

Interacción entre calcio y boro en el crecimiento y contenido mineral de plantas de pimiento morrón

Boron-calcium interaction in the growth and mineral content of sweet pepper plants

Tomás Moreno-Gómez¹,
Armando Hernández-
Pérez^{1*},
Alberto Sandoval-Rangel¹,
Valentín Robledo-Torres¹,
Rosalinda Mendoza-
Villarreal¹,
José Antonio González-
Fuentes¹

¹Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro, CP. 25315. Buenavista, Saltillo Coahuila México.

*Autor de correspondencia:
hernandez865@hotmail.com

Artículo científico

Recibido: 21 de enero 2021

Aceptado: 25 de agosto 2021

Como citar: Moreno-Gómez T, Hernández-Pérez A, Sandoval-Rangel A, Robledo-Torres V, Mendoza-Villarreal R, González-Fuentes JA (2021) Interacción entre calcio y boro en el crecimiento y contenido mineral de plantas de pimiento morrón. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 8(3): e2813. DOI: 10.19136/era.a8n3.2813

RESUMEN. La toxicidad de B es una restricción ambiental que limita la productividad de los cultivos. El objetivo de esta investigación fue determinar la influencia de Ca en plantas de pimiento irrigadas con altas concentraciones de B. Los tratamientos evaluados fueron cinco concentraciones de B (0.5, 1.5, 3, 4.5 y 6 ppm) y tres concentraciones de Ca (7, 9 y 11 meq L⁻¹). La fotosíntesis, altura de planta, peso seco de raíz y total decreció al aumentar la concentración de B en la solución nutritiva; pero el efecto negativo del B fue menor cuando se incrementó la concentración de Ca en la solución nutritiva. La longitud de raíz fue afectada por concentraciones altas de B, pero no se observó el efecto positivo del incremento de Ca. Asimismo, el contenido total de N, P, K, Ca y Mg en las plantas de pimiento decreció al aumentar la concentración de B; sin embargo, a excepción de Mg, este detrimento fue menor al incrementar la concentración de Ca a 9 y 11 meq L⁻¹. El contenido total de B en las plantas de pimiento decreció al aumentar la concentración de B, pero cuando la concentración de Ca en la solución fue mayor a 7 meq L⁻¹ el contenido total de B presentó una disminución más pronunciado. Por lo tanto, al incrementar la concentración de Ca en la solución nutritiva se puede mejorar el crecimiento y absorción de nutrientes de las plantas de pimiento en condiciones de exceso de B.

Palabras clave: Absorción; biomasa; fotosíntesis; mensajero secundario; toxicidad.

ABSTRACT. Boron (B) toxicity is an environmental restriction limiting crop productivity. The goal of this research work was to determine the influence of Calcium (Ca) in sweet pepper plants irrigated with high B concentrations. The assessed treatments included five B concentrations (0.5, 1.5, 3.0, 4.5 and 6.0 ppm) and three Ca concentrations (7, 9 and 11 meq L⁻¹). Photosynthesis, plant height, root dry weight and total dry weight decreased as B concentration increased in the nutrient solution; however, B negative effect was lower as Ca concentration increased in the nutrient solution. High B concentrations affected root length and Ca increase did not show any positive effect. Furthermore, total N, P, K, Ca and Mg contents in sweet pepper plants decreased when B concentration increased; however, except for Mg, these decreases were lower when Ca concentration increased at nine (9) and eleven (11) meq L⁻¹. Total B content in plants decreased when the concentration of this micronutrient increased in the solution; however, when Ca rate in the solution was higher than seven (7) meq L⁻¹, B content experienced a sharper drop. Therefore, under B excess conditions, the growth and nutrient uptake of sweet pepper plants can improve by increasing Ca concentration in the nutrient solution.

Key words: Uptake; biomass; photosynthesis; secondary messenger; toxicity.

INTRODUCCIÓN

Los micronutrientes son esenciales para el crecimiento y desarrollo normal de las plantas a pesar de la baja concentración en comparación con los macronutrientes. El rango dinámico de concentraciones internas óptimas de micronutrientes en las plantas requiere una regulación estricta para que sus requisitos se cumplan en diferentes condiciones ambientales (Castro *et al.* 2018). El boro (B) es un nutriente esencial para las plantas debido a que participa en la formación, estabilidad y función de la pared y la membrana celular, transporte de electrones de la membrana plasmática, metabolismo de los carbohidratos, metabolismo de fenol y auxinas, elongación y división celular, alargamiento de las raíces, fijación de nitrógeno y la asimilación de nitratos (Marschner 1995, Arunkumar *et al.* 2018, Brdar-Jokanović 2020, García *et al.* 2020). El B es absorbido por las plantas en forma de H_3BO_3 y H_2BO_3 (Arunkumar *et al.* 2018). Sin embargo, el B tiene un rango estrecho entre deficiencia y toxicidad (Brdar-Jokanović 2020, García *et al.* 2020). La toxicidad del B en las plantas está relacionada a la calidad del agua de riego utilizada y a los suelos con concentraciones excepcionalmente altas en B (Chatzissavvidis y Antonopoulou 2020). La toxicidad de B en el medio de crecimiento es una restricción para la productividad de los cultivos (El-Shazoly *et al.* 2019), debido a que causa deterioro de las funciones celulares y de los procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas (Chatzissavvidis y Antonopoulou 2020).

