



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**

**FISIOLOGÍA VEGETAL**

**ÁCIDO ABSCÍSICO Y CALCIO FOLIAR EN  
LA PUDRICIÓN APICAL DE TOMATE**

**DANIEL LÓPEZ OSORIO**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

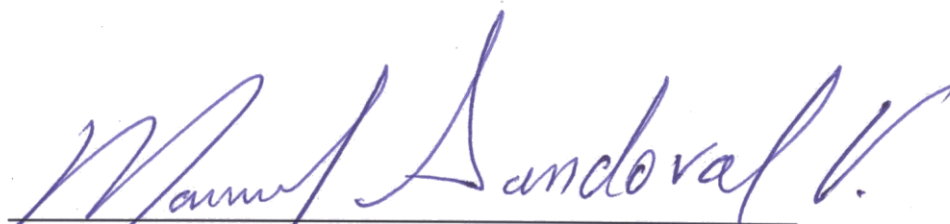
**2015**

La presente tesis titulada: **Ácido abscísico y calcio foliar en la pudrición apical de tomate**, realizada por el alumno: **Daniel López Osorio**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD  
FISIOLOGÍA VEGETAL

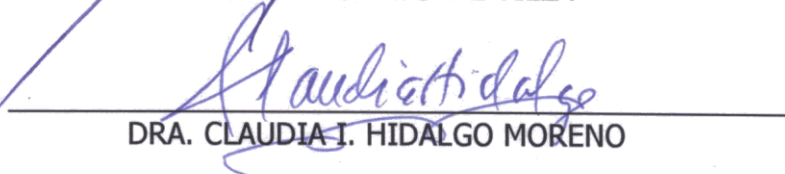
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. MANUEL SANDOVAL VILLA

ASESOR



DRA. CLAUDIA I. HIDALGO MORENO

ASESOR



M. C. JORGE ALVARADO LÓPEZ

Montecillo, Texcoco, estado de México, diciembre de 2015

# ÁCIDO ABCSÍCSICO Y CALCIO FOLIAR EN LA PUDRICIÓN APICAL DE TOMATE

Daniel López Osorio, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2015

## RESUMEN

El desorden fisiológico *blossom end rot* (BER) se debe a una baja distribución de calcio en el fruto de tomate y es favorecido por factores internos y externos, como baja absorción de calcio (Ca) y elevada tasa de transpiración foliar. Como alternativas para mejorar la absorción de Ca en el fruto se han evaluado las aplicaciones foliares de Ca o ácido abscísico (ABA). El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de las aplicaciones foliares de ABA (0, 250, 500 y 750 mg L<sup>-1</sup>) y dos fuentes de Ca: Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 4H<sub>2</sub>O y nanopartículas de CaCO<sub>3</sub>, en plantas de jitomate bajo deficiencia inducida de calcio. Se usó un equipo de infrarrojo para analizar gas (IRGA por sus siglas en inglés) portátil LI6400XT en la determinación de variables fisiológicas como fijación de CO<sub>2</sub>, conductancia estomática, transpiración, temperatura de la hoja y déficit de presión de vapor (DPV); se analizó la concentración nutrimental de Ca, potasio (K) y magnesio (Mg) en hojas y frutos. Además, se evaluó la altura de planta, el peso fresco y seco, las flores abortadas, el rendimiento de fruto y la incidencia de pudrición apical. Las aplicaciones foliares de ABA y nanocarbonato de Ca disminuyeron la conductancia estomática y la tasa de transpiración foliar; la tasa fotosintética se redujo 55 días después de las aplicaciones foliares de 500 y 750 mg L<sup>-1</sup> de ABA. La temperatura y el DPV de la hoja aumentaron debido a la aplicación de ABA, mientras que la aplicación de nitrato de Ca redujo el DPV y, en aplicación conjunta con el nanocarbonato de Ca, redujeron la temperatura de la hoja. Las aplicaciones foliares de nitrato de Ca y ABA aumentaron la concentración de Ca en hojas y el rendimiento de fruto, y disminuyeron la incidencia de BER. El nanocarbonato de Ca disminuyó la concentración de K en hojas, pero incrementó la concentración de Mg en el fruto del primer racimo. El rendimiento se incrementó por la combinación de 0.6 meq L<sup>-1</sup> de carbonato de Ca con 0.6 meq L<sup>-1</sup> de nitrato de Ca y 500 mg L<sup>-1</sup> de ABA. La dosis evaluada de 250 mg L<sup>-1</sup> de ABA redujo la incidencia de BER, de manera similar a como ocurrió con la dosis de 500 y 750 mg L<sup>-1</sup>. La aplicación de nitrato de Ca incrementó la altura, el peso fresco y el peso seco, y disminuyó el número de flores abortadas por planta. La aplicación de nanocarbonato de Ca disminuyó la altura de planta, el peso fresco y el peso seco, y aumentó el número de flores abortadas. Por último, el ABA incrementó la altura, el peso fresco y el peso seco, y disminuyó el número de hojas con hijuelos, los hijuelos por hoja y el número de flores abortadas.

Palabras clave: Blossom end rot, *Solanum lycopersicum*, conductancia estomática, tasa fotosintética, nanocarbonato de calcio.

# ABSCISIC ACID AND FOLIAR CALCIUM ON TOMATO BLOSSOM END ROT

Daniel López Osorio, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2015

## ABSTRACT

The physiological disorder blossom end rot (BER) is due to a low distribution of calcium in the fruit of tomato and is favored by internal and external factors such as low absorption of calcium (Ca) and high rate of leaf transpiration. Foliar applications of Ca or abscisic acid (ABA) has been evaluated as alternatives to improve the absorption of Ca in the fruit. The objective of this study was to evaluate the effect of foliar application of ABA (0, 250, 500 and 750 mg L<sup>-1</sup>) and two Ca sources: Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O and nanoparticles of CaCO<sub>3</sub>, in plants of tomato under induced deficiency of calcium. A portable infrared gas analyzer (IRGA) model LI6400XT was used in the determination of physiological variables such as CO<sub>2</sub> uptake, stomatal conductance, transpiration, temperature of the blade and vapor pressure deficit (VPD); concentration of calcium (Ca), potassium (K) and magnesium (Mg) in leaves and fruits was determined. In addition, plant height, fresh and dry weight, the aborted flowers, fruit yield and the incidence of BER was evaluated. Foliar applications of ABA and Ca nanocarbonate of decreased stomatal conductance and transpiration rate leaf; the photosynthetic rate dropped 55 days after foliar applications of 500 and 750 mg L<sup>-1</sup> of ABA. Temperature and leaf VPD increased due to the application of ABA, while the application of Ca nitrate reduced the VPD and application together with the nanocarbonato of Ca, reduced the temperature of the sheet. Foliar applications of Ca and ABA nitrate increased Ca concentration in leaves and fruit yield and decreased the incidence of BER. The nanocarbonato of Ca decreased the concentration of K in leaves, but increased the concentration of Mg in the fruit of the first cluster. The yield increased by the combination of 0.6 meq L<sup>-1</sup> of Ca carbonate with 0.6 meq L<sup>-1</sup> of nitrate of Ca and 500 mg L<sup>-1</sup> of ABA. The evaluated dose of 250 mg L<sup>-1</sup> of ABA reduced the incidence of BER, similarly to as occurred with a dose of 500 and 750 mg L<sup>-1</sup>. The application of Ca nitrate increased height, fresh weight and dry weight, and decreased the number of flowers aborted per plant. The application of nanocarbonato of Ca decreased plant height and dry weight, fresh weight, and increased the number of aborted flowers. Finally, the ABA increased height, fresh weight and dry weight, and decreased the number of leaves with tillers, tillers per leaf and the number of aborted flowers.

Key words: Blossom end rot, *Solanum lycopersicum*, stomatal conductance, photosynthetic rate, calcium nanocarbonato.

## **AGRADECIMIENTOS**

A los integrantes de mi consejo particular Dr. Manuel Sandoval Villa, Dra. Claudia I. Hidalgo Moreno y M.C. Jorge Alvarado López por su invaluable apoyo y por sus acertados comentarios en la realización de este trabajo, han hecho un gran aporte a mi formación profesional y sobre todo me han compartido su conocimiento y su confianza.

Al CONACYT por el financiamiento para mis estudios de Maestría en Ciencias.

Al Colegio de Postgraduados por los recursos facilitados en la realización de este trabajo de investigación.

## **DEDICATORIA**

A las personas que son parte de mi motivación para cumplir mis metas personales: mis padres.

Con gratitud y respeto

Daniel López Osorio

## Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS .....	2
HIPÓTESIS .....	2
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
Ion calcio .....	3
Fuentes de calcio .....	4
Absorción y transporte.....	4
Influencia del ambiente en el transporte de calcio.....	5
Antagonismo con otros elementos .....	6
Movimiento de calcio en xilema.....	7
Calcio en la composición vegetal .....	7
Funciones del calcio .....	8
El desorden fisiológico <i>Blossom end rot</i> .....	10
El ácido abscísico .....	13
LITERATURA CITADA .....	16
<b>COMPORTAMIENTO FISIOLÓGICO DE HOJAS DE TOMATE TRATADAS CON ÁCIDO ABSCÍSICO, CARBONATO Y NITRATO DE CALCIO.....</b>	<b>22</b>
RESUMEN .....	22
INTRODUCCIÓN.....	23
MATERIALES Y MÉTODOS .....	24
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	25
CONCLUSIONES .....	35
LITERATURA CITADA .....	36
<b>ÁCIDO ABSCÍSICO Y CALCIO EN LA PUDRICIÓN APICAL DE TOMATE .....</b>	<b>39</b>
RESUMEN .....	39
INTRODUCCIÓN.....	40
MATERIALES Y MÉTODOS .....	41
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	42
CONCLUSIONES .....	51
LITERATURA CITADA .....	52
<b>RESPUESTA DEL TOMATE AL ÁCIDO ABSCÍSICO Y NANOCALCIO FOLIAR.....</b>	<b>55</b>
RESUMEN .....	55
INTRODUCCIÓN.....	55
MATERIALES Y MÉTODOS .....	56
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	57
CONCLUSIONES .....	65
LITERATURA CITADA .....	65
<b>CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>67</b>

## INTRODUCCIÓN

El calcio (Ca) es un nutriente esencial requerido para la función de la membrana plasmática, almacenado en organelos como catión en el balance de cargas aniónicas, en el citosol para la señalización celular y en el apoplasto para la estructura de la pared celular (Ho y White, 2005). Los desórdenes por deficiencia de  $\text{Ca}^{2+}$  en frutos se han atribuido al bajo contenido total de calcio en el tejido, así como regulación anormal en su distribución (De Freitas *et al.*, 2011). Los síntomas de la deficiencia de Ca en el fruto comienzan con plasmólisis celular y apariencia húmeda de los tejidos de la parte apical del fruto, que llegan a ser café oscuro cuando las células van muriendo (de Freitas *et al.*, 2010); este síntoma visible en los frutos se conoce como pudrición apical o *blossom end rot*. Aunque se cree que el Ca se mueve en la planta exclusivamente por los tejidos vasculares del xilema, los mecanismos que regulan la distribución permanecen poco entendidos, el flujo de savia del xilema, la dirección y la tasa de calcio xilemático deberían determinarse por gradientes de potencial en respuesta a diferentes tasas de crecimiento y transpiración (Taylor y Locascio, 2004). En tal caso, las altas tasas de transpiración y de crecimiento pueden reducir el potencial del agua e incrementar la demanda de calcio xilemático, por lo que la distribución de Ca que fluye desde las raíces hacia las hojas y frutos depende de la concentración de calcio en la savia del xilema. De acuerdo con esto, las hojas tienen mayor tasa de transpiración que los frutos, lo cual resulta en mayor contenido de Ca en las hojas que en los frutos (De Freitas *et al.*, 2011).

Se ha demostrado que al reducirse la transpiración de las hojas, al disminuir el déficit de presión de vapor atmosférico o al aplicar ácido abscísico (ABA) a las plantas de tomate, puede disminuirse el flujo de Ca xilemático hacia las hojas e incrementarse este movimiento hacia el fruto (De Freitas *et al.*, 2011). Las aplicaciones foliares de 500 mg  $\text{L}^{-1}$  de ABA han disminuido la incidencia de pudrición apical al incrementarse el flujo de calcio hacia los frutos, mediante la disminución en la transpiración foliar y un mayor número de tejidos de xilema en el fruto (De Freitas *et al.*, 2011). Barickman *et al.* (2014) señalan que las aplicaciones de ABA son efectivas en etapas tempranas de desarrollo de la planta, pero son menos efectivas en etapas más avanzadas de desarrollo; la menor incidencia de pudrición apical fue más notable al suministrar 500 mg  $\text{L}^{-1}$  de ABA y 180 mg  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{Ca}^{2+}$  en la solución nutritiva. La concentración de Ca en el fruto y su firmeza se incrementan en proporción a la concentración de Ca en la solución



nutritiva (Hamson, 1952; Hanger, 1979). Dodds *et al.* (1997) mostraron que las aplicaciones foliares de  $\text{CaCl}_2$ , una vez por semana durante la etapa de crecimiento del fruto, promueven un incremento en la firmeza en frutos asperjados, en comparación con frutos sin asperjar, por lo que la aplicación foliar de Ca es una alternativa de suministro de este elemento en condiciones de deficiencia. El desarrollo de nuevos tipos de fertilizantes, usando tecnología innovadora, es una opción para incrementar la producción agrícola en un futuro, de una población global creciente, ya que el desarrollo de estas fuentes nanoestructuradas puede enfocarse a ser más eficientes que los fertilizantes convencionales (Liu y Lal, 2015).

## **OBJETIVOS**

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el control de la pudrición apical y el comportamiento fisiológico de las plantas de tomate en respuesta a la aplicación de ácido abscísico, un compuesto de calcio nanoestructurado y otro convencional, así como evaluar la absorción de Ca de ambos casos.

## **HIPÓTESIS**

La incidencia de pudrición apical disminuye por efecto de la aplicación del nanocalcio.

El ácido abscísico favorece la acumulación de Ca en frutos.

La absorción de calcio proveniente de nanofertilizantes es mayor que la del suministrado en el fertilizante convencional.

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### Ion calcio

El ion Ca presenta un radio iónico de  $1.0 \times 10^{-10}$  m (1 angström) y un radio hidratado equivalente a  $4.12 \times 10^{-10}$  m, con una energía de hidratación de  $1577 \text{ J mol}^{-1}$ ; otro catión bivalente, como el magnesio, presenta radio iónico de  $0.72 \times 10^{-10}$  m y radio hidratado igual a  $4.28 \times 10^{-10}$  m; para el caso del catión monovalente potasio (K) presenta radio iónico de  $1.49 \times 10^{-10}$  y radio hidratado de  $3.31 \times 10^{-10}$  m (Marschner, 2012). La corteza terrestre contiene 3.64% de Ca, valor mucho más alto que el de otros nutrientes. El Ca se encuentra en minerales como calcita, dolomita, apatita e iones Ca. El contenido de Ca varía, dependiendo del tipo de suelo, a su vez este depende de variables como el material parental, el grado de intemperización, el uso previo y la pérdida del mismo. Los suelos derivados de rocas calcáreas usualmente tienen altos contenidos de Ca (Mengel y Kirkby, 1989). Las aplicaciones regulares de Ca al suelo, ya sea para prevenir la acidez del suelo o en forma de fertilizantes inorgánicos, como superfosfato de calcio, han provocado que los suelos agrícolas estén relativamente bien suministrados con Ca (Kirby y Pilbeam, 1984). La concentración de Ca en la solución del suelo es controlada por el material parental del suelo, la química del suelo, la fertilización y la difusión a lo largo del gradiente de concentración. Las características de los suelos que afectan el suministro de Ca son la capacidad de intercambio catiónico, la proporción de Ca en el almacén de bases catiónicas intercambiables, la tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo, la liberación de Ca soluble de minerales primarios y el pH de la solución del suelo (McLaughlin y Wimmer, 1999). A pH mayor o igual a 5.0 el incremento de la acidez del suelo se asocia a dos aspectos, el desgaste mineral y el incremento de la disponibilidad de Ca dentro de la solución del suelo. Cuando disminuye el pH, los iones  $\text{H}^+$  reemplazan a iones  $\text{Ca}^{2+}$  sobre los sitios de intercambio y los libera hacia la solución del suelo, de la cual esos cationes pueden ser absorbidos por las raíces o pueden ser lixiviados. Así conforme el pH del suelo es menor de 5.0, iones  $\text{Al}^{3+}$  son movilizados más rápidamente que  $\text{Ca}^{2+}$ , porque la liberación de cationes es proporcional a la carga. Esta liberación resulta en mayor contenido de aluminio en la solución del suelo (McLaughlin y Wimmer, 1999).

## **Fuentes de calcio**

El Ca puede ser suministrado a las plantas usando fertilizantes, enmiendas al suelo o aplicaciones foliares. Los materiales que contienen calcio son carbonato de Ca (40%), cianamida de Ca (28.5%), nitrato de Ca (19%), superfosfato de Ca concentrado (14%), dolomita (30%), desechos de pescado (8.5%), huesos de animales (31.5%-33%), sulfato de Ca (26.5%), superfosfato de Ca ordinario (20%), tiosulfato de Ca (6.4%) y cloruro de Ca (36%). Klougart (1980) encontró que proporcionar Ca en la solución nutritiva como nitrato es mejor que hacerlo como cloruro o sulfato, para tener una mayor absorción de calcio en tulipán (*Tulipa gesneriana* L.). Kleinhenz *et al.* (1999) mostraron que las fuentes solubles de Ca, como nitrato de calcio, incrementan la concentración de Ca en tejidos de papa (*Solanum tuberosum*), en comparación con aquellas de baja solubilidad, como el sulfato de Ca.

## **Absorción y transporte**

Las plantas obtienen Ca principalmente de la solución nutritiva, a través del sistema radical (White, 2001). La absorción de Ca presenta alta correlación con la radiación solar y la temperatura del sistema radical (Paiva *et al.*, 1998). La absorción de calcio por las raíces se considera un proceso pasivo, a lo largo del gradiente electroquímico, acoplado a la absorción de agua o transpiración, durante el día, y a la presión radical durante la noche (Morard *et al.*, 2000). La actividad radical en la absorción de Ca se relaciona indirectamente con la asimilación de carbono en el follaje, mediante la regulación concurrente de flujos de agua y carbono a través de estomas. El movimiento de calcio en la planta y su acumulación en frutos y almacenamiento en tejidos está relacionado con el movimiento transpiratorio de agua (Keiser y Mullen, 1993). El Ca solo se mueve a través del xilema, en dirección de raíces a brotes. En un fruto de tomate, el floema abastece más del 90% de agua (Paiva *et al.*, 1998). El Ca es inmóvil en el floema, el cual es bidireccional, así que una vez que el Ca está en hojas o frutos, no puede removilizarse a otras partes de la planta, ni bajo estrés por falta de Ca (Hanger, 1979).

El Ca se mueve apoplásticamente, a través de las raíces, para llegar al xilema y traslocarse a varias partes de la planta. La ruta apoplástica es a través de las paredes celulares y espacios intercelulares, sin cruzar la membrana plasmática. La banda de Caspari existe en raíces desarrolladas y es una separación entre la sección estelar y la cortical de la raíz. Esta estructura extracelular está presente en todas las raíces de las plantas vasculares y actúa como una barrera para el movimiento apoplástico de solutos. Esta barrera está presente a lo largo de la raíz excepto en pocos milímetros en el extremo del ápice radical, y es en este ápice por donde la mayoría del Ca entra al xilema (White, 2001). El estatus y la capacidad de intercambio catiónico del apoplasto son importantes para la absorción de Ca, porque este debe moverse completamente a través del apoplasto hacia el xilema. En el apoplasto, la capacidad de intercambio catiónico de la pared celular es influenciada por la concentración relativa de la celulosa, hemicelulosa y lignina, la cual puede variar grandemente entre especies vegetales y puede influir en la absorción de iones específicos (McLaughlin y Wimmer, 1999). En algunos casos, el Ca viaja a través de la banda de Caspari, en el exterior de la membrana, hacia las bombas de Ca, en la membrana interna. El Ca libre en el citosol se descarga en el apoplasto estelar, por las bombas dependientes de energía. La concentración de Ca se mantiene debajo de niveles dañinos y el Ca descargado se deposita dentro del xilema (Kitano *et al.*, 1999).

