

**ADICIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO A LA SOLUCIÓN DEL
SUELO PARA MODIFICAR LA SOLUBILIDAD Y
DISPONIBILIDAD DE NUTRIMENTOS MINERALES EN UN
SUELO CALCÁREO**

FABIÁN PÉREZ LABRADA

TESIS

**Presenta como requisito parcial para
obtener el grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN HORTICULTURA**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
AGRARIA
ANTONIO NARRO**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Diciembre del 2013**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO**

**Adición de ácido cítrico a la solución del suelo para modificar la solubilidad y
disponibilidad de nutrimentos minerales en un suelo calcáreo**

Por

Fabián Pérez Labrada

Elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y aprobada
como requisito parcial para optar al grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN
HORTICULTURA**

COMITÉ PARTICULAR

Asesor principal: _____
Dr. Adalberto Benavides Mendoza

Asesor: _____
Dr. Valentín Robledo Torres

Asesor: _____
Dr. Homero Ramírez Rodríguez

Asesor: _____
Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar

Asesor: _____
Dr. Mario Ernesto Vázquez Badillo

Dr. Fernando Ruiz Zarate
Subdirector de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Diciembre del 2013

DEDICATORIAS

A toda mi familia, por su apoyo incondicional...

Especialmente a mi sobrina Hanna Paola por ser la luz que siempre iluminó mi sendero...

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, institución que me formó como profesional.

Al programa de la Maestría en Ciencias en Horticultura y a la Academia de maestros.

Al Dr. Adalberto Benavides Mendoza por la asesoría oportuna, el tiempo y apoyo brindado, y por ser un gran ejemplo en el ámbito laboral.

Al Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar por su apoyo y asesoría brindada.

Al Dr. Valentín Robledo Torres, Dr. Homero Ramírez Rodríguez y al Dr. Mario Ernesto Vázquez Badillo por el apoyo y asesoría brindada para la finalización del presente trabajo.

A la Maestra Laura Olivia Fuentes Lara y al T.L.Q. Carlos Alberto Arévalo Sanmiguel, por el apoyo y sus valiosas observaciones en el trabajo de laboratorio.

Al Dr. Alberto Sandoval Rangel, M.C. Erika Noemi Rivas Martínez, Ing. Auri Gutiérrez por las facilidades brindadas para el desarrollo del presente trabajo.

A mi compañera de generación Mari Carmen López.

COMPENDIO

ADICIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO A LA SOLUCIÓN DEL SUELO PARA MODIFICAR LA SOLUBILIDAD Y DISPONIBILIDAD DE NUTRIMENTOS MINERALES EN UN SUELO CALCÁREO

Por

FABIÁN PÉREZ LABRADA

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Diciembre del 2013.

Dr. Adalberto Benavides Mendoza –Asesor–

Palabras clave: ácidos orgánicos, potencial de óxido reducción, minerales, *Solanum lycopersicum*.

El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de la adición de ácido cítrico (AC), aplicado en la solución fertilizante, sobre las características químicas, así como la composición mineral de la solución del suelo (SS) de un suelo calcáreo, y su correlación con la composición química y calidad de la planta y del fruto. Así como su impacto en el crecimiento, producción y calidad de fruta del tomate. El experimento consistió en adicionar a una solución fertilizante Steiner completa el AC ($C_6H_8O_7$) grado alimenticio en distintas

concentraciones: 10^{-2} , 10^{-4} y 10^{-6} M, siendo el tratamiento testigo la solución fertilizante sin AC. Los tratamientos se comenzaron a aplicar inmediatamente después del trasplante, usando el sistema de riego, continuándose a lo largo del ciclo del cultivo. Para la colecta de la SS se utilizaron lisímetros de succión, colocados a 15 cm de profundidad y con una presión de extracción de 50 kPa.