El estrés abiótico es uno de los principales factores limitantes que influyen en el crecimiento y la productividad de las especies vegetales (Atif *et al.* 2019). El calcio (Ca) es un elemento esencial necesario para el crecimiento y desarrollo de las plantas en condiciones de estrés y sin estrés, ya que éste no solo cumple la una función importante en la estabilidad de la pared y la membrana celular, sino que también actúa como un segundo mensajero involucrado en varios procesos celulares (White y Broadley 2003, Aldon *et al.* 2018, Thor 2019). La variación intracelular de la concentración de Ca libre se encuentra entre

los primeros eventos que siguen a la percepción de la planta del cambio ambiental (Aldon *et al.* 2018). El estrés, generalmente, conlleva a un incremento de Ca libre en el citoplasma de las células, el cual genera una expresión genética que activa respuestas bioquímicas que da a la planta la posibilidad de adaptarse a condiciones adversas de diferente naturaleza (Aldon *et al.* 2018). En cuanto la interacción entre el B y Ca, la información disponible es limitada y la naturaleza de esta compleja interacción aún se desconoce claramente. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue determinar si la aplicación de diferentes concentraciones de Ca puede aliviar la toxicidad de B en plantas de pimiento inducido por altas concentraciones de B presentes en la solución nutritiva.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

La presente investigación se llevó a cabo de julio a diciembre del 2019 en un invernadero del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Durante el experimento se presentó una temperatura promedio diurna de 30 °C, humedad relativa promedio de 55% y radiación fotosintéticamente activa incidente de $450 \mu\text{mol m}^{-2} \text{S}^{-1}$.

Material vegetal

Se utilizaron semillas pimiento amarillo cv. shir F1, las cuales se sembraron el 10 de julio en charolas de poliestireno de 200 cavidades, utilizando como sustrato *peat moss*. El trasplante se realizó a los 40 días después de la siembra en contenedores de polietileno negro con un volumen de 10 L. El sustrato utilizado para el trasplante fue compuesto de una mezcla de *peat moss* y perlita (70/30%, v/v).

Tratamiento

Los tratamientos consistieron en cinco concentraciones de B (0.5, 1.5, 3.0, 4.5 y 6.0 ppm) y tres concentraciones de Ca (7, 9 y 11 meq L^{-1}), la combinación de estos dio un total de 15 tratamientos. Como

fuelle de boro y calcio se utilizaron ácido bórico y nitrato de calcio. Las diferentes concentraciones de Ca se obtuvieron a partir de las modificaciones de la solución Steiner (1961), variando únicamente la cantidad de Ca y el resto de los macronutrientes se mantuvieron constantes. Además, en cada tratamiento se agregaron los siguientes micronutrientes (mg L^{-1}): 5 Fe, 0.11 Zn, 0.65 Mn, 0.02 Cu y 0.05 Mo. Para la formulación de las soluciones nutritivas se consideró las propiedades químicas del agua de riego. El pH de las soluciones nutritivas se ajustó a 6.0 ± 0.1 con H_3PO_4 al 85% y HNO_3 al 55%. Tres días después del trasplante se iniciaron los riegos con las soluciones correspondientes a cada tratamiento. Los riegos se realizaron en forma manual y la frecuencia dependió del requerimiento hídrico de las plantas, aplicando el volumen suficiente de la solución nutritiva para mantener una fracción de lixiviación del 20%.

Variables agronómicas evaluadas

A los 108 días después del trasplante, se evaluó la altura de planta midiendo desde la base hasta la parte apical. Los diferentes órganos de la planta se separaron, para luego lavar el sistema radicular con agua de la llave y agua destilada para eliminar el exceso de sustrato, posteriormente, se determinó la longitud radicular. La raíz, tallo y hoja se colocó de forma separada en bolsas de papel estraza y posteriormente se introdujeron en un horno de secado a temperatura de 65°C durante 72 h, para después registrar la biomasa seca de cada órgano en una balanza analítica. El peso seco total se obtuvo de la sumatoria del peso seco de cada órgano evaluado.

Fotosíntesis

Para determinar la fotosíntesis se utilizó un equipo portátil (LI-6800XT, Lincoln, Nebraska). Las lecturas se efectuaron al inicio de la floración. La evaluación se realizó en hojas bien desarrolladas y completamente sanas, evaluando este parámetro entre las 12:00 y 13:00 h tomando una lectura por hoja en dos hojas por planta.

Concentración y contenido nutrimental

Los tejidos secos se digestaron en una mez-

cla de 2:1 de H_2SO_4 : HClO_4 y 2 mL de H_2O_2 al 30%. La determinación de N se realizó por el procedimiento de Micro-Kjeldahl (Bremner 1996); mientras que, las concentraciones de fósforo (P), potasio (K), Ca, magnesio (Mg) y B se determinaron con espectrómetro de emisión de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES, model Liberty, VARIAN, Santa Clara, CA) (Soltanpour *et al.* 1996). Una vez obtenido la concentración nutrimental, se utilizó la biomasa seca de los distintos órganos para obtener el contenido nutrimental por planta.

Análisis estadístico

El diseño experimental utilizado fue el de bloques completos al azar con un arreglo factorial de 5×3 , con cuatro repeticiones en cada tratamiento. Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias fue de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) utilizando el programa estadístico SAS (Statistical Analysis Systems) versión 9.0.

RESULTADOS

Los parámetros de fotosíntesis, altura de planta, longitud de raíz, peso seco de raíz, peso seco de tallo, peso seco de hoja y peso seco total fueron afectados por la concentración de B en la solución nutritiva; mientras que, a excepción del peso seco de tallo, estos mismos parámetros fueron afectados por las concentraciones de Ca así como por la interacción de ambos factores evaluados (Tabla 1). Debido a las bajas temperaturas presentadas el experimento no pudo llegar a la etapa de producción.

La fotosíntesis incrementó al aumentar la concentración de B, con un máximo con 4.5 ppm de B, presentando este comportamiento cuando se aumentó la concentración de Ca en la solución nutritiva a 9 y 11 meq L^{-1} ; mientras que al adicionar 7 meq L^{-1} de Ca la fotosíntesis decreció cuando la concentración de B fue mayor a 1.5 ppm (Figura 1A). La altura de planta se redujo conforme incrementó la concentración de B en la solución nutritiva, pero este detrimento fue menos pronunciado al incrementar la concentración de Ca en la solución nutritiva de 9 meq

Tabla 1. Efecto de la concentración de B y Ca en la solución nutritiva sobre la fotosíntesis, altura de planta, longitud de raíz, peso seco de raíz (PSR), peso seco de tallo (PST), peso seco de hoja (PSH) y peso seco total (PST) de plantas de pimiento amarillo cv. shir F1.