### **Influencia del ambiente en el transporte de calcio**

Los factores que inhiben la transpiración son baja disponibilidad de agua, alta humedad relativa, restringido crecimiento de raíces y baja temperatura (Keiser y Mullen, 1993; Bar-Tal y Pressman, 1996). Las hojas tienen mayor relación superficie-volumen que los frutos. Cuando estos son pequeños tienen una relación superficie-volumen mayor que los frutos grandes, lo cual promueve la transpiración y los frutos pequeños acumulan más calcio (Tadesse *et al.*, 2001 y 1999). En la última etapa, no obstante, la reducción en la relación superficie-volumen y el depósito de cutina y ceras sobre la superficie del fruto reducen la permeabilidad de agua. En consecuencia, el movimiento del Ca hacia el fruto es reducido (Tadesse *et al.*, 2001). Además, las plantas desarrollan más follaje, el cual compite con el fruto por agua, reduciendo el transporte de Ca hacia el fruto, en especial bajo periodos de baja humedad relativa (Tadesse *et al.*, 1999). El

transporte lento de Ca a esos órganos que transpiran poco se considera la principal razón de la baja acumulación de Ca en el fruto. Estos efectos pueden deberse a la capacidad limitada de las plantas para regular la distribución interna de calcio, en particular el flujo continuo hacia los órganos con baja transpiración y rápido crecimiento, como son los frutos (Tadesse *et al.*, 2001; Franco *et al.*, 1994). Pavia *et al.* (1998) mostraron que un incremento en la transpiración del fruto es más efectivo para incrementar la concentración de Ca en el tejido que una mayor concentración de Ca en el sustrato. En frutos, el Ca se acumula más en la parte proximal al tallo que en la parte distal. Frost y Kretchman (1989) dividieron pepinos en cuatro secciones transversales equivalentes y encontraron que existe un gradiente de Ca dentro del fruto; la sección proximal al pedúnculo presenta los valores más altos de Ca, mientras que la parte distal los más bajos. En un estudio de Tadesse *et al.* (2001) el fruto de chile dulce se dividió en secciones proximales y distales, y estas últimas tuvieron concentraciones de Ca menores que las secciones proximales del fruto.

### **Antagonismo con otros elementos**

La absorción de Ca es menos eficiente que la de K (Kirby y Pilbeam, 1984), debido a que el Ca es un ion divalente y a medida que se incrementa la carga iónica de este su absorción disminuye. Altas concentraciones de  $K^+$ ,  $Na^{2+}$  y  $NH_4^+$  en suelos pueden tener efectos adversos sobre la absorción de calcio (Mengel y Kirkby, 1989). Geraldson (1956) sugirió que un exceso de estos disminuye la absorción de Ca e incrementa la presencia de BER en tomate. En un estudio realizado por Nukaya *et al.* (1995), una mayor concentración de  $NH_4^+$  que de  $NO_3^-$  en la solución nutritiva favorece una menor absorción de Ca y un incremento en la incidencia de BER. Además, la absorción de Ca es más baja que la de  $K^+$ , porque el  $Ca^{2+}$  solo se toma por el ápice radical, donde no hay suberización de endodermis ni banda de Caspari (Kreij, 1996). Por lo tanto, la presencia de nematodos puede inducir BER. El movimiento de Ca hacia el fruto disminuye conforme la etapa de desarrollo progresa y los elementos fácilmente móviles en el floema, como  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ , P y N se incrementan con la traslocación de fotosintatos. Esto reduce la relación de Ca con otros elementos, en particular  $Mg^{2+}$  y  $K^+$ , lo cual resulta en pudrición apical (Tadesse *et al.*, 2001).

## **Movimiento de calcio en xilema**

Una vez en la corriente transpiratoria, la ruta para Ca es parte de un complejo de intercambio iónico, como se va desplazando; la adsorción y desorción ocurren en los sitios de intercambio dentro de las paredes celulares del xilema (McLaughlin y Wimmer, 1999). Otros factores que afectan el desplazamiento de Ca a través de la planta, además de la transpiración, son los sitios de unión de intercambio (Choi *et al.*, 1999). Estos permanecen en equilibrio con el flujo transpiratorio y la capacidad de intercambio total de Ca de las células del xilema depende de las superficies interiores, así como de la composición química y estructural de tales paredes celulares (McLaughlin y Wimmer, 1999).

Aunque el Ca se mueve con el agua, el influjo de este a las hojas maduras es más bajo que el influjo a hojas jóvenes, incluso aunque tengan la misma tasa de transpiración. En áreas que requieren grandes cantidades de Ca, como las meristemáticas, se crean los sitios de intercambio catiónico. El ácido indol acético (AIA), una forma de auxina, estimula el eflujo de las bombas de protones, en la zona de elongación, e incrementa la formación de los sitios de intercambio catiónico que causan que el ápice en crecimiento sea una demanda de Ca (Marschner, 1997). Choi *et al.* (1999) cultivaron plantas de tomate en pequeños recipientes que restringían el crecimiento radical. Esto suprimió fuertemente el transporte de iones de  $^{45}\text{Ca}^{2+}$  a las nuevas hojas y ápices, mientras que el transporte solo se redujo marginalmente, lo cual indicando independencia del transporte de Ca aquel del agua. Este fenómeno puede ser el resultado de la modificación de sitios de unión a Ca a lo largo de las paredes del xilema o la interacción mutua entre AIA y  $\text{Ca}^{2+}$  (Choi *et al.*, 1999). La aplicación de ácido 2,3,5 triiodobenzoico, un inhibidor del transporte de AIA, ha resultado en una deficiencia de Ca (Kirby y Pilbeam, 1984).

## **Calcio en la composición vegetal**

El Ca se encuentra en grandes cantidades, más que cualquier otro ion divalente inorgánico, en las plantas y se ha reconocido como un nutriente esencial desde mediados de 1800 (McLaughlin y Wimmer, 1999). La concentración de Ca en las plantas varía de 0.1 a 10% de peso seco en los tejidos y de 0.2 a 0.3% en el fruto (Marschner, 1997,

2012). Esta concentración alta de Ca se asocia con la concentración de Ca en la solución del suelo más que con una alta eficiencia de absorción radical (Morard *et al.*, 2000). El Ca en las plantas está presente como Ca libre, adsorbido en grupos carboxílicos, fosforílicos e hidroxilos, así como en carbonatos, fosfatos y oxalatos (Mengel y Kirkby, 1989). Además en semillas, como fitina y ácido fítico (Hanger, 1979). La mayoría de las funciones del Ca son como componente estructural y componente de macromoléculas, a las cuales les proporciona estabilidad y unión molecular. El Ca puede suministrarse en altas concentraciones y puede alcanzar más de 10% del peso seco, por ejemplo, en hojas maduras sin síntomas de toxicidad o inhibición del crecimiento de la planta (Marschner, 2012).

### **Funciones del calcio**

En contraste con otros macronutrientes, una alta proporción del Ca total en los tejidos de la planta usualmente se ubica en paredes celulares (apoplasto). Esta única distribución es el resultado del gran número de sitios de unión para Ca en las paredes celulares. En la lámina media se encuentra ligado a grupos R-COO<sup>-</sup> de ácidos poligalacturónicos o pectinas, en una forma fácilmente intercambiable (Marschner, 2012). La importancia de bajas concentraciones de Ca libre en el citosol radica en la función de ciertas enzimas, como la citosólica fructosa 1,6-bisfosfatasa, la cual regula la síntesis de sacarosa de triosas fosfato entregadas por el cloroplasto. Una concentración tan baja, como 1 µM de Ca, inhibe la actividad de esta enzima, incluso en presencia de 1000 veces más concentración de Mg (1 mM).

### **Estabilización de la pared celular**

La unión de Ca, como pectatos, en la lámina media es esencial para fortalecer paredes celulares y tejidos vegetales. Esta función del calcio se refleja en la correlación positiva entre la capacidad de intercambio catiónico de paredes celulares y la concentración de Ca en tejidos vegetales requerida para el óptimo crecimiento. La degradación de pectatos es mediada por la acción de poligalacturonasa, la cual es fuertemente inhibida por altas concentraciones de Ca. Por lo tanto, en tejidos deficientes de calcio la actividad de poligalacturonasas se incrementa y un síntoma típico de deficiencia de Ca es la

desintegración de las paredes celulares y el colapso de los tejidos afectados, como pecíolos y partes terminales de tallos y frutos (Ho y White, 2005; Marschner, 2012). Debido a su función en las paredes celulares de las plantas, el Ca tiene efecto sobre la firmeza (Hanger, 1979). La concentración de Ca en el fruto y su firmeza se incrementan en proporción a como aumenta la concentración de Ca en la solución nutritiva (Hamson, 1952). Dodds *et al.* (1997) mostraron que las aplicaciones foliares de CaCl<sub>2</sub>, una vez por semana durante la etapa de crecimiento del fruto, favorecen un incremento en la firmeza en frutos asperjados, comparados con aquellos no asperjados. En contraste con la mayoría de los macronutrientes, una alta proporción de Ca está en las paredes celulares (Marschner, 1997). Esto se debe a la alta necesidad de Ca como componente estructural y estabilizador de paredes celulares (Kitano *et al.*, 1999). Dicha distribución es producto de la gran cantidad de sitios de unión para Ca (Kirby y Pilbeam, 1984).

### **Estabilización de la membrana**

El Ca juega un papel fundamental en la estabilización e integridad y permeabilidad de la membrana celular (Kitano *et al.*, 1999). Esto es evidente en el incremento de pérdida de solutos de bajo peso molecular de las células de tejidos deficientes en Ca y en plantas severamente afectadas por la deficiencia, por una desintegración general de estructura de la membrana y pérdida de compartimentalización celular (Marschner, 2012). El Ca estabiliza membranas celulares por unión de fosfato y grupos carboxilato de fosfolípidos y proteínas, y puede intercambiarse por otros cationes en esos sitios de unión; el intercambio de Ca por sodio, metales pesados o aluminio puede deberse a salinidad en el suelo, metales pesados y toxicidad por aluminio. El efecto estabilizador de Ca es más prominente bajo condiciones de estrés, como bajas temperaturas y anaerobiosis. La pérdida de solutos de bajo peso molecular, como azúcares e iones K, en respuesta a anaerobiosis es reducida por el incremento de calcio en la solución externa (Marschner, 2012).

### **Balance de cargas catión-anión**

En células vacuoladas de hojas, en particular, una gran proporción de Ca se localiza en las vacuolas, donde puede contribuir al balance catión-anión, al actuar como ion *counter*



para aniones orgánicos e inorgánicos. En especies de plantas que preferentemente sintetizan oxalato, en respuesta a la reducción de nitrato, la formación de oxalato de Ca en vacuolas es importante para el mantenimiento de una baja concentración de Ca libre citosólico. Lo mismo se mantiene para especies con formación preferente de oxalatos de Ca en el apoplasto. La presencia de oxalato de Ca soluble también es importante para la acumulación de sales en vacuolas de plantas alimentadas con nitratos, sin el incremento de la presión osmótica en las vacuolas. Los movimientos estomatales, nyctinástico y seismonástico son procesos inducidos por cambios de turgor en células individuales (células guarda) o tejidos. Estos cambios de turgor son mediados por flujos, principalmente, de Ca, cloro y malato, como solutos osmóticamente activos.

### **El calcio como segundo mensajero**

La habilidad del Ca para funcionar como segundo mensajero se basa en la baja concentración de Ca libre citosólico en células vegetales y en la química del mismo, lo cual permite alterar la conformación de proteínas a que se une (White y Broadley, 2003). Las señales ambientales y de desarrollo pueden activar canales de Ca en membranas celulares que catalizan rápidamente el influjo de calcio hacia el citosol e incrementan las concentraciones de Ca libre; estos estímulos pueden ser la intensidad luminosa, duración del día, temperaturas extremas, sequía, estrés osmótico, salinidad, estrés por aluminio, estrés oxidativo, estimulación mecánica, anoxia, nodulación y ataque de patógenos (Marschner, 2012).

### **El desorden fisiológico *Blossom end rot***

Los síntomas de *Blossom end rot* (BER) primero llegan a ser una área húmeda en la parte apical del fruto. Esta se desarrolla rápidamente en una mancha negra, seca. El BER afecta la parte distal de la placenta y contenidos loculares adyacentes, así como la pared externa. La deficiencia de calcio estimula la producción de etileno y, en consecuencia, la producción de carotenoides. Otra forma de este desorden es una apariencia interna café o negra en el tejido interno, en el parénquima adyacente alrededor de las semillas jóvenes y la parte distal de la placenta. Esto se puede presentar sin que el síntoma exterior sea visible. BER interno es algunas veces llamado semillas

negras y esto es visible cuando el fruto es cortado por el consumidor, los frutos que muestran síntomas de BER tienen menos Ca que frutos no afectados (Maynard *et al.*, 1957; Wada *et al.*, 1996).

### **Factores que favorecen la incidencia de *Blossom end rot***

Cantidades insuficientes de Ca para el crecimiento de las plantas son raras en la mayoría de los suelos; así, una deficiencia de calcio en las plantas es el resultado de una pobre distribución de calcio, en relación con la demanda, absorción pobre o efectos antagónicos con otros elementos que resultan en deficiencias de Ca. La deficiencia de Ca puede ser una consecuencia de perturbaciones en el abastecimiento de agua, exceso de salinidad o factores que inhiben la transpiración. Las deficiencias de Ca con frecuencia se restringen a baja transpiración y rápido crecimiento de tejidos como ápices de raíz, frutos y órganos de almacenamiento (Keiser y Mullen, 1993). Similarmente, el BER puede ocurrir debido a una pobre absorción de Ca por las plantas, debido al estrés hídrico o al estrés osmótico, o a una baja distribución de Ca dentro del fruto y poco transporte de Ca hacia la parte distal del fruto, en la etapa crítica de desarrollo (Ho *et al.*, 1995). Si la deficiencia de Ca ocurre, los síntomas típicos son la deformación y apariencia clorótica de ápices en crecimiento, deformación periférica de la lámina foliar de hojas jóvenes, que llevan a necrosis foliar y muerte de meristemas (Mengel y Kirby, 1989; Paiva *et al.*, 1998; Morard *et al.*, 1996). La deficiencia de Ca puede llevar a una pronta senescencia y ausencia de fructificación (Paiva *et al.*, 1998). Deficiencias de Ca localizadas en tejidos están implicadas como mecanismos iniciadores de muerte celular y necrosis de tejidos (Kleinhenz *et al.*, 1999). Las semillas que son deficientes en Ca tienen poca germinación y producen plántulas anormales y débiles, aun cuando la semilla germine en solución nutritiva (Keiser y Mullen, 1993). La deficiencia de Ca está relacionada con algunos desórdenes, incluyendo *tip burn*, en lechuga (*Lactuca* spp.); *black heart*, en apio (*Apium graveolens* L.), *bitter pit*, en manzano (*Malus domestica*); y *blossom end rot*, en melón, pepino, berenjena y tomate (Frost y Kretchman, 1989). Estudios previos han mostrado que el BER no es causado por solo un factor, sino por una combinación de uno o más factores que intensifican el efecto, como alta salinidad, alta concentración de  $Mg^{2+}$ ,  $NH_4^+$  y  $K^+$ , inadecuado desarrollo de tejidos del xilema, tasa de crecimiento acelerada, relaciones de humedad desfavorable

(alta, baja o fluctuante), bajo Ca soluble en suelo, alta temperatura, y alta o baja transpiración (Saure, 2001; Geraldson, 1955; Kirby y Pilbeam, 1984; Paiva *et al.*, 1998; Kreij, 1996; Franco *et al.*, 1999; Marcelis y Ho, 1999). La forma de fertilización nitrogenada ha mostrado afectar la incidencia de BER. Cuando la fertilización se hace con  $\text{NO}_3^-$  se estimula la absorción de Ca, comparada con la nutrición con  $\text{NH}_4^+$ , lo cual disminuye la absorción de Ca (English y Barker, 1983). En un estudio realizado por DeKock *et al.* (1982) el porcentaje de BER fue significativamente más alto con  $\text{NH}_4^+$  que con  $\text{NO}_3^-$ . La alta fertilización nitrogenada causa excesivo crecimiento vegetativo y bajo amarre de frutos (He *et al.*, 1999). En un experimento reportado por Morard *et al.* (1996) en cultivo de tomate en hidroponía, en la 22-23 hoja desarrollada, indujo deficiencia severa de Ca por 5 y 8 días. Con 5 días de estrés por Ca hubo una disminución en el crecimiento y las plantas recuperaron su crecimiento después de 15 a 18 días del inicio de la deficiencia. Las plantas que recibieron el periodo más largo de estrés por deficiencia de Ca (8 días) tuvieron síntomas más severos: se detuvo la elongación del tallo, la aparición de nuevas hojas se interrumpió, la necrosis apical apareció entre 10 y 11 días después del comienzo del estrés por Ca. El BER apareció en 55% de los frutos producidos y la habilidad de absorción de Ca no se recuperó después de haber suministrado la solución completa. La absorción de Mg se incrementó durante el estrés por falta de Ca, reflejando el antagonismo entre estos dos elementos. La deficiencia de Ca generalmente disminuye la absorción de aniones (nitrato, sulfato y fosfato), y favorece un menor crecimiento (Morard *et al.*, 1996).

Diferentes factores ambientales como luminosidad, temperatura, humedad y contenido de agua en el suelo afectan la transpiración de la planta. Las bajas temperaturas también tienen un efecto negativo sobre presión radical, lo cual se asocia con el transporte de Ca (Quintana *et al.*, 1999). Las bajas temperaturas reducen el crecimiento radical y la radiación solar juega un rol importante en transpiración de la planta. Las bajas concentraciones de calcio también pueden ocurrir cuando hay alta humedad y la transpiración de la planta completa es baja (Choi *et al.*, 1999). La alta humedad relativa promueve y reduce el BER. Tadesse *et al.* (2001) mostraron que la alta humedad relativa induce la incidencia de BER en chile dulce.

Las deficiencias de Ca son más severas durante el periodo de rápida expansión celular en el fruto, esto es de una a tres semanas después de la antesis (Willumsen *et al.*, 1996). La máxima tasa relativa de crecimiento de frutos de tomate ocurre entre 12 y 15 días después de la antesis (Saure, 2001). Durante este periodo de rápida expansión celular el Ca es esencial para prevenir BER. Muchos otros investigadores están de acuerdo en que la incidencia de BER ocurre principalmente alrededor de la segunda semana después de la antesis (Saure, 2001). Un incremento de requerimientos de Ca para la síntesis de membrana celular resulta de la alta expansión celular causada por las altas tasas de importación de sacarosa y las altas temperaturas del fruto pueden incrementar el déficit entre el abastecimiento de Ca y sus requerimientos, favoreciendo la incidencia de BER (Paiva *et al.*, 1998). Altas temperaturas y radiación han mostrado agravar el problema, ocasionando altas tasas de crecimiento del fruto (Tadesse *et al.*, 1999). Marcelis y Ho (1999) hipotetizaron que el BER no se debió al bajo suministro de Ca en la solución nutritiva, sino a un incremento en la demanda para Ca en áreas de rápida elongación celular del fruto, la cual el xilema no tiene la habilidad de suministrar.

### **El ácido abscísico**

La síntesis de la hormona del estrés (ABA) ocurre en respuesta a factores ambientales, especialmente la carencia de agua o de nitrógeno (Wilkinson y Davies, 2002; Marschner, 2012). Los precursores para la biosíntesis de ácido abscísico son los carotenoides violaxantina y neoxantina. Las raíces y brotes son sitios importantes de biosíntesis de ABA, el cual es altamente móvil tanto en xilema como en floema y puede circular dentro de la planta (Jiang y Hartung, 2008). En lupino blanco, cuando el abastecimiento de agua es el adecuado, 28% del ABA en la savia del xilema se origina de la biosíntesis en las raíces, mientras que en condiciones de sequía esta proporción se incrementa a alrededor de 55% (Wolf *et al.*, 1990). En respuesta al déficit de agua, el ABA rápidamente induce cierre estomático, lo cual ocurre a través de la apertura de canales iónicos en el tonoplasto y la membrana plasmática de las células guarda (Amtmann y Blatt, 2009). El ABA puede convertirse en varios metabolitos biológicamente inactivos, incluyendo ácido faseico, ácido dihidrofásico y conjugados de glucosa. En hojas, el ABA se sintetiza principalmente en las hojas maduras y se exporta con los fotosintatos, vía floema, hacia las hojas jóvenes. Los cambios de

concentración de ABA en una hoja pueden reflejar la fisiología de cambio de demanda a fuente durante su desarrollo (Marschner, 2012).