La adición del AC en la solución fertilizante indujo un descenso en el pH, CE y potencial de óxido-reducción (ORP), así como cambios en la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ de la SS. De igual manera aumentó en el contenido de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y P en el tejido foliar del tomate, mientras que en fruto se elevó el contenido de Mn, Na^+ y Mg^{2+} . Se presentó una correlación negativa entre la concentración de Ca^{2+} , K^+ y Na^+ en la SS y la concentración de los mismos en el tejido foliar, de manera similar se presentó correlación negativa entre la concentración de K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en la SS y la concentración de K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en el tejido del fruto.

El AC indujo cambios positivos en la longitud de tallo, peso fresco y biomasa seca de planta. La producción de fruto aumentó con el tratamiento 10^{-6} M de ácido cítrico (en un 69%). Las concentraciones de 10^{-6} y 10^{-4} M modificaron favorablemente el potencial antioxidante, la conductividad eléctrica, la acidez titulable y la vitamina C en el fruto.

ABSTRACT

ADDITION OF CITRIC ACID TO SOIL SOLUTION TO MODIFY THE SOLUBILITY AND AVAILABILITY OF MINERAL NUTRIENTS IN CALCAREOUS SOIL

By

FABIÁN PÉREZ LABRADA

MASTER OF SCIENCE IN HORTICULTURE
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Diciembre del 2013.

Dr. Adalberto Benavides Mendoza –Adviser–

Key words: organic acids, potential redox, minerals, *Solanum lycopersicum*.

The aim of this study was to determine the effect of the addition of citric acid (CA), applied in the fertilizer solution on the chemical characteristics and mineral composition of the soil solution (SS) in a calcareous soil, and correlation with chemical composition and quality of the plant and the fruit. Also on the impact on growth, yield and quality of tomato fruit. The experiment consisted of adding food grade AC ($C_6H_8O_7$) in different concentrations, 10^{-2} , 10^{-4} and 10^{-6} M, to a Steiner fertilizer solution; the control treatment being the fertilizer without AC. The treatments began to be applied immediately after transplantation, using

irrigation system, continuing along the crop cycle. For the collection of SS suction lysimeters were used, placed 15 cm deep and at an extraction pressure of 50 kPa.

The addition of AC in the fertilizer solution induced a decrease in pH, EC and redox potential (ORP), and changes in the concentration of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ and K^+ of the SS. Similarly increased the content of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ and P in leaf tissue of tomato, while in fruit content of Mn, Na^+ and Mg^{2+} was raised. A negative correlation between the concentration of Ca^{2+} , K^+ and Na^+ in the SS and the concentration thereof in the leaf tissue, similarly negative correlation occurred between the concentration of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} in the SS and the concentration of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} in the fruit tissue.

AC induced positive changes in stem length, fresh weight and dry biomass plant. Fruit production increased with treatment 10^{-6} M citric acid (by 69%). Concentrations 10^{-6} and 10^{-4} M favorably modified the antioxidant potential, electrical conductivity, titratable acidity and vitamin C in the fruit.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
Hipótesis.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Metabolismo y transporte de ácidos orgánicos.....	3
2.2. Ácido cítrico.....	4
2.3. Función de los ácidos orgánicos en la planta.....	5
2.4. Uso de ácidos orgánicos en la agricultura.....	5
III. ARTÍCULO No. 1:.....	7
ADICIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO PARA MODIFICAR ABSORCIÓN DE MINERALES EN TOMATE EN UN SUELO CALCÁREO.....	7
IV. ARTÍCULO No. 2:.....	29
ADICIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO EN LA SOLUCIÓN FERTILIZANTE PARA TOMATE EN UN SUELO CALCÁREO.....	29
V. CONCLUSIONES.....	39
VI. LITERATURA CITADA.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

ARTÍCULO No 1

	Página
Figura Dinámica de la CE determinada en la solución de suelo de un 1. suelo calcáreo donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante.....	14
Figura Dinámica del pH determinado en la solución de suelo de un 2. suelo calcáreo donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante.....	15
Figura Dinámica del ORP determinado en la solución de suelo de un 3. suelo calcáreo donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante.....	16