B (ppm)	Fotosíntesis ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Altura de planta (cm)	Longitud de raíz (cm)	PSR	PST (g planta ⁻¹)	PSH	PST
0.5	3.77 ^b	59.28 ^a	43.33 ^a	5.33 ^b	13.05 ^b	21.39 ^c	39.78 ^b
1.5	3.98 ^{ab}	57.22 ^a	41.50 ^{abc}	7.00 ^a	15.33 ^a	22.50 ^b	44.83 ^a
3	4.05 ^a	56.89 ^a	42.00 ^{ab}	6.11 ^{ab}	14.00 ^{ab}	24.11 ^a	44.00 ^a
4.5	3.98 ^{ab}	53.44 ^b	41.06 ^{bc}	5.67 ^b	13.22 ^b	24.17 ^a	43.05 ^a
6	3.49 ^c	50.56 ^c	39.67 ^c	5.44 ^b	12.67 ^b	24.83 ^a	42.94 ^b
Anova p ≤	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Ca (meqL ⁻¹)							
7	3.84 ^{ab}	55.27 ^b	43.47 ^a	5.47 ^b	13.20 ^a	22.16 ^b	40.70 ^b
9	3.97 ^a	57.43 ^a	40.37 ^b	6.27 ^a	13.77 ^a	24.27 ^a	44.30 ^a
11	3.76 ^b	53.73 ^b	40.70 ^b	6.00 ^{ab}	14.00 ^a	23.76 ^a	43.76 ^a
Anova p ≤	0.004	0.001	0.001	0.036	0.118	0.001	0.001
Interacción	0.001	0.006	0.001	0.026	0.111	0.001	0.001
CV %	4.03	3.21	3.72	13.80	7.68	3.07	4.54

Medias con letra diferentes indican efectos significativos según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p \leq 0.05$. Anova = análisis de varianza. Interacción = B x Ca. CV = coeficiente de variación.

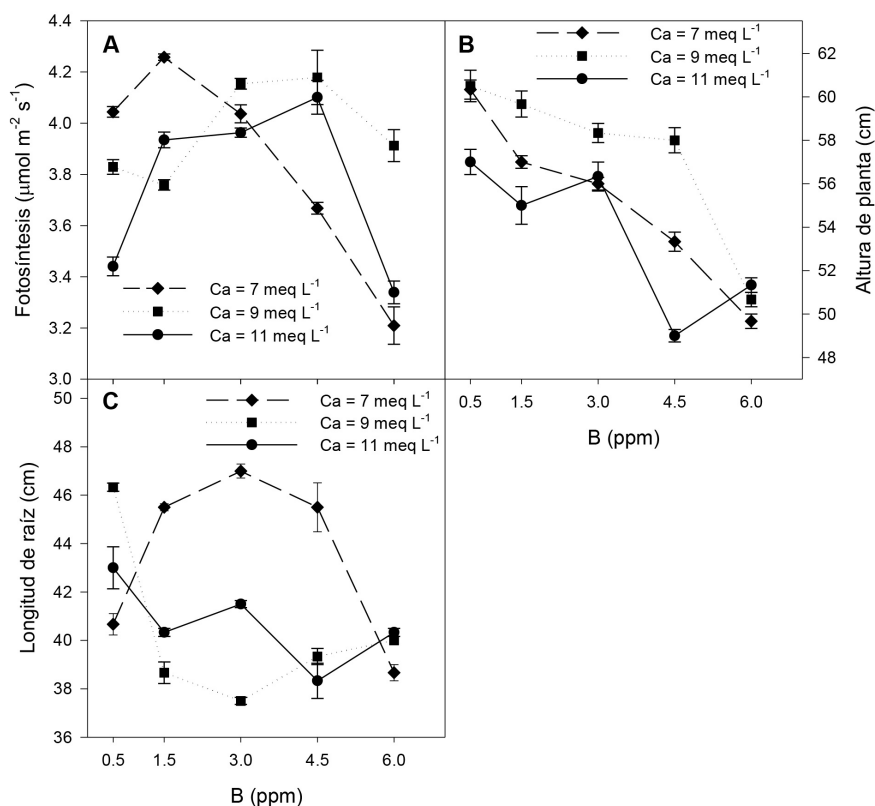


Figura 1. Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre la fotosíntesis (A), altura de planta y longitud de raíz de plantas de pimiento amarillo cv. shir F1. Las barras indican el error estándar de la media.

L⁻¹ (Figura 1B). La longitud de raíz fue superior con 3 ppm de B con 7 meq L⁻¹ de Ca en la solución nutritiva; mientras que al adicionar 9 y 11 meq L⁻¹ de Ca

la longitud de raíz decreció con más de 0.5 ppm de B (Figura 1C).

El peso seco de raíz fue mayor con 1.5 ppm

de B en la solución, mientras que valores inferiores o superiores a esta concentración el peso seco de raíz decreció, este mismo comportamiento se observó cuando la concentración de Ca en la solución nutritiva fue de 7 y 9 meq L⁻¹. En tanto que al incrementar la concentración de Ca a 11 meq L⁻¹ el peso seco de raíz fue mayor con 3 ppm de B (Figura 2A). El peso seco de hoja, en general, incrementó al aumentar la concentración de B, principalmente cuando se adicionó 7 y 9 meq L⁻¹ de Ca en la solución nutritiva; pero, al incrementar la concentración de Ca a 11 meq L⁻¹ el peso seco de hoja fue mayor al adicionar una concentración de 1.5 y 4.5 ppm de B (Figura 2B). Similar comportamiento se observó en el peso seco total (Figura 2C).

El contenido de N, P, K, Ca, Mg y B en las plantas de pimiento fue afectado de forma significativa por las concentraciones de B en la solución nutritiva; con excepción del contenido total de Mg, el contenido total de estos iones en las plantas de pimiento fue afectado por las concentraciones de Ca en la solución nutritiva. También el contenido total de N, P, K, Ca, Mg y B fue influenciado de forma significativa por la interacción de los dos factores evaluados (Tabla 2).