La señal de transducción en cascada de ABA se inicia por proteínas fosfatasa que modulan las actividades de diversas proteínas cinasas (Kline *et al.*, 2010). Tales señales en cascada se integran con proteína cinasa mitogen-activada (MAPK), además de otras proteínas cinasa, enzimas fosfatasa y sistemas calcio-calmodulina.

Las fitohormonas y los segundos mensajeros intracelulares son partes integrales de una extensiva cadena de transducción de señales que inducen respuestas apropiadas de la planta a cambios ambientales. Por ejemplo, bajo contenido de agua en suelo en la zona de la rizosfera incrementa la síntesis y exportación de ABA de las raíces a los brotes (Wilkinson y Davies, 2002). Algunas moléculas de ABA se unen a los receptores de ABA en células guarda y, a través de cascadas de transducción de señales, incluyendo cambios de calcio citosólico y pH citosólico, abren canales de  $K^+$  y  $Cl^-$  en sus membranas plasmáticas y en el tonoplasto (Amtmann y Blatt, 2009). Esto resulta en una pérdida de presión osmótica de las células guarda, causando contracción y cierre del poro estomático, por lo tanto la prevención de pérdida de agua (Marschner, 2012).

Los efectos del abastecimiento de nitrógeno en la producción de ácido abscísico son importantes para el balance de agua de la planta. Bajo deficiencia de agua, altas concentraciones de ABA en las hojas favorecen el cierre de estomas y previenen la pérdida excesiva de agua. Cuando las plantas son deficientes en nitrógeno o son alimentadas con bajas cantidades de nitrógeno, responden con un más rápido cierre estomático (indicado por un incremento en la resistencia foliar al déficit de presión de vapor) que en plantas bien suministradas con nitrógeno. Esta respuesta estomática en hojas de plantas deficientes en nitrógeno se debe no solo a las altas concentraciones de ABA en la savia del xilema, sino también a una mayor sensibilidad del estoma a las elevadas concentraciones de ABA. La sensibilidad del estoma a la concentración de ABA es mayor en hojas viejas que en hojas jóvenes, y para una dada edad foliar, mayor en hojas de plantas deficientes de nitrógeno que en plantas bien suministradas con dicho elemento (Marschner, 2012).

## **Ácido abscísico en el control de *Blossom end rot***

La aspersión de plantas completas con ABA incrementa las concentraciones de Ca en los tejidos del fruto y en el apoplasto, y reduce la permeabilidad de las membranas celulares en los frutos, y por lo tanto la incidencia de *blossom-end rot* (De Freitas *et al.*, 2011). Estos estudios sugieren que el ABA puede no solo afectar la concentración de Ca en el tejido, sino también la regulación de la distribución celular de Ca, lo cual puede afectar la susceptibilidad del fruto a los desórdenes de deficiencia de Ca como el BER (De Freitas *et al.*, 2011). El ABA ayuda a las plantas a aclimatarse a varios tipos de estrés de tipo ambiental, como sequía, temperatura extrema y exceso de luz (Hirayama y Shinozaki 2007); afecta el intercambio gaseoso, causando cierre de estomas, y por lo tanto la fotosíntesis disminuye, lo cual tiene un efecto negativo en el crecimiento vegetativo. No obstante, puede tener un efecto positivo sobre los flujos nutricionales de la planta, por ejemplo, mejorar la absorción de K en pepino (*Cucumis sativus*), bajo condiciones de alta temperatura, y promover la absorción de Ca en frutos de tomate (Barickman *et al.*, 2014).

El crecimiento de la planta y su desarrollo son regulados por factores internos y externos, uno de los cuales es el ABA. Esta hormona puede generar fluctuación en la concentración de Ca citosólico, lo cual es percibido por proteínas Ca dependientes para iniciar una cascada de señales que controla muchos procesos fisiológicos, incluyendo la adaptación a estrés ambiental. Estudios recientes demuestran que el ABA desencadena mecanismos para incrementar la absorción de Ca en el fruto y prevenir el desarrollo de BER. Por ejemplo, de Freitas *et al.* (2011) encontraron que el ABA induce baja conductancia estomática y disminuye la pérdida de agua, lo cual resulta en un incremento en la concentración de calcio en los frutos y una reducción en la de las hojas.

## LITERATURA CITADA

- Amtmann, A. and M.R. Blatt. 2009. Regulation of macronutrient transport. *New Phytol.* 81: 35-52
- Barickman T. C., D. A. Kopsell, and C. E. Sams. 2014. Exogenous foliar and root applications of abscisic acid increase the influx of calcium into tomato fruit tissue and decrease the incidence of blossom-end rot. *Hortscience* 49: 1397-1402.
- Bar-Tal, A. and E. Pressman. 1996. Root restriction and potassium and calcium solution concentration affect dry-matter production, cation uptake, and blossom-end rot in greenhouse tomato. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 121: 649-655.
- Barickman, C.T., D.A. Kopsell, and C.E. Sams. 2014. Foliar applications of abscisic acid decrease the incidence of blossom-end rot in tomato fruit. *Sci. Hortic.* 179: 356-362.
- Choi, J.H., G.C. Chung, and S.H. Lee. 1999. Influence of the night humidity on distribution of calcium and sap flow in tomato plants. *J. Plant Nutr.* 22: 281-290.
- De Freitas S. T., C. V. T. Amarante, J. M. Labavitch, and E. J. Mitcham 2010. Cellular approach to understand bitter pit development in apple fruit. *Postharvest Biol. Tec.* 57: 6-13.
- De Freitas S. T., K. A. Shackel, and E. J. Mitcham. 2011. Abscisic acid triggers whole-plant and fruit-specific mechanisms to increase fruit calcium uptake and prevent blossom-end rot development in tomato fruit. *J. Exp. Bot.* 62. 2645-2656.

- DeKock, P., A. Hall, R. Boggie, and R. Inkson. 1982. The effect of water stress and form of nitrogen on the incidence of blossom-end rot in tomatoes. *J. Sci. Food Agric.* 33: 509-515.
- Dodds, G.T.; L. Trenholm, A. Rajabipour, C.A. Madramootoo, and E.R. Norris. 1997. Yield and quality of tomato fruit under water-table management. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 122: 491-498.
- English, J.E. and A.V. Barker. 1983. Calcium efficiency among tomato strains depends on nitrogen regimes. *J. Plant Nutr.* 6: 725-734.
- Franco, J.A., S. Banon, and R. Madrid. 1994. Effects of a protein hydrolysate applied by fertigation on the effectiveness of calcium as a corrector of blossom-end rot in tomato cultivated under saline conditions. *Sci. Hort.* 57: 283-292.
- Franco, J.A., S.P.J. Perez, J.A. Fernandez, M. Parra, and A.L. Garcia. 1999. Effect of two irrigation rates on yield, incidence of blossom-end rot, mineral content, and free amino acid levels in tomato cultivated under drip irrigation using saline water. *J. Hort. Sci. Biotech.* 74: 430-435.
- Frost, D.J., and D.W. Kretchman. 1989. Calcium deficiency reduces cucumber fruit and seed quality. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 114:552-556.
- Geraldson, C.M. 1955. The use of calcium for control of blossom-end rot of tomatoes. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 68: 197-202.
- Geraldson, C.M. 1956. Evaluation of control methods for blackheart of celery and blossom-end rot of tomatoes. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 69: 236-241.
- Hamson, A.R. 1952. Factors which condition firmness in tomatoes. *Food Res.* 17: 370-379.
- Hanger, B. C. 1979. The movement of calcium in plants. *Commun. Soil Sci. Plant Ann.* 10: 171-193.



- He, Y., S. Terabayashi, T. Asaka, and T. Namiki. 1999. Effect of restricted supply of nitrate on fruit growth and nutrient concentration in the petiole sap of tomato culture hydroponically. *J. Plant Nutr.* 22: 799-811.
- Hirayama T. and K. Shinozaki. 2007. Perception and transduction of abscisic acid signals: Keys to the function of the versatile plant hormone ABA. *Trends Plant Sci.* 12: 343-351.
- Ho L.C., P. Adams, X.Z. Li, H. Shen, J. Andrews, and Z.H. Xu. 1955. Response of calcium-inefficient tomato cultivars to salinity in plant growth, calcium accumulation and blossom-end rot. *J. Hort. Sci.* 70: 909-918.
- Ho L C. and P. J. White. 2005. A cellular hypothesis for the induction of blossom-end rot in tomato fruit. *Ann. Bot.* 95: 571-581.
- Jiang F. and W. Hartung. 2008. Long-distance signaling of abscisic acid (ABA): the factors regulating the intensity of the ABA signal. *J. Exp. Bot.* 59: 37-43.
- Keiser, J. R., and R. E. Mullen. 1993. Calcium and relative humidity effects on soybean seed nutrition and seed quality. *Crop Sci.* 33: 1345-1349.
- Kirby, E.A., and D.J. Pilbeam. 1984. Calcium as a plant nutrient. *Plant Cell Environ.* 7: 397-405.
- Kitano, M., T. Araki, S. Yoshida, and T. Eguchi. 1999. Dependence of calcium uptake on water absorption and respiration in roots of tomato plants. *Biotronics* 28: 121-130.
- Kleinhenz, M. D., J.P. Palta, and C.C. Guner. 1999. Impact of source and timing of calcium and nitrogen applications on "Atlantic" potato tuber calcium concentrations and internal quality. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 124: 498-506.
- Kline, K.G., M.R. Sussman, and A.M. Jones. 2010. Abscisic acid receptors. *Plant Physiol.* 154: 479-482.

- Klougart, A. 1980. Calcium uptake of tulips during forcing. *Acta Hort.* 109: 89-95.
- Kreig, C. 1996. Interactive effect of air humidity, calcium, and phosphate on blossom end rot, leaf deformation, and nutrient contents of tomato. *J. Plant Nutr.* 19: 361-377.
- Liu R. and R. Lal. 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Sci. Total Environ.* 514: 131-139.
- MacLaughlin, S. B. and R. Wimmer. 1999. Calcium physiology and terrestrial ecosystem processes. *New. Phytol.* 142: 373-417.
- Marcelis, L.F.M. and L.C. Ho. 1999. Blossom-end rot in relation to growth rate and calcium contents in fruits of sweet pepper (*Capsicum annuum* L). *J. Exp. Bot.* 50: 357-363.
- Marschner, H. 1997. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd ed. Academic Press: San Diego, CA.
- Marschner, P. 2012. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3rd. ed. Academic Press. San Diego, CA.
- Maynard, D.N., W.S. Barham, and C.L. McCombs. 1957. The effect of calcium nutrition of tomatoes as related to the incidence and severity of blossom end rot. *Proc. Fla. State Hort. Sci.* 69: 318 -322
- Mengel, K. and E. Kirkby. 1989. *Principals of Plant Nutrition*. International Potash Institute. Basil, Switzerland.
- Morard, P., L. Lacoste, and J. Silvestre. 2000. Effects of calcium deficiency on nutrient concentration of xylem sap of excised tomato plants. *J. Plant. Nutr.* 23: 1051-1062.

- Morard, P., A. Pujos, A. Bernadac, and G. Bertoni. 1996. Effect of temporary calcium deficiency on tomato growth and mineral composition. *J. Plant Nutr.* 19: 115-127.
- Nukaya, A., K. Goto, H. Jang, A. Kano, and K. Ohkawa. 1995. Effect of  $\text{NH}_4^+$ -N level in the nutrient solution on the incidence of blossom-end rot and gold specks on tomato fruit grown in rockwool. *Acta Hort.* 401: 381-338.
- Paiva, E.A.S., R.A. Sampaio, and H.E.P. Martínez. 1998. Composition and quality of tomato fruit cultivated in nutrient solutions containing different calcium concentrations. *J. Plant Nutr.* 21: 2653-2661.
- Quintana, J.M., H.C. Harrison, J. Nienhuis, J.P. Palta, and K. Kmiecik. 1999. Comparison of pod calcium concentration between two snap bean populations. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 124: 273-276.
- Saure, M.C. 2001. Blossom-end rot of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) - a calcium or a stress-related disorder? *Sci. Hort.* 90: 193-208.
- Tadesse, T., M. A. Nichols, E.W. Hewett, and K.J. Fisher. 2001. Relative humidity around the fruit influence the mineral composition and incidence of blossom-end rot in sweet pepper. *J. Hort. Sci. Biotechnol.* 76: 9-16.
- Tadesse, T., M.A. Nichols, and K.J. Fisher. 1999. Nutrient conduction effects on sweet pepper plants grown using a nutrient film technique. 2. Blossom-end rot and fruit mineral status. *New Zealand J. Crop Hort. Sci.* 27: 239-247.
- Taylor, M.D., S.J. Locascio, and M.R. Alligood. 2004. Blossom-end rot incidence of tomato as affected by irrigation quantity, calcium source, and reduced potassium. *HortScience* 39:110-1115.

- Wada, T.; H. Ikeda, M. Ikeda, and H. Furukawa. 1996. Effects of foliar application of calcium solution on the incidence of blossom end rot of tomato fruit. *J. Japan Soc. Hort. Sci.* 65: 553-558.
- White, P. J. 2001. The pathways of calcium movement in the xylem. *J. Exp. Bot.* 52: 891-899.
- White, P.J. and M.R. Broadley. 2003. Calcium in plants. *Ann. Bot.* 92: 487-511.
- Willumsen, J., K.K. Petersen, and K. Kaack. 1996. Yield and blossom-end rot of tomato as affected by salinity and cation activity ratios in the root zone. *J. Hort. Sci.* 71: 81-98.
- Wilkinson, S. and W.J. Davies. 2002. ABA-based chemical signalling: the co-ordination of responses to stress in plants. *Plant Cell Environ.* 25: 195-210.
- Wolf, O., W.D. Jeschke, and W. Hartung. 1990. Long distance transport of abscisic acid in NaCl-treated intact plants of *Lupinus albus*. *J. Exp. Bot.* 41: 593-600.

# COMPORTAMIENTO FISIOLÓGICO DE HOJAS DE TOMATE TRATADAS CON ÁCIDO ABCSÍCICO, CARBONATO Y NITRATO DE CALCIO

PHYSIOLOGICAL RESPONSE OF TOMATO LEAVES TREATED WITH ACID, ABCSISIC, CARBONATE AND CALCIUM NITRATE

Daniel López Osorio<sup>1</sup>, Manuel Sandoval Villa<sup>1§</sup>, Claudia Isabel Hidalgo Moreno<sup>1</sup> y

Jorge Alvarado López<sup>1</sup>

## RESUMEN

El desorden fisiológico *blossom end rot* (BER) se debe a una baja distribución de calcio en el fruto de tomate y es favorecida por factores internos y externos, como baja absorción de calcio y elevada tasa de transpiración foliar. Como alternativas para mejorar la absorción de calcio en el fruto se han evaluado las aplicaciones foliares de calcio o ácido abscísico (ABA). El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de las aplicaciones foliares de ABA y dos fuentes de calcio [ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  y nanopartículas de  $\text{CaCO}_3$ ] en plantas de jitomate con deficiencia inducida de calcio. En la determinación de las variables fisiológicas como fijación de  $\text{CO}_2$ , conductancia estomática, transpiración, temperatura de la hoja y déficit de presión de vapor se usó un equipo portátil LI6400XT. Los resultados mostraron que las aplicaciones foliares de ABA y carbonato de calcio disminuyen la conductancia estomática y la tasa de transpiración foliar; la tasa fotosintética se redujo 55 días después de las aplicaciones foliares de 500 y 750  $\text{mg L}^{-1}$  de ABA. La temperatura y el déficit de presión de vapor de la hoja aumentaron, debido a la aplicación de ABA, mientras que la aplicación de nitrato de calcio redujo el déficit de presión de vapor y, en aplicación conjunta con carbonato de calcio, redujeron la temperatura de la hoja.

Palabras clave: *Blossom end rot*, *Solanum lycopersicum*, conductancia estomática, tasa fotosintética, nanofertilizante.

## INTRODUCCIÓN

La deficiencia de calcio en frutos de tomate causa el desorden fisiológico conocido como pudrición apical (*Blossom end rot*, en inglés, BER), la prevención de su incidencia ha sido efectiva con aplicaciones foliares de calcio (Wada *et al.*, 1996) o ácido abscísico (De Freitas *et al.*, 2011). Los mecanismos de acción sobre el comportamiento de las hojas no son claros y serían fisiológicamente distintos, ya que el ácido abscísico (ABA) es una hormona sintetizada en las raíces y los brotes, en respuesta a carencia de agua o nitrógeno (Wilkison y Davies, 2002), mientras que el calcio es un nutrimento que debe trasladarse hacia el fruto, desde la raíz o la hoja, en caso de aplicación foliar. El comportamiento de los estomas es afectado por la radiación, la humedad relativa, la concentración de CO<sub>2</sub>, el estrés biótico o abiótico, y la acción de las hormonas, dentro de las cuales el ABA promueve el cierre de estomas, mediante dos mecanismos: una acción bioquímica que provoca la salida de agua de las células guarda y una acción hidráulica indirecta, a través de una disminución en la permeabilidad al agua dentro de los tejidos vasculares de la hoja (Pantin *et al.*, 2012). Se ha demostrado que al aplicar ABA a las plantas de tomate se reduce la transpiración de las hojas y disminuye el flujo de calcio xilemático hacia las mismas, y el movimiento hacia el fruto se incrementa (De Freitas *et al.*, 2011), órgano donde la falta de calcio origina BER (Taylor y Locascio, 2004). La fuente más usada para suministrar Ca vía foliar es el CaCl<sub>2</sub>, sin embargo, el uso de compuestos nanoestructurados va en aumento, como ocurre con las nanopartículas de TiO<sub>2</sub>, las cuales promueven la actividad de la nitrato reductasa (Lu *et al.*, 2002) y aceleran la germinación de semillas de espinaca (Zheng *et al.*, 2005) y trigo (Feizi *et al.*, 2012). Por el lado contrario, se ha encontrado que induce efectos genotóxicos en *Vicia narbonensis* L. y *Zea mays* L. (Castiglione *et al.*, 2011). Las dos

rutas de acceso a las hojas de compuestos nanoestructurados son vía cuticular y estomática (Eichert *et al.*, 2008); la primera solo permite la entrada de compuestos con tamaño menor de 5 nm, debido a los poros cuticulares extremadamente pequeños, mientras que la ruta estomática permite la entrada de partículas más grandes, dado el tamaño micrométrico de los estomas (Eichert *et al.*, 2008; Eichert y Goldbach, 2008). Los efectos de la aplicación foliar de estos compuestos no se tienen bien determinados, posiblemente alteran las tasas de transpiración, fotosíntesis y balance térmico, y obstruyen los estomas, debido a su tamaño (Grantz *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2006). El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de la aplicación foliar de ABA (0, 250, 500 y 750 mg L<sup>-1</sup>), nitrato de calcio (0 y 0.6 meq L<sup>-1</sup>) y carbonato de calcio nanoestructurado (0 y 0.6 meq L<sup>-1</sup>) sobre la actividad de los estomas de plantas de jitomate con deficiencia de calcio.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Semillas de jitomate “chino” (*Solanum lycopersicum* L.), colecta regional de Tehuacán, Pue., México), se sembraron en turba, en una charola de poliestireno, en un invernadero del Área de Nutrición Vegetal, en el Colegio de Postgraduados. Treinta días después de la siembra, las plantas se transfirieron a bolsas de polietileno de 35 × 35 cm y se irrigaron con solución nutritiva universal de Steiner. Al inicio de floración, la solución nutritiva se modificó, eliminando el suministro de Ca<sup>2+</sup>, y la composición de esta quedó de la siguiente manera: N-NO<sub>3</sub> (9.5 meq L<sup>-1</sup>), P (1 meq L<sup>-1</sup>), S-SO<sub>4</sub> (4 meq L<sup>-1</sup>), K (8 meq L<sup>-1</sup>), Mg (4 meq L<sup>-1</sup>) y N-NH<sub>4</sub> (2.5 meq L<sup>-1</sup>). Al día siguiente de modificar la solución nutritiva, se inició con la aplicación foliar de ABA (0, 250, 500 y 750 mg L<sup>-1</sup>), nitrato de calcio (0 y 0.6 meq L<sup>-1</sup>) y carbonato de calcio nanoestructurado (0 y 0.6

meq L<sup>-1</sup>); a todas las soluciones se les añadió 0.3 mL L<sup>-1</sup> de DAP-PLUS<sup>®</sup>, como surfactante. Después de 32, 40 y 55 días de iniciar las aplicaciones foliares, se midió la radiación fotosintéticamente activa, la conductancia estomática, la tasa fotosintética, la concentración intercelular de CO<sub>2</sub>, la tasa de transpiración, el déficit de presión de vapor y la temperatura de la hoja, con un equipo portátil de fotosíntesis LI6400XT LI-COR<sup>®</sup>, equipado con una cámara de 3 × 2 cm, modelo 6400-08 LI-COR<sup>®</sup> (LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA), en un periodo entre 11:00 y 13:00 horas, sobre hojas recientemente maduras y en condiciones de cielo despejado.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

La radiación fotosintéticamente activa externa (PAR, por sus siglas en inglés) se midió dentro del invernadero y el promedio, durante los 32 días después del inicio de aplicación de tratamientos (DDAT), fue de 898.10  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; en la segunda medición (40 DDAT) se presentó un promedio de 934.88  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , mientras que en la tercera medición (55 DDAT) la PAR promedio fue de 908.45  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . La PAR interna es la radiación que llegó directamente a la superficie de la hoja y es con la cual se determinaron las variables fisiológicas. Después de 32, 40 y 55 DDAT, la PAR promedio fue de 691.59, 733.43 y 708.27  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectivamente.



