y Garg y Singh (1975) en uchuva, quienes encontraron que las deficiencias de K redujeron el número de hojas; en contraste, Bernal *et al.* (2008) encontraron que en cebollín la deficiencia de K no afectó el número de hojas.

Área foliar

El tratamiento 0 mg L⁻¹ de K obtuvo los menores valores de área foliar, presentándose un leve incremento desde el día cero hasta el día 61, cuando presentó su valor máximo. Desde el día 30 se observa una tendencia a la estabilización o limitación de la magnitud de la tasa a causa de un nivel cero de K. Los tratamientos con las dosis de K más altas (180 y 360 mg L⁻¹) alcanzaron los mayores valores de área foliar, superiores en 77 y 76% al valor de 0 mg L⁻¹ de K, respectivamente. Los tratamientos de 59 y 117 mg L⁻¹ de K alcanzaron valores inferiores al de 360 mg L⁻¹, en 17 y 24%, respectivamente (figura 3B).

La tasa de crecimiento de las hojas depende de la expansión de células jóvenes, que son producidas por la división celular en los tejidos meristemáticos. De este modo, el bajo suministro de nutrientes podría afectar la tasa de crecimiento foliar por la inhibición de la tasa de producción y expansión de nuevas hojas (Neumann, 1997). Un aumento del contenido de K en las hojas puede favorecer la asimilación de CO₂ y disminuir la respiración mitocondrial (Barker y Pilbeam, 2007), proceso que favorecería la acumulación de fotoasimilados y la expansión

foliar de plantas de lechuga en este estudio a medida que se aumenta la concentración de K hasta 360 mg L⁻¹.

Peso seco

Respecto al peso seco de raíz, después de los 30 ddt las diferencias entre tratamientos se acentúan, lo que muestra a este periodo como fundamental en el crecimiento de la lechuga. El peso seco de raíz del tratamiento sin K fue el menor durante todo el ciclo de crecimiento, presentando diferencias significativas con los tratamientos de 117 y 360 mg L⁻¹ de K, desde los 30 hasta los 61 ddt, donde tuvo un valor final de 2,18 g, lo que significa una disminución de 66 y 69% en el peso seco de este órgano con respecto a los tratamientos de 117 y 360 mg L⁻¹, respectivamente. Hasta aproximadamente 50 ddt, la aplicación de 59 mg L⁻¹ mostró una tendencia similar a la de 360 mg L⁻¹, pero hacia el final del ciclo una posible redistribución de materia seca generó menor peso seco en raíz, presentando diferencias significativas en este punto (figura 3C).

Las variaciones en la disponibilidad de nutrientes causan con frecuencia algunas alteraciones en la arquitectura de la raíz. En avena, un bajo suministro K genera una reducción de la longitud de las raíces laterales. En contraste, medios ricos en K aceleran el crecimiento de raíces laterales. Estos resultados experimentales indican que el K localizado incrementa las señales sistémicas responsables de la proliferación lateral de raíces (Hodge, 2004).

En *Arabidopsis* sp. las deficiencias de potasio disminuyen el desarrollo de raíces laterales (Shin y Schachtman, 2004; Armengaud *et al.*, 2004). Los incrementos en los niveles de etileno pueden ser responsables de la inhibición de raíces laterales observada en plantas deficientes de K (Shin y Schachtman, 2004), pero esta respuesta en desarrollo no está necesariamente acompañada de la activación de genes relacionados con el metabolismo y señalización de etileno (Armengaud *et al.*, 2004).

Los valores más bajos de peso seco foliar y total se obtuvieron con las plantas bajo deficiencia absoluta de K. La curva sigmoideal mostró hasta

el día 30 una progresiva acumulación de materia seca en hojas y en total, y a partir de este día se estabilizó, obteniendo un peso constante de 4 g (figura 3D) y 6,5 g (figura 3E) para peso foliar y total, respectivamente. Los tratamientos de 117 y 180 mg L⁻¹ mostraron un comportamiento similar, pero su peso constante se presentó hacia los 40 ddt, incrementado el tiempo de acumulación de materia seca. Para los tratamientos con 117 y 180 g L⁻¹ de K se obtiene un peso seco total de 14,6 y 15,5 (figura 3E) y un peso foliar de 9,1 y 10,8 g (figura 3D),