El mayor contenido de N en las plantas de pimiento se presentó en aquellas plantas que se les proporcionó 1.5 ppm de B y 7 meq L⁻¹ de Ca, con una concentración diferente de B el contenido total de N decreció; pero cuando se incrementó la concentración de Ca en la solución a 9 y 11 meq L⁻¹ el mayor contenido de N se obtuvo con 3 ppm de B, mientras que con una concentración diferente de B el contenido de N fue menor, aunque el detrimento fue menos pronunciado que con 7 meq L⁻¹ de Ca (Figura 3A). De igual manera, el contenido total de P y K en las plantas de pimiento fue mayor con 1.5 ppm de B al adicionar 7 y 9 meq L⁻¹ de Ca, pero con una concentración inferior o superior de B el contenido de estos iones decreció, con un detrimento menos marcado con 9 meq L⁻¹ de Ca (Figura 3B y C). El contenido de Ca total en las plantas de pimiento fue mayor con 1.5 y 3 ppm de B y 7 meq L⁻¹ de Ca; mientras que, al incrementar la concentración de Ca a 9 meq L⁻¹ el contenido total de Ca fue mayor con 1.5 ppm de B, superando al contenido total alcanzado con 7 meq

L⁻¹ de Ca; en tanto que, al incrementar la concentración de Ca a 11 meq L⁻¹ el contenido total de Ca fue superior con 4.5 ppm de B (Figura 3D).

El contenido total de Mg en las plantas de pimiento incrementó al aumentar la concentración de B en la solución nutritiva, observando este comportamiento con las diferentes concentraciones de Ca adicionados a la solución nutritiva. Pero con concentraciones de 7 y 11 meq L⁻¹ de Ca el contenido máximo de Mg se observó con 3 ppm de B, pero al adicionar 9 meq L⁻¹ de Ca el mayor contenido de Mg se presentó con 4.5 ppm de B (Figura 4A). Por otro lado, el contenido total de B en las plantas fue mayor con 1.5 y 3 ppm de B al adicionar únicamente 7 meq L⁻¹ de Ca en la solución nutritiva; pero, al incrementar la concentración de Ca a 9 meq L⁻¹ el mayor contenido total de B se presentó con 1.5 ppm de B, con contenidos diferentes el contenido total de B decreció; mientras que, al incrementar la concentración de Ca a 11 meq L⁻¹ el contenido de B fue mayor con 1.5 y 6 ppm de B (Figura 4B).

DISCUSIÓN

El B es un micronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo óptimo de las plantas debido a que ejerce funciones importantes a nivel fisiológico y metabólico (Marschner 1995, Arunkumar *et al.* 2018). Pero cuando la concentración de B excede el valor óptimo determinado puede resultar tóxico para las plantas (Chatzissavvidis y Antonopoulou 2020). Los requerimientos de B pueden variar entre especies y/o cultivares, algunas especies pueden tolerar hasta 0.5 mg L⁻¹, mientras que otras pueden llegar a tolerar hasta 4 mg L⁻¹ (Batar *et al.* 2009, Princi *et al.* 2015, García *et al.* 2020). En este trabajo se observó que el B en altas concentraciones (mayor a 0.5 ppm) en la solución nutritiva afecta negativamente el crecimiento de las plantas de pimiento, ya que, en general, se observó un detrimento de la altura de planta y longitud de raíz al emplear concentraciones altas de este ion. Relacionado a lo anterior, Yermiyahu *et al.* (2008) indicaron que el mayor crecimiento de las plantas de pimiento cv. Maor se obtuvo con 0.093 mM de B; mientras que,

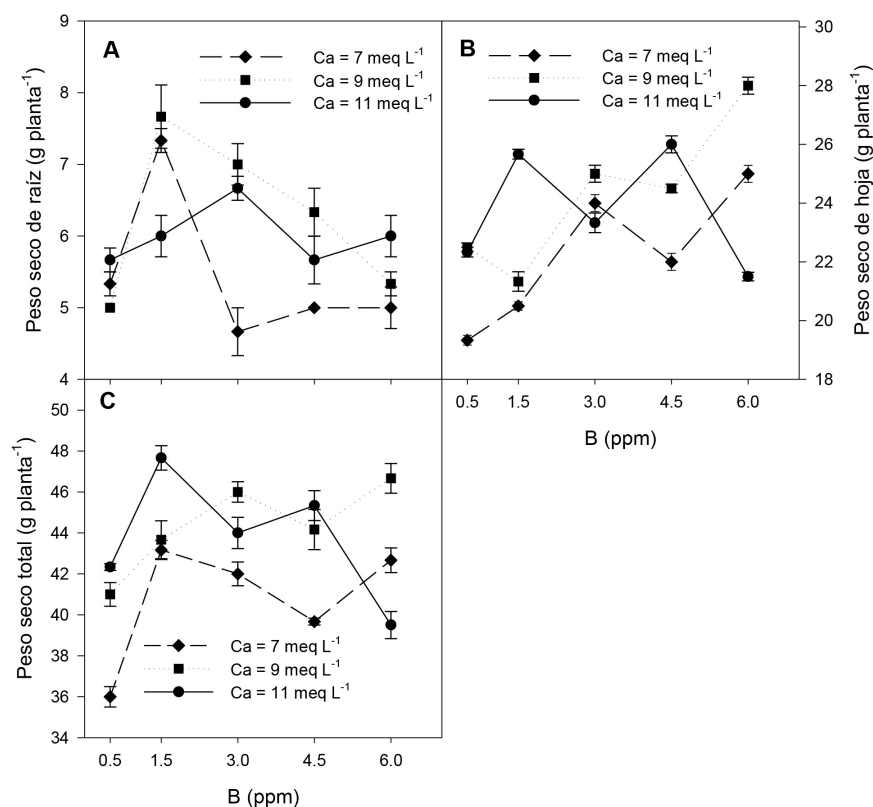


Figura 2. Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre el peso seco de raíz y hoja de plantas de pimienta amarilla cv. shir F1. Las barras indican el error estándar de la media.

