

Efectos de distintas concentraciones de boro y pH en el crecimiento de *Zea mays* var. *Capia blanco*, un maíz ancestral de Chile

*Effects of different boron concentrations and pH on growth
Zea mays var. Capia blanco, an ancestral corn from Chile*

Mirko Ortiz¹; José Pablo Delatorre-Castillo¹; Isabel Sepúlveda¹;
Christopher Low¹; Karina B. Ruiz²; José Delatorre Herrera^{1*}

RESUMEN

El maíz *Capia blanco* es considerado una variedad ancestral y actualmente se cultiva en la zona norte de Chile. Este maíz local se caracteriza por crecer en suelos con elevada concentración de boro y pH alcalinos. El objetivo de la investigación fue determinar el efecto de cinco concentraciones de boro (B) y de dos niveles de pH sobre el crecimiento del maíz y la acumulación del boro en los tejidos vegetales. Se realizaron los siguientes tratamientos con B, el cual fue agregado a una solución Hoagland completa: 5, 10, 20 y 30 mg L⁻¹ y el control (0,27 mg L⁻¹). Cada uno de los tratamientos de B fue llevado a dos niveles de pH: 5,8 y 7,8. Los tratamientos se realizaron en plántulas de siete días creciendo en un sustrato de perlita y se aplicaron por un período de 19 días. Se midieron variables de crecimiento (altura y distancia entrenudos) y concentración final de B en la parte aérea (hojas y tallo) y en raíces. Los resultados muestran que, con todas las concentraciones de B, a pH 5,8 se produce una mayor absorción de B versus pH 7,8 ($p < 0,05$). A mayor concentración de B (30 mg L⁻¹) también mayor es la absorción del maíz ($p < 0,05$). El crecimiento no fue significativamente afectado, y al término del experimento las plantas no manifestaron síntomas de toxicidad. En conclusión, la concentración de 30 mg L⁻¹ a pH 7,8 afecta el crecimiento, el pH ácido (5,8) permite una mayor asimilación de boro y se acumula mayormente en la raíz. *Capia blanco* muestra alta tolerancia al exceso de boro y se propone para esta variedad un comportamiento borófito.

Palabras clave: estrés abiótico, tolerancia, borófito, *Zea mays*, *Capia blanco*.

ABSTRACT

PENDIENTE blanco es considerado una variedad ancestral y actualmente se cultiva en la zona norte de Chile. Este maíz local se caracteriza por crecer en suelos con elevada concentración de boro y pH alcalinos. El objetivo de la investigación fue determinar el efecto de cinco concentraciones de boro (B) y de dos niveles de pH sobre el crecimiento del maíz y la acumulación del boro en los tejidos vegetales. Se realizaron los siguientes tratamientos con B, el cual fue agregado a una solución Hoagland completa: 5, 10, 20 y 30 mg L⁻¹ y el control (0,27 mg L⁻¹). Cada uno de los tratamientos de B fue llevado a dos niveles de pH: 5,8 y 7,8. Los tratamientos se realizaron en plántulas de siete días creciendo en un sustrato de perlita y se aplicaron por un período de 19 días. Se midieron variables de crecimiento (altura y distancia entrenudos) y concentración final de B en la parte aérea (hojas y tallo) y en raíces. Los resultados muestran que, con todas las concentraciones de B, a pH 5,8 se produce una mayor absorción de B versus pH 7,8 ($p < 0,05$). A mayor concentración de B (30 mg L⁻¹) también mayor es la absorción del maíz ($p < 0,05$). El crecimiento no fue significativamente afectado, y al término del experimento las plantas no manifestaron síntomas de toxicidad. En conclusión, la concentración de 30 mg L⁻¹ a pH 7,8 afecta el crecimiento, el pH ácido (5,8) permite una mayor asimilación de boro y se acumula mayormente en la raíz. *Capia blanco* muestra alta tolerancia al exceso de boro y se propone para esta variedad un comportamiento borófito.

Keywords: abiotic stress, tolerance, borophyte, *Zea mays*, *Capia blanco*.

Introducción

El boro (B) es un elemento químico perteneciente al grupo de los micronutrientes esenciales para el crecimiento vegetal, generalmente escaso en la

corteza terrestre. El B se concentra en suelos regados con agua rica en este elemento, en suelos con mal drenaje y en suelos de regiones áridas y semiáridas donde este nutriente es acumulado como depósito natural (Landi *et al.*, 2013), y cuando alcanza

¹ Universidad Arturo Prat, Facultad de Recursos Naturales Renovables.

² Universidad Arturo Prat, Facultad de Ciencias de la Salud.

