

PRODUCCIÓN DE LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) CON CINCO PROPORCIONES DE MACRONUTRIENTES EN SOLUCIÓN NUTRITIVA

Alfredo Lara-Herrera¹, Rodolfo de la Rosa-Rodriguez² y Libia Iris Trejo-Téllez³

RESUMEN

Mediante el uso de la hidroponía es posible aumentar el aprovechamiento de los nutrientes por los cultivos; sin embargo, el balance de la solución nutritiva (SN) debe ser adecuado, o de lo contrario, se puede afectar negativamente la respuesta de la planta. El objetivo del estudio fue evaluar, durante tres etapas, el crecimiento de plantas de lechuga en hidroponía, usando macronutrientes (NO_3^- , H_2PO_4^- , SO_4^{2-} y K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) en las siguientes cinco proporciones: 60:5:35 y 35:45:20 (SN-1, Steiner-testigo); 80:2,5:17,5 y 35:45:20 (SN-2); 40:7,5:52,5 y 35:45:20 (SN-3); 60:5:35 y 43,7:38,9:17,3 (SN-4); y 60:5:35 y 20:55,4:24,6 (SN-5). El ensayo se condujo en un diseño de bloques al azar con seis repeticiones. Se determinó el índice de clorofila (IC), área foliar (AF) y peso fresco de la planta (PF), así como peso seco de hojas (PSH), cogollo (PSC) y raíz (PSR). La SN-2 superó en las tres etapas a otros tratamientos propuestos en las variables de PF, AF e IC, y en determinadas etapas superó al tratamiento testigo. En las variables de peso seco, sólo hubo diferencias en la etapa final para PSH y PSR en la que la SN-2 superó a otras SN propuestas, pero no se diferenció de la SN de Steiner (testigo). El tratamiento con alta proporción de nitrato (SN-2) superó al resto de los tratamientos en diferentes variables, así como eventualmente a la SN de Steiner, por lo que se debería considerar en futuras evaluaciones de soluciones nutritivas para cultivos de hoja.

Palabras clave adicionales: Balance de nutrientes, relación de aniones, relación de cationes, sistema hidropónico cerrado

ABSTRACT

Lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth and yield under five proportions of macronutrients in nutrient solution

By using hydroponics makes possible to increase the use of nutrients by crops; however, the balance of the nutrient solution (NS) must be adequate, otherwise the plant response may be negatively affected. The objective of this research was to determine during three stages the growth of lettuce plants under hydroponics, using macronutrients (NO_3^- , H_2PO_4^- , SO_4^{2-} and K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) in the following five respective proportions: 60:5:35 and 35:45:20 (NS-1-control), 80:2.5:17.5 and 35:45:20 (NS-2), 40:7.5:52.5 and 35:45:20 (NS-3), 60:5:35 and 43.7: 38.9:17.3 (NS-4) and 60:5:35 and 20:55.4:24.6 (NS-5). The trial was conducted in a randomized block design with six replicates. The chlorophyll index (CI), foliar area (FA) and plant fresh weight (PF), as well as dry weight of leaves (LDW), bud (BDW) and root (RDW) were determined. The NS-2 showed to be superior than other proposed treatments in the three stages in the variables of FP, FA and IC, and in certain stages it was superior to the control treatment. In the dry weight variables, there were only differences in the final stage for LDW and RDW in which NS-2 outperformed other proposed NS, although did not differ from Steiner's NS (control). The treatment with a high proportion of nitrate (NS-2) outperformed the rest of the treatments in different variables, as well as eventually Steiner's NS, so it should be considered in future evaluations of nutrient solutions for leafy crops.

Additional keywords: Closed hydroponic system, mutual anion ratio, mutual cation ratio, nutrient balance

INTRODUCCIÓN

El cultivo en invernadero permite tener condiciones ambientales favorables para que los cultivos tengan mejor desarrollo. Y mediante el uso de la técnica de hidroponía se puede producir lechuga, una de las hortalizas mayormente cultivadas en el mundo, con una eficiencia superior al 50 % en solución nutritiva (SN) con respecto a un sistema convencional en suelo (Gruda, 2019). Los sistemas hidropónicos

cerrados tienen ventajas importantes porque reutilizan la SN (agua y nutrientes) y disminuye la cantidad de SN utilizada durante el proceso de producción (Son et al., 2020). En los sistemas hidropónicos, las relaciones dentro de los aniones, dentro de los cationes y entre aniones y cationes son muy importantes, ya que si no se tiene cuidado en su manejo se pueden producir efectos negativos en las plantas; por ejemplo, con desbalances en la SN diversos iones pueden

Recibido: Julio 3, 2022

Aceptado: Marzo 10, 2023

¹ Unidad Académica de Agronomía, Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ), C.P. 98170, Zacatecas, Zacatecas, México. e-mail: alara204@hotmail.com.

² Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ), C.P. 98000 Zacatecas, México. e-mail: rodox116@hotmail.com (autor de correspondencia)

³ Colegio de Postgraduados (CP), Campus Montecillo, Texcoco, México. e-mail: tlibia@colpos.mx

ocasionar antagonismos en la nutrición mineral (Parra, 2016; Mitra, 2017; Combrink y Kempen, 2019). El balance adecuado en las relaciones entre macronutrientes es fundamental para tener mayor eficiencia en la absorción de los mismos y así mejor producción. Una mayor concentración de nitrógeno puede promover mayor crecimiento vegetal; sin embargo, es necesario tener un adecuado balance con los demás aniones y cationes para obtener la mejor respuesta de la planta, ya que al manejar una proporción N/K baja se generan mayores concentraciones de K en la SN y puede ocasionar deficiencia de calcio (Kavvadias et al., 2012).

Son escasos los estudios referentes a las relaciones iónicas en la SN y en específico, en sistemas hidropónicos cerrados, porque es difícil mantener un equilibrio iónico, debido a que las concentraciones de los nutrientes no son constantes y es complejo mantenerlas estables (Langenfeld et al., 2022). Por esta razón, el objetivo de esta investigación fue determinar el crecimiento y rendimiento de plantas de lechuga desarrolladas en cinco proporciones de macronutrientes en SN en un sistema hidropónico cerrado tipo raíz flotante (RF).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental. El trabajo se desarrolló en las estaciones de verano a otoño, del 2 de septiembre al 31 de octubre del año 2021, en una nave de invernadero de tipo túnel de 200 m², con sistema de control de temperatura y humedad relativa mediante la renovación del aire caliente y seco por aire fresco y húmedo, donde se estableció el sistema hidropónico cerrado RF. El invernadero se ubica en Zacatecas, México, en las coordenadas 22°43'42" de latitud norte y 102°40'58" de longitud oeste, y a una altitud de 2236 m.

Etapas de crecimiento de la planta. Se efectuaron tres ensayos en las siguientes tres etapas del cultivo: la primera (etapa 1) correspondió a los 20 días después del trasplante (ddt), durante la formación de roseta; la intermedia (etapa 2), correspondió de los 21 a los 40 ddt, en el comienzo de la formación de la cabeza, y la final (etapa 3) de los 41 a los 60 ddt, que correspondió con la culminación de la fase de formación de cabeza, en el ciclo de variedades precoces donde el ciclo de la planta fue de 70 ddt (Hernández y Hernández, 2005). El máximo crecimiento para variedades

precoces en sistema hidropónico se presenta entre 55 a 60 días, evitándose la llegada de la etapa de floración, que es cuando se pierde calidad comercial (Sánchez et al., 2015).

Tratamientos experimentales. En su SN, Steiner (1968; 1984) manejó la proporción de 60:5:35 en aniones y 35:45:20 en cationes, tratando de mantener el equilibrio para lograr la mejor respuesta potencial de la planta; sin embargo, no es la única proporción que puede manejarse en una SN. Proporciones distintas a la propuesta por él podrían ser diseñadas bajo condiciones particulares, siempre y cuando se consideren límites biológicos (características de las plantas) y límites químicos (precipitación de iones) para así obtener la mejor respuesta potencial del cultivo. Por esta razón, se establecieron como tratamientos, además de la SN de Steiner, otras cuatro proporciones distintas de macronutrientes en la SN, para constituir un total de cinco tratamientos aplicados en un sistema cerrado RF. El porcentaje establecido en cada tratamiento fue logrado aplicando los moles de carga (mol_c m⁻³) necesarios en cada anión y catión, disminuyendo la concentración iónica para obtener una conductividad eléctrica adecuada para el cultivo de lechuga, pero manteniendo la proporción de Steiner, según Baca et al. (2016) (Cuadro 1). En todos los tratamientos se manejó el mismo potencial osmótico (-0,0547 MPa).