Tabla 2. Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre el contenido total de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y boro (B) en las plantas de pimienta amarilla cv. shir F1.

B (ppm)	N	P	K (mg planta ⁻¹)	Ca	Mg	B
0.5	871.48 ^c	143.506 ^b	953.01 ^b	531.26 ^b	184.34 ^e	2.69 ^e
1.5	997.22 ^a	170.407 ^a	1093.19 ^a	637.67 ^a	232.77 ^c	4.88 ^a
3	986.78 ^{ab}	166.016 ^a	1000.12 ^b	618.48 ^a	260.41 ^a	4.19 ^c
4.5	944.14 ^b	165.251 ^a	1062.16 ^a	615.24 ^a	243.80 ^b	3.57 ^d
6	958.52 ^{ab}	163.045 ^a	1055.37 ^a	543.04 ^b	208.95 ^d	4.49 ^b
Anova p ≤	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Ca (Meq L ⁻¹)	N	P	K (mg planta ⁻¹)	Ca	Mg	B
7	925.62 ^b	153.160 ^c	1011.79 ^b	576.60 ^b	223.864 ^a	4.10 ^a
9	970.70 ^a	168.575 ^a	1069.40 ^a	599.66 ^a	225.104 ^a	4.09 ^a
11	940.56 ^{ab}	163.201 ^b	1017.12 ^b	591.15 ^{ab}	229.216 ^a	3.70 ^b
Anova p ≤	0.010	0.001	0.001	0.022	0.087	0.001
Interacción	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
CV (%)	4.03	3.42	3.52	3.66	2.94	3.42

Medias con letra diferentes indican efectos significativos según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p \leq 0.05$. Anova = análisis de varianza. Interacción = B x Ca. CV = coeficiente de variación.

el mayor crecimiento de pimienta cv. Celica se obtuvo con 0.05 mM. Sin embargo, la toxicidad sobre la altura de planta se redujo al incrementar la concen-

tración de Ca en la solución nutritiva a 9 meq L⁻¹. El Ca al ser un mensajero secundario ante condiciones de estrés (Gao *et al.* 2019, Thor 2019), pudo influir

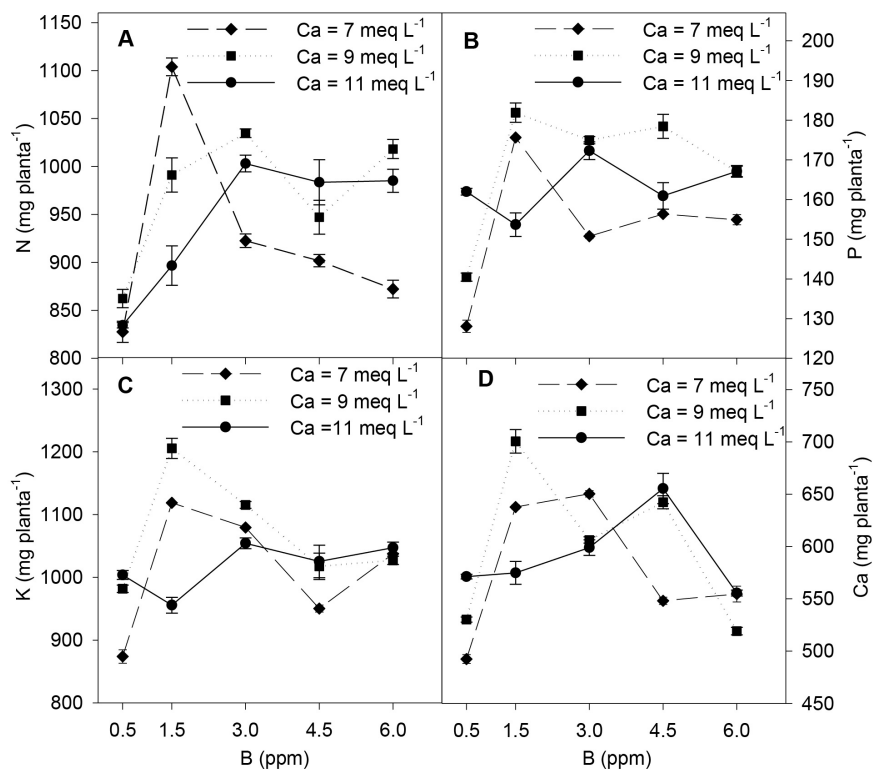


Figura 3. Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre el contenido total de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y calcio (Ca) en plantas de pimiento amarillo cv. shir F1. Las barras indican el error estándar de la media.

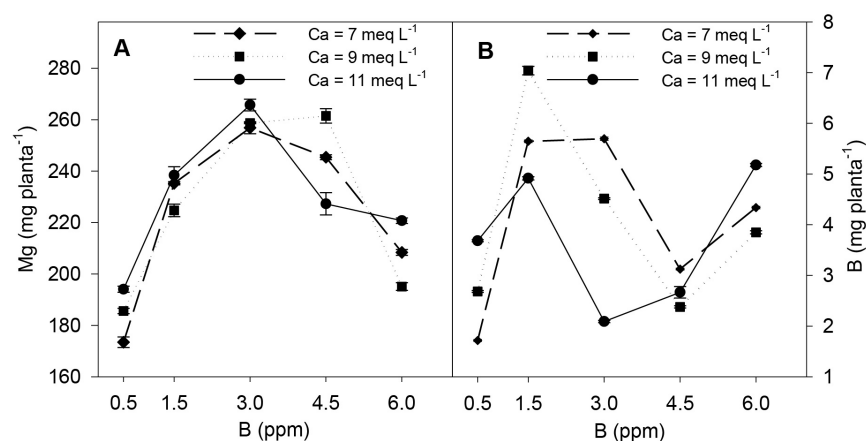


Figura 4. Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre el contenido total de magnesio (Mg) y boro (B) en plantas de pimiento amarillo cv. shir F1. Las barras indican el error estándar de la media.

en la mitigación de la toxicidad de B en las plantas de pimiento. Siddiqui *et al.* (2013) indicaron que al incrementar la concentración de Ca se alivió la toxicidad del B en plantas de rábano, debido a que el incre-

mento del Ca disminuyó los niveles de malondialdehído y peróxido de hidrógeno y la fuga de electrolitos y mejoró las actividades de las enzimas antioxidantes. En tanto que, en la longitud de la raíz no se

observó el efecto positivo del Ca al incrementar su concentración en la solución nutritiva. Esta respuesta alcanzada pudo deberse a que la concentración de B es inferior en las raíces (García *et al.* 2020), ya que el B se transporta rápidamente a los órganos superiores y se acumula allí (Camacho *et al.* 2008).