* Autor correspondencia: jodelato@unap.cl

niveles tóxicos para las plantas, estas pueden verse afectadas en su crecimiento y desarrollo. Según la DGA (Ministerio de Obras Públicas, 2004), el río Loa en la Región de Antofagasta (Chile) presenta valores de pH entre 7,0 y 8,0 durante el año y los niveles de B pueden alcanzar hasta $17,7 \text{ mg L}^{-1}$ (Martínez, 2018). Las plantas absorben el B bajo dos formas químicas: como ácido bórico (B(OH)_3) y como anión borato (B(OH)_4^-) a pH elevados, y el primero es el más común. La biodisponibilidad del B disminuye con el pH básico, mientras que la acidez del agua o solución del suelo contribuye a su solubilización (Mendoza-Grimón *et al.*, 2003; Landi *et al.*, 2013) favoreciendo su ingreso a los tejidos vegetales. La absorción se produce por vía radicular y posteriormente el boro es transportado por vía xilemática hasta tallos, hojas y ápices vegetativos (Camacho *et al.*, 2008). El B cumple un rol fundamental en las plantas, específicamente en los componentes estructurales de la pared celular, actuando en conjunto con las moléculas de pectina para mantener la funcionalidad de la pared celular (Brodie, 2011).

Para completar su crecimiento y tener buenos rendimientos, normalmente los cultivos requieren del aporte exógeno de B mediante la fertirrigación $0,3 \text{ mg L}^{-1}$ de B (Miwa and Fujiwara, 2010), el cual viene suplementado principalmente como ácido bórico (H_3BO_3). Tanto la deficiencia como el exceso de B afectan también los procesos de fotosíntesis, ya sea debido a limitaciones de tipo estomático o no estomático (Moreno *et al.*, 2016) y, en consecuencia, el crecimiento, el desarrollo y la productividad de los cultivos (Nable *et al.*, 1997; Cervilla Medina, 2009). El exceso de B es dañino para la mayoría de las especies vegetales, y la clorosis y la necrosis en los tejidos son algunos de los síntomas de toxicidad (Rodríguez Guerreiro *et al.*, 2009).

La mayoría de los cultivos necesita del aporte de B. Sin embargo, especies como la frutilla, vides y la higuera son sensibles a concentraciones de B que varían entre 2 y 4 mg L^{-1} , mientras que otras como la remolacha, alcachofa y algodón pueden crecer y desarrollarse a concentraciones $\geq 15 \text{ mg L}^{-1}$, y son consideradas tolerantes. Existe otra categoría de plantas llamadas borófitas, las cuales logran completar su ciclo de desarrollo a concentraciones de B en el suelo y en la planta superior a $6-15 \text{ mg L}^{-1}$.

La ciudad de Calama (Chile), localizada en el desierto más árido del mundo, Atacama, mantiene el cultivo de un maíz ancestral variedad

Capia blanco (*Zea mays*), el cual se siembra en los poblados ribereños del río Loa, como Chiu Chiu, Yalquincha y Calama ($22^{\circ}27'31.16''$ s $68^{\circ}52'53.95''$ o). Los cultivos son regados con aguas del río Loa, que presenta condiciones fisicoquímicas especiales de pH neutro a básico (7-8) durante el año y concentraciones de B que varían según la geografía y la cercanía a la desembocadura del río en el Pacífico, alcanzando valores de hasta $39,51 \text{ mg L}^{-1}$ (Martínez, 2018). La capacidad de adsorción del B en el suelo varía, así como su capacidad de asimilación para las distintas especies cultivadas en las áreas que dependen de este afluente (Mendoza-Grimón *et al.*, 2003). En esta zona prevalece el cultivo de la variedad Capia blanco, ya que otras variedades comerciales de maíz no logran sobrevivir en estas extremas condiciones edafoclimáticas.

El maíz es una especie sensible al exceso de B. Sin embargo, se han descrito algunos maíces ancestrales como los lluteños (originarios de Arica) que se cultivan en ambientes semiáridos, donde la biomasa y la altura de las plantas aumentan en forma creciente y continua bajo condiciones de exceso de sodio y de boro (Bastías *et al.*, 2011). Este comportamiento ha sido atribuido a estrategias de tolerancia que presentan estos cultivos locales que crecen normalmente bajo condiciones de exceso de sodio y boro (Bastías *et al.*, 2015). Se han planteado 3 mecanismos para la entrada del boro en las células a nivel de raíz: 1) difusión pasiva a través de la bicapa lipídica, 2) presencia de canales transportadores y 3) una vía dependiente de energía cuando existen deficiencias de boro mediado por los transportadores *BOR* (Tanaka and Fujiwara, 2008a). El ácido bórico puede entrar a la célula ya sea por los canales *NIP 5;1* o por la difusión pasiva del B en forma de ácido bórico, la cual depende de las condiciones de pH del suelo y de la acción de las proteínas transportadoras *BOR1* en condiciones normales (Kajikawa *et al.*, 2011), dentro de la raíz. Luego es trasladado hasta el xilema, y se acumula preferentemente en los ápices vegetativos y en las hojas (Camacho *et al.*, 2008).