El agua utilizada para la preparación de la SN fue sometida a un tratamiento de desionización por osmosis inversa (Purikor mod. PKRO100-6UVPM). Los nutrientes persistentes en el agua fueron tomados en cuenta para preparar las SN de los tratamientos ensayados.

Material vegetal y sistema de producción. Se utilizó la variedad "Toscana", que es un tipo de lechuga vigorosa, de color oscuro, cabezas redondas, muy tolerante al manchado o quemadura apical. Además, es muy estable frente a condiciones meteorológicas cambiantes por ser un tipo que forma "repollo" (León et al., 2022). La semilla fue sembrada en bandejas de poliestireno de 297 cavidades con sustrato turba y fueron regadas hasta transcurridos 28 d después de la siembra. Posteriormente, las plantas fueron retiradas de la bandeja, se lavó la raíz para eliminar el sustrato y se sumergió en agua estéril y baja en sales durante 5 d para la adaptación de la planta al nuevo medio.

Cuadro 1. Soluciones nutritivas con base en la concentración iónica ($\text{mol}_c \text{ m}^{-3}$), porcentaje equivalente de macronutrientes (en el paréntesis) para una CE de $1,5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ y potencial osmótico de $-0,0547 \text{ MPa}$

Solución	Proporción	NO_3^-	H_2PO_4^-	SO_4^{2-}	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
Establecida por Steiner (1968; 1984)	1	9,000 (60)	0,750 (5)	5,250 (35)	5,250 (35)	6,750 (45)	3,000 (20)
	2	11,338 (80)	0,354 (2,5)	2,479 (17,5)	4,960 (35)	6,378 (45)	2,834 (20)
Evaluadas en este trabajo	3	6,371 (40)	1,194 (7,5)	8,362 (52,5)	5,574 (35)	7,167 (45)	3,185 (20)
	4	8,744 (60)	0,728 (5)	5,100 (35)	6,375 (43,7)	5,675 (38,9)	2,522 (17,3)
	5	9,473 (60)	0,789 (5)	5,526 (35)	3,158 (20)	8,743 (55,3)	3,886 (24,6)

Manejo de la solución nutritiva durante el experimento. Además de los macronutrientes que correspondieron a los tratamientos ensayados en las SN, se mantuvo la concentración de micronutrientes de manera uniforme con valores de 2,25, 1,11, 0,18, 0,09, 0,21 y 0,06 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) para Fe, Mn, Zn, Cu, B y Mo, respectivamente. Diariamente, en la SN se determinó la CE y el pH, previo a la reposición del agua consumida en el día anterior. El agua que se repuso fue la necesaria para reestablecer el volumen original, y el pH se ajustó mediante la aplicación de la cantidad necesaria de ácido sulfúrico, con el fin de mantener valores adecuados para la planta (CE de 1.5 dS m^{-1} y pH de 5.5) en sus diferentes etapas de desarrollo (Valenzuela et al., 2014; Preciado et al., 2021).

Las fuentes de fertilizantes que se emplearon para aportar los macronutrientes en la SN fueron $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , K_2SO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, KH_2PO_4 y H_2SO_4 . Para el caso de los micronutrientes se utilizó una mezcla comercial con las proporciones ya mencionadas.

Peso fresco de planta. Esta variable se determinó al momento de cosechar las plantas en cada etapa fenológica. Para ello se pesó una planta de lechuga (parte aérea) de cada repetición en una balanza con precisión de 0,01 g (Kern, modelo AES 200-4N).

Clorofila. El índice de clorofila se determinó en las plantas en el momento inmediato antes de la cosecha. Para ello, se utilizó un instrumento SPAD Minolta, mod. 502, en una hoja exterior (madura).

Área foliar. Para esta variable se determinó la medida de la superficie de las hojas (en una planta

de cada repetición), mediante planimetría, usando un equipo de análisis por escaneo y procesamiento digital de imágenes (Sauceda et al., 2017).

Peso seco de hoja (PSH), cogollo (PSC) y raíz (PSR). Se determinó el peso seco de los tres órganos (hojas, cogollo y raíz) de una planta por cada repetición. Se separaron estos órganos y se secaron en un horno (Thermo Fisher Scientific 51028118) a $68 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, para después determinar el peso seco de cada uno de ellos en la balanza digital con precisión de 0,01 g.