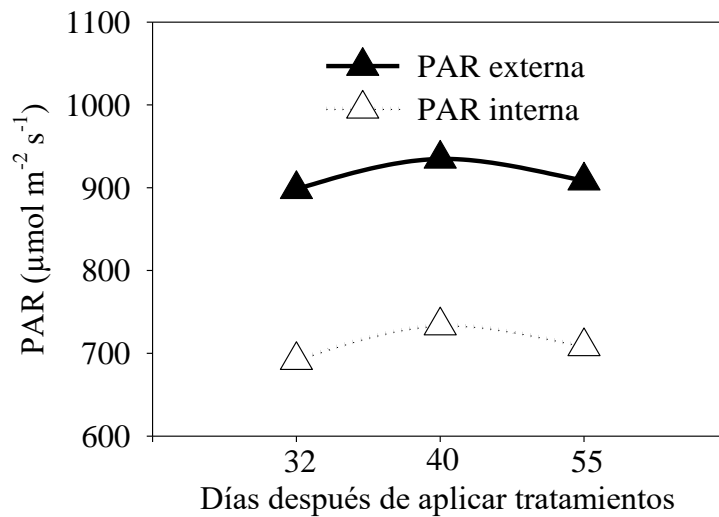


Figura 1. Radiación fotosintéticamente activa (PAR) en el interior del invernadero (PAR externa) y sobre la superficie foliar de las hojas muestreadas (PAR interna), después de los diferentes días de aplicación de tratamientos.

Los estomas son estructuras microscópicas ubicadas en las hojas, formadas por dos células guarda que conforman un poro central, mediante el cual optimizan la absorción de  $\text{CO}_2$  y minimizan la pérdida de vapor de agua, para adaptarse a las condiciones ambientales en las que la planta se desarrolla (Araújo *et al.*, 2011). La tasa fotosintética y la conductancia estomática fueron afectadas por la aplicación de carbonato de calcio y ABA, como factores independientes, mientras que la transpiración fue afectada por la aplicación de ABA, así como por la interacción entre carbonato y nitrato de calcio, lo cual se observó después de 40 días del inicio de la aplicación de tratamientos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Análisis de varianza para tasa fotosintética, conductancia estomática y transpiración.

Fuente de variación	Tasa fotosintética			Conductancia estomática			Transpiración		
	32	40	55	32	40	55	32	40	55
	----- ddt -----								
N	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C	*	*	*	*	ns	ns	ns	*	*
ABA	ns	ns	*	*	ns	*	ns	ns	*
N × C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
N × ABA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C × ABA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
N × C × ABA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV	31.3	33.9	26	46.3	52.6	55	30.6	26.4	28.8

ns = efecto no significativo ( $\alpha = 0.05$ ), \* = significativo ( $\alpha = 0.05$ ).

N = nitrato de calcio, C = carbonato de calcio, ABA = ácido abscísico, ddt = días después de aplicación de tratamientos. CV = coeficiente de variación.

La aplicación de ABA causó una disminución significativa de la conductancia estomática, a 32 y 55 días después del inicio de aplicación de tratamientos (Figura 1). De Freitas *et al.* (2014) encontraron algo similar, al aplicar 500 mg L<sup>-1</sup> de ABA, en comparación con aplicar solo agua. El efecto del ABA sobre la conductancia estomática se debe a la acción bioquímica consistente en la activación de canales iónicos SALC1, en las células guarda, lo que favorece la salida de agua y, finalmente, el cierre de estomas (Kim *et al.*, 2010), o a través de la disminución de la permeabilidad al agua dentro de los tejidos vasculares de la hoja (Pantin *et al.*, 2012).

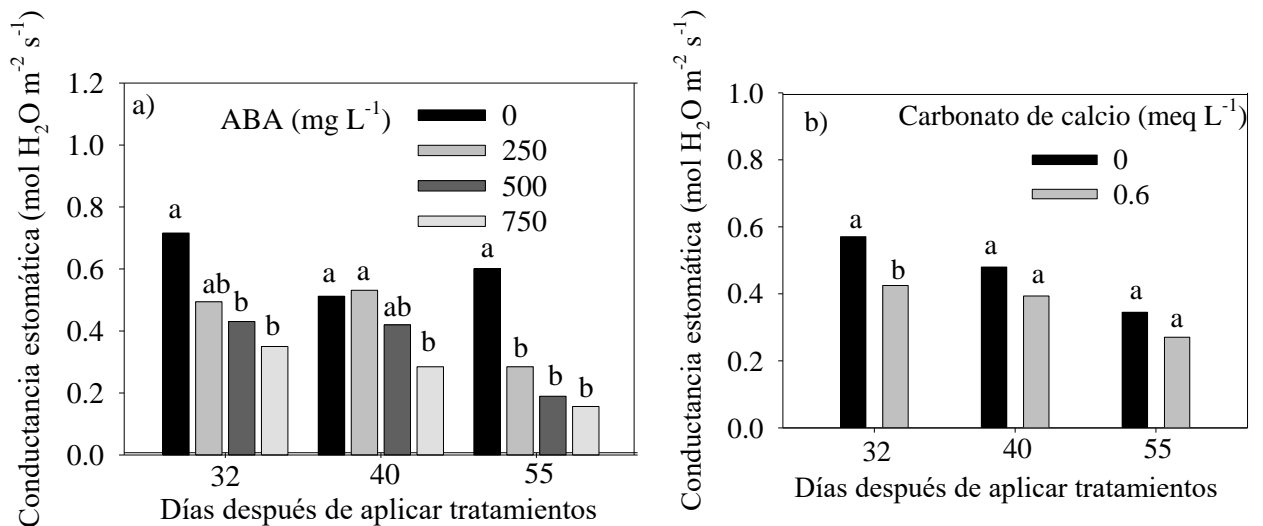


Figura 2. Conductancia estomática promedio en respuesta a la aplicación de ácido

abscísico (a) y carbonato de calcio (b) (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

La aplicación foliar de carbonato de calcio (0.6 meq L<sup>-1</sup>) disminuyó la conductancia estomática, 32 días después de iniciar la aplicación de tratamientos (Figura 2); el efecto fue similar al de la hormona ABA, al causar el cierre de estomas. Al cerrarse los estomas, la conductancia estomática disminuye proporcionalmente (Nobel, 2009). Al respecto, Wang *et al.* (2013) indican que las nanopartículas con tamaño mayor de 100 nm pueden obstruir la apertura estomática y causar efectos adversos sobre el intercambio gaseoso, causando necrosis sobre la superficie de las hojas. Este efecto se observó cuando se aplicaron nanopartículas de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en hojas de sandía, sin embargo, cuando se aplicaron nanopartículas de MgO no se observaron hojas dañadas. En el presente trabajo se presentó necrosis de las hojas tratadas con nanopartículas de CaCO<sub>3</sub> sin la aplicación de ácido abscísico, efecto similar al observado al aplicar Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, debido posiblemente a factores como el tamaño de partículas y la solubilidad del compuesto, ya que el CaCO<sub>3</sub> tiene baja solubilidad, comparada con la del Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, el cual no afectó la conductancia estomática.

La tasa fotosintética, expresada en  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , fue afectada negativamente por la aplicación de CaCO<sub>3</sub> (Figura 3). Los estomas son poros cuya función es permitir el

intercambio gaseoso, de forma que el  $\text{CO}_2$  atmosférico entre al estroma del cloroplasto en las células del mesófilo, donde se fijará en ácido 3-fosfoglicérico, por acción de la enzima ribulosa bifosfato carboxilasa oxigenasa (Ciclo C3), además de permitir la pérdida de vapor de agua. Los resultados muestran que este proceso se ve afectado negativamente por la aplicación de  $30 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ . La aplicación foliar de ABA generó diferencias significativas después de 55 días del inicio de la aplicación de tratamientos (Figura 4); la concentración de  $750 \text{ mg L}^{-1}$  fue la que la disminuyó significativamente. Es interesante que las dosis de  $250$  y  $500 \text{ mg L}^{-1}$  redujeron la conductancia estomática (Figura 2), sin llegar a afectar la fijación de  $\text{CO}_2$  atmosférico, después de 32 y 40 días de la aplicación de tratamientos (Figura 3).

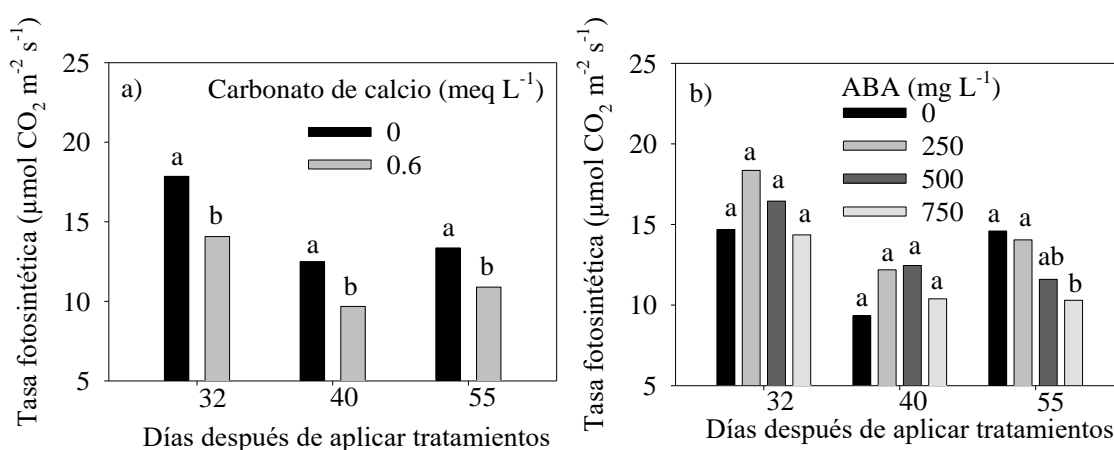


Figura 3. Tasa fotosintética (a, b) en respuesta a la aplicación foliar de nanopartículas de  $\text{CaCO}_3$  (a) y ácido abscísico (b) en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), a través del desarrollo del cultivo. (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ; a y b).

Cuadro 2. Correlación entre la tasa de fotosíntesis, conductancia estomática y transpiración en tomate, después de 55 días de la aplicación de tratamientos.

Variable	Parámetros estadísticos	Fotosíntesis	Conductancia estomática	Transpiración
Fotosíntesis	R <sup>2</sup>	1	0.4846	0.6316
	Valor p		0.0005	< 0.001
Conductancia estomática	R <sup>2</sup>		1	0.8730
	Valor p			< 0.001
Transpiración	R <sup>2</sup>			1
	Valor p			

La aplicación de ABA y carbonato de calcio disminuye la tasa de transpiración (Figura 5); además, la combinación de 0.6 meq L<sup>-1</sup> de carbonato y nitrato de calcio causa una disminución drástica de la transpiración foliar de las plantas tratadas. Se encontró una estrecha correlación entre la conductancia estomática y la transpiración (Cuadro 2); algunos autores han reportado que la absorción de calcio en los frutos se promueve al disminuir la transpiración foliar (Adams y Ho, 1992; de Freitas *et al.*, 2011).

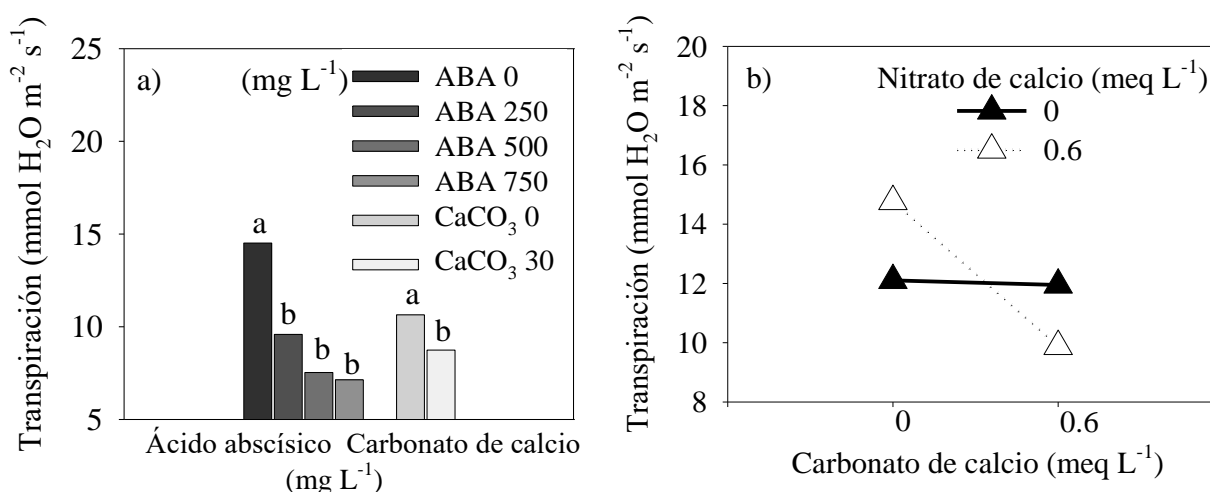


Figura 5. Efecto de la aplicación de ácido abscísico y carbonato de calcio (a) 55 días después de los tratamientos, e interacción de nitrato y carbonato de calcio 40 días después de la aplicación de tratamientos sobre la tasa de transpiración (b) (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

Cuadro 3. Análisis de varianza para concentración intercelular de CO<sub>2</sub>, déficit de presión de vapor y temperatura de la hoja.

Fuente de variación	Concentración intercelular de CO <sub>2</sub>			Déficit de presión de vapor			Temperatura de la hoja		
	32	40	55	32	40	55	32	40	55
	----- ddt -----								
N	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	*	ns
C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
ABA	*	*	*	ns	*	*	ns	*	*
N × C	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	*	*
N × ABA	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C × ABA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
N × C × ABA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV	11.0	6.8	15.7	31	23.3	18.3	8.2	4.5	4.83

ns = efecto no significativo ( $\alpha = 0.05$ ), \* = significativo ( $\alpha = 0.05$ ).

N = nitrato de calcio, C = carbonato de calcio, ABA = ácido abscísico, ddt = días

después de la aplicación de tratamientos. CV = coeficiente de variación.

La concentración intercelular de CO<sub>2</sub> se redujo por la aplicación de ABA, después de 32 y 55 días del inicio de la aplicación de tratamientos; el CO<sub>2</sub> atmosférico que llega a la cámara estomática disminuye progresivamente al aumentar la concentración aplicada de ABA (Figura 6). El nitrato de calcio interaccionó con el ABA, después de 40 días de la aplicación, sobre la concentración intercelular de CO<sub>2</sub> y con el carbonato de calcio, sobre la temperatura de la hoja (Cuadro 3). La concentración de CO<sub>2</sub> en las células guarda también afecta el grado de apertura estomática, la cual responde a la consumo de CO<sub>2</sub> por la fotosíntesis; una disminución de los niveles de CO<sub>2</sub> en las células guarda provoca la apertura estomática. De esta manera, el CO<sub>2</sub> atmosférico entra a la hoja y la fotosíntesis continúa. En la oscuridad, el proceso de respiración generalmente favorece altas concentraciones de CO<sub>2</sub> en las hojas, induciendo el cierre de los estomas (Nobel, 2009).

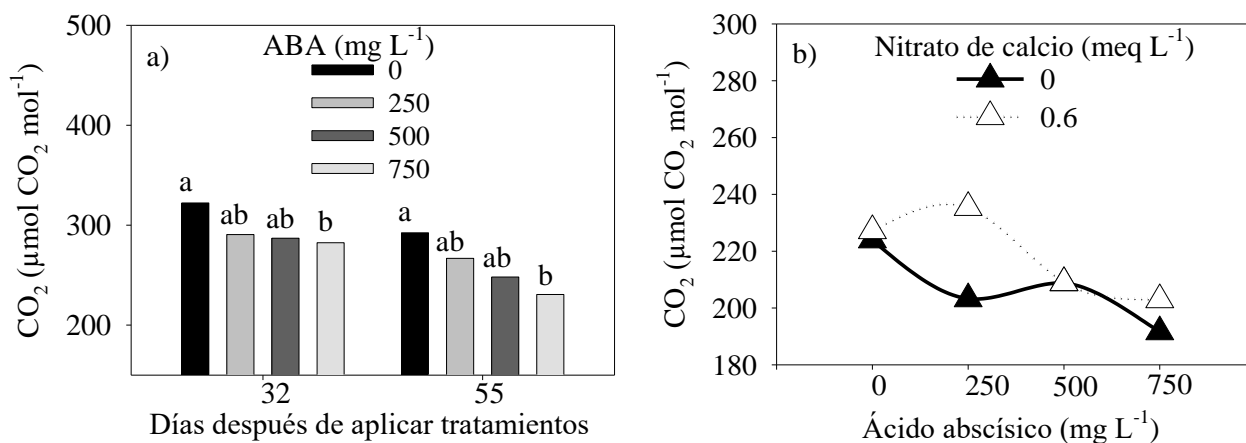


Figura 6. Efecto de la aplicación de ácido abscísico (a) e interacción entre el nitrato de calcio y el ácido abscísico (b) sobre la concentración intercelular de CO<sub>2</sub> de las células del mesófilo (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

El déficit de presión de vapor (DPV), con base en la temperatura de la hoja, aumenta al aplicar ABA, mientras que la aplicación de 0.6 meq L<sup>-1</sup> de nitrato de calcio lo disminuye. Además, se encontró que el DPV disminuye, debido a una interacción entre el carbonato y el nitrato de calcio (Figura 7). Las condiciones de un déficit de presión de vapor alto reducen el flujo en xilema e incrementan la transpiración del fruto (Guichard *et al.*, 2005). En el presente trabajo se encontró una correlación negativa entre el déficit de presión de vapor y la conductancia estomática (Cuadro 4).

La aplicación de ABA causa un incremento en la temperatura de la hoja (Figura 9), lo cual puede ser consecuencia de la reducción de la conductancia estomática, ya que se reduce la pérdida de calor, a través de la salida de vapor de agua, lo cual puede contribuir al estrés por calor en las plantas y a reducir el rendimiento de los cultivos (Battisti y Naylor, 2009; Hu *et al.*, 2010). La interacción entre el carbonato y el nitrato de calcio disminuye la temperatura de la hoja (Figura 8), mientras que el carbonato de

calcio tiene un comportamiento variable, al aplicarse con diferentes concentraciones de ABA.