Estudios preliminares han demostrado que el maíz ancestral, variedad Capia blanco, es capaz de mantener su crecimiento a altas concentraciones de arsénico (Low Pfeng and Valenzuela Calderón, 2017) y a B (Ortiz *et al.*, 2017). El objetivo general de este trabajo fue determinar el efecto en el crecimiento y en la asimilación del B por parte de

la variedad ancestral Capia blanco, producto de la aplicación de cinco diferentes concentraciones de B en condiciones de pH ácido (5,8) y alcalino (7,8). Consideramos que la variedad local y ancestral está adaptada a altas concentraciones de B, ya que, independientemente del pH del suelo, crece y se desarrolla, sin presentar síntomas de toxicidad a nivel foliar.

Materiales y métodos

Material vegetal

Se utilizaron 113 semillas de la variedad Capia blanco de *Zea mays*, provenientes del poblado de Chiuchiu, Calama, Región de Antofagasta de Chile. Las semillas germinaron en placa Petri usando algodón con agua destilada, y luego fueron trasplantadas en vasos de poliestireno de 350 cc con perlita. El riego se aplicó 3 veces por semana con 50 mL de solución nutritiva Hoagland modificada (Low Pfeng and Valenzuela Calderón, 2017) hasta que las plantas alcanzaron la sexta hoja verdadera (V6). Estos vasos se encontraban en un recipiente de mayor volumen todos juntos por tratamientos para que el excedente del riego se acumulara y fuera tomado por las raíces (Figura 1a).

Variables de crecimiento

El ensayo se realizó el año 2017, entre febrero-julio. Durante estos meses se evaluó el crecimiento en el Laboratorio de Fisiología y Nutrición Vegetal y en el invernadero de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Arturo Prat del Estado de Chile, ubicado en el Campus Huayquique.

Al día cinco, nueve y diecinueve después que todas las plantas fueron trasplantadas en sustrato de perlita hasta que alcanzaron el estado V6, se inició la evaluación de las siguientes variables: altura (cm) de la plántula en función de la hoja de mayor longitud desde el suelo hasta el ápice de la hoja, distancia de entrenudos (cm) y concentración de B a nivel radicular y tejido aéreo (hojas y tallo) al final del ensayo.

Estadística y diseño experimental

Los tratamientos fueron aplicados una semana después de transcurrida la germinación de las semillas y la acumulación de boro en el tejido

vegetal se evaluó a los 19 días desde que las semillas se sometieron al tratamiento. El experimento tuvo una duración de 24 días. Los tratamientos se analizaron con un diseño factorial con 5 niveles de B (0,27, 5, 10, 20 y 30 mg L⁻¹) y dos pH: 5,8 y 7,8 completamente al azar como se describe en la **Tabla 1**. Se ajustó el pH mediante la adición de H₂SO₄ (pH ácido) y KOH (pH básico).

Cada tratamiento tuvo 6 repeticiones y cada unidad experimental tres plantas. Se analizaron los datos mediante ANOVA y cuando existieron diferencias significativas se utilizó la prueba Tukey ($p \geq 0,05$). Los datos fueron analizados con el programa INFOSTAT v2106.

Cuantificación de boro

La determinación del B fue realizada tanto en hojas y tallo como en raíces de plantas de maíz Capia blanco. Se pesó 1 g aproximadamente de tejido seco en un crisol de porcelana y se mineralizó mediante calcinación a temperatura de 500 °C en horno mufla. Una vez seca se extrajo el boro con 10 ml de HCl 2 mol⁻¹. Esta solución se llevó hasta ebullición y luego se dejó reposar durante 1 h. A continuación se filtró (papel filtro $\leq 3 \mu\text{m}$) y finalmente se aforó en un tubo Falcón de 50 mL (**Figura 1b**). Para la reacción colorimétrica se tomó una alícuota de 2 mL y se agregó la solución tampón (4 mL) en presencia del reactivo azometina-H con ácido ascórbico (2 mL). La formación del complejo coloreado se completó después del reposo de 30 a 60 min. Finalmente se extrajo una alícuota del complejo coloreado en la cubeta de 1 mm de paso

Tabla 1. Tratamientos aplicados a los maíces ancestrales Capia blanco. T0 es el control.