respectivamente. Las plantas a las que se les aplicaron 59 mg L⁻¹ de K presentaron un incremento significativo en el peso seco foliar hacia el final del ciclo, correlacionando altamente con la reducción que arrojó el peso seco de raíces en el mismo período. El tratamiento de 360 mg L⁻¹ mostró un crecimiento progresivo y exponencial desde 0 hasta 61 ddt, cuando alcanzó un máximo de 16 g, lo cual refleja que bajo esta concentración de K en solución nutritiva, las plantas no tienen limitaciones para acumular materia seca en hojas.

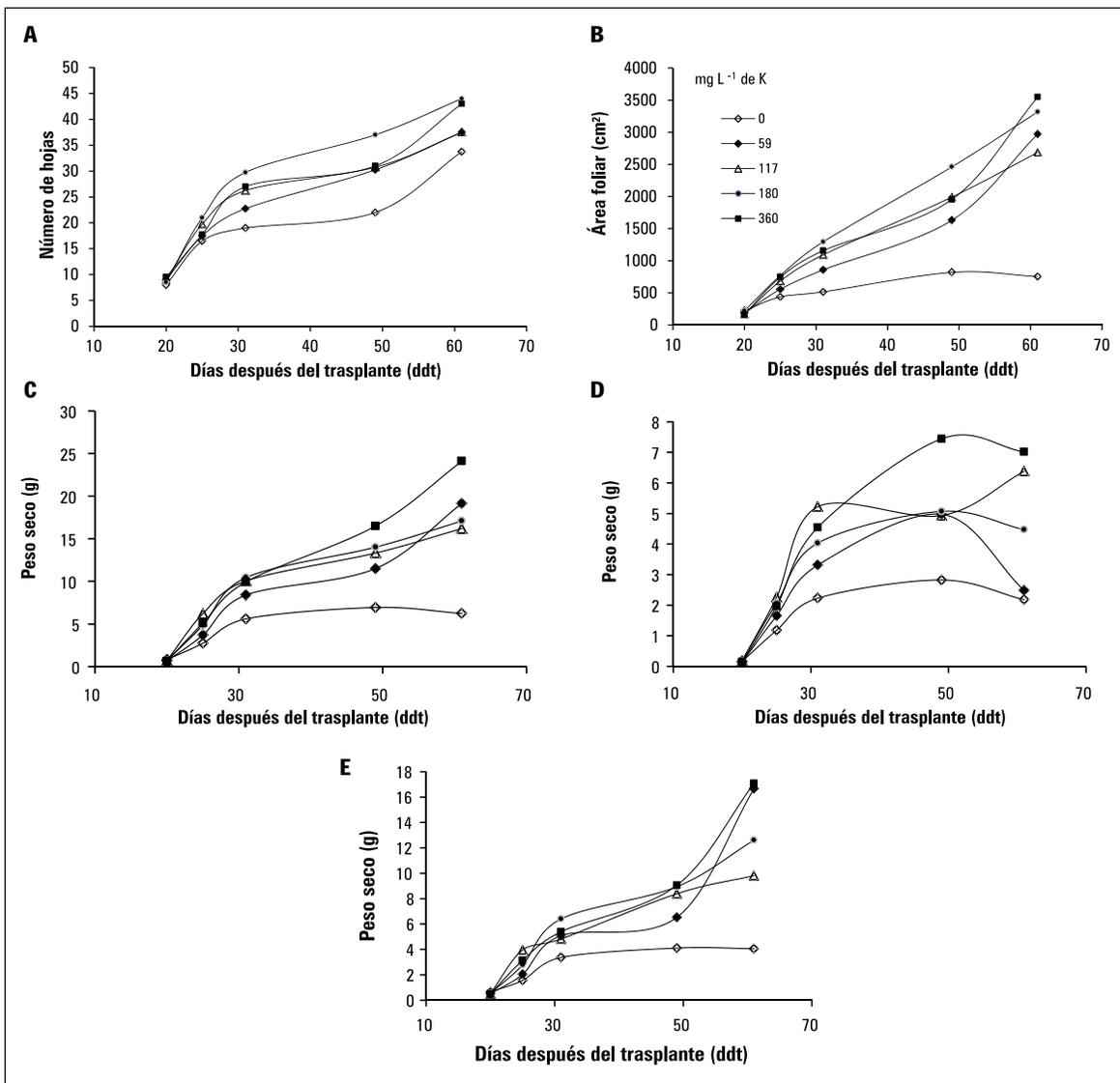


Figura 3. Efecto de diferentes niveles de potasio sobre: A. Número de hojas; B. Área de foliar; C. Peso seco de raíces; D. Peso seco de hojas, y E. Peso seco total de plantas de lechuga, var. romana.

La baja acumulación de materia seca se relaciona directamente con el suministro inadecuado de K y correspondientes menores contenidos foliares, lo que resulta en una menor tasa de fotosíntesis, ya que este nutriente juega un rol central en el mantenimiento de la fotosíntesis y procesos relacionados; la deficiencia de K resulta en una severa disminución en la fotosíntesis neta (Barnes *et al.*, 1995), la cual se relaciona con la conductancia estomática, el incremento de la resistencia del mesófilo y la baja actividad de la ribulosa bifosfato carboxilasa (Zhao *et al.*, 2001). El mantenimiento de la fotosíntesis en una alta tasa también depende de la exportación y utilización de fotoasimilados, que se limitan en plantas deficientes de K (Bednarz y Oosterhuis, 1999; Zhao *et al.*, 2001). También Rajendran *et al.* (2009) hacen evidente la importancia del K en la síntesis y translocación de los carbohidratos. Por otro lado, se genera una mayor tasa de respiración, lo cual es una característica típica de la deficiencia potásica (Marschner, 2002). Además, la deficiencia de K limita la actividad y síntesis de la nitrato reductasa, disminuyendo la eficiencia en el metabolismo de nitrógeno (Marschner, 2002).