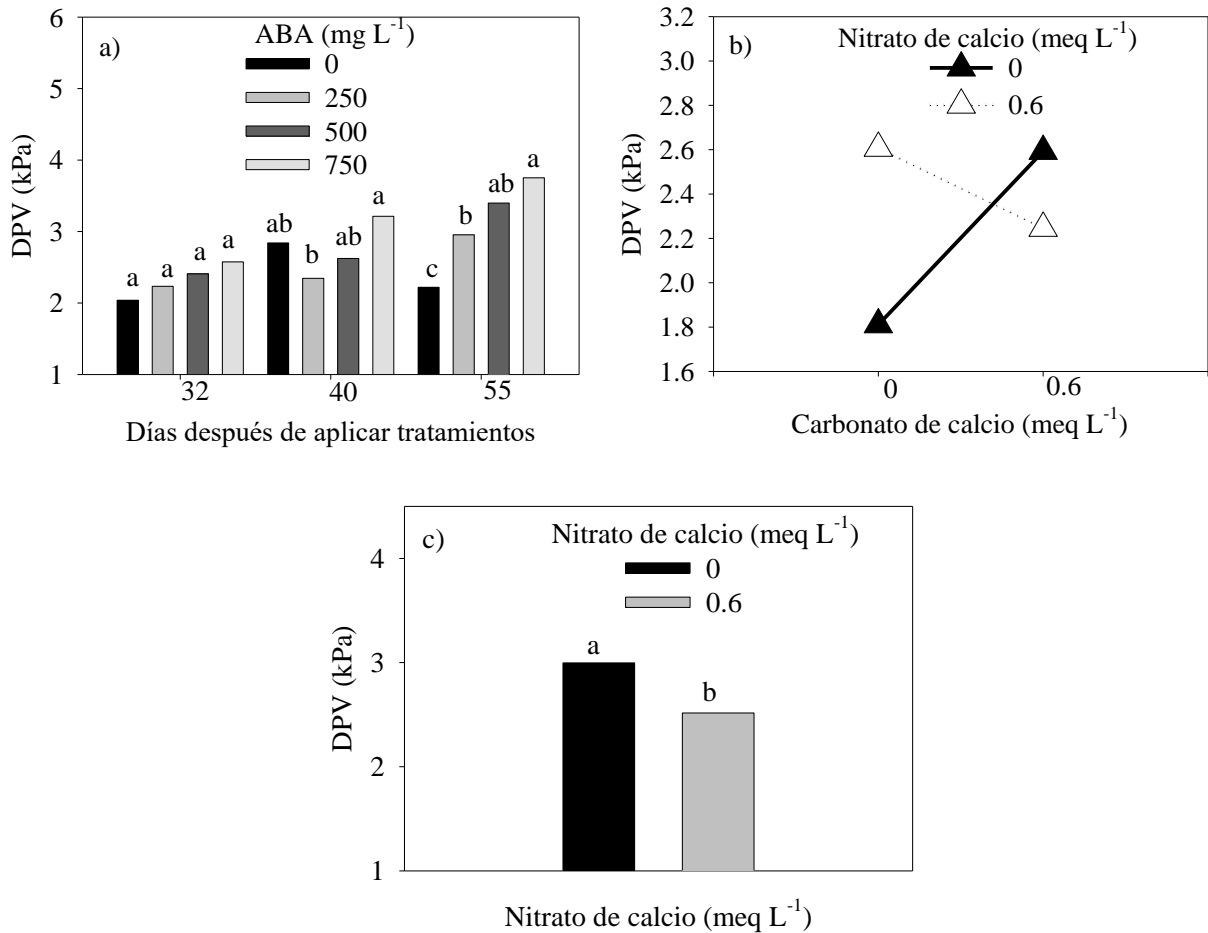


Figura 7. Efecto del ácido abscísico sobre el déficit de presión de vapor (DPV): (a) interacción entre el carbonato y el nitrato de calcio, 32 días después de aplicación de tratamientos, (b) y efecto del nitrato de calcio, 40 días después de aplicación de los tratamientos (c) (Prueba de Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).



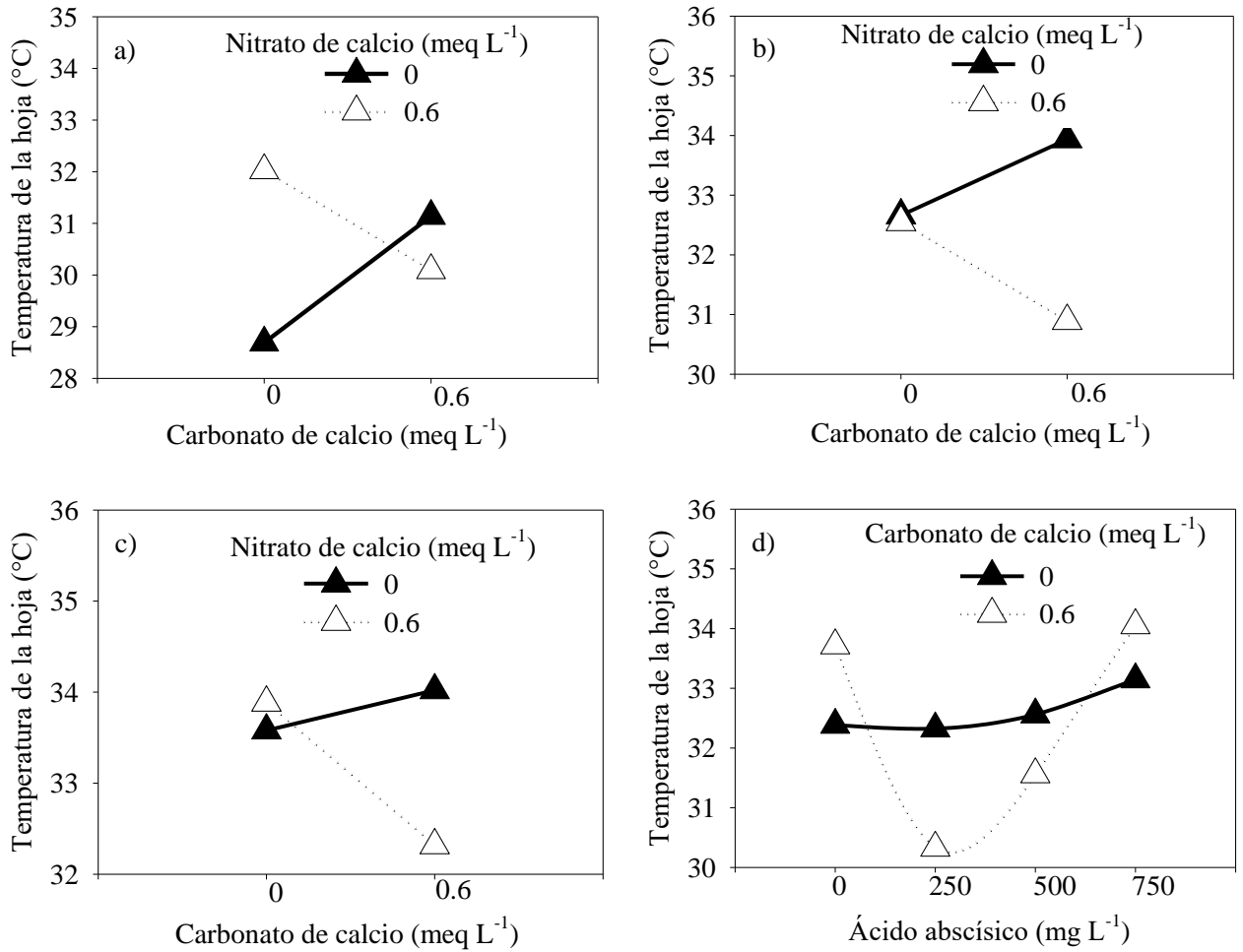


Figura 8. Interacción entre el carbonato de calcio con el nitrato de calcio, después de 32 (a), 40 (b) y 55 (c) días, y con el ácido abscísico, después de 40 días de la aplicación de tratamientos, (d) sobre la temperatura de la hoja.

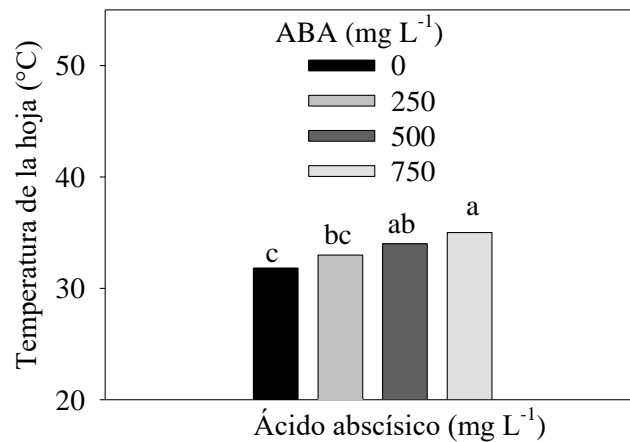


Figura 9. Efecto de la aplicación de ácido abscísico sobre la temperatura de la hoja, 55 días después de la aplicación de tratamientos (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

Cuadro 4. Correlación de la concentración intercelular de CO<sub>2</sub>, la temperatura de la hoja y el déficit de presión de vapor, después de 55 días de la aplicación de tratamientos.

Variable	Parámetros estadísticos	Concentración intercelular de CO <sub>2</sub>	Temperatura de la hoja	Déficit de presión de vapor
Fotosíntesis	R <sup>2</sup>	0.3504	-0.2123	-0.4882
	Valor p	0.0146	0.1473	0.0004
Conductancia estomática	R <sup>2</sup>	0.4526	-0.5198	-0.7885
	Valor p	0.0012	0.0002	<0.0001
Transpiración	R <sup>2</sup>	0.5277	-0.3085	-0.7030
	Valor p	0.001	0.0329	<0.0001
Concentración intercelular de CO <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	1	-0.5895	-0.7240
	Valor p		<0.001	<0.001
Temperatura de la hoja	R <sup>2</sup>		1	0.8854
	Valor p			<0.001
Déficit de presión de vapor	R <sup>2</sup>			1
	Valor p			

## CONCLUSIONES

La aplicación de ácido abscísico redujo la conductancia estomática, esto indica que indujo el cierre de estomas y redujo la tasa fotosintética y de transpiración, 55 días después de las aplicaciones foliares de 500 y 750 mg L<sup>-1</sup>. La concentración intercelular de CO<sub>2</sub> disminuyó después de 32 y 55 días de la aplicación foliar de 750 mg L<sup>-1</sup>. La temperatura de la hoja aumentó debido a la aplicación de ácido abscísico y, a su vez, incrementó el déficit de presión de vapor. Por su parte, la aplicación de nitrato de calcio redujo el déficit de presión de vapor y, en aplicación conjunta con el carbonato de calcio, disminuyó la temperatura de la hoja. La aplicación de carbonato de calcio nanoestructurado redujo la conductancia estomática, la tasa fotosintética y la transpiración.

## LITERATURA CITADA

- Adams, P. and L.C. Ho. 1992. The susceptibility of modern tomato cultivars to blossom-end rot in relation to salinity. *J. Hort. Sci.* 67:827-839.
- Araújo, W.L., A.R. Fernie, and A. Nunes-Nesi. 2011. Control of stomata aperture. A renaissance of the old guard. *Plant Signaling Behav.* 6: 1305-1311.
- Battisti, D.S. and R.L. Naylor. 2009. Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. *Science* 323: 240-44.
- Castiglione, M.R., L. Giorgetti, C. Geri, and R. Cremonini. 2011. The effects of nano-TiO<sub>2</sub> on seed germination, development and mitosis of root tip cells of *Vicia narbonensis* L. and *Zea mays* L. *J. Nanopart. Res.* 13: 2443-2449.
- Silva, L.C., M.A. Oliva, A.A. Azevedo, and J.M. Araújo. 2006. Responses of resting a plant species to pollution from an iron pelletization factory. *Water Air Soil Pollut.* 175: 241-256.
- De Freitas, S.T., A.J. Mcelrone, K.A. Shackel, and E.J. Mitcham. 2014. Calcium partitioning and allocation and blossom-end rot development in tomato plants in response to whole-plant and fruit-specific abscisic acid treatments. *J. Exp. Bot.* 65: 235-247.
- De Freitas, S.T., K.A. Shackel, and E.J. Mitcham. 2011. Abscisic acid triggers whole-plant and fruit-specific mechanisms to increase fruit calcium uptake and prevent blossom end rot development in tomato fruit. *J. Exp. Bot.* 62: 2645-2656.
- Eichert, T. and H.E. Goldbach. 2008. Equivalent pore radii of hydrophilic foliar uptake routes in stomatous and astomatous leaf surfaces- further evidence for a stomatal pathway. *Physiol. Plant.* 132: 491-502.

- Eichert, T., A. Kurtz, U. Steiner, and H.E. Goldbach. 2008. Size exclusion on limits and lateral heterogeneity of the stomatal foliar uptake pathway for aqueous solutes and water-suspended nanoparticles. *Physiol. Plant.* 134: 151-160.
- Feizi, H., P.R. Moghaddam, N. Shahtahmassebi, and A. Fotovat. 2012. Impact of bulk and nanosized titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) on wheat seed germination and seedling growth. *Biol. Trace Elem. Res.* 146: 101-106.
- Grantz, D.A., J.H.B. Garner, and D.W. Johnson. 2003. Ecological effects of particulate matter. *Environ. Int.* 29: 213-239.
- Hu, H., A. Boisson-Dernier, M. Israelson-Nordström, M. Böhmer, and S. Xue. 2010. Carbonic anhydrases are upstream regulators of CO<sub>2</sub> –controlled stomatal movements in guard cells. *Nat. Cell Biol.* 12: 87-93.
- Kim, T-H., M. Böhmer, H. Hu, N. Nishimura, and J. I. Schroeder. 2010. Guard cell signal transduction network: Advances in understanding abscisic acid, CO<sub>2</sub>, and Ca<sup>2+</sup> signaling. *Ann. Rev. Plant Biol.* 61: 561-591.
- Lu, C.M., C.Y. Zhang, J.Q. Wen, and G.R. Wu. 2002. Effects of nanomaterial on germination and growth of soybean. *Soybean Sci.* 21: 168-171.
- Nobel, P. S. 2009. *Physicochemical and environmental plant physiology*. University of California. CA, USA.
- Pantin, F., F. Monnet, D. Jannaud, C.J. Miguel, J. Renaud, B. Muller, T. Sinonneau, and B. Genty. 2012. The dual effect of abscisic acid on stomata. *New Phytol.* 197: 65-72.
- Taylor, M.D. and S.J. Locascio. 2004. Blossom-end rot: A calcium deficiency. *J. Plant Nutr.* 27: 123-139.

- Wada, T., H. Ikeda, M. Ikeda, and H. Furukawa. 1996. Effects of foliar application of calcium solution on the incidence of blossom-end rot of tomato fruit. *J. Japan Soc. Hort. Sci.* 65: 553-558.
- Wang, W.N., and J.C. Tarafdar. 2013. Nanoparticle synthesis and delivery by an aerosol route for watermelon plant foliar uptake. *J. Nanopart. Res.*15: 1417.
- Wilkinson, S., and W.J. Davies. 2002. ABA-based chemical signaling: the co-ordination of responses to stress in plants. *Plant Cell Environ.* 25: 195-210.
- Zheng, L., F. Hong, S. Lu, and C. Liu. 2005. Effect of nano-TiO<sub>2</sub> on strength of naturally aged seeds and growth of spinach. *Biol. Trace Elem Res.* 104. 83-91.

**ÁCIDO ABCSÍICO Y CALCIO EN LA PUDRICIÓN APICAL DE TOMATE**  
**ABSCISIC ACID AND CALCIUM EFFECT ON BLOSSOM-END ROT OF**  
**TOMATO FRUITS**

López-Osorio, Daniel<sup>1</sup>, M. Sandoval-Villa<sup>1\*</sup>, C. Hidalgo-Moreno<sup>1</sup> y J. Alvarado-López<sup>1</sup>

**RESUMEN**

Se evaluaron las aplicaciones foliares de nitrato de calcio (0 y 0.6 meq L<sup>-1</sup>), nanocarbonato de calcio (0 y 0.6 meq L<sup>-1</sup>) y ácido abscísico (ABA), en dosis de 0, 250, 500 y 750 mg L<sup>-1</sup>, sobre la incidencia del desorden fisiológico *blossom end rot* (BER), el cual se presenta cuando hay baja distribución de calcio en la etapa de crecimiento del fruto de tomate. Al inicio de la floración de tomate “chino” se dejó de suministrar calcio en la solución nutritiva, con el propósito de inducir deficiencia de calcio y, después de las aplicaciones foliares, se analizó el contenido nutrimental de calcio, magnesio y potasio, en hojas y frutos; además, se cuantificó el rendimiento y el porcentaje de frutos sanos. Los resultados mostraron que las aplicaciones foliares de nitrato de calcio y ABA aumentaron la concentración de calcio en hojas y el rendimiento de fruto, y disminuyeron la incidencia de BER. El nanocarbonato de calcio disminuyó la concentración de potasio en hojas, pero incrementó la concentración de magnesio en el fruto del primer racimo. El rendimiento se incrementó por la combinación de 0.6 meq L<sup>-1</sup> de carbonato de calcio con 0.6 meq L<sup>-1</sup> de nitrato de calcio y con 500 mg L<sup>-1</sup> de ABA. La dosis de 250 mg L<sup>-1</sup> de ABA redujo la incidencia de BER de manera similar a la dosis de 500 y 750 mg L<sup>-1</sup>.

**Palabras clave:** *Solanum lycopersicon* L., blossom-end rot, nanocalcio, nanocarbonato.

## INTRODUCCIÓN

La incidencia de pudrición apical del fruto de tomate es el resultado de la acción de diversos factores ambientales que se presentan durante la etapa de mayor demanda de calcio en el fruto, lo que causa una disminución en el transporte y acumulación de calcio. Durante el desarrollo y crecimiento del fruto, el mayor porcentaje de agua que entra a este proviene del floema, pero la única fuente que proporciona calcio al fruto es el agua que ingresa por el xilema (Ho y White, 2005). La aplicación foliar de  $500 \text{ mg L}^{-1}$  de ácido abscísico (ABA) ha disminuido notablemente la incidencia de pudrición apical, promoviendo el flujo de calcio del xilema hacia los frutos, mediante una menor transpiración foliar y un mayor número de tejidos de xilema en el fruto (De Freitas *et al.*, 2011). Por su parte, Barickman *et al.* (2014) encontraron que las aplicaciones de ABA son efectivas en etapas tempranas de desarrollo de la planta, pero lo son menos en etapas más avanzadas de desarrollo; la reducción de la incidencia de pudrición apical fue más notable al combinar  $500 \text{ mg L}^{-1}$  de ABA y  $180 \text{ mg L}^{-1}$  de Ca en la solución nutritiva. Las aplicaciones foliares de calcio han contribuido a incrementar la firmeza del fruto (Dodds *et al.*, 1997), debido a la función del calcio en la estabilidad de la pared y la membrana celular. La fuente de calcio más usada en la aplicación por riego es nitrato de calcio, la cual ha sido más efectiva en el aporte de calcio que otras fuentes, como sulfato de calcio, tiosulfato de calcio y cloruro de calcio. En dosis altas, el nitrato de calcio causó menos toxicidad que el cloruro de calcio, cuando se aplicó de manera foliar (Chang *et al.*, 2004; Taylor *et al.*, 2004). El uso de materiales a escala nanométrica es el resultado de la aplicación de la nanotecnología, siendo la agricultura un área en donde ha habido poco desarrollo sobre la misma (Ghormade *et al.*, 2011). En esta, los nanomateriales presentan características físicas diferentes de las de los materiales convencionales y pueden diseñarse para suministrar elementos esenciales a

las plantas (Corradini *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2013; Liu y Lal, 2015). La presente investigación tuvo como objetivo evaluar las aplicaciones foliares de ABA (0, 250, 500 y 750 mg L<sup>-1</sup>), nitrato de calcio (0 y 0.6 meq L<sup>-1</sup>) y nanopartículas de carbonato de calcio (0 y 0.6 meq L<sup>-1</sup>), sobre la concentración de calcio, magnesio y potasio, en hojas y frutos, además del rendimiento por planta y el porcentaje de frutos sanos en plantas de tomate, en condiciones de deficiencia de calcio.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Semillas de jitomate “chino” (*Solanum lycopersicum* L., colecta regional de Tehuacán, Pue., México) se sembraron en turba, en una charola de poliestireno, en un invernadero del Área de Nutrición Vegetal, del Colegio de Postgraduados. Treinta días después de la siembra, las plantas se transfirieron a bolsas de polietileno de 35 × 35 cm y se irrigaron con solución nutritiva universal de Steiner. Al inicio de floración, la solución nutritiva se modificó, eliminando el suministro de Ca<sup>2+</sup>, y la composición de esta quedó de la siguiente manera: N-NO<sub>3</sub> (9.5 meq L<sup>-1</sup>), P (1 meq L<sup>-1</sup>), S-SO<sub>4</sub> (4 meq L<sup>-1</sup>), K (8 meq L<sup>-1</sup>), Mg (4 meq L<sup>-1</sup>) y N-NH<sub>4</sub> (2.5 meq L<sup>-1</sup>). Al día siguiente de modificar la solución nutritiva, se inició la aplicación foliar de ABA (0, 250, 500 y 750 mg L<sup>-1</sup>), nitrato de calcio (0 y 0.6 meq L<sup>-1</sup>) y carbonato de calcio nanoestructurado (0 y 0.6 meq L<sup>-1</sup>); a todas las soluciones se les añadió 0.3 mL L<sup>-1</sup> de DAP-PLUS<sup>®</sup>, como surfactante. Después de 23, 51 y 62 días del inicio de la aplicación de tratamientos, se colectaron hojas recientemente maduras, se lavaron en agua destilada y se secaron a 70 °C. Se colectaron dos frutos por planta; un fruto del primer racimo, después de 42 días de la aplicación de tratamientos, y otro del segundo racimo, 60 días después de la aplicación de tratamientos, y se secaron a 70 °C, se molieron en un mortero de porcelana y posteriormente, se tomaron muestras de 0.5 g de material seco y se sometió a digestión, con una mezcla de ácidos nítrico y perclórico (relación 2:1, v:v), de acuerdo con lo



descrito por Alcántar y Sandoval (1999). En los extractos obtenidos se cuantificaron las concentraciones de Ca, K y Mg, con un espectrofotómetro de emisión atómica de inducción por plasma acoplado (ICP-AES), marca VARIAN® modelo Liberty II (Mulgrave, Australia). A partir de s 39 días y hasta 87 días después del inicio de las aplicaciones foliares, se cuantificó el peso de frutos maduros y el número de frutos con el síntoma de pudrición apical del fruto.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis nutrimental mostró que la concentración de calcio en hoja fue afectada por la aplicación de nitrato de calcio y ácido abscísico, de manera individual. La concentración de potasio fue afectada por la interacción de carbonato con nitrato de calcio, después de 23 días de las aplicaciones foliares, y por la interacción de carbonato de calcio con ABA, después de 51 días de la aplicación de tratamientos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Análisis de varianza para concentración de calcio, potasio y magnesio en hojas de plantas de tomate “chino” (*Solanum lycopersicon* L.).