Diseño experimental y análisis estadístico. Se utilizó un diseño experimental en bloques completos al azar, con cinco tratamientos y seis repeticiones para 30 unidades experimentales, con una planta en cada contenedor y en cada etapa, para un total de 90 plantas en las tres etapas consideradas. Cada tratamiento recibió la SN con las características deseadas (proporción iónica) en un volumen de 19 L. De esta manera se pudieron realizar las mediciones correspondientes en cada etapa de desarrollo, las cuales estuvieron representadas por determinaciones destructivas.

Los resultados fueron comparados mediante un análisis de varianza y prueba de Tukey empleando el programa SAS v.9.4 (Cary, NC, USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Peso fresco (PF), área foliar (AF) e índice de clorofila (IC). Al considerar la solución de Steiner (tratamiento 1 - testigo) como la proporción de macronutrientes de referencia, en general, en las tres etapas de desarrollo las plantas presentaron mayor PF, AF e IC cuando existió alta proporción

de nitratos en la SN (tratamiento 2) respecto a la proporción baja (tratamiento 3) (Cuadro 2). La respuesta positiva de la planta en estas variables podría atribuirse al efecto favorable que produce el N-NO_3^- sobre la tasa de fotosíntesis y la conductancia estomática de CO_2 , entre otros procesos, con los que se aumenta el crecimiento de los tejidos en el cultivo de lechuga (Chowdhury y Das, 2015; Urlicé et al., 2017). Resultados similares fueron encontrados por Petropoulos et al. (2016) en un cultivo de lechuga hidropónica donde las concentraciones de nitrógeno, fósforo, potasio y calcio fueron variadas, y se observó que el aumento en la aplicación de nitrógeno de 100 a 200 mg L^{-1} resultó en un incremento de más del 100 % en el peso fresco de la planta.

Las tres etapas del cultivo tuvieron comportamiento similar respecto al AF. El efecto de las proporciones que se establecieron mostraron el mismo orden de valores, y al pasar de la etapa 1 a la 2 se incrementó el AF, llegando a alcanzar hasta 238 % en el tratamiento con alta proporción de nitrato en la SN (tratamiento 2), pero en la etapa 3 el AF fue menor en todos los tratamientos con un 18.3 % (tratamiento 1) hasta 45.9 % cuando se disminuyó la proporción del nitrato en la solución (tratamiento 3). Sin embargo, esas variables pueden afectar de diferentes maneras al cultivo, dependiendo de la forma en que se combinen (Salusso et al., 2017). La proporción alta en nitrato, superior a la SN de Steiner, correspondió a un mayor AF, principalmente en la etapa 2 (Cuadro 2).

Con relación al IC, es conocido que el nitrógeno es un nutriente básico para la formación de clorofila (Rambo et al., 2010; Lin et al., 2013). La mayor proporción de N-NO_3^- en la SN favorece la síntesis de clorofila en la planta ya que este nutriente, junto al magnesio, son constituyentes esenciales de la molécula del pigmento, y por consecuencia aumenta el IC (unidades SPAD) (Konstantopoulou et al., 2012; Limantara et al., 2015). Mahlangu et al. (2016) hallaron una relación positiva entre el contenido de N y la concentración de clorofila en la lechuga. En la SN con bajo contenido de nitratos (tratamiento 3) se hallaron los valores más bajos de IC (especialmente en las etapas 2 y 3), lo que coincide con los resultados de Fraile et al. (2017). Por su parte, la SN con bajo contenido de potasio (tratamiento 5) también promovió una

disminución del IC, particularmente en la etapa 3, lo que se asocia con una disminución del proceso fotosintético (Jin et al., 2011; Wang et al., 2012). Zhang et al. (2017) encontraron que al disminuir la concentración de K^+ a sólo 1 $\text{mol}_c \cdot \text{m}^{-3}$ en la SN hubo una disminución significativa del IC en diferentes variedades de lechuga hidropónica.

Todos los tratamientos ensayados mostraron una similitud en su comportamiento en el IC entre etapas debido a que, el valor más bajo se obtuvo en la etapa inicial del cultivo y el mayor en la final en todos los tratamientos. Con un aumento promedio cercano al 100 %, la mayor síntesis de clorofila se llevó a cabo de la segunda a la tercera etapa (Cuadro 2).