ÍNDICE DE CUADROS

ARTÍCULO No 1

Página

Cuadro 1.	Caracteres químicos y concentración de elementos minerales determinados en la solución del suelo de un suelo calcáreo donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante en plantas de tomate.....	18
Cuadro 2.	Elementos minerales en tejido foliar de plantas de tomate cultivadas sobre suelo calcáreo donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante. Cu, Mn, Zn, y Fe se expresan en ppm. K, Na, Mg, Ca, N y P se expresan en porcentaje.....	20
Cuadro 3.	Elementos minerales en fruto de plantas de tomate cultivadas sobre suelo calcáreo donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante. Cu, Mn, Zn, y Fe se expresan en ppm. K, Na, Mg, Ca, N y P se expresan en porcentaje.....	21
Cuadro 4.	Extracción total de micro y macronutrientes (g planta^{-1}) de plantas de tomate cultivadas sobre suelo calcáreo donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante.....	22

Cuadro 5.	Producción y características de los frutos de plantas de tomate cultivadas en suelo calcáreo donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante.....	23
------------------	---	----

ARTÍCULO No 2

Página

Cuadro 1.	Variables morfológicas de plantas de tomate cultivadas sobre suelo calcáreo que mostraron respuesta a la adición de ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante.....	34
Cuadro 2.	Producción de frutos (g/planta) y características de los frutos de tomate cultivadas en suelo calcáreo en donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante.....	35
Cuadro 3.	Calidad de frutos de plantas de tomate cultivadas sobre suelo calcáreo en donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante. La CE se expresa como $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y el potencial de óxido-reducción como mV.....	36

I. INTRODUCCIÓN

Los ácidos orgánicos juegan un papel primordial en el metabolismo energético, además de ser claves en la tolerancia a metales pesados (Jones y Darrah, 1994), en respuesta a deficiencias de nutrientes (Silva *et al.*, 2001), movilización de Ca, Fe y P (Wang *et al.*, 2008) y acidificación del suelo (Massonneau *et al.*, 2001). Dichos ácidos son exudados por los tejidos radicales como una mezcla compleja de aniones orgánicos (Dakora y Phillips, 2002), siendo esta actividad muy alta en las raíces proteiformes (Peñaloza *et al.*, 2000). Dentro del grupo de ácidos orgánicos citado se tiene al ácido cítrico (Campbell, 2010), cuya exudación como anión citrato se presenta en respuesta al daño causado por Al o bien frente a la deficiencia de Fe o P (Hu *et al.*, 2005; Shlizermana *et al.*, 2007).

El uso de ácidos orgánicos ha sido reportado por Bilkisu *et al.* (2005) y Luo *et al.* (2005) quienes encontraron que la presencia de ácido cítrico aumenta la absorción de metales pesados como Cu, Pb, Zn, Al y Cd en la raíz, traslocándose a diversos órganos de la planta. Por otra parte Al-Bahrany y Al-Shabaan (1995) citan que aplicaciones exógenas de ácido cítrico y oxálico en suelos calcáreos indujeron un aumento en la absorción de Ca, K, Mg, Fe y Zn en plantas de tomate. Por su parte Ferreyra *et al.* (1998) encontraron aumentos en el contenido de N, Fe, Mn, Cu y Zn al realizar aplicación exógena de ácido cítrico en suelo calcáreo. Finalmente Palomo *et al.*, (2006) reportan un aumento en la disponibilidad y absorción de P aplicando ácido cítrico en suelos calcáreos, háplicos y cambisoles, disminuyendo el pH, de la reacción del suelo, en los dos últimos.