Fuente de variación	Ca			K			Mg		
	23	51	62	23	51	62	23	51	62
	----- ddt -----								
N	*	*	*	ns	ns	ns	*	ns	ns
C	ns	ns	ns	*	ns	*	*	ns	ns
ABA	*	*	*	ns	*	ns	ns	*	ns
N × C	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns
N × ABA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
C × ABA	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
N × C × ABA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
CV	21.6	33.3	28.	15	11.57	24.	14.8	18.5	18.1
	8	9	36			68	9	1	8

ns = efecto no significativo ( $\alpha = 0.05$ ), \* = significativo ( $\alpha = 0.05$ ).

N = nitrato de calcio, C = nanocarbonato de calcio, ABA = ácido abscísico, ddt = días después de aplicación de tratamientos y CV = coeficiente de variación.

La aplicación de ABA incrementó la concentración de calcio en la hoja (Figura 1). Cuando el calcio se adiciona en la solución nutritiva, la aplicación de 500 mg L<sup>-1</sup> de ABA reduce la concentración de calcio en hojas y la incrementa en frutos (De Freitas *et al.*, 2011; Barickman *et al.*, 2014); este efecto se debió a la disminución de la transpiración foliar que favoreció el flujo de calcio hacia los frutos, en lugar de que ocurriera hacia las hojas. En el presente trabajo, el suministro de calcio se hizo vía foliar, por lo que el aumento de la concentración de calcio se puede atribuir a la activación de canales de calcio en membranas celulares. Esto permite la entrada de calcio, como ocurre en las células guarda, donde el ABA activa canales de calcio y facilita la entrada del citosol (Kim *et al.*, 2010), y en el proceso del cierre de estomas, que a su vez causa un incremento en el Ca<sup>2+</sup> del citosol, lo cual activa canales que permiten la salida de aniones de la célula y posterior despolarización de la membrana, lo que favorecerá la salida de cationes, principalmente potasio (Kim *et al.*, 2010).

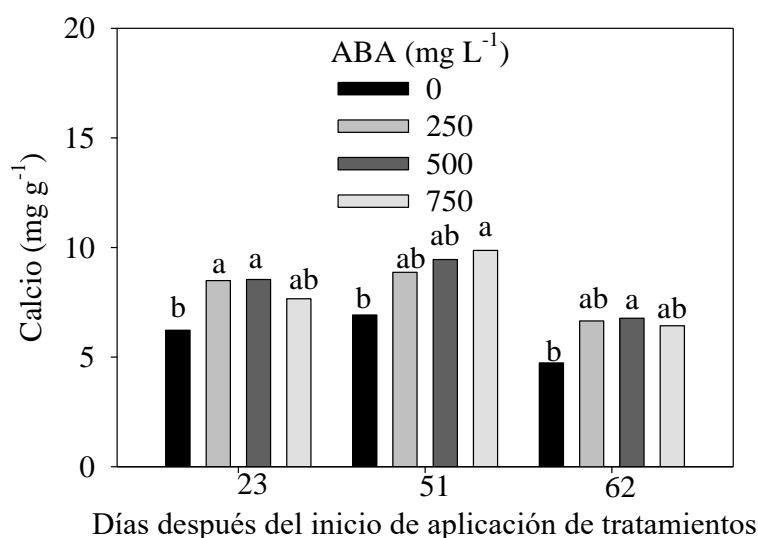


Figura 1. Efecto de la aplicación de ácido abscísico (ABA) sobre la concentración de calcio en hojas de tomate.

La concentración de Ca<sup>2+</sup> en hojas se incrementó por la aplicación foliar de 0.6 meq L<sup>-1</sup> de nitrato de calcio (Figura 2), no así con el carbonato de calcio. La aplicación de 25

mM de nitrato de calcio redujo el daño por deficiencia de calcio, en *Lilium* ‘Star Gazer’, de la misma manera que la aplicación de cloruro de calcio, sin embargo, en dosis altas (100 y 150 mM) la toxicidad causada por el cloruro de calcio fue mayor que la toxicidad causada por el nitrato de calcio (Chang *et al.*, 2004). Taylor *et al.* (2004) encontraron que el nitrato de calcio aplicado en la solución nutritiva incrementa la concentración de calcio en hojas y frutos, en comparación con otras fuentes de calcio, como sulfato de calcio, tiosulfato de calcio y cloruro de calcio. Aunque el tamaño de partículas del carbonato de calcio fue menor de 100 nm, la entrada y acumulación en hojas no fue suficiente para causar diferencias significativas. Al respecto, Liu *et al.* (2005) encontraron que al aplicar carbonato de calcio de tamaño entre 20 y 80 nm en solución nutritiva se incrementó el contenido de calcio en raíces y brotes, en cacahuete, demostrando que las raíces absorbieron nanopartículas de calcio y estas transportaron el calcio hacia la parte aérea.

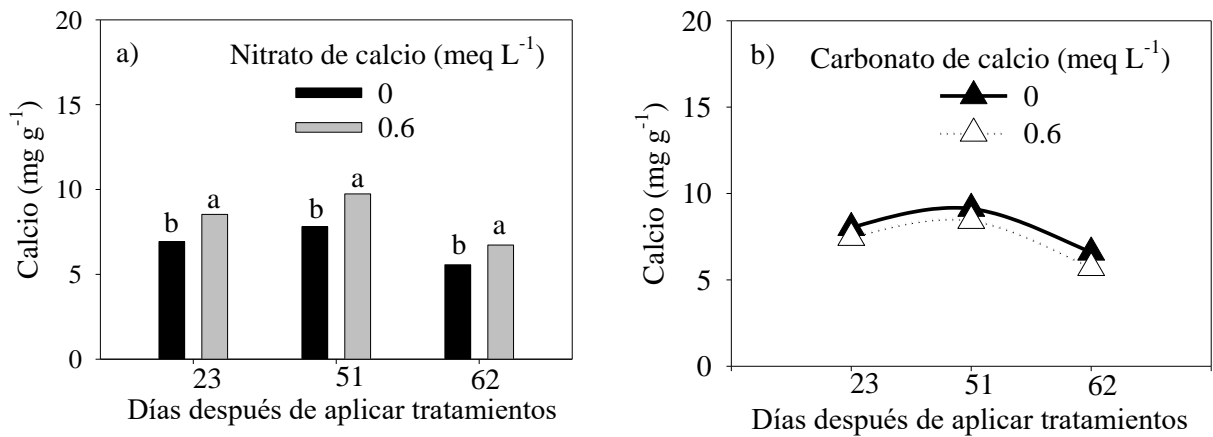


Figura 2. Efecto de la aplicación de nitrato de calcio (a) y nanocarbonato de calcio (b) sobre la concentración de calcio en hojas de tomate durante el desarrollo del cultivo (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

La concentración de potasio en hojas aumentó por la aplicación de ABA, 51 días después de las aplicaciones foliares, y disminuyó por la aplicación de 0.6 meq L<sup>-1</sup> de

carbonato de calcio. Una consecuencia del incremento de calcio en el citosol iniciado por ABA es la activación de canales de potasio en la vacuola, lo que permite la salida de potasio vacuolar al citosol (Gobert *et al.*, 2007; Ward y Schroeder, 1994). En la presente investigación esto pudo contribuir al incremento en la concentración de potasio en el peso seco de la hoja.

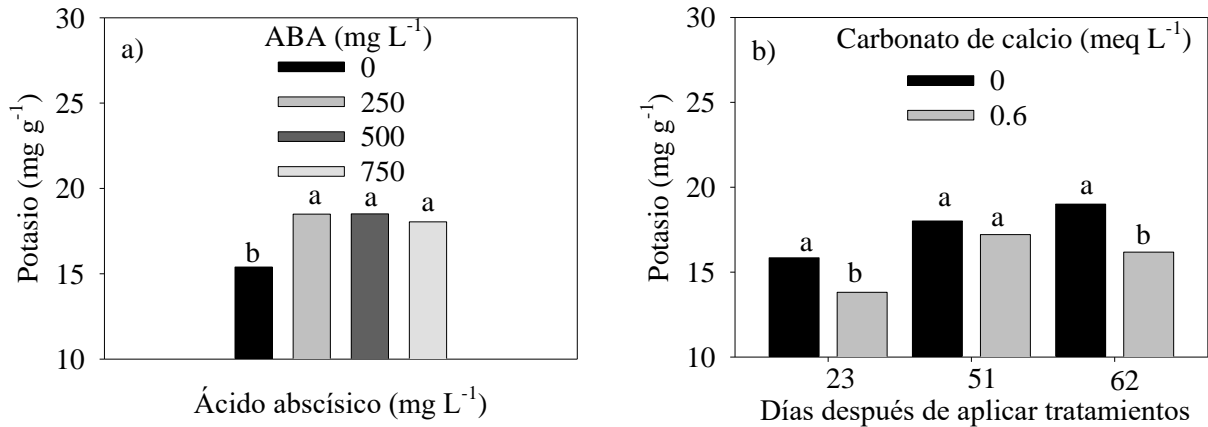


Figura 3. Efecto de la aplicación de ácido abscísico (ABA), 51 días después de la aplicación de tratamientos (a), y nanocarbonato de calcio (b) sobre la concentración de potasio en hoja (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

La aplicación de carbonato de calcio disminuye la concentración de potasio en hoja, 23 y 62 días después de la aplicación de tratamientos, y también al aplicarse con ABA, 51 días después de la aplicación de tratamientos. La aplicación de nanocarbonato de calcio con nitrato no disminuyó la concentración de potasio, como ocurrió con la aplicación de solo carbonato (Figura 4). Bar-Tal y Pressman (1996) encontraron que la incidencia de pudrición apical correlaciona con la relación K:Ca en las hojas, reflejando una relación de antagonismo entre potasio y calcio. El incremento en la concentración de potasio en la solución nutritiva reduce la absorción de calcio y, por consecuencia, incrementa el riesgo de incidencia de pudrición apical del fruto.

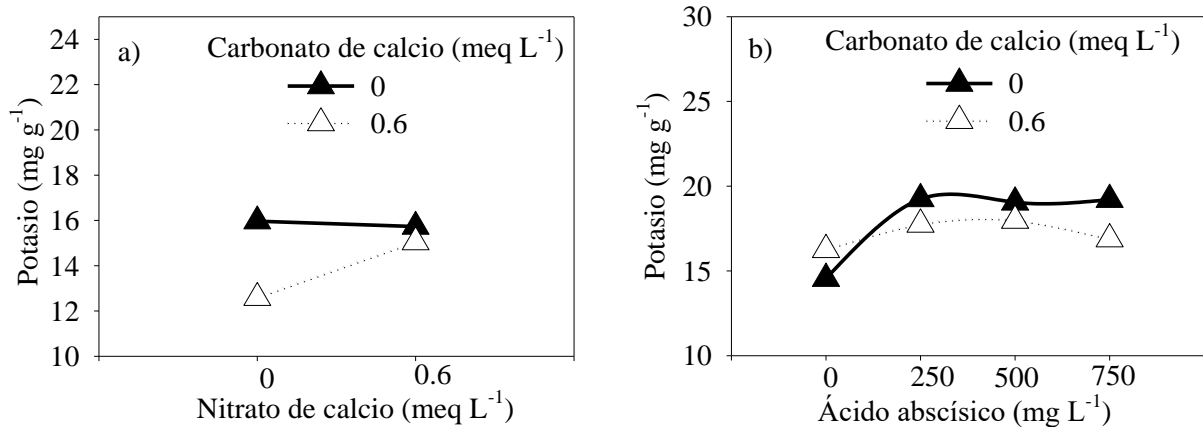


Figura 4. Interacción entre nanocarbonato de calcio y nitrato de calcio (a) y con ácido abscísico (b) sobre la concentración de potasio en hojas, 23 y 51 días después de la aplicación de tratamientos.

La aplicación de 0.6 meq L<sup>-1</sup> de nitrato de calcio, junto con 250 o 750 mg L<sup>-1</sup> de ABA, aumentó la concentración de magnesio en hoja, 51 días después del inicio de la aplicación de tratamientos, pero la aplicación de nitrato de calcio con 500 mg L<sup>-1</sup> de ABA redujo la concentración de magnesio en hoja. La aplicación conjunta de nanocarbonato y nitrato de calcio aumenta la concentración de magnesio en hojas, 23 días después de la aplicación de tratamientos (Figura 5); 62 días después de la aplicación de tratamientos, la concentración de magnesio fue afectada por la interacción de ABA, nitrato de calcio y carbonato de calcio, en la cual la combinación de 750 mg L<sup>-1</sup> de ABA con 0.6 meq L<sup>-1</sup> de nitrato de calcio fue la que incrementó la concentración de este elemento en las hojas (Figura 6).

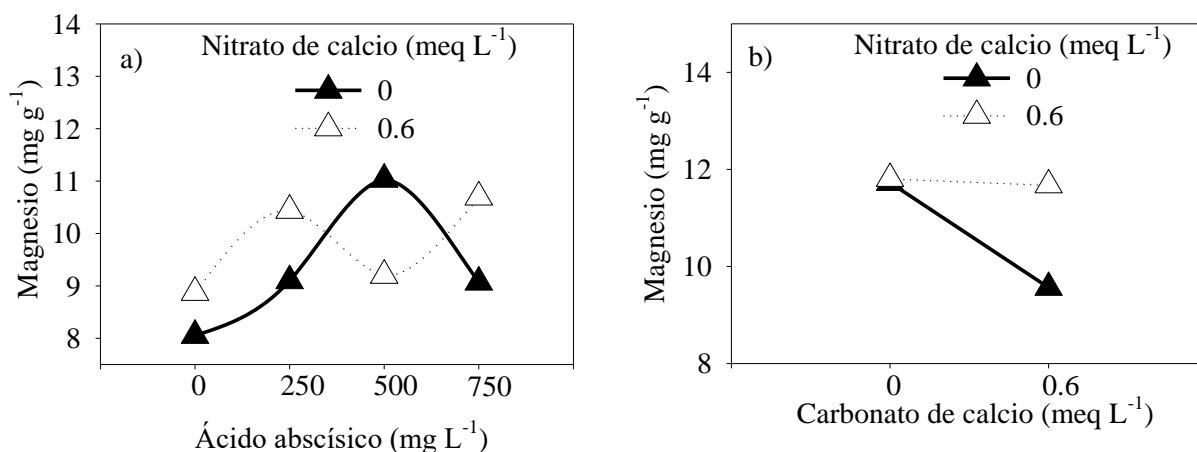


Figura 5. Interacción entre el nitrato de calcio con el ácido abscísico (a) y el nanocarbonato de calcio (b) sobre la concentración de magnesio en el peso seco de hojas de tomate, 23 y 51 días después de la aplicación de tratamientos.

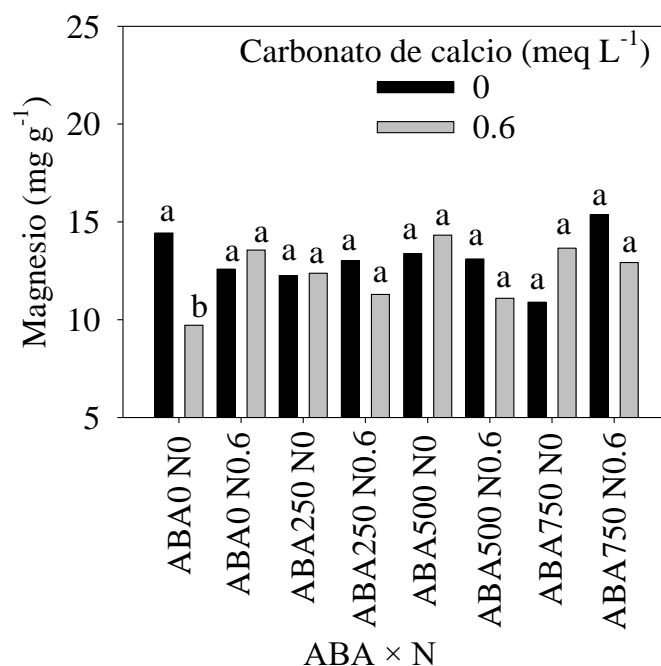


Figura 6. Comparación de medias de carbonato de calcio en cada combinación de nitrato de calcio (N) y ácido abscísico (ABA), 62 días después de aplicación de tratamientos, sobre la concentración de magnesio en hojas de tomate (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

La concentración de nutrientes en peso seco de frutos no fue afectada por la aplicación de nanocarbonato, nitrato de calcio o ABA (Cuadro 2), a excepción del fruto del primer racimo, en el que se incrementó la concentración de magnesio por la

aplicación de 0.6 meq L<sup>-1</sup> de nanocarbonato de calcio (Figura 7). Se han reportado efectos antagónicos entre magnesio y calcio; el incremento de magnesio en la solución nutritiva causa baja absorción de calcio en tomate (Sun *et al.*, 2013): En este estudio hubo sinergismo entre el carbonato de calcio y la acumulación de magnesio en el fruto.

Cuadro 2. Análisis de varianza para concentración de calcio, magnesio y potasio en frutos de tomate rojo, por la aplicación de nitrato de calcio y nanocarbonato de calcio.

Fuente de variación	Ca		K		Mg	
	1er racimo	2do racimo	1er racimo	2do racimo	1er racimo	2do racimo
N	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV	13.69	21.73	10.11	15.55	11.57	19.26
C	ns	ns	ns	ns	*	ns
CV	14.20	21.27	9.24	15.35	10.26	18.85
ABA	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV	13.46	22.14	8.93	15.91	11.33	21.05

ns = efecto no significativo ( $\alpha = 0.05$ ), \* = significativo ( $\alpha = 0.05$ ).

N = nitrato de calcio, C = nanocarbonato de calcio, ABA= ácido abscísico, CV = coeficiente de variación.

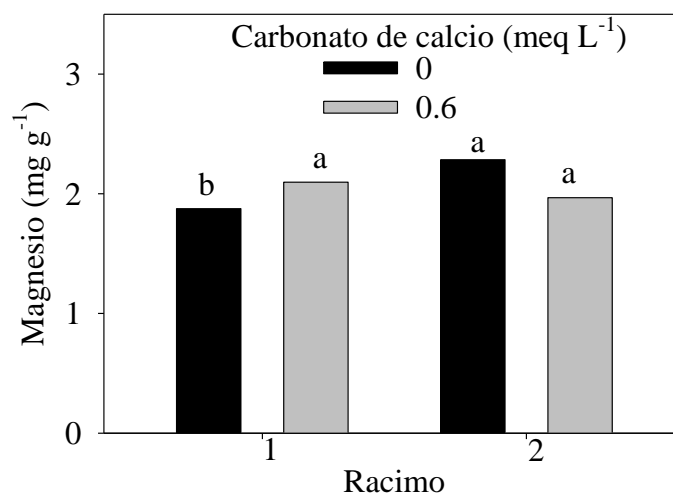


Figura 7. Efecto de la aplicación de nanocarbonato de calcio sobre la concentración de magnesio en frutos del primero y segundo racimo (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

El rendimiento total fue afectado por la interacción de nitrato de calcio, carbonato de calcio y ácido abscísico (Cuadro 3); el mayor rendimiento (1895.6 g planta<sup>-1</sup>) se obtuvo de la combinación de 500 mg L<sup>-1</sup> de ABA, 0.6 meq L<sup>-1</sup> de nitrato de calcio y 0.6 meq L<sup>-1</sup> de carbonato de calcio, esto es 3.6 veces mayor que la aplicación de solo agua, en donde el rendimiento fue de 523.3 g planta<sup>-1</sup>. El tratamiento que presentó el segundo mayor rendimiento (1591.9 g planta<sup>-1</sup>) fue la combinación de 250 mg L<sup>-1</sup> de ABA con 0.6 meq L<sup>-1</sup> de nitrato de calcio (Figura 8).