Se ha indicado que las alta concentración de B afecta negativamente el proceso fotosintético, ya que este ion daña el contenido de clorofila, la velocidad de transporte de electrones, la eficiencia del uso de CO₂, el fotosistema II, la subunidad de H⁺-ATPasa y algunas actividades relacionadas con las enzimas Rubisco y la NADP-GAPDH (Han *et al.* 2009, Chen *et al.* 2014, Mesquita *et al.* 2016, Landi *et al.* 2019, Riaz *et al.* 2019). La reducción de la fotosíntesis debido a las altas concentraciones de B se vio en este trabajo; sin embargo, cuando se incrementó la concentración de Ca en la solución nutritiva a 9 y 11 meq L⁻¹ el efecto tóxico del B se observó hasta con 6 ppm en comparación a las plantas a las que se les adicionó 7 meq L⁻¹ de Ca. Tomando en cuenta que el Ca ayuda a las plantas a protegerse contra la peroxidación lipídica, fuga de electrolitos y contenido de H₂O₂ producidos ante diferentes condiciones adversas del medio (Siddiqui *et al.* 2013), al incrementar la concentración de Ca en la solución nutritiva la planta de pimiento pudo incrementar la absorción de Ca para mitigar en mayor medida el estrés causado en el proceso fotosintético al adicionar una concentración alta de B, comparado al adicionar únicamente 7 meq L⁻¹ de Ca.

Por otro lado, Marschner (1995) menciona que la producción de biomasa de un cultivo se determina en gran medida por la fotosíntesis, ya que aproximadamente el 90% del peso seco de una planta se considera derivado de los productos formados durante este proceso. En este trabajo se observó que el efecto de las altas concentraciones de B en la solución nutritiva sobre la fotosíntesis también se vio reflejado en la producción de biomasa, donde la mayor actividad de esta variable fisiológica se relacionó con los tratamientos donde se obtuvo la mayor producción de biomasa seca de raíz, hoja y total, principalmente al adicionar 9 y 11 meq L⁻¹ de Ca, resultado que pudo relacionarse a que, además de su participación

como segundo mensajero, el Ca cumple funciones en la biogénesis de la pared celular, división, expansión y organización celular (Kölling *et al.* 2019), por lo que al aumentar la concentración de Ca se logró generar un mayor desarrollo vegetal lo que se reflejó en una mayor biomasa seca. Relacionado a lo anterior, Turan *et al.* (2009) y Metwally *et al.* (2018) reportaron que la aplicación de altos niveles de Ca alivió parcialmente los síntomas de toxicidad de B sobre la producción de biomasa seca de brotes y raíz de plantas de trigo y canola. Además, de acuerdo al comportamiento de la longitud radicular y peso seco de raíz, se observó que al adicionar 9 y 11 meq L⁻¹ de Ca y concentraciones superiores a 0.5 ppm de B en la solución nutritiva las plantas de pimiento modificaron la arquitectura radicular produciendo un sistema de raíces más ramificadas al reducir el crecimiento de la raíz primaria, ya que a pesar de tener una longitud radicular inferior se obtuvo mayor peso seco radicular con estos tratamientos.

Una dosis inadecuada de B afecta el estado nutricional de la planta (Sarafi *et al.* 2017). Sarafi *et al.* (2018b) indican que para obtener un crecimiento óptimo de las plantas y una absorción máxima de los nutrientes, la concentración de B en la solución nutritiva en el cultivo de pimiento no debe exceder 1 mg L⁻¹. Por su parte, Princi *et al.* (2015) y Ferreira *et al.* (2020) indican que el exceso de B puede afectar la absorción N por las raíces, esto debido a que hay una alteración de su metabolismo. En este trabajo se observó una reducción del contenido total de N en las plantas de pimiento al incrementar la concentración de B en la solución nutritiva, principalmente cuando se adicionó únicamente 7 meq L⁻¹ de Ca; sin embargo, al incrementar la concentración de Ca (9 y 11 meq L⁻¹) en la solución nutritiva el contenido total de N en las plantas presentó un menor detrimento a altas concentraciones de B, demostrando que al aumentar la concentración de Ca se mantiene el proceso metabólico de la pared celular y el transporte de iones, tal como es mencionado en otros estudios (Tariq y Mott 2007, Sarafi *et al.* 2018a). En este experimento se observó que el contenido total de P en las plantas de pimiento fue afectado por las concentraciones empleadas de B, lo que concuerda

con Sarafi *et al.* (2018b), quienes informaron una reducción de la absorción total de P en plantas de pimienta al aumentar los niveles de B en la solución nutritiva; pero, de igual manera que el N, el contenido total de P en las plantas fue menos afectado por el exceso de B al incrementar la concentración de Ca en la solución nutritiva (9 y 11 meq L⁻¹).

Asimismo, el contenido total de K en las plantas de pimienta también presentó una reducción al aumentar la concentración de B en la solución nutritiva. Sarafi *et al.* (2018b) reportaron una reducción en la absorción de K al aumentar la concentración de B en la solución nutritiva, indicando que esta respuesta pudo deberse posiblemente a la reducción del crecimiento de la planta o de las raíces. Sin embargo, el efecto benéfico del incremento de la concentración de Ca en la solución sobre el efecto inhibitor del exceso de B en el contenido nutrimental únicamente se observó con 9 meq L⁻¹, en tanto que, al incrementar el Ca a 11 meq L⁻¹ se observó un efecto negativo en el contenido total de K en las plantas de pimienta. La respuesta anterior puede atribuirse a que el K presenta antagonismo con Ca (Ranade-Malvi 2011).