Peso seco de hojas (PSH) y peso seco de raíz (PSR). En las dos primeras etapas del cultivo no hubo efectos en PSH y PSR al modificar las proporciones de nitrato y potasio en la SN (Cuadro 3). Sin embargo, sí hubo efecto en la etapa final del cultivo para el peso seco de hojas y raíces, ya que la proporción alta de nitrato (tratamiento 2) promovió los mayores valores con respecto a los tratamientos con baja proporción de nitrato y alta de K (tratamientos 3 y 4). Este comportamiento puede atribuirse a que la elevada dosis de N-NO_3^- habría propiciado aumento del número de hojas (Macías et al., 2010; Urlicé et al., 2017; Sapkota et al., 2019); además, el nitrógeno estimula la fotosíntesis y favorece el crecimiento vegetativo por lo cual aumentaría el peso seco de las hojas (Britto y Kronzucker, 2002; Sánchez, 2010). Asimismo, debido a este crecimiento de la planta, las raíces incrementarían la absorción de agua y nutrientes (Kataria y Guruprasad, 2012; Rojas et al., 2013; Urlicé et al., 2017). Por su parte, los resultados indican que el tratamiento con alta proporción de nitrato (tratamiento 2) no representó un exceso de N, debido a que su relación PSH/PSR no fue mayor que en los demás tratamientos (Cuadro 3), lo cual tiene similitud con lo reportado por Linker y Johnson (2005) y Stefanelli et al. (2012).

También se destaca que al aumentar la proporción de potasio en el tratamiento 4 (con menor proporción de Ca y Mg) se produjo una disminución del PSH, probablemente debido a que el posible desbalance entre los macronutrientes puede tener como efecto negativo la disminución en alguna variable de rendimiento (Sapkota et al., 2019).

Cuadro 2. Peso fresco (PF), índice de clorofila (IC) y área foliar (AF) de plantas de lechuga en tres etapas de desarrollo, por efecto de diferentes proporciones entre iones de macronutrientes en la solución nutritiva (SN)

Etapa	Tratamiento	PF (g·planta ⁻¹)	AF (cm ² ·planta ⁻¹)	IC (SPAD)
1 0 a 20 ddt (formación de la roseta)	1	691,83 ab	2710,70 ab	14,71 c
	2	811,50 a	2967,00 a	20,18 a
	3	591,17 ab	2201,70 ab	15,13 bc
	4	490,33 b	1426,80 b	18,67 a
	5	639,33 ab	1637,90 ab	15,93 b
	DSH	275,48	1397,40	3,52
2 21 a 40 ddt (inicio de formación de la cabeza)	1	860,17 ab	8353,70 b	22,60 ab
	2	1004,83 a	10034,30 a	29,12 a
	3	779,50 b	7819,70 b	20,68 b
	4	887,50 ab	8076,00 b	24,85 ab
	5	806,17 ab	8511,50 ab	21,28 b
	DSH	201,63	1606,20	6,65
3 41 a 60 ddt (culminación de formación de la cabeza)	1	1002,20 ab	6816,90 a	44,77 b
	2	1114,20 a	7077,70 a	52,28 a
	3	644,70 b	4223,10 b	35,00 c
	4	762,50 ab	4842,10 ab	51,93 a
	5	789,30 ab	5537,50 ab	45,16 b
	DSH	387,92	2497,60	6,53

Medias con letras distintas en cada variable y etapa indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$). DSH=Diferencia significativa honesta. Proporción de macronutrientes en cada tratamiento de acuerdo con el Cuadro 1

Para la variable PSH, este tratamiento mostró una tendencia irregular debido a que presentó su mayor valor en la etapa intermedia, con 7.5 % mayor con respecto a la etapa final. De manera general, se observó que la mayor acumulación de peso seco de las hojas ocurrió en la etapa 2 ya que el incremento promedio de todos los tratamientos fue 5,7 veces mayor que el de la etapa 1, mientras que el de la etapa 3 fue sólo de 1,2 veces superior al de la etapa 2.

Con relación al PSR, el promedio para todas las proporciones de nutrientes ensayadas mostró que esta variable tuvo un comportamiento similar al PSH ya que presentó su mayor incremento al pasar de la etapa 1 a la etapa 2, observándose en esta etapa el mayor crecimiento del peso seco de

la raíz en la SN con la mayor proporción de nitratos (tratamiento 2), mientras que con la mayor proporción de K^+ (tratamiento 4) se obtuvo el menor valor del PSR.