Tratamientos	Boro (mg L ⁻¹)	pH
T0	0,27	
T1	5	
T2	10	5,8
T3	20	
T4	30	
T0	0,27	
T1	5	
T2	10	7,8
T3	20	
T4	30	

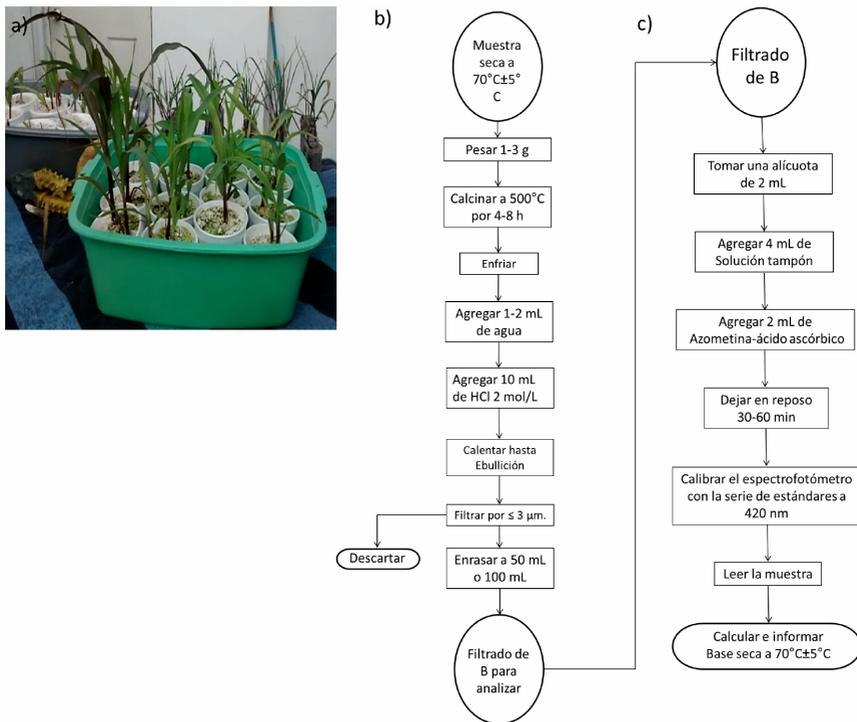


Figura 1. Metodología a) Maíz en estado v3 (7 días), b) Diagrama de flujo calcinación y digestión HCl c) Diagrama de flujo colorimetría.

óptico y se lee en el espectrofotómetro UV-VIS a 420 nm. La cuantificación se realizó por comparación con respecto a una curva de calibración obtenida con soluciones patrones de 0-100 $\mu\text{g L}^{-1}$ de boro (Figura 1c).

La cuantificación del boro se realizó por método colorimétrico según el protocolo de Sadzawka R. *et al.*, 2007. El método consiste en la descontaminación, secado y molienda de la muestra, seguido de las medidas absorciométricas y trazado de curvas espectrales en UV-VIS. Para esta última etapa se utilizó un espectrofotómetro UV-VIS haz simple (190-1100 nm), marca Mecasys Modelo Optizen Pop, en cubetas de 1 mm de paso óptico y volumen útil de 0,240 ml con adaptador para portacubetas.

Resultados y discusión

Efecto de la concertación sobre el crecimiento

Se realizaron tres muestreos a los días 5, 9 y 19, controlando la altura y la distancia entrenudos,

y al final de esta experiencia se cuantificó la concentración de boro.

En el primer muestreo (5 días), las plantas de los distintos tratamientos no presentaron diferencias significativas entre ellas. La altura tuvo un rango entre 3,5 cm y 18 cm, y una altura inicial promedio de 9,3 cm. La distancia de entrenudos varió en un rango entre 0,5 cm y 3 cm con un promedio inicial de 1,44 cm.

El aumento de altura en las plantas de maíz fue continuo durante los estados fenotípicos siguientes y tampoco se vio afectada hasta el final del ensayo. A los 19 días, la altura varió en un rango entre 14 cm y 40 cm con una media de 17,9 cm (Figura 2a) y la distancia entrenudos presentó un rango entre 1,5 cm y 7 cm con un promedio de 2,8 cm (Figura 2b),

En papaya a concentraciones de 0 y 2 mg L^{-1} de boro, no se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) para las variables altura de planta y número de hojas. Sin embargo, se apreciaron diferencias significativas para el diámetro del tallo y el área foliar al comparar tratamientos de B. En tomates los síntomas son visibles en las

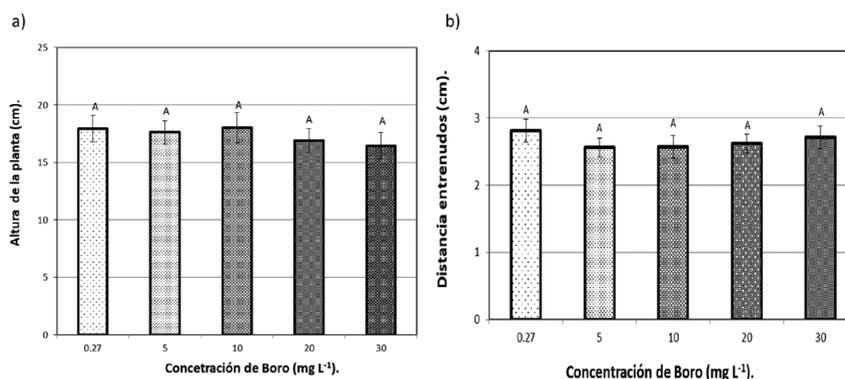


Figura 2. Crecimiento, a) altura y b) distancia entrenudos de la planta *Zea mays* Capia blanco ancestral tratadas con distintas concentraciones de boro (mg L⁻¹). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$) de acuerdo con la prueba Tukey.