Resultados que difieren de los de esta investigación fueron encontrados por Bernal *et al.* (2008) en plantas de cebollín bajo deficiencias nutricionales, cuya masa seca de raíces y de hojas no fue significativamente disminuida por la deficiencia de K.

Índice de área foliar (IAF)

El IAF está directamente relacionado con la expansión foliar (Hunt, 1982). Bajo deficiencia absoluta de K, se obtuvieron los menores índices (figura 4A). Estos valores se ajustaron a un modelo sigmoideal que alcanzó un valor máximo de 3,08 a los 61 ddt, lo cual representa una reducción del 72 y 77% con respecto a 59 y 360 mg L⁻¹ de K, con índices finales de 10,9 y 13, respectivamente, observando que su crecimiento fue progresivo con tendencia exponencial durante los primeros 61 ddt. Las concentraciones de 117 y 180 mg L⁻¹ presentaron el mismo comportamiento sigmoideal de crecimiento, alcanzando valores máximos de 10 y 12, respectivamente, y estos índices fueron mayores durante todo el ciclo de crecimiento. Los niveles deficientes de K limitan el área foliar y, por

consiguiente, el IAF; el crecimiento de las plantas es un resultado directo de la intensiva división y expansión de células meristemáticas, este último proceso, en especial, depende del turgor celular, que a su vez está regulado por el estado nutricional del K, y es este elemento el principal soluto requerido en las vacuolas para la extensión celular (Marschner, 2002).

En el presente estudio, los IAF fueron similares a los encontrados por Tei *et al.* (1996) en lechuga, quienes registraron un valor máximo de 12,7 al momento de la cosecha, muy similar a lo encontrado por Archila *et al.* (1998) con un IAF de 13,5 a 70 ddt. Por su parte, Andriolo *et al.* (2010) encontraron mayor IAF en fresa con la aplicación de 6 mmol L⁻¹ de K, respecto a 3 y 9 mmol L⁻¹ de K, lo cual indica que tanto dosis bajas como altas de este elemento pueden afectar el crecimiento de las plantas, ya que, según estos mismos autores, dosis altas pueden generar deficiencia de calcio y magnesio, situación que no se evidenció en el presente estudio, pues con 360 mg L⁻¹ de K no se redujo el crecimiento de las plantas de lechuga.