Peso seco de cogollo (PSC). Esta variable no fue sensible a los cambios de las proporciones ensayadas entre los macronutrientes, en las tres etapas de cultivo (Cuadro 3); sin embargo, sí fue notorio, en conjunto, un incremento al avanzar las etapas de desarrollo del cultivo, en las que el mayor aumento se presentó en la etapa final.

En el ensayo, la SN con alta proporción de nitrato superó al resto de los tratamientos, así como eventualmente a la SN de Steiner, lo cual sugiere que debería ser tomada en cuenta para futuras evaluaciones.

Cuadro 3. Peso seco de hojas (PSH), peso seco de cogollo (PSC), peso seco de raíz (PSR) y relación PSH/PSR de lechuga desarrollada en soluciones nutritivas con diferentes proporciones de macronutrientes en tres etapas del cultivo

Etapa	Tratamiento	PSH	PSC	PSR	Relación
		g.planta ⁻¹			PSH/PSR
1	1	8,02 a	0,36 a	1,36 a	5,88 a
	2	5,55 a	0,27 a	1,02 a	5,34 a
	3	7,20 a	0,21 a	0,78 a	12,43 a
	4	4,92 a	0,18 a	0,71 a	11,38 a
	5	4,74 a	0,25 a	0,78 a	8,52 a
	DSH	4,13	0,31	0,70	12,52
2	1	29,47 a	2,62 a	4,07 a	5,84 b
	2	40,10 a	3,17 a	4,71 a	8,54 ab
	3	33,62 a	2,99 a	3,78 a	8,89 ab
	4	38,19 a	3,31 a	3,89 a	10,05 a
	5	32,18 a	2,63 a	4,09 a	8,30 ab
	DSH	15,11	0,88	1,58	3,92
3	1	51,00 ab	8,45 a	8,03 ab	6,38 a
	2	58,27 a	14,26 a	11,25 a	5,44 a
	3	36,01 b	9,72 a	6,34 b	6,75 a
	4	35,30 b	6,20 a	4,80 b	8,89 a
	5	38,66 ab	5,68 a	5,38 b	8,49 a
	DSH	21,53	8,83	4,83	3,90

Medias con letras distintas en cada variable y etapa indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$). DSH=Diferencia significativa honesta. Proporción de macronutrientes en cada tratamiento de acuerdo con el Cuadro 1

CONCLUSIONES

Una alta proporción de nitrato en la solución nutritiva con relación a la solución de Steiner incrementó de forma significativa el índice de clorofila y el área foliar en algunas de las etapas de crecimiento del cultivo de lechuga. Este tratamiento también superó en peso fresco de la planta, área foliar, índice de clorofila, y peso seco de hojas y raíz en los tratamientos con baja proporción de nitratos o elevada de potasio, particularmente en la etapa final del crecimiento del cultivo.

El hecho de que el tratamiento con la proporción alta de nitrato haya superado al resto de las combinaciones de macronutrientes, así como haber superado ocasionalmente a la solución

de Steiner en dos de las variables, sugiere que este tratamiento debería ser considerado para futuras evaluaciones de soluciones nutritivas, especialmente en cultivos de hojas.

LITERATURA CITADA

1. Baca-Castillo, G.A.J., C.E. Rodríguez y N.A. Quevedo. 2016. La Solución Nutritiva en Hidroponía. 1 ed. México DF. 197 p.
2. Britto, D.T. y H.J. Kronzucker. 2002. NH_4^+ toxicity in higher plants: a critical review. *Journal of Plant Physiology* 1(59): 567-584.
3. Chowdhury, A. y A. Das. 2015. Nitrate accumulation and vegetable quality. *International Journal of Science and Research* 4(3): 1668-1672.