La producción de cultivos en suelos de tipo calcáreo implica una serie de problemas, como deficiencia de Fe (Crane *et al.*, 2007), dificultad en la absorción de P, Fe, Zn y Mn y poca solubilidad de Ca, Fe y Zn (Rivera *et al.*, 2008), debido a la presencia de carbonatos alcalinotérreos y a la presencia del ion bicarbonato (Navarro, 2010). Parte de la respuesta del cultivo consiste en la

producción y exudación de ácidos orgánicos, lo cual representa un fuerte gasto metabólico para la planta (Peñaloza *et al.*, 2000). De lo anterior se desprende la presente propuesta de investigación que tiene por objetivos:

Objetivo general

Determinar el efecto de la adición de ácido cítrico ($C_6H_8O_7$) a la solución del suelo sobre las características químicas de esta, así como sobre la concentración de aniones y cationes disponibles para la planta.

Objetivos específicos

Estudiar la composición de la solución de un suelo calcáreo con y sin adición de ácido cítrico en la solución nutritiva utilizada como fertilizante.

Verificar si las diferencias en la composición química de la solución del suelo tiene impacto en el crecimiento, rendimiento y composición química de la planta.

Determinar si los cambios en la composición química de la solución del suelo modifican la calidad nutricional del fruto; considerando el contenido de minerales.

Hipótesis

La calidad nutricional del fruto, productividad y rendimiento dependen de la composición de la solución del suelo, misma que pudiera modificarse con la adición de ácido cítrico.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Metabolismo y transporte de ácidos orgánicos

Los ácidos orgánicos son compuestos de carbono, formados al sustituir en el carbono primario dos hidrógenos por un oxígeno y el tercer hidrogeno por un grupo (OH) que se une mediante un enlace simple, formando un grupo carboxilo, presentando la fórmula general R-COOH (Ryan *et al.*, 2001).

La diversidad de compuestos orgánicos necesarios en la elaboración de membranas, paredes y componentes estructurales de la planta y para la regulación metabólica, surge de la síntesis intensa y variada que consume el ATP generado en la fotosíntesis y la respiración, empleando como precursores los esqueletos de C que proporciona la fotosíntesis o bien compuestos intermediarios producidos en el ciclo de Krebs (Popova y Pinheiro de Carvalho, 1998). Estos ácidos se producen en las mitocondrias, principalmente a través del ciclo de Krebs y en menor medida por el ciclo del glioxilato (Leninger *et al.*, 2005; Salceda, 2008); debido a la naturaleza catalítica del ciclo de Krebs, los ácidos orgánicos están presentes sólo en compartimentos muy pequeños en la mitocondria, siendo almacenados preferentemente en la vacuola (López *et al.*, 2000).

El transporte de estos aniones orgánicos se restringe a tres vías supuestas: a) difusión trans-membrana en forma protonada, b) exocitosis y c) transporte transmembrana con proteínas integrales (Ryan *et al.*, 2001). Ante tal consideración Jones (1998) menciona que la movilidad de ácidos orgánicos y sus compuestos quelatados se realiza por dos vías básicas 1) lenta difusión y 2) eflujo a través de un canal de la membrana plasmática, la dirección de transporte por ambos mecanismos es controlada por gradiente de potencial electroquímico creado por una H⁺-ATPasa.

Dentro de los ácidos tricarbónicos excretados por las plantas en los suelos se encuentran: oxálico (C₂H₂O₄), succínico (C₄H₆O₄) tartárico (C₄H₆O₆),

ácido fumárico ($C_4H_4O_4$), málico ($C_4H_6O_5$), cítrico ($C_6H_8O_7$), láctico ($C_3H_6O_3$) y pirúvico ($C_3H_4O_3$). (Mimmo *et al.*, 2012; Moradi *et al.*, 2012). La importancia de los ácidos carboxílicos es múltiple, se relacionan con el metabolismo del nitrógeno (Román y Gutiérrez, 1998), se asocian con la producción de energía como intermediarios en el ciclo de Krebs, o bien permiten el equilibrio de cargas necesario para el transporte de cationes o mantienen el potencial osmótico (malato y oxalato). El contenido de ácidos orgánicos en las plantas se rige principalmente por el tipo de fijación de C, su estado nutricional y la edad (Jones, 1998).