Tasa absoluta de crecimiento (TAC)

La figura 4B presenta las diferencias encontradas en la tasa absoluta de crecimiento (TAC) entre los cinco tratamientos. Este índice describe la ganancia de materia seca en el tiempo. Se observa que el tratamiento sin adición de K presenta valores inferiores respecto a la adición de este nutriente durante todo el ciclo de cultivo. Las plantas tratadas con 360 mg L⁻¹ de K muestran TAC superiores a las de los demás tratamientos durante los primeros 18 ddt, y a partir de los 34 ddt hasta el final de ciclo. El tratamiento con 59 mg L⁻¹ de K registra un comportamiento similar al de 360 mg L⁻¹, pero su ganancia de materia seca diaria fue inferior a este en los últimos 25 ddt. El mayor suministro de K, con 360 mg L⁻¹, permitió mantener tasas de crecimiento absolutas por encima de 0,4 g día⁻¹ durante un mayor número de días que los tratamientos con dosis intermedias. Posiblemente, las funciones del potasio en la activación de varios sistemas de enzimas, y su papel en la incorporación de los aminoácidos en las proteínas (Rajendran *et al.*, 2009), entre otros, favorecieron la alta TAC, aplicando la dosis de 360 mg L⁻¹.

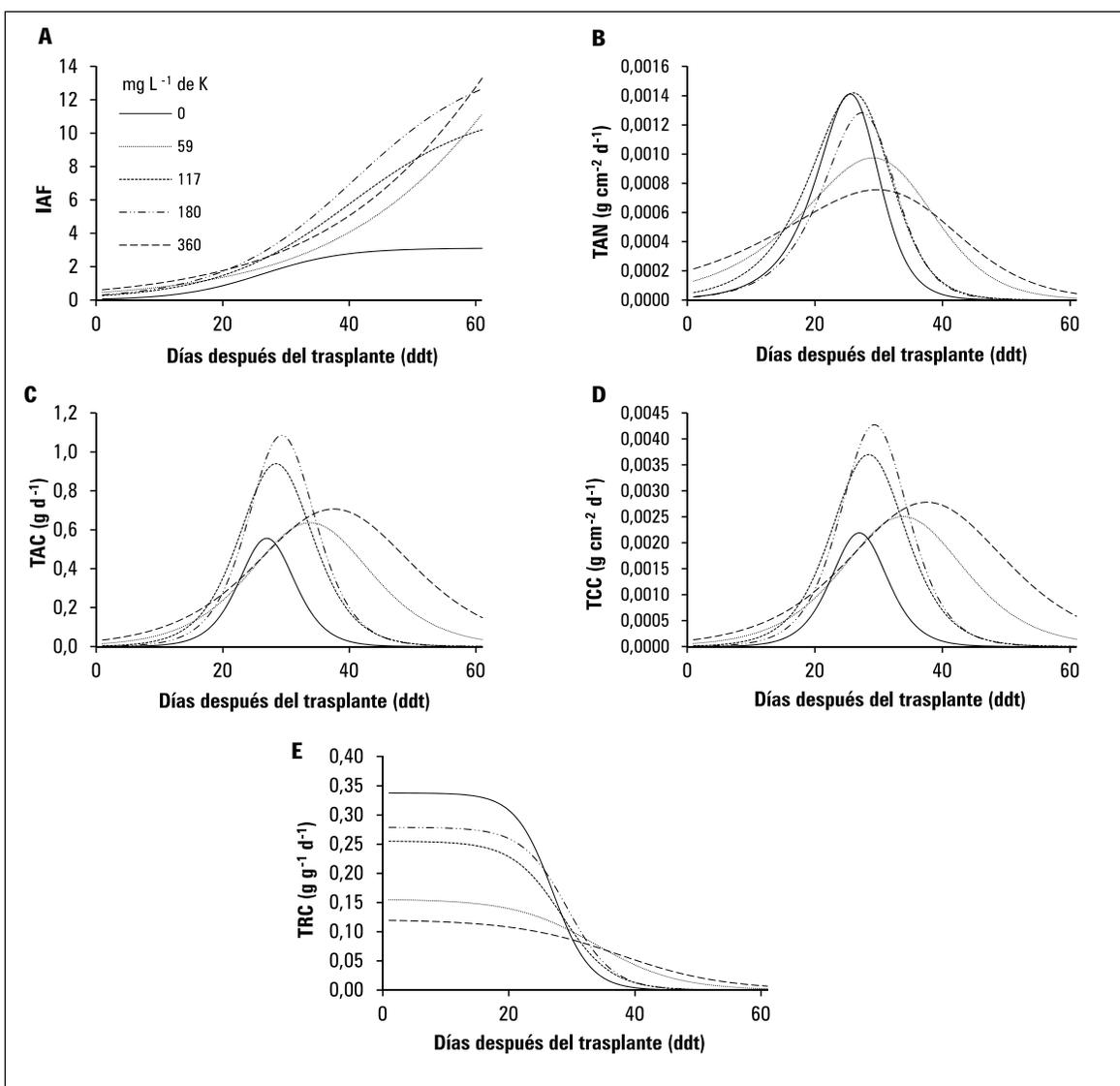


Figura 4. Efecto de diferentes niveles de potasio sobre plantas de lechuga, var. romana: **A.** Índice de área foliar (IAF); **B.** Tasa absoluta de crecimiento (TAC); **C.** Tasa relativa de crecimiento (TRC); **D.** Tasa de asimilación neta (TAN), y **E.** Tasa de crecimiento del cultivo (TCC).

Tasa relativa de crecimiento (TRC)

La TRC es una medida de la eficiencia de la planta como productor de nuevo material (Sivakumar y Shaw, 1978); expresa el incremento en materia seca de la planta en un intervalo de tiempo determinado, tomando como referencia el valor inicial de la materia seca producida y acumulada. Archila *et al.* (1998) describen la TRC como una medida del balance entre la capacidad potencial de fotosíntesis y el costo respiratorio.

Los valores más altos de la TRC los mostró el tratamiento sin K durante los primeros 25 ddt