Cuadro 3. Análisis de varianza para rendimiento total y porcentaje de frutos sanos por aplicación de nitrato de calcio y nanocarbonato de calcio.

Fuente de variación	Rendimiento total	Frutos sanos (%)
N	*	*
C	ns	ns
ABA	*	*
N × C	ns	ns
N × ABA	ns	ns
C × ABA	ns	ns
N × C × ABA	*	ns
CV	68.25	93.27

ns = efecto no significativo ( $\alpha = 0.05$ ), \* = significativo ( $\alpha = 0.05$ ).

N = nitrato de calcio, C = nanocarbonato de calcio, ABA= ácido abscísico, CV = coeficiente de variación.



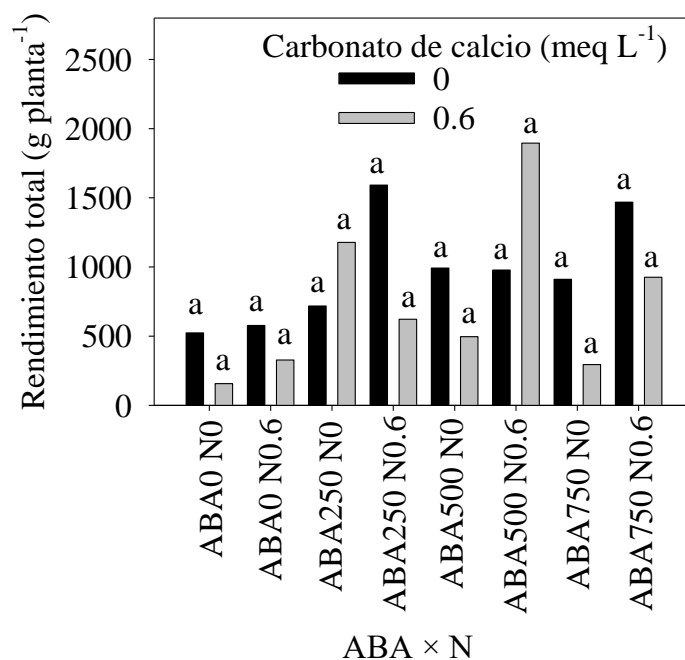
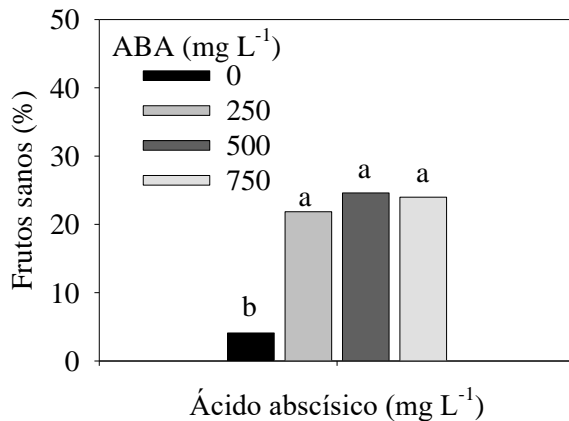


Figura 8. Comparación de medias de carbonato de calcio (0 y 0.6 meq L<sup>-1</sup>) en cada combinación de nitrato de calcio (N) y ácido abscísico (ABA) sobre el rendimiento total (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

El porcentaje de futos sanos fue afectado de manera independiente por la aplicación de ABA y nitrato de calcio (Cuadro 3). Las dosis de ABA evaluadas (250, 500 y 750 mg L<sup>-1</sup>) aumentaron en 15% de frutos sanos respecto a la nula aplicación de ABA y en la cual se obtuvo 4% de frutos sanos (Figura 9). De Freitas *et al.* (2014) reportaron que la aplicación de 500 mg L<sup>-1</sup> de ABA suprime totalmente la incidencia de pudrición apical en tomate cultivar Ace 55. Por su parte, Barickman *et al.* (2014) indicaron una disminución de 86.2% en la incidencia de pudrición apical, al aplicar 500 mg L<sup>-1</sup> de ABA en combinación con la aplicación de calcio (180 mg L<sup>-1</sup>) en solución nutritiva. En este trabajo los resultados muestran que al aplicar 250 mg L<sup>-1</sup> de ABA se logra una disminución de la incidencia de pudrición apical, con la misma efectividad que con 500 y 750 mg L<sup>-1</sup>. Asimismo, con la aplicación de nitrato de calcio se logró disminuir esta incidencia de manera similar a la aplicación de ABA.

a)



b)

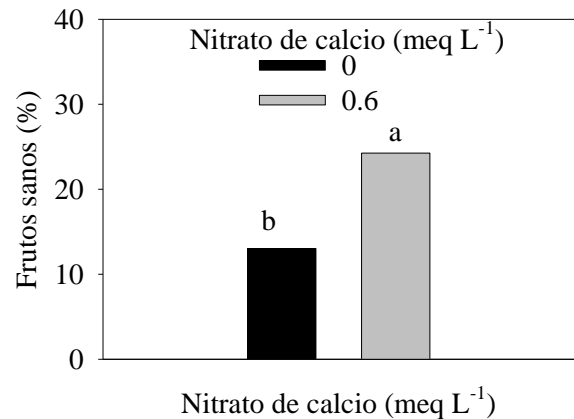


Figura 9. Efecto de la aplicación de ácido abscísico (a) y nitrato de calcio (b) sobre el porcentaje de frutos sanos (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

## CONCLUSIONES

Las aplicaciones foliares de nitrato de calcio y ácido abscísico incrementaron la concentración de calcio en hojas y el porcentaje de frutos sanos; ambos factores resultaron ser efectivos en disminuir la incidencia de pudrición apical. El nanocarbonato de calcio disminuyó la concentración de potasio en hojas, pero incrementó la concentración de magnesio en el fruto del primer racimo. Además, incrementó el rendimiento total, con la combinación de 500 mg L<sup>-1</sup> de ácido abscísico y 0.6 meq L<sup>-1</sup> de nitrato de calcio. La dosis de 250 mg L<sup>-1</sup> de ácido abscísico reduce la incidencia de este desorden fisiológico de manera similar que la dosis de 500 mg L<sup>-1</sup>, reportada en estudios previos, por lo que en condiciones de invernadero esta dosis mínima puede ser efectiva en el control de la pudrición apical en tomate.

## LITERATURA CITADA

- Alcántar G., G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Publicación especial. 10. Chapingo, México. 156 p.
- Barickman, T. C., D. A. Kopsell, and C. E. Sams. 2014. Exogenous foliar and root applications of abscisic acid increase the influx of calcium into tomato fruit tissue and decrease the incidence of blossom-end rot. *Hortscience* 49: 1397-1402.
- Bar-Tal, A., and E. Pressman. 1996. Root restriction and potassium and calcium solution concentrations affect dry-matter production, cation uptake, and blossom-end rot in greenhouse tomato. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 121:649-655.
- Chang, Y-C., K. Grace-Martin, and W. B. Miller. 2004. Efficacy of exogenous calcium applications for reducing upper leaf necrosis in *Lilium* 'Star Gazer'. *Hortscience* 39: 272-275.
- Corradini, E., M. R. Moura, and L. H. C. Mattoso. 2010. A preliminary study of the incorporation of NPK fertilizer into chitosan nanoparticles. *eXPRESS Polymer Lett.* 4:509-515.
- De Freitas, S. T., K. A. Shackel, and E. J. Mitcham. 2011. Abscisic acid triggers whole-plant and fruit-specific mechanisms to increase fruit calcium uptake and prevent blossom end rot development in tomato fruit. *J. Exp. Bot.* 62: 2645-2656.
- De Freitas, S. T., A. J., Mcelrone, K. A. Shackel, and E. J. Mitcham. 2014. Calcium partitioning and allocation and blossom-end rot development in tomato plants in response to whole-plant and fruit-specific abscisic acid treatments. *J. Exp. Bot.* 65: 235-247.

- Dodds, G. T., L. Trenholm, A. Rajabipour, C. A. Madramootoo, and E. R. Norris. 1997. Yield and quality of tomato fruit under water-table management. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 122: 491-498.
- Ghormade, V., M. V. Deshpande, and K. M. Paknikar. 2011. Perspectives for nano-biotechnology enabled protection and nutrition of plants. *Biotechnol. Adv.* 29: 792-803.
- Gobert, A., S. Isayenkov, C. Voelker, K. Czempinski, and F. J. Maathuis. 2007. The two pore channel TPK1 gene encodes the vacuolar K<sup>+</sup> conductance and plays a role in K<sup>+</sup> homeostasis. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104: 10726-10731.
- Ho, L. C., and P. J. White. 2005. A cellular hypothesis for the induction of blossom-end rot in tomato fruit. *Annals Bot.* 95:571-581.
- Kim, T-H., M., Böhmer, H. Hu, N. Nishimura, and J. I. Schroeder. 2010. Guard cell signal transduction network: Advances in understanding abscisic acid, CO<sub>2</sub>, and Ca<sup>2+</sup> signaling. *Ann. Rev. Plant Biol.* 61: 561-591.
- Liu, X., D. Zhang, S. Zhang, X. He, Y. Wang, Z. Feng. 2005. Responses of peanut to nano-calcium carbonate. *J. Plant Nutr. Fert.* 11: 385-389.
- Liu, R. and R. Lal. 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Sci. Total Environ.* 514: 131-139.
- Sun, Y., H. Feng, and F. Liu. 2013. Comparative effect of partial root-zone drying and deficit irrigation on incidence of blossom-end rot in tomato under varied calcium rates. *J. Exp. Bot.* 64: 2107-2116.
- Taylor, M. D., S. J. Locascio, and M. R. Alligod. 2004. Blossom-end rot incidence of tomato as affected by irrigation quantity, calcium source, and reduced potassium. *Hortscience* 39: 1110-1115.

Wang, W.N., and J.C. Tarafdar. 2013. Nanoparticle synthesis and delivery by an aerosol route for watermelon plant foliar uptake. *J. Nanopart. Res.*15: 1417.

Ward, J. M., and J. L. Schroeder. 1994. Calcium-activated  $K^+$  channels and calcium-induced calcium release by slow vacuolar ion channels in guard cell vacuoles implicated in the control of stomata closure. *Plant Cell* 6: 669-683.

## **RESPUESTA DEL TOMATE AL ÁCIDO ABCSÍCSICO Y NANOCALCIO FOLIAR**

### **RESPONSE OF TOMATO TO SPRAYED NANOCALCIUM AND ABSCISIC ACID**

Daniel López Osorio<sup>1</sup>, Manuel Sandoval Villa<sup>1\*</sup>, Claudia Isabel Hidalgo Moreno<sup>1</sup> y

Jorge Alvarado López<sup>1</sup>

#### **RESUMEN**

El objetivo de esta investigación fue evaluar el desarrollo de plantas de tomate bajo deficiencia de calcio inducida. Las plantas se asperjaron cada semana con nitrato de calcio, nanocarbonato de calcio y ácido abscísico (ABA). Después de 102 días de las aplicaciones foliares, se midieron las siguientes variables en las plantas: altura, peso fresco, peso seco, número de hojas enchinadas, número de hojas con hijuelos, número de hijuelos por hoja y número de flores abortadas. Los resultados mostraron que la aplicación de nitrato de calcio incrementó la altura, el peso fresco y el peso seco, y disminuyó el número de flores abortadas por planta. La aplicación de nanocarbonato de calcio disminuyó la altura de planta, el peso fresco y el peso seco, y aumentó el número de flores abortadas. Por último, el ABA incrementó la altura, el peso fresco y el peso seco, y disminuyó el número de hojas con hijuelos, los hijuelos por hoja y el número de flores abortadas.

#### **INTRODUCCIÓN**

El calcio es un nutriente esencial requerido para la función de la membrana plasmática. Este se encuentra almacenado en organelos; en el citosol, para la señalización celular, y en el apoplasto, para la estructura de la pared celular (Ho y White, 2005). En contraste con otros macronutrientes, una alta proporción del calcio total en los tejidos de la planta usualmente se ubica en paredes celulares y en la lámina media se encuentra ligado a grupos  $R-COO^-$  de ácidos poligalacturónicos o pectinas, en una forma fácilmente

intercambiable (Marschner, 2012). Los desórdenes por deficiencia de Ca en frutos se han atribuido al bajo contenido total de calcio en el tejido, así como a regulación anormal en su distribución (De Freitas *et al.*, 2011). En estas condiciones, la deficiencia de Ca podría afectar el desarrollo y crecimiento de la planta, debido a que el Ca desempeña funciones importantes en la estructura y función celular. En el presente trabajo se evaluó la altura de planta, el peso fresco, el peso seco, las hojas enchinadas, el número de hojas con hijuelos, el número de hijuelos por hoja y el número de flores abortadas, en plantas de tomate bajo deficiencia de calcio y en respuesta a la aplicación de nitrato de calcio, nanocarbonato de calcio y ABA.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Semillas de jitomate “chino” (*Solanum lycopersicum* L., colecta regional de Tehuacán, Pue., México) se sembraron en turba, en una charola de poliestireno, en un invernadero del Área de Nutrición Vegetal, del Colegio de Postgraduados. Treinta días después de la siembra, las plantas se transfirieron a bolsas de polietileno de 35 × 35 cm y se irrigaron con la solución nutritiva universal de Steiner. Al inicio de la floración, la solución nutritiva se modificó, eliminando el suministro de  $\text{Ca}^{2+}$ , y la composición de esta quedó de la siguiente manera (meq  $\text{L}^{-1}$ ): N- $\text{NO}_3$  (9.5), P (1), S- $\text{SO}_4$  (4), K (8), Mg (4), N- $\text{NH}_4$  (2.5). Al día siguiente de modificar la solución nutritiva, se inició con la aplicación foliar de ABA (0, 250, 500 y 750 mg  $\text{L}^{-1}$ ), nitrato de calcio (0 y 0.6 meq  $\text{L}^{-1}$ ) y carbonato de calcio nanoestructurado (0 y 0.6 meq  $\text{L}^{-1}$ ); a todas las soluciones se les añadió 0.3 mL  $\text{L}^{-1}$  de DAP-PLUS<sup>®</sup>, como surfactante. Después de 102 días de la aplicación de tratamientos, se midió la altura de planta, el número de hojas con hijuelos, el número de hijuelos por hoja, las hojas enchinadas y el número de flores abortadas. Posteriormente, se cortaron las plantas desde la base del tallo y se cuantificó el peso

fresco; después se colocó el material vegetal fresco en hojas de papel y se secó a 70 °C, en estas muestras se determinó el peso seco.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La altura de planta, el peso seco, el peso fresco y el número de abortos por planta fueron afectados de manera independiente por la aplicación de ABA, nitrato de calcio y nanocarbonato de calcio; el número de hojas enchinadas por planta fue afectado por la interacción de ABA, nitrato de calcio y carbonato de calcio (Cuadro 1).

Cuadro 1. Análisis de varianza para altura de planta, peso fresco, peso seco, número de hojas enchinadas por planta, número de hojas con hijuelos, número de hijuelos por hoja y número de abortos de flores.

Fuente de variación	Altura de planta	Peso fresco	Peso seco	Hojas enchinadas	Hojas con hijuelos	Hijuelos por hoja	Abortos de flores
N	*	*	*	ns	*	ns	*
C	*	*	*	*	ns	ns	*
ABA	*	*	*	*	*	*	*
N × C	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
N × ABA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C × ABA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
N × C × ABA	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
CV	14.318	33.69	33.69	55.47	60.85	75.47	49.21

ns = efecto no significativo ( $\alpha = 0.05$ ), \* = significativo ( $\alpha = 0.05$ ).

N = nitrato de calcio, C = carbonato de calcio, ABA = ácido abscísico. CV = coeficiente de variación.

La aplicación de nitrato de calcio incrementó la altura de planta, mientras que la aplicación de nanocarbonato de calcio la disminuyó (Figura 1). La generación de nuevas hojas y órganos vegetales incrementa la demanda de nutrientes y la baja disponibilidad de estos o la alta conductividad eléctrica en la solución nutritiva reducen la altura de planta (Flores *et al.*, 2011). En este trabajo el efecto opuesto de las fuentes de calcio sobre la altura de planta pudo deberse a que las plantas absorbieron más calcio,



al aplicar nitrato de calcio que al aplicar nanocarbonato de calcio; además, la disminución en peso fresco por la aplicación de carbonato de calcio puede explicarse debido a que las nanopartículas aplicadas vía foliar pueden obstruir los estomas y causar efectos adversos sobre el intercambio gaseoso y causar necrosis en la superficie de las hojas, como señalaron Wang *et al.* (2013), al aplicar nanopartículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en sandía.

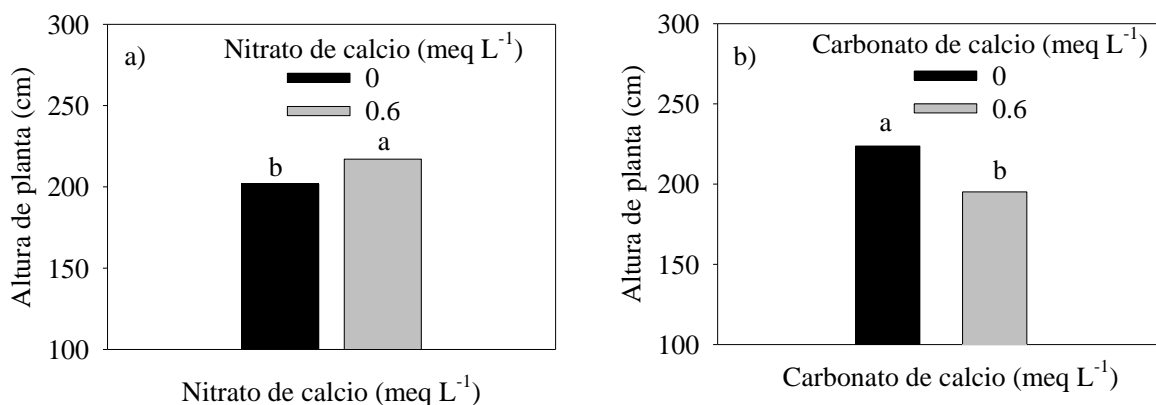


Figura 1. Efecto de la aplicación de nitrato de calcio (a) y nanocarbonato de calcio (b) sobre la altura de planta en tomate (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

La aplicación de ABA incrementó la altura de planta (Figura 2); estudios previos han demostrado que el ABA tiene un efecto positivo en la absorción de calcio (De Freitas *et al.*, 2011) y el aumento de tejidos de xilema (De Freitas, 2011; Ho y White, 2005), de esta manera, el ABA pudo incrementar la disponibilidad de calcio para células en expansión en la planta. Por otra parte, Guo *et al.* (2002) señalan que el ABA desencadena un cambio en la concentración de calcio en el citosol que da inicio a una señalización celular que controla procesos fisiológicos, como la adaptación al estrés ambiental.

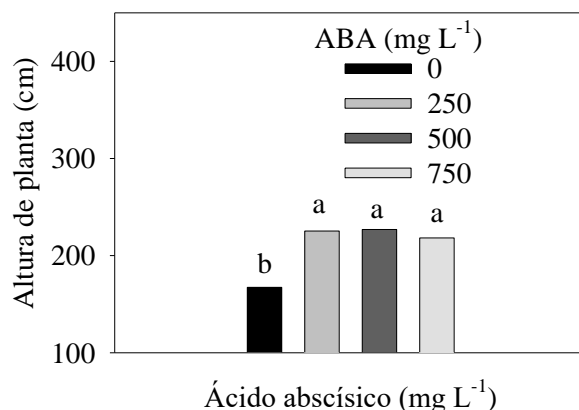


Figura 2. Efecto de la aplicación de ácido abscísico sobre la altura de planta en tomate (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

De manera similar a la altura de planta, el peso fresco de la misma se incrementó al aplicar nitrato de calcio y disminuyó con la adición de nanocarbonato de calcio (Figura 3), lo cual correlaciona con la altura de la planta (Cuadro 2), posiblemente debido al mayor aporte de calcio para la generación de biomasa. La aplicación de nanocarbonato de calcio disminuyó la altura de planta y el peso fresco de la parte aérea.