hojas de las plantas sometidas a concentraciones de 5,4 y 21,6 mg L⁻¹ de B: además de tener un menor tamaño, presentaron necrosis y reducción de la biomasa foliar (Cervilla Medina, 2009b). En paltas a concentraciones de boro de B50, la existencia de entrenudos muy cortos generó mayor número de nudos (Novoa *et al.*, 2018) y ante el exceso de B150, se observó necrosis apicales y un aumento de tamaño en la lámina foliar. Esto quizás asociado a un aumento en el nivel de RNA y, en consecuencia, un incremento de la división celular en los meristemos (Wild and Jones, 1992), por el papel del elemento en la elongación celular y la síntesis de ácidos nucleicos (Taiz and Zeiger, 2006). En este estudio se aprecia que el maíz capia ancestral sometido a concentraciones 100 veces mayores a los que señala la literatura como tóxicos, no se ve afectado en su crecimiento (altura y distancia entrenudos) y no muestra ninguna sintomatología de toxicidad ante las concentraciones evaluadas.

Efecto del pH sobre el crecimiento

Se realizaron tres muestreos a los días 5, 9 y 19, controlando la altura y la distancia entre nudos, y al final de esta experiencia se cuantificó la concentración de boro.

En el primer muestreo (5 días) las plantas en la variable altura en los distintos pH no presentaron diferencias significativas entre ellas. El pH 5,8 en la altura tuvo un rango entre 10 cm y 28,38 cm. La distancia entre nudos mostró un rango de 1,38 cm a 4,08 cm. El aumento de esta variable altura en las plantas de maíz fue continuo durante

los estados fenotípicos siguientes y tampoco se vio afectada hasta el final del ensayo. A los 19 días ambas variables no presentaron diferencias significativas. La altura mostró un rango de 14 cm a 40 cm, mientras que el promedio final de altura fue 17,7 cm (Figura 3 a). La distancia entre nudos presentó un rango de 1,5 cm a 7 cm, mientras que el promedio final fue 2,7 cm (Figura 3b).

La biodisponibilidad del B disminuye con el pH básico, mientras que la acidez del agua o solución del suelo contribuye a su solubilización (Mendoza-Grimón *et al.*, 2003; Landi *et al.*, 2013) favoreciendo su ingreso a los tejidos vegetales. Esto se debe a que las plantas absorben el boro en 2 formas químicas: como ácido bórico (B(OH)₃) y como anión borato (B(OH)₄⁻) a pH elevados, y el primero es el más común.

En algunas especies tropicales como el banano, valores de 4 a 6 de pH provocan la aparición de síntomas de toxicidad (Vargas *et al.*, 2007), generando un mal crecimiento. En cambio, en variedades como el tabaco, papas, melones y moras el pH óptimo para su normal crecimiento es de 5 a 5,5 (Zapata, 2004). Este maíz puede crecer en pH ácidos y básicos sin generar ninguna consecuencia en el crecimiento.

Efecto de la interacción de la concentración de boro con diferentes pH

Respecto del efecto de la interacción de la concentración de boro con los diferentes pH, los datos evidencian que al final del ensayo las plantas

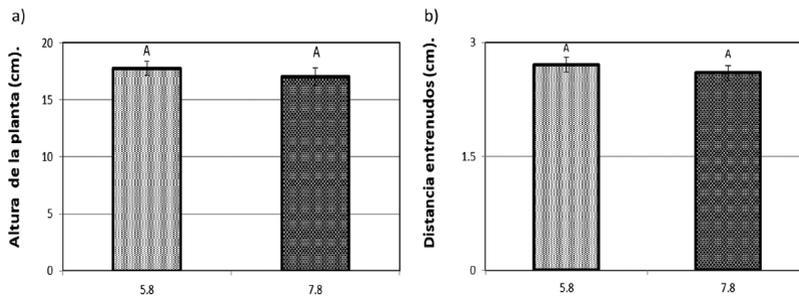


Figura 3. Efecto del pH en el crecimiento, a) altura y b) distancia entrenudos de la planta *Zea mays* Capia blanco ancestral. Las medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) de acuerdo con la prueba Tukey.

expuestas a pH básico de 7,8 y concentración de 30 mg L^{-1} de B mostraron un efecto negativo en la altura, con relación al control y a la misma concentración (30 mg L^{-1}) pero a pH 5,8 ($p \leq 0,05$). Las plantas con pH 5,8 y 30 mg L^{-1} alcanzan 24% más de crecimiento que a pH básico (Figura 4a). En cuanto a la distancia entrenudos, esta variable no difiere significativamente entre los tratamientos, respecto del control ($p > 0,05$). Al igual que la altura a pH básico de 7,8 y concentración de 30 mg L^{-1} de B, mostraron un efecto negativo en la altura respecto del control y de la misma concentración (30 mg L^{-1}) pero a pH 5,8 ($p \leq 0,05$). Las plantas con pH 5,8 crecen más que a pH básico.