(figura 4C), producto de sus más bajos niveles iniciales de materia seca, de manera que sus incrementos diarios de materia seca representan un alto porcentaje. Todos los tratamientos experimentaron una caída significativa en la TRC hacia los 18 ddt, debido a que en este punto inicia la fase 'rápido crecimiento'; luego, la TRC tendió a estabilizarse hacia el día 40, para los tratamientos con 0, 117 y 180 mg L⁻¹ de K, y hacia los 50 ddt para los tratamientos con 59 y 360 mg L⁻¹. Las plantas con la mayor dosis de K presentaron menor variación en su tasa relativa de crecimiento que las demás, gracias a su más

alta tasa de producción de materia seca a lo largo del ciclo de cultivo.

Tasa de asimilación neta (TAN)

La TAN es una medida de la eficiencia fotosintética de las hojas; depende del área foliar, de la disposición y edad de las hojas y de los procesos de regulación interna relacionados con la demanda de los asimilados (Hunt, 1982).

La TAN fue más alta en los tratamientos con 59 y 360 mg L⁻¹ de K durante los primeros 20 ddt y después de los 30 ddt (figura 4D), mientras el periodo entre los días 18 y 30 registró un pico para las dosis de 117 y 180 mg L⁻¹. Sin embargo, a partir de ese día la eficiencia fotosintética de las plantas tratadas con 59 y 360 mg L⁻¹ de K resultó superior a la de los otros tratamientos, ya que experimentaron una tasa de incremento de materia seca mayor, pero con un área foliar ligeramente inferior a la de los tratamientos con 117 y 180 mg L⁻¹ de K. Esta respuesta se relaciona con el área foliar existente en los primeros días de cultivo, cuyas hojas están más expuestas a la radiación y son más eficientes en la asimilación de CO₂.

En el desarrollo del cultivo, la TAN disminuye a través del ciclo de producción; a medida que se forma la cabeza, las hojas externas aumentan el sombreado sobre las internas, influyendo en la interceptación de la radiación fotosintéticamente activa en los diferentes estratos del canopi, lo cual afecta las tasas fotosintéticas (Carranza *et al.*, 2009).