Cuadro 2. Correlación de variables agronómicas en el cultivo de tomate, después de 102 días de la aplicación de tratamientos.

Variable	Parámetros estadísticos	Altura	Peso fresco	Peso seco	Hojas con hijuelos	Hijuelos por hoja	Flores abortadas
Altura	R <sup>2</sup>	1	0.77991	0.77991	-0.00565	-0.0744	-0.71989
	Valor p		< 0.0001	< 0.001	0.9647	0.5586	< 0.0001
Peso fresco	R <sup>2</sup>		1	1	0.18544	0.1842	-0.58646
	Valor p			< 0.001	0.1424	0.1451	< 0.0001
Peso seco	R <sup>2</sup>			1	0.18544	0.1842	-0.58646
	Valor p				0.1424	0.1451	< 0.0001
Hojas con hijuelos	R <sup>2</sup>				1	0.7910	0.14374
	Valor p					< 0.001	0.2571
Hijuelos por hoja	R <sup>2</sup>					1	0.08142
	Valor p						0.5225
Flores abortadas	R <sup>2</sup>						1
	Valor p						

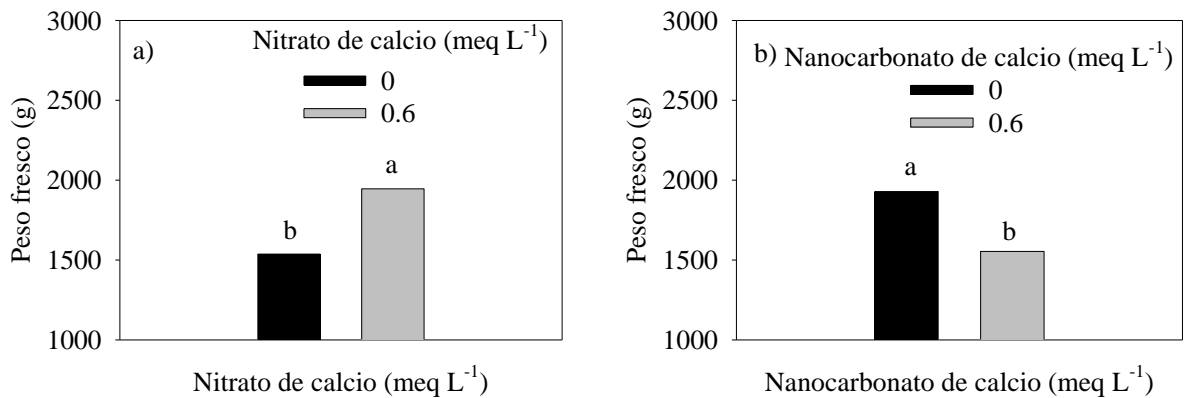


Figura 3. Efecto de la aplicación de nitrato de calcio y carbonato de calcio sobre el peso fresco de plantas (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

El peso fresco de la parte aérea aumenta con la aplicación de ABA, sin embargo, en términos agronómicos es suficiente con 250 mg L<sup>-1</sup>, ya que con 500 se obtiene casi el mismo peso y este disminuye con 750 mg L<sup>-1</sup> (Figura 4). De Freitas *et al.* (2014) señalan que la aplicación de 500 mg L<sup>-1</sup> de ABA incrementa el flujo de savia del xilema y el transporte de calcio, pudiendo ser esta la razón por la cual la aplicación de ABA incrementa el peso fresco.

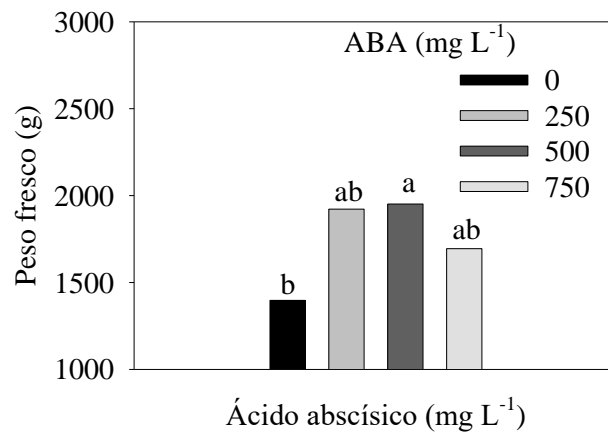


Figura 4. Efecto de la aplicación de ácido abscísico sobre el peso fresco de la planta (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

El peso seco de la parte aérea se incrementó, al igual que el peso fresco, por la aplicación de nitrato de calcio, y disminuyó por la aplicación de nanocarbonato de calcio

(Figuras 5 y 6); además, la correlación es fuerte con la altura de la planta y el peso fresco.

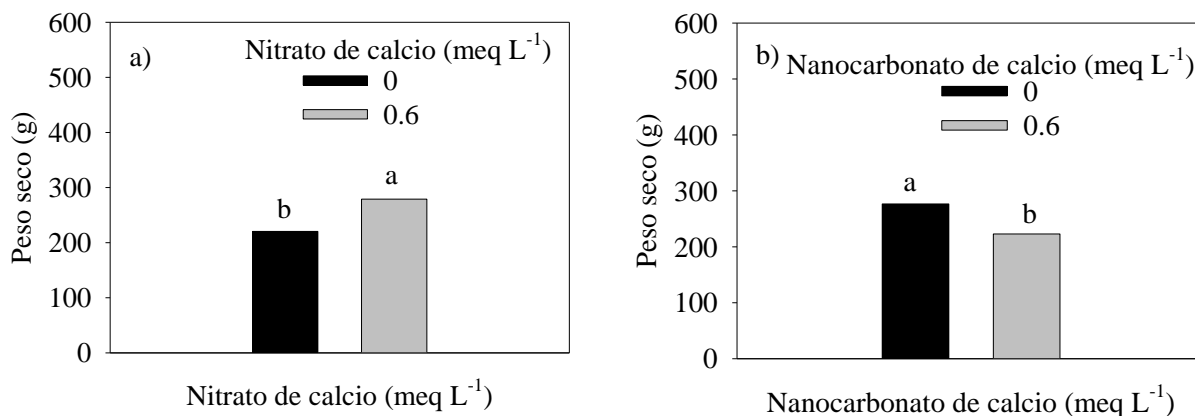


Figura 5. Efecto de la aplicación de nitrato de calcio (a) y carbonato de calcio (b) sobre el peso seco de la planta (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

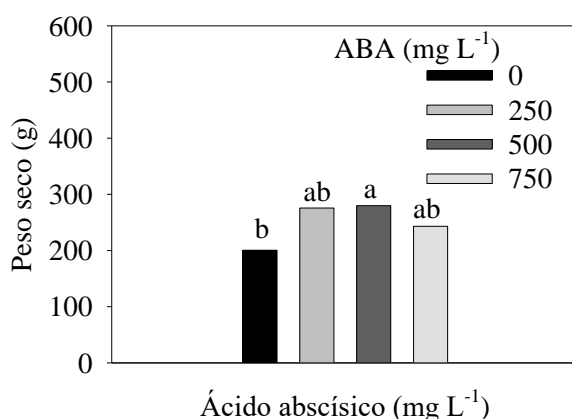


Figura 6. Efecto de la aplicación de ácido abscísico sobre el peso seco de la planta (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

El enchinamiento de hojas es una característica propia de algunas poblaciones nativas de tomate del estado de Puebla, conocido localmente como “jitomate chino” (Flores *et al.*, 2011; Bonilla *et al.*, 2014). Sin embargo, en el presente trabajo el número de hojas enchinadas por planta fue afectado por la interacción de nitrato de calcio, nanocarbonato de calcio y ABA. La aplicación de solo nanocarbonato de calcio incrementó esta variable, mientras que el menor número de hojas enchinadas se obtuvo

con la combinación de 500 mg L<sup>-1</sup> de ABA, 0.6 meq L<sup>-1</sup> de nitrato de calcio y 0.6 meq L<sup>-1</sup> de nanocarbonato de calcio (Figura 7).

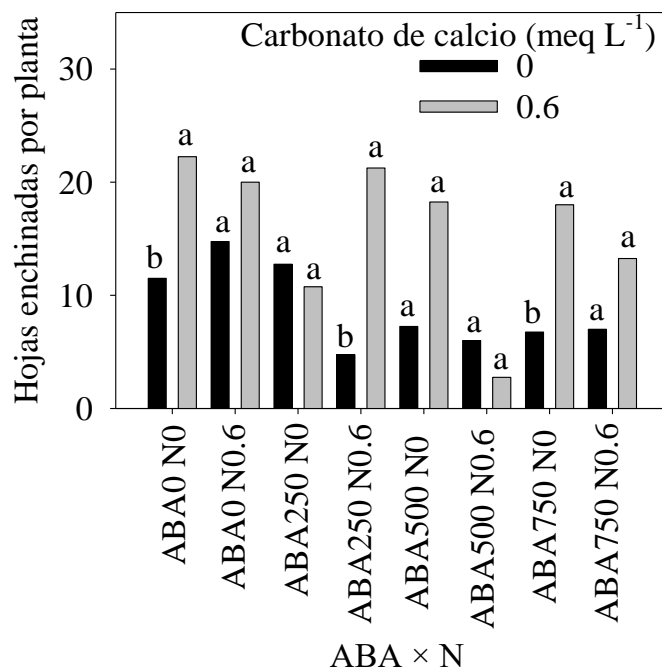


Figura 7. Comparación de promedios para nanocarbonato de calcio en cada combinación de ácido abscísico (ABA) y nitrato de calcio (N) sobre el número de hojas enchinadas por planta (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

El número de hojas con hijuelos disminuyó significativamente por la aplicación de 750 mg L<sup>-1</sup> de ABA; las aplicaciones de 250 y 750 mg L<sup>-1</sup> de ABA disminuyeron de manera similar esta variable, en comparación con el testigo. La combinación de 0.6 meq L<sup>-1</sup> de nitrato de calcio con 0.6 meq L<sup>-1</sup> de nanocarbonato de calcio incrementó el número de hojas con hijuelos, en comparación de la aplicación de solo nitrato de calcio (Figura 8).

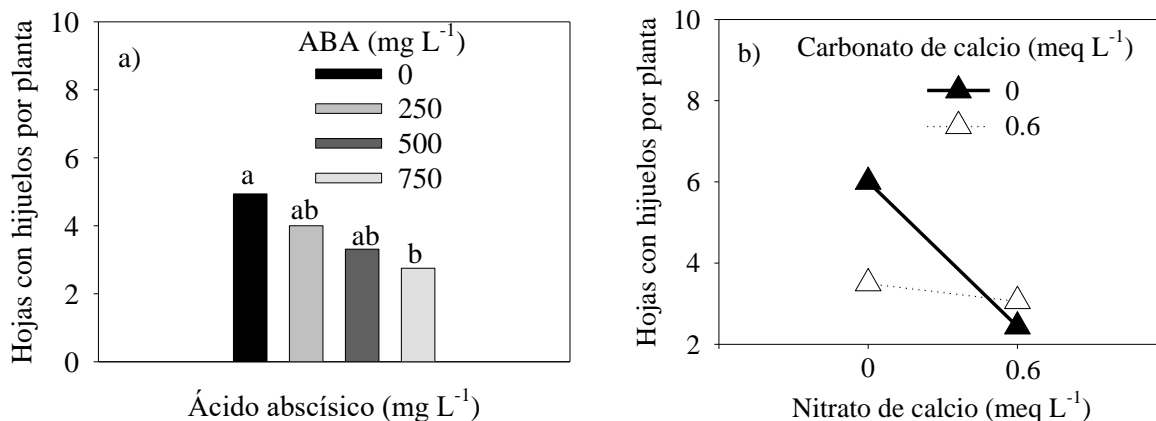


Figura 8. Efecto de la aplicación de ácido abscísico (a) e interacción entre carbonato y nitrato de calcio (b) sobre el número de hojas con hijuelos por planta (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

El número de hijuelos por hoja fue afectado por la aplicación de ABA y fue la dosis de 750 mg L<sup>-1</sup> de ABA la que disminuyó considerablemente esta variable, en comparación con el testigo (Figura 9), lo cual indica que puede ser una característica del material vegetal nativo que se presenta en condiciones de deficiencia de calcio; la generación de hijuelos en las hojas disminuyó con la aplicación de ABA.

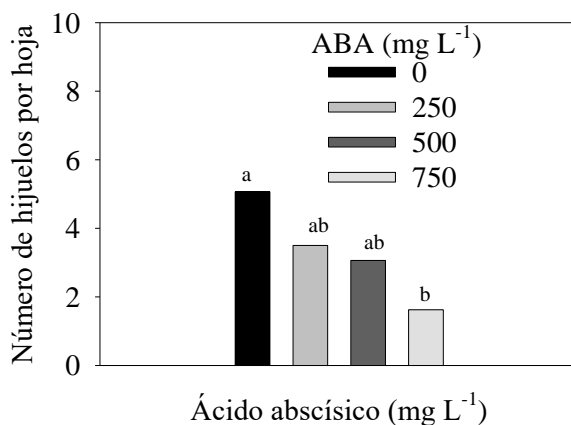


Figura 9. Efecto de la aplicación de ácido abscísico sobre el número de hijuelos por hoja (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

El número de flores abortadas en la planta disminuyó con la aplicación de nitrato de calcio y aumentó con la aplicación de nanocarbonato de calcio (Figura 10). Se encontró correlación negativa de esta variable con la altura de la planta (Cuadro 2). Posiblemente,

el aborto de flores en este trabajo se debe a la deficiencia de calcio, la cual causa, además, la detención del crecimiento de la planta; Santiago *et al.* (1998) señalan que en condiciones de invernadero el aborto de flores se presenta debido a fluctuaciones de la temperatura ambiental y que este depende del genotipo de tomate.

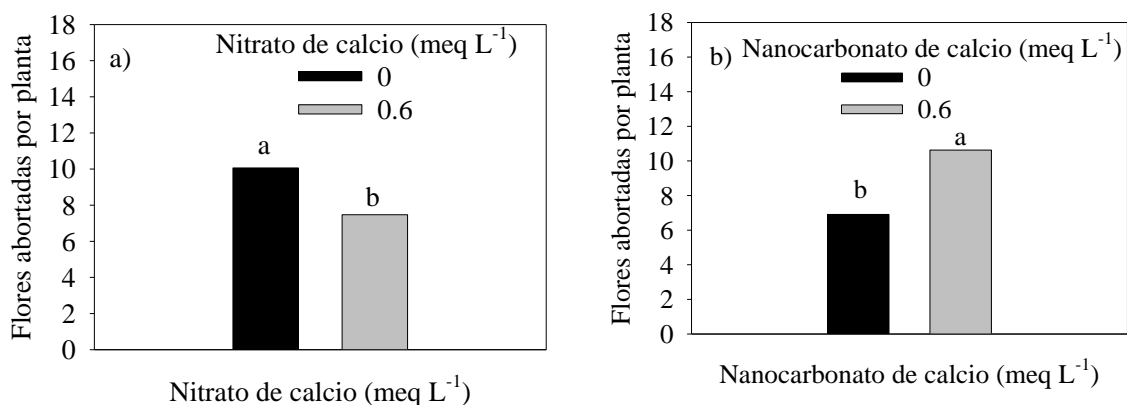


Figura 10. Efecto de la aplicación de nitrato de calcio (a) y nanocarbonato de calcio (b) sobre el número de flores abortadas por planta (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

La aplicación de ABA afecta el número de flores abortadas por planta (Figura 11); 500 mg L<sup>-1</sup> redujo el aborto significativamente y las dosis de 250 y 750 mg L<sup>-1</sup> afectaron de manera similar esta variable, pero en comparación con el testigo, ambos tratamientos presentaron menor cantidad de flores abortadas.

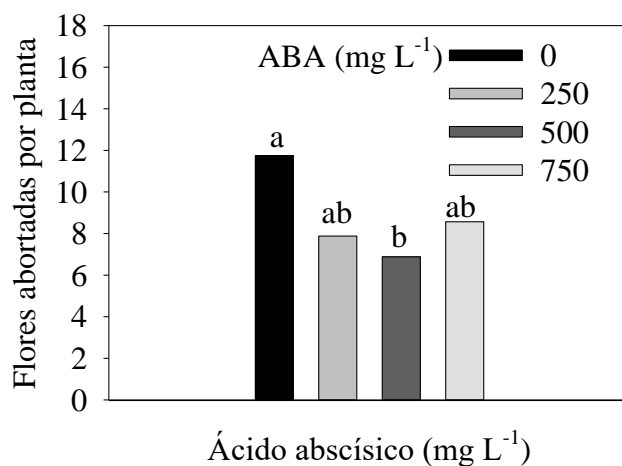


Figura 11. Efecto de la aplicación de ácido abscísico sobre el número de flores abortadas por planta (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

## CONCLUSIONES

El nitrato de calcio incrementó la altura de planta, el peso fresco y el peso seco, y disminuyó el número de flores abortadas por planta. El nanocarbonato de calcio disminuyó la altura de planta, el peso fresco y el peso seco, y aumentó el número de flores abortadas. Por su parte, el ácido abscísico incrementó la altura de planta, el peso fresco y el peso seco, y disminuyó el número de hojas con hijuelos y los hijuelos por hoja. La aplicación de 500 mg L<sup>-1</sup> de ácido abscísico disminuyó el número de flores abortadas y, en combinación con la aplicación de 0.6 meq L<sup>-1</sup> de nitrato de calcio y 0.6 meq L<sup>-1</sup> de nanocarbonato de calcio, redujo el número de hojas enchinadas.

## LITERATURA CITADA

- Bonilla, B., O., R. Lobato O., J.J. García Z., S. Cruz I., D. Reyes L., E. Hernández L. y A. Hernández B. 2014. Diversidad agronómica y morfológica de tomates arriñonados y tipo pimiento de uso local en Puebla y Oaxaca, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 37: 129-139.
- De Freitas, S.T., A.J. McElrone, K.A. Shackel, and E.J. Mitcham. 2014. Calcium partitioning and allocation and blossom-end rot development in tomato plants in response to whole-plant and fruit-specific abscisic acid treatments. *J. Exp. Bot.* 65: 235-247
- De Freitas, S.T., K.A. Shackel, and E.J. Mitcham. 2011. Abscisic acid triggers whole-plant and fruit-specific mechanisms to increase fruit calcium uptake and prevent blossom end rot development in tomato fruit. *J. Exp. Bot.* 62: 2645-2656.
- Flores, G. D., M. Sandoval V., P. Ramírez V., P. Sánchez G., y M. Rodríguez G. 2011. Rendimiento de genotipos nativos de tomate cultivados en invernadero e



hidroponía. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

Guo, Y., L.M. Xiong, C.P. Song, D.M. Gong, U. Halfter, and J.K. Zhu. 2002. A calcium sensor and its interacting protein kinase are global regulators of abscisic acid signaling in Arabidopsis. *Dev. Cell.* 3:233-244.

Ho, L.C and P.J. White. 2005. A cellular hypothesis for the induction of blossom-end rot in tomato fruit. *Ann. Bot.* 95:571-581.

Marschner, P. 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press. San Diego, CA, USA.

Santiago, J., M. Mendoza y F. Borrego. 1998. Evaluación de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en invernadero: criterios fenológicos y fisiológicos. *Agronomía Mesoamericana* 9: 59-65.

Wang, W.N. and J.C. Tarafdar. 2013. Nanoparticle synthesis and delivery by an aerosol route for watermelon plant foliar uptake. *J. Nanopart. Res.*15: 1417.

## CONCLUSIONES GENERALES

Las aplicaciones foliares de ácido abscísico (ABA) y nanocarbonato de calcio disminuyeron la conductancia estomática y la tasa de transpiración foliar.

Las aplicaciones foliares de nitrato de calcio y ABA aumentaron la concentración de calcio en hojas y el rendimiento de fruto, y disminuyeron la incidencia de pudrición apical (BER).

La aplicación foliar de 250 mg L<sup>-1</sup> de ABA redujo la incidencia de BER, de manera similar a como ocurrió con las dosis de 500 y 750 mg L<sup>-1</sup>.

La aplicación del nitrato de calcio incrementó la altura, el peso fresco y el peso seco, y disminuyó el número de flores abortadas por planta.

La aplicación foliar de nanocarbonato de calcio disminuyó la altura de planta, el peso fresco y el peso seco, y aumentó el número de flores abortadas.