El maíz crece normalmente entre pH 5 y 7, y en las regiones áridas el pH fluctúa entre 6,5 y 9. En el caso del boro que contiene el río Loa, en el sector de Yalquincha se observa valor promedio de $17,7 \text{ mg L}^{-1}$ y aumenta según la cercanía a la desembocadura del río en el Pacífico, alcanzando valores de hasta $39,51 \text{ mg L}^{-1}$ (Martínez, 2018). En relación con este ensayo, el maíz Capia blanco crece sin problema a pH 5,8 y 30 mg L^{-1} de concentración de boro como una muestra de la adaptación a las aguas con las que ha sido regado por años. Este ambiente extremo le ha proporcionado la capacidad de conservar el mecanismo de adaptación a pH ácidos y altas concentraciones de boro comportándose como una variedad borófito.

Acumulación de boro

La acumulación de boro en la raíz (Figura 5a) se incrementa en función del pH y de la concentración en la solución nutritiva. A pH ácido el aumento

de la concentración de B se presenta a partir de 10 mg L^{-1} , alcanzando el peak a los 20 mg L^{-1} . No existen diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos de 20 y 30 mg L^{-1} . A pH básico los valores de asimilación de boro son inferiores a los tratamientos expuestos a pH ácido en 40%. El peak también se presenta con 20 mg L^{-1} de boro en la solución nutritiva y tampoco existen diferencias significativas ($p > 0,05$) entre 20 y 30 mg L^{-1} de boro en la solución. En ambos pH las plantas no registran diferencias significativas entre el control ($0,27 \text{ mg L}^{-1}$) y 10 mg L^{-1} .

En la acumulación de boro en el tejido aéreo (Figura 5b), las plantas expuestas a pH ácido presentan una mayor asimilación de B, el cual fue directamente proporcional según aumentaba la concentración de este elemento en la solución nutritiva. Sin embargo, entre $0,27 \text{ mg L}^{-1}$ y 10 mg L^{-1} no hay diferencias significativas ($p > 0,05$), difiriendo a partir de 20 mg L^{-1} . Entre el control y 20 mg L^{-1} hay un incremento de 19%. Entre 20 mg L^{-1} y 30 mg L^{-1} no existen diferencias y la diferencia entre el control es 13% menor a 30 mg L^{-1} . Por otra parte, las plantas expuestas a pH básico y diversas concentraciones de boro mostraron menores tasas de asimilación de B al compararlas con los peaks de plantas expuestas a pH ácido con el pH básico. Este valor fue un 41% menor. Al analizar la respuesta de las plantas dentro del tratamiento a pH básico se observa además que no existen diferencias significativas entre la acumulación de B a 5 mg L^{-1} y 30 mg L^{-1} y que el control solo difiere significativamente de 20 mg L^{-1} ($p \leq 0,05$), en 29%.

La acumulación de boro en los tejidos vegetales aéreos fue inferior respecto de la acumulación en raíces. A pH ácido la acumulación en raíces supera

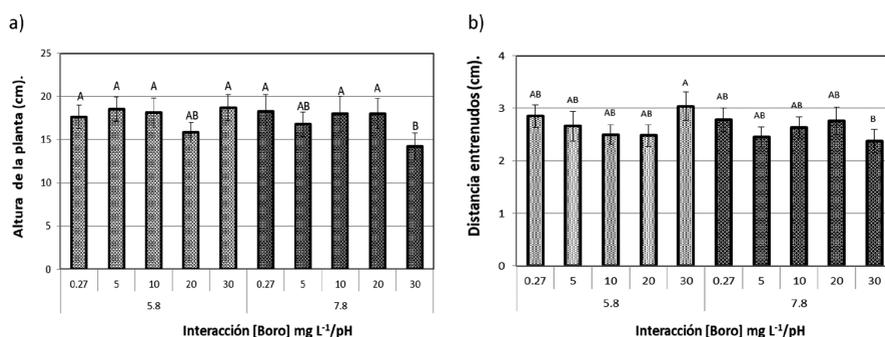


Figura 4. Crecimiento, a) altura y b) distancia entre nudos de la planta *Zea mays* Capia blanco ancestral para la interacción [Boro] mg L⁻¹/pH. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) de acuerdo con la prueba Tukey.