Tasa de crecimiento del cultivo (TCC)

Según Carranza *et al.* (2009), la TCC es una medida de la ganancia de biomasa vegetal en el área de superficie ocupada por la planta; es aplicable a plantas que crecen juntas en cultivos cerrados (Hunt, 1982). De nuevo, el tratamiento con 360 mg L⁻¹ de K registró los mayores valores a partir de la mitad del ciclo de cultivo, lo que le permite tener mayor acumulación de materia seca en el momento de la cosecha. El comportamiento de la TCC en las plantas con 59 mg L⁻¹ de K es similar, pero no alcanza los niveles de las tratadas con 360 mg L⁻¹. A diferencia de lo reportado por Carranza *et al.* (2009) y Archila *et al.* (1998), en cuanto a que la TCC se incrementó progresivamente hasta los 35 y 70 ddt, respectivamente, en el presente estudio la mayor acumulación de masa seca por unidad de

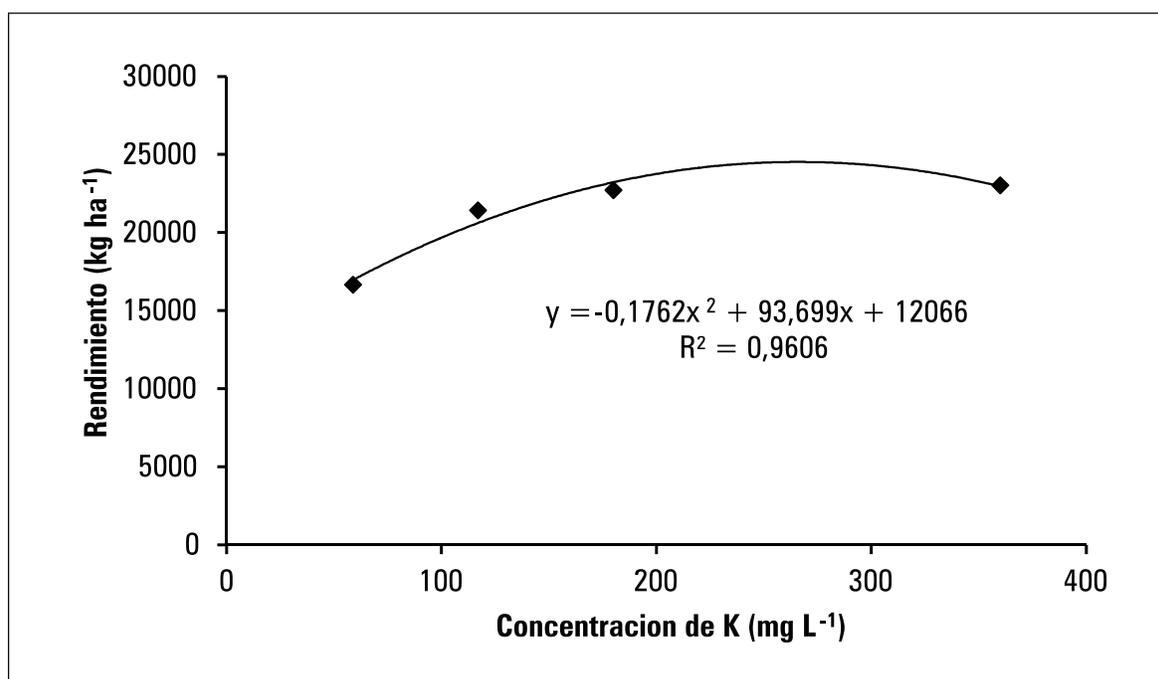


Figura 5. Efecto de diferentes niveles de potasio sobre el rendimiento de plantas de lechuga, var. romana.

área de suelo se dio en las aplicaciones de 0, 117 y 180 mg L⁻¹ de K, y fue cercana a los 25 ddt, y alrededor de los 40 ddt para los tratamientos con 59 y 360 mg L⁻¹ (figura 4E).