Los ácidos orgánicos son exudados por todas las raíces, especialmente por raíces proteiformes (Watt y Evans, 1999; Peñaloza *et al.*, 2000), como una mezcla compleja de aniones (Dakora y Phillips, 2002). Igualmente son utilizados para el transporte de iones de metales a través del xilema (Wasaki *et al.*, 2008).

2.2. Ácido cítrico

Dentro de los ácidos orgánicos se encuentra el ácido cítrico, se caracteriza por ser un ácido débil que posee tres grupos carboxílicos con constantes de disociación que varían en tres órdenes de magnitud y que forman complejos con varios elementos presentes en el suelo como Al, Fe, Mn y Cu; cargándose negativamente cuando un ion H^+ se elimina desde el grupo carboxilo (Ferreyra *et al.*, 1998; Campbell, 2010). El ácido cítrico es utilizado en la retención de C para el reciclaje interno de este elemento y para mantener el balance de agua (Lüttge, 1998).

Este ácido, secretado en forma de citrato, se presenta como una respuesta a deficiencias de algunos nutrientes como Fe, para acceder a P o por el estrés inducido por el Al en suelos con reacción ácida (Peñaloza *et al.*, 2000; Shlizermana *et al.*, 2007), muestra asimismo una gran capacidad para movilizar P (Wang *et al.*, 2008) debido a la acción complejante del anión citrato, así como al aporte de los protones liberados a partir de ácido cítrico en la solución del suelo (Jones y Darrah, 1994).

2.3. Función de los ácidos orgánicos en la planta

Los ácidos orgánicos tienen un papel variado dentro de los procesos de la planta, son considerados como solutos potenciales, metabólicamente activos, para el ajuste osmótico y el equilibrio del exceso de cationes, participan en los mecanismos para hacer frente a las deficiencias de nutrimentos, tolerancia a metales pesados y las interacciones planta-microorganismo que operan en la interface suelo-raíz (López *et al.*, 2000). De igual manera intervienen en la apertura estomática, siendo el flujo del malato a través de canales de aniones en la membrana plasmática y tonoplasto, quien regula dicho proceso (Wang & Blatt, 2011), así como el equilibrio iónico y extrusión del exceso de Ca^{2+} del metabolismo activo (Çalışkan, 2000).

2.4. Uso de ácidos orgánicos en la agricultura

Además del papel fundamental que juegan en el metabolismo los ácidos orgánicos, los aniones orgánicos potencialmente pueden cambiar las concentraciones de micronutrientes (Fe^{3+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+}) en la solución del suelo (Ryan *et al.*, 2001) presentando un efecto nutricional, ya que los exudados de la raíz inducen la acidificación de la rizosfera, dependiendo en gran medida de la relación entre las cantidades de aniones absorbidos por las raíces con respecto a los cationes (Dakora y Phillips, 2002). Juegan igualmente un papel importante en el crecimiento de las plantas y los microorganismos mediante la mejora de solubilidad de nutrientes, por ejemplo, P, Fe, Zn, además sirven como desintoxicantes de metales presentes en altas concentraciones, como el Al y Cd (Oburger *et al.*, 2011).

La aplicación exógena de estos ácidos, particularmente del AC, fue reportada por Al-Bahrany y Al-Shabaan (1995) quienes citan aumento en la absorción de Ca, K, Mg, Fe y Zn en plantas de tomate al aplicar ácido cítrico y oxálico de manera exógena en suelos calcáreos. Por otra parte Ferreyra *et al.* (1998) encontraron aumentos en el contenido de N, Fe, Mn, Cu y Zn al realizar

aplicación exógena de ácido cítrico en suelo calcáreo. Mientras que