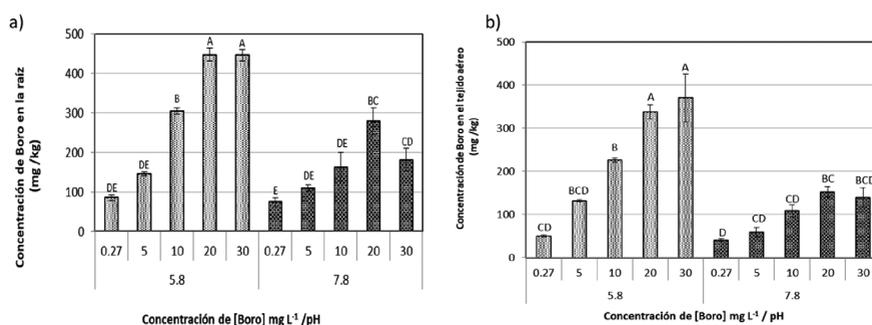


Figura 5. Acumulación de boro a) en la raíz y b) en el tejido aéreo de la planta *Zea mays* Capia blanco ancestral tratadas con la interacción [Boro] mg L⁻¹/pH. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) de acuerdo con la prueba Tukey.

en 29% al tejido aéreo. Las plantas expuestas a pH ácido presentan una mayor asimilación de boro, el cual fue directamente proporcional según aumentaba la concentración de este elemento en la solución nutritiva. Sin embargo, entre 0,27 mg L⁻¹ y 5 mg L⁻¹ no hay diferencias significativas ($p > 0,05$), difiriendo a partir de 10 mg L⁻¹. Entre el control y 10 mg L⁻¹ hay un incremento de 28%. Entre 20 mg L⁻¹ y 30 mg L⁻¹ no existen diferencias. Por otra parte, las plantas expuestas a pH básico y diversas concentraciones de boro mostraron menores tasas de asimilación de B al comparar los peaks de plantas expuestas a pH ácido con el pH básico. Este valor fue un 41% menor. Al analizar la respuesta de las plantas dentro del tratamiento a pH básico se observa además que no existen diferencias significativas entre la acumulación de B a 5 mg L⁻¹ y 30 mg L⁻¹ y que el control solo difiere significativamente de 20 mg L⁻¹ ($p \leq 0,05$), en 26%.

Algunas plantas poseen mecanismos de tolerancia para sobrevivir en presencia de altas concentraciones de boro. Estos no distan mucho de los de absorción normal, variando en la presencia y ausencia de 2 genes, el canal *BORI* perteneciente a la familia *BOR*, el cual permite la exportación de boro fuera de la célula. Este transportador, en presencia de altas concentraciones de boro, es degradado vía endocitosis, generando la expresión de un gen parálogo perteneciente a la misma familia. La expresión de este nuevo gen, *BOR4*, les permite a las plantas tolerar altas concentraciones de boro. Así, el transportador *BOR4* exporta el boro presente en el citoplasma celular al apoplasto, donde no es dañino para el desarrollo normal de la planta (Tanaka and Fujiwara, 2008).

Es bastante probable que Capia blanco ancestral al igual que el tipo "Lluteño" se adapte muy bien a las condiciones de salinidad y exceso de boro del Valle de Lluta. Sin embargo, en relación con los

maíces híbridos del resto del país, sus rendimientos son bastante menores (Tapia, 2009).

En Chile, la norma para aguas de riego 1333-1978 establece que las concentraciones permitidas de boro son de 0,750 mg L⁻¹. Sin embargo, las plantas se comportan de manera diferente frente a las concentraciones de boro. Existen plantas sensibles (<1 mg L⁻¹), moderadamente sensibles (1-2 mg L⁻¹), moderadamente tolerantes (2-4 mg L⁻¹), tolerantes y muy tolerantes (6-15 mg L⁻¹) (Mujeriego, 1990). La sobrevivencia de las especies vegetales es el resultado final de una serie de interacciones donde intervienen el genotipo, el clima, el suelo y el manejo del cultivo, entre otros factores. Este peculiar maíz

resiste una concentración de 30 mg L⁻¹ a pH ácido, demostrando en este experimento que no se ajusta a la clasificación existente.

Conclusiones

El pH ácido permite una mayor asimilación de boro y se acumula mayormente en la raíz. La concentración de 30 mg L⁻¹ a pH 7,8 afecta el crecimiento, aunque las plantas se mantienen vivas y no muestran síntomas de toxicidad.

Zea mays ancestral Capia blanco presenta tolerancia a concentraciones elevadas de boro y un comportamiento borófito.