Producción

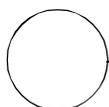
Las plantas sin aplicación de K no lograron completar su ciclo de vida, por tanto, no se registraron datos del rendimiento. Se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos con adición de K; además, el rendimiento se ajustó a una función cuadrática respecto a las dosis de K aplicada, siendo 360 mg L⁻¹ de K la dosis que generó mayor rendimiento (figura 5).

Resultados similares fueron encontrados por Koetz *et al.* (2006), quienes evaluaron cuatro dosis de KCl (100, 150, 200 o 250 kg ha⁻¹) sobre la productividad de lechuga tipo americana cv. Raider; los resultados indicaron que la productividad en función de la dosis de K presentó un modelo de regresión cuadrático, siendo la dosis óptima 198,93 kg ha⁻¹ de KCl; este resultado, junto con el obtenido en la presente investigación, concuerdan en que el K es

indispensable para garantizar una buena producción de lechuga, pues este nutriente garantiza mayor eficiencia en el uso del agua como consecuencia de la regulación estomática, favorece la translocación de carbohidratos, mayor eficiencia enzimática y mejor calidad comercial de la planta (Taiz y Zeiger, 2006; Marschner, 2002; Malavolta *et al.*, 1997).

CONCLUSIONES

La deficiencia absoluta de potasio causó un efecto severo sobre porte, calidad de hojas (necrosis y malformaciones de hojas nuevas) y parámetros de crecimiento de la planta, pues se obtuvieron los valores más bajos de número de hojas, área foliar y peso seco de raíz, hojas y el total; así mismo, los índices de crecimiento fueron sustancialmente más bajos en comparación con los demás tratamientos; además, se obtuvieron los valores más bajos en producción. El tratamiento con 360 mg L⁻¹ de K presentó los mejores resultados en crecimiento y producción, por tanto, es la dosis de K más recomendable para el cultivo de lechuga, var. romana.



AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al ingeniero Milton Galán (Brenntag de Colombia), al ingeniero Carlos Carranza y a los profesores Gerhard Fischer y Diego Miranda la colaboración para el desarrollo de este estudio, y por incentivar esta investigación en la Escuela de Posgrados de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agronet. 2009. Producción nacional por producto – lechuga. En: Análisis-estadísticas. En: <http://www.agronet.gov.co/agronetweb/AnalisisEstadisticas/tabid/73/Default.aspx>.3p.; consulta: diciembre de 2009.

Andriolo, J.L.; D.I. Jänisch; O.J. Schmitt; M. Dal Picio; F.L. Cardoso y L. Erpen. 2010. Doses de potássio e cálcio no crescimento da planta, na produção e na qualidade de frutas do morangueiro em cultivo sem solo. *Ciencia Rural* 40(2), 267-272.