De la misma forma, se observó un detrimento del contenido total de Ca en las plantas de pimienta al aumentar la concentración de B en la solución nutritiva, principalmente con 7 y 9 meq L⁻¹ en la solución nutritiva; mientras que, al aumentar la concentración de Ca en la solución a 11 meq L⁻¹ el contenido total de Ca incrementó, con un máximo con 4.5 ppm de B; sin embargo, cuando se empleó una concentración de 9 meq L⁻¹ de Ca y 4.5 ppm de B en la solución nutritiva se observó una recuperación del contenido total de Ca, obteniendo semejante contenido total de Ca que el mayor contenido obtenido con 11 meq L⁻¹ de Ca. El Ca es un nutriente mineral esencial en las plantas, el cual realiza la función de mensajero secundario ante condiciones de estrés (White y Broadley 2003, Rahman *et al.* 2016). La señalización del Ca a condiciones desfavorables se lleva a cabo mediante una acumulación de éste en el citosol, para posteriormente conllevar a una reacción en cadena obteniéndose como resultado la activación de factores de transcripción para la expresión de genes

de defensa (Thor 2019). Por lo que, la respuesta del contenido total de Ca en este trabajo ante concentraciones altas de B pudo deberse a que la planta al estar bajo estrés por las concentraciones altas de B tuvo mayor absorción y acumulación de Ca; sin embargo, esta respuesta dependió de la disponibilidad de Ca en el medio de crecimiento, por lo que el mayor contenido total de Ca con concentraciones altas de B se presentó con concentraciones de 9 y 11 meq L⁻¹ de Ca en la solución nutritiva. El efecto adverso de la toxicidad de B en el contenido total de Mg en las plantas de pimienta se observó en este trabajo; sin embargo, no se obtuvo una respuesta positiva del incremento de la concentración de Ca en la solución nutritiva.

A pesar de que en este trabajo se incrementó la concentración de B en la solución nutritiva, se observó que cuando la concentración de B fue mayor a 1.5 ppm el contenido total de B en las plantas de pimienta se redujo, alcanzando un mínimo con 4.5 ppm de B, con detrimento al incrementar la concentración de Ca en la solución (9 y 11 meq L⁻¹); pero, cuando la concentración de B se incrementó a 6 ppm se observó una recuperación del contenido total de B en las plantas. El menor contenido total de B en las plantas de pimienta alcanzado con una concentración de 4.5 ppm de B y 9 y 11 meq L⁻¹ de Ca concuerda con el incremento del contenido total de Ca en las plantas con estos tratamientos, por lo tanto, el incremento del contenido total de Ca reguló la absorción de B cuando éste se encontraba en altas concentraciones en el medio de crecimiento. Relacionado a lo anterior, se ha indicado que la aplicación de Ca puede reducir la absorción de B en plantas de rábano, canola y trigo, debido a que disminuye la permeabilidad de la membrana de célula vegetal a este ion (Turan *et al.* 2009, Siddiqui *et al.* 2013, Metwally *et al.* 2018).

CONCLUSIONES

Concentraciones superiores a 1.5 ppm de B afectan de forma negativa la fotosíntesis, crecimiento, producción de biomasa y absorción de nutrientes en las plantas de pimienta morrón. Pero al incrementar

la concentración de Ca en la solución nutritiva a 9 y 11 meq L⁻¹, las plantas de pimiento pueden tolerar concentraciones mayores de B. Además, cuando la concentración de Ca en la solución nutritiva es mayor

a 7 meq L⁻¹ el contenido total de B en el tejido vegetal se reduce; por lo tanto, el Ca regula la absorción de B cuando este se encuentra en altas concentraciones en el medio de crecimiento.

LITERATURA CITADA

- Aldon D, Mbengue M, Mazars C, Galaud JP (2018) Calcium signalling in plant biotic interactions. *International Journal of Molecular Sciences* 19: 665-683.
- Arunkumar BR, Thippeshappa GN, Anjali MC, Prashanth KM (2018) Boron: A critical micronutrient for crop growth and productivity. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 7: 2738-2741.
- Atif RM, Shahid L, Waqas M, Ali B, Rashid MAR, Azeem F, Nawaz MA, Wani SH, Chung G (2019) Insights on calcium-dependent protein kinases (CPKs) signaling for abiotic stress tolerance in plants. *International Journal of Molecular Sciences* 20: 5298-5921.
- Batar T, Köksal NS, Yersel SE (2009) Production and characterization of wall plaster with borax and paper wastes and perlite additives. *Ekoloji* 18: 45-53.
- Bremner JM (1996) Total nitrogen. In: Sparks DL (ed.) *Methods of soil analysis. Chemical methods*. Soil Science Society of America. Madison, WI. USA. pp: 1085-1086.
- Brdar-Jokanović M (2020) Boron toxicity and deficiency in agricultural plants. *International Journal of Molecular Sciences* 21: 1424-1443.
- Castro PH, Lilay GH, Assunção AGL (2018) Regulation of micronutrient homeostasis and deficiency response in plants'. *Plant micronutrient use efficiency: Molecular and Genomic Perspectives in Crop Plants 2018*: 1-15.
- Camacho CJJ, Rexach J, Gonzales FA (2008) Boron in plants: Deficiency and toxicity. *Journal of Integrative Plant Biology* 50: 1247-1255.
- Chatzissavvidis C, Antonopoulou C (2020) Boron toxicity in fruit crops: Agronomic and physiological implications. In: Srivastava A, Chengxiao H (ed.) *Fruit Crops*. Elsevier. Amsterdam, Netherlands. pp: 211-221.
- Chen M, Mishra S, Heckathorn SA, Frantz JM, Krause C (2014) Proteomic analysis of *Arabidopsis thaliana* leaves in response to acute boron deficiency and toxicity reveals effects on photosynthesis, carbohydrate metabolism, and protein synthesis. *Journal of Plant Physiology* 171: 235-242.
- El-Shazoly RM, Metwally AA, Hamada AM (2019) Salicylic acid or thiamin increases tolerance to boron toxicity stress in wheat. *Journal of Plant Nutrition* 42: 702-722.
- Ferreira GA, Hippler FW, Prado LADS, Rima JA, Boaretto RM, Quaggio JA, Facanha AR, Mattos D (2020) Boron modulates the plasma membrane H⁺-ATPase activity affecting nutrient uptake of Citrus trees. *Annals of Applied Biology* 178: 293-303.
- García SF, Simón GS, Martínez NJJ, Alfosea SM, Liu C, Chatzissavvidis C, Pérez PJ, Cámara ZJ (2020) Multiple stresses occurring with boron toxicity and deficiency in plants. *Journal of hazardous Materials* 397: 122713. DOI: 10.1016/J.JHAZMAT.2020.122713.
- Gao Q, Xiong T, Li X, Chen W, Zhu X (2019) Calcium and calcium sensors in fruit development and ripening. *Scientia Horticulturae* 253: 412-421.
- Han S, Tang N, Jiang HX, Yang LT, Li Y, Chen LS (2009) CO₂ assimilation, photosystem II photochemistry, carbohydrate metabolism and antioxidant system of citrus leaves in response to boron stress. *Plant Science* 176: 143-153.