Literatura citada

- Bastías, E.; Díaz, M.; Pacheco, P.; Bustos, R.; Hurtado, E.
2011. Characterization of maize "Lluteño" (*Zea mays* L. amylaceae type) from northern Chile, tolerant to NaCl and excess of boron, as an alternative for bio-energy production. *Idesia* 29(3): 7-16.
- Bastías, E.; González-Moro, M.B.; González-Murua, C.
2015. Interactive effects of excess boron and salinity on response curves of gas exchange to increase in the intensity of light of *Zea mays* amylacea from the Lluta Valley (Arica-Chile). *Idesia* 33(1): 33-38.
- Brodie, E.
2011. Boron or not boron. Reporting on Agriculture in Western Canada. P. 25-33.
- Camacho, J.J.; Rexach, J.; González-Fontes, A.
2008. Boron in plants: Deficiency and toxicity. *Journal of Integrative Plant Biology* 50(10): 1247-1255.
- Cervilla, M.
2009. Respuesta fisiológica y metabólica a la toxicidad por boro en plantas de tomate. Estrategias de tolerancia. Granada-España. 226 p.
- Kajikawa, M.; Fujibe, T.; Uruguchi, S.; Miwa, K.; Fujiwara, T.
2011. Expression of the Arabidopsis borate efflux transporter gene, AtBOR4, in rice affects the xylem loading of boron and tolerance to excess boron. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry* 75(12): 2421-2423.
- Landi, M.; Remorini, D.; Pardossi, A.; Guidi.
2013. Boron excess affects photosynthesis and antioxidant apparatus of greenhouse Cucurbita pepo and Cucumis sativus. *Journal of Plant Research* 126(6): 775-786.
- Low, C.; Valenzuela, D.
2017. Determinación de la expresión de los genes ACC1, ABCC2, PCS1, en condiciones de alta concentración de arsénico en maíz calameño (*Zea mays*): 73.
- Martínez, C.
2018. Influencia de los diferentes afluentes del sistema del río Loa sobre la concentración de minerales contaminantes en diferentes épocas del año: 72.
- Mendoza-Grimón, V.; Rodríguez-Matín, R.; Fernández Vera, J.; Palacios Díaz, M.; Hernán Moreno, J.
2003. Estudio de la disponibilidad del fósforo y boro aportados por las aguas depuradas de Islas Canarias: Metodología y Resultados Preliminares. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo* VI: 355-360.
- Ministerio de Obras Públicas.
2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos de agua según objetivos de calidad. Calama. Santiago, Chile. 155 p.
- Miwa, K.; Fujiwara, T.
2010. Boron transport in plants: Co-ordinated regulation of transporters. *Annals of Botany* 105(7): 1103-1108.
- Moreno, D.L.; Quiroga, L.A.; Balaguera-López, H.E.; Magnitskiy, S.
2016. El estrés por boro afecta la fotosíntesis y la síntesis de compuestos antioxidantes en plantas. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 10(1). doi: 10.17584/rch.2016v10i1.4189.
- Mujeriego, R.
1990. Riego con agua residual municipal regenerada: manual práctico. Catalunya-España. *Universidad Politécnica de Catalunya*: 9. <http://mie.esab.upc.es/arr/T28E.htm>.
- Nable, R.O.; Bañuelos, G.S.; Paull, J.G.
1997. Boron toxicity. *Plant and Soil* 193: 181-198.
- Novoa, M.; Miranda, D.; Melgarejo, L.
2018. Efecto de las deficiencias y excesos de fósforo, potasio y boro en la fisiología y el crecimiento de plantas de aguacate (*Persea americana*, cv. Hass). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 12(2): 293-307.
- Ortiz, M.; Delatorre-Castillo, C.J.; Low, Sepúlveda, I.; Delatorre-Herrera, J.
2017. Efectos de la aplicación de diferentes concentraciones de boro y dos pH sobre el crecimiento de plántulas de maíz ancestral, raza Capia blanco (*Zea mays*). X Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ciencias Biológicas. Cochabamba, Bolivia.
- Rodríguez Guerreiro, M.J.; Muñoz Camacho, E.; Bernal Pita Da Veiga, M. de los Á.
2009. Estudio comparativo de la tolerancia al boro de dos variedades de pimiento (*Capsicum annum* L.). *Revista Científica UDO Agrícola* 9(3): 509-516.

- Sadzawka R.A.; Carrasco R.M.; Demanel F.R.; Flores P.H.
2007. Métodos de análisis de tejidos vegetales. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile. 120 p.
- Taiz, L.; Zeiger, E.
2006. Fisiología Vegetal. Sunderland, MA, US. 656 p.
- Tanaka, M.; Fujiwara, T.
2008. Physiological roles and transport mechanisms of boron: Perspectives from plants. *Pflugers Archiv European Journal of Physiology* 456(4): 671-677.
- Tapia, F.
2009. Estudio básico: Investigación silvoagropecuaria de innovación en la I región. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias*: 146 p.
- Vargas, A.; Arias, F.; Serrano, E.; Arias M.O.
2007. Toxicidad de boro en plantaciones de banano. *Agronomía Costarricense* 31(2): 21-29.
- Wild, A.; Jones, L.H.P.
1992. Nutrición mineral de las plantas cultivadas. En: Wild, A. (ed.). *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russel*. Ediciones MundiPrensa, Madrid. Pp. 73-119.
- Zapata, R.D.
2004. La química de la acidez del suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Cali, Colombia. 208 p.