- Archila, J.; U. Contreras; H. Pinzón; H. Laverde y G. Corchuelo. 1998. Análisis de crecimiento de cuatro materiales de lechuga (*Lactuca sativa*). Agron. Colomb. 16(1), 68-75.
- Armengaud, P.; R. Breitling y A. Amtmann. 2004. The potassium dependent transcriptome of *Arabidopsis* reveals a prominent role of jasmonic acid in nutrient signaling. Plant Physiol. 136, 2556-2576.
- Barker, A. y D. Pilbeam. 2007. Handbook of plant nutrition. CRC Press Taylor & Francis Group, New York, NY.
- Barnes, J. D.; T. Pfirrmann; K. Steiner; C. Lütz; U. Busch; H. Küchenhoff y H.D. Payer. 1995. Effects of elevated CO₂, elevated O₃ and potassium deficiency on Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.]: seasonal changes in photosynthesis and nonstructural carbohydrate content. Plant Cell Environ. 18, 1345-1357.
- Bednarz, C. y D. Oosterhuis. 1999. Physiological changes associated with potassium deficiency in cotton. J. Plant Nutr. 22, 303-313.
- Bernal, D.A; L.C. Morales; G. Fischer; J. Cuervo y S. Magnitskiy. 2008. Caracterización de las deficiencias de macronutrientes en plantas de cebollín (*Allium schoenoprasum* L.). Rev. Colomb. Cienc. Hort. 2(2), 192-204.
- Black, C. 1975. Relaciones suelo-planta. Tomo II. Ed. Hemisferio Sur, Buenos Aires.
- Bonilla, I. 2000. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. pp. 103-141. En: Azcón-Bieto, J. y M. Talón (eds.). Fundamentos de fisiología vegetal. McGraw-Hill Interamericana, Madrid.
- Cakmak, I. 2005. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. J. Plant Nutr. Soil Sci. 168, 521-530.
- Cantwell, M. y T. Suslow. 2005. Lechuga: Lechuga romana. Recomendaciones para mantener la calidad postcosecha. Department of Plant Sciences, University of California, Davis, CA.
- Carranza, C.; O. Lancho; D. Miranda y B. Chaves. 2009. Análisis del crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) 'Batavia' cultivada en un suelo salino de la Sabana de Bogotá. Agron. Colomb. 27(1), 41-48.
- Friedrich, G. y M. Fischer. 2000. Physiologische Grundlagen des Obstbaus. Ulmer Verlag, Stuttgart, Alemania.
- Garg, R.C. y S.K. Singh. 1975. Primary nutrient deficiencies in cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). Progressive Hort. 7(2), 53-58.
- Hoagland, D.R. y D.I. Arnon, 1950. The water culture method for growing plants without soil. California Agric. Exp. Stn. Circ. No. 347.
- Hodge A. 2004. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. New Phytologist 162, 9-24.
- Hunt, R. 1982. Plant growth curves. The functional approach to plant growth analysis. Edward Arnold Publ., London.
- Koetz, M.; G. Coelho; C. Da Costa; E. Lima y R. De Souza. 2006. Efeito de doses de potássio e da frequência de irrigação na produção da alface-americana em ambiente protegido. Eng. Agríc. 26(3), 730-737.
- Malavolta, E.; G. C. Vitti y S. Oliveira. 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2a ed. Potafós, Piracicaba, Brasil.
- Marschner, H. 2002. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London.
- Marschner, H. e I. Cakmak. 1989. High light intensity enhances chlorosis and necrosis in leaves of zinc-, potassium- and magnesium-deficient bean (*Phaseolus vulgaris*) plants. J. Plant Physiol. 134, 308-315.
- Martínez, F. y J. Sarmiento. 2008. Estudio de los síntomas de deficiencia de N, P, K, Ca, Mg y B en plantas de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Mengel, K.; E.A. Kirkby; H. Kosegarten y T. Appel. 2001. Principles of plant nutrition. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, The Netherlands.
- Neumann, P. 1997. Salinity resistance and plant growth revisited. Plant Cell Environ. 20, 1193-1198.
- Rajendran, C.; K. Ramamoorthy y S. J. Hepziba. 2009. Nutritional and physiological disorders in crop plants. Scientific Publ., Jodhpur, India.

- Samra, J.S. e Y.K. Arora. 1997. Mineral nutrition. pp. 175-201. En: Litz, R.E. (ed.): The mango: botany, production and uses. CAB International, Wallingford, UK.
- Shin, R. y D.P. Schachtman. 2004. Hydrogen peroxide mediates plant root cell response to nutrient deprivation. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 101, 8827-8832.
- Sivakumar, M. V. R. y R. H. Shaw. 1978. Methods of growth analysis in field growth soybeans *G. max* (Merril). *Ann. Bot.* 42, 213-322.
- Swietlik, D. 2003. Plant nutrition. pp. 251-257. En: Baugher, T.A. y S. Singha (eds.). Concise encyclopedia of temperature tree fruit. Food Product Press, New York, NY.
- Taiz, L. y E. Zeiger. 2006. Plant physiology. 4th ed. Sinauer Associates Inc. Publ., Sunderland, MA.
- Tei, F.; A. Scaife y D. P. Aikman. 1996. Growth of lettuce, onion and red beet. 1. Growth analysis, light interception and radiation use efficiency. *Ann. Bot.* 78, 633-643.
- Zhao, Z.G.; G.C. Chen y C.L. Zhang. 2001. Interaction between reactive oxygen species and nitric oxide in drought-induced abscisic acid synthesis in root tips of wheat seedlings. *Aust. J. Plant Physiol.* 28, 1055-1061.