4. Combrink, N.J.J. y E. Kempen. 2019. Nutrient solution management. Department of Agronomy Stellenbosch University. Stellenbosch, South Africa. 77p.
5. Fraile-Robayo, R.D., J.G. Álvarez-Herrera., M. Reyes., A. Johana., O.F. Álvarez-Herrera y A.L. Fraile-Robayo. 2017. Evaluation of the growth and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a closed recirculating hydroponic system. *Agronomía Colombiana* 35(2): 216–222.
6. Gruda, N.S. 2019. Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy* 9(6): 1-24.
7. Hernández, C.J. y J.L. Hernández. 2005. Valoración productiva de lechuga hidropónica con la técnica de película de nutrientes (nft). *Naturaleza y Desarrollo* 3(1): 11-16.
8. Jin, S. H., J. Q. Huang, X. Q. Li, B. S. Zheng, J. S. Wu, Z. J. Wang y M. Chen. 2011. Effects of potassium supply on limitations of photosynthesis by mesophyll diffusion conductance in *Carya cathayensis*. *Tree Physiology* 31(1): 1142–1151.
9. Kataria, S. y K. N. Guruprasad. 2012. Intraspecific variations in growth, yield and photosynthesis of sorghum varieties to ambient UV (280-400 nm) radiation. *Plant Science* 196(1): 85-92.
10. Kavvadias, V., C. Paschalidis, G. Akrivos, y D. Petropoulos. 2012. Nitrogen and potassium fertilization responses of potato (*Solanum tuberosum*) cv. Spunta. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 43(1-2): 176-189.
11. Konstantopoulou, E., G. Kaptis, G. Salachas, S.A. Petropoulos, E. Chatzieustratiou, I.C. Karapanos y H.C. Passam. 2012. Effect of nitrogen application on growth parameters, yield and leaf nitrate content of greenhouse lettuce cultivated during three seasons. *Journal of Plant Nutrition* 35(8): 1246-1254.
12. Langenfeld, N. J., D. F. Pinto, J. E. Faust, R. Heins y B. Bugbee. 2022. Principles of nutrient and water management for indoor agriculture. *Sustainability* 14(16): 1-25.
13. León-Pachecho, R. I., J. E. Jaramillo-Noreña, M. L. Montes-Pérez, A. R. Orozco-Guerrero, F. F. Carrascal-Pérez, E. A. V. Munar y A. O. Rodríguez-Roa. 2022. Evaluación agronómica y fisiológica de cinco cultivares de lechuga bajo dos sistemas de agricultura protegida en el departamento de Magdalena, Colombia. *Avances en Investigación Agropecuaria* 26(1): 79-93.
14. Limantara, L., M. Dettling, R. Indrawati y T. H. P. Brotosudarmo. 2015. Analysis on the chlorophyll content of commercial green leafy vegetables. *Procedia Chemistry* 14(1): 225-231.
15. Lin, K.H., M.Y. Huang, W.D. Huang, M.H. Hsu, Z.W. Yang y C.M. Yang. 2013. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata). *Scientia Horticulturae* 150(1): 86-91.
16. Linker, R. y C. Johnson-Rutzke. 2005. Modeling the effect of abrupt changes in nitrogen availability on lettuce growth, root-shoot partitioning and nitrate concentration. *Agricultural Systems* 86(2): 166-189.
17. Macías, A. F., R. M. Franco, A. G. Spínola, M. H. Mendoza y G. R. Espinoza. 2010. Estudio sobre el requerimiento interno de nitrógeno en lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Sociedades Rurales Producción y Medio Ambiente* 10: 83-100.
18. Mahlangu, R. I. S., M. M. Maboko, D. Sivakumar, P. Soundy, J. Jifon. 2016. Lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, yield and quality response to nitrogen fertilization in a non-circulating hydroponic system. *Journal Plant Nutrition*, 39: 1766–1775.
19. Mitra, G. 2017. Essential plant nutrients and recent concepts about their uptake. In: M. Naeem, Abid A. Ansari, Sarvajeet Singh Gill (eds.). *Essential Plant Nutrient*. Springer. Cham, Suiza. pp: 3-39.
20. Parra-Terraza, S. 2016. Relaciones NO_3^- /aniones y K^+ /cationes en la solución nutritiva para el crecimiento de plántulas de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(7): 1527-1538.