- Kölling M, Kumari P, Bürstenbinder K (2019) Calcium and calmodulin regulated microtubule-associated proteins as signal-integration hubs at the plasma membrane-cytoskeleton nexus. *Journal of Experimental Botany* 70: 387-396.
- Liang W, Wang M, Ai X (2009) The role of calcium in regulating photosynthesis and related physiological indexes of cucumber seedlings under low light intensity and suboptimal temperature stress. *Scientia Horticulturae* 123: 34-38.
- Marschner H (1995) Mineral nutrition of higher plants. 2nd Edition. Academic Press. London, England. 889p.
- Metwally AM, Radi AA, El-Shazoly RM, Hamada AM (2018) The role of calcium, silicon and salicylic acid treatment in protection of canola plants against boron toxicity stress. *Journal of Plant Research* 131: 1015-1028.
- Mesquita GL, Zambrosi FCB, Tanaka FAO, Boaretto RM, Quaggio JA, Ribeiro RV, Mattos D (2016) Anatomical and physiological responses of Citrus trees to varying boron availability are dependent on rootstock. *Frontiers in Plant Science* 7: 224. doi: 10.3389/fpls.2016.00224.
- Princi MP, Lupini A, Araniti F, Longo C, Mauceri A, Sunseri F, Abenavoli MR (2015) Boron toxicity and tolerance in plants: Recent advances and future perspectives. In: Ahmad P (ed) *Plant metal interaction: Emerging remediation techniques*. Elsevier. Calabria, Italy. pp: 115-147.
- Riaz M, Yan L, Wu X, Hussain S, Aziz O, Jiang C (2019) Boron supply maintains efficient antioxidant system, cell wall components and reduce aluminum concentration in roots of trifoliate orange. *Plant Physiology and Biochemistry* 137: 93-101.
- Rahman A, Mostofa MG, Nahar K, Hasanuzzaman M, Fujita M (2016) Exogenous calcium alleviates cadmium-induced oxidative stress in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by regulating the antioxidant defense and glyoxalase systems: Calcium-induced cadmium stress tolerance in rice. *Revista Brasileira de Botanica* 39: 393-407.
- Ranade-Malvi U (2011) Interaction of micronutrients with major nutrients with special reference to potassium. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences* 24: 106-109.
- Sarafi E, Siomos A, Tsouvaltzis P, Therios I, Chatzissavvidis C (2018a) Boron toxicity effects on the concentration of pigments, carbohydrates and nutrient elements in six non-grafted pepper cultivars (*Capsicum annuum* L.). *Indian Journal of Plant Physiology* 23: 474-485.
- Sarafi E, Siomos A, Tsouvaltzis P, Therios I, Chatzissavvidis C (2018b) The influence of boron on pepper plants nutritional status and nutrient efficiency. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 18: 653-667.
- Sarafi E, Chatzissavvidis C, Therios I (2017) Response of two pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars to six boron concentrations: Growth performance, nutrient status, gas exchange parameters, chlorophyll fluorescence, and proline and carbohydrate content. *Journal of Plant Nutrition* 40: 983-994.
- Siddiqui MH, Al-Whaibi MH, Sakran AM, Ali HM, Basalah MO, Faisal M, Alatar A, Al-Amri AA (2013) Calcium-Induced Amelioration of Boron Toxicity in Radish. *Journal of Plant Growth Regulation* 32: 61-71.
- Soltanpour PN, Johnson GW, Workman SM, Jones JB, Miller RO (1996) Inductively coupled plasma emission spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry. In: Sparks DL (ed.). *Methods of soil analysis. Chemical Methods*. Soil Science Society of North America. Madison WI. USA. pp: 91-139.
- Tariq M, Mott CJB (2007) Effect of boron on the behavior of nutrients in soil-plant systems. *Asian Journal of Plant Sciences* 6: 195-202.
- Thor K (2019) Calcium nutrient and messenger. *Frontiers in Plant Science* 10: 440-453. DOI: 10.3389/FPLS.2019.00440.

Turan MA, Taban N, Taban S (2009) Effect of calcium on the alleviation of boron toxicity and localization of boron and calcium in cell wall of wheat. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 37: 99-103.

White PJ, Broadley MR (2003) Calcium in plants. *Annals of Botany* 92: 487-511.

Yermiyahu U, Ben-Gal A, Keren R, Reid RJ (2008) Combined effect of salinity and excess boron on plant growth and yield. *Plant and Soil* 304: 73-87.