21. Petropoulos, S.A., E. Chatzieustratiou, E. Constantopoulou y S.G. Kaptis. 2016. Yield and quality of lettuce and rocket grown in floating culture system. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 44(2): 603-612.
22. Preciado-Rangel, P., E.O. Rueda-Puente, L.A. Valdez-Aguilar, J.J Reyes-Pérez, M.A. Gallegos-Robles y B. Murillo-Amador. 2021. Conductividad eléctrica de la solución nutritiva y su efecto en compuestos bioactivos y rendimiento de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24(5): 1-12.
23. Rambo, L., B.L. Ma, Y. Xiong y P. Regis Ferreira da Silvia. 2010. Leaf and canopy optical characteristics as crop-N-status indicators for field nitrogen management in corn. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 173(3): 434-443.
24. Rojas-Velázquez, A.N., L.A. Valdez-Aguilar, L.M. Ruiz-Posadas, M. Sandoval-Villa y V. Bertolini. 2013. Respuestas de *Antirrhinum majus* (L.) para flor de corte al potencial osmótico de la solución nutritiva en dos estaciones de crecimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4(8): 1151-1160.
25. Salusso, F.A., J.O. Plevich, A.R.S. Delgado, D.F. Ramos y L.E. Grosso. 2017. Efectos del uso de manta térmica sobre variables ambientales y rendimiento de un cultivo de lechuga. *Revista Engenharia na Agricultura* 25(1): 74-82.
26. Sánchez, T.M. 2010. Evaluación de la calidad de lechuga (*Lactuca sativa* L.) respecto a su contenido de nitratos y su materia seca. *Semiárida* 21(1): 29-36.
27. Sánchez-Alegría, A., M.P. Patricio, J.L.C. Anzueto, F.G. Miceli, A.A. González y S.V. Trujillo. 2015. Análisis del porcentaje de crecimiento en plantaciones de lechuga hidropónica para detectar la falta de nutrimentos por medio de imágenes digitales. *Academia Journals* 11(12): 2144-2149.
28. Sapkota, S., S. Sapkota y Z. Liu. 2019. Effects of nutrient composition and lettuce cultivar on crop production in hydroponic culture. *Horticulturae* 5(4): 1-8.
29. Saucedo-Acosta, C.P., V.A. González-Hernández, B.H. Sánchez-Soto, R.H. Saucedo-Acosta, H.M. Ramírez-Tobías y J.G. Quintana-Quiroz. 2017. MACF-IJ. Método automatizado para medir color y área foliar mediante imágenes digitales. *Agrociencia* 51: 409-423.
30. Son, J.E., H.J. Kim y T.I. Ahn. 2020. Hydroponic systems. In: Toyoki Kozai, Genhua Niu, Michiko Takagaki (eds.). *Plant factory*. Academic Press. Seoul, Korea. pp: 273-283.
31. Stefanelli, D., S. Brady, S. Winkler, R. B. Jones, y B. T. Tomkins. 2012. Lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth and quality response to applied nitrogen under hydroponic conditions. *Acta Horticulturae* 353-359.
32. Steiner, A.A. 1968. Soilless culture. *Proceedings of the International Potash Institute. 6th Colloquium IPI. Florence, Italy.* pp. 324-341.
33. Steiner, A.A. 1984. The universal nutrient solution. *Proceedings of the 6th Congress of the International Society for Soilless Culture. ISOSC, Wageningen, The Netherlands.* pp. 633-650.
34. Urlić, B., M.J. Špika, C. Becker, H.P. Kläring, A. Krumbein, S.G. Ban y D. Schwarz. 2017. Effect of NO₃⁻ and NH₄⁺ concentrations in nutrient solution on yield and nitrate concentration in seasonally grown leaf lettuce. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B- Soil and Plant Science* 67(8): 748-757.
35. Valenzuela-López, M., L. Partida-Ruvalcaba, T. Díaz-Valdés, T.D.J. Velázquez-Alcaraz., G. Bojórquez-Bojórquez y T. Enciso-Osuna. 2014. Respuesta del tomate cultivado en hidroponía con soluciones nutritivas en sustrato humus de lombriz-fibra de coco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5(5): 807-818.
36. Wang, N., H. Hua, A. E. Eneji, Z. Li, L. Duan y X. Tian. 2012. Genotypic variations in photosynthetic and physiological adjustment to potassium deficiency in cotton (*Gossypium hirsutum*). *Journal of*

- Photochemistry and Photobiology B: Biology 110: 1- 8.
37. Zhang, G., M. Johkan., M. Hohjo., S. Tsukagoshi y T. Maruo. 2017. Plant growth and photosynthesis response to low potassium conditions in three lettuce (*Lactuca sativa* L) types. The Horticulture Journal 86(2): 229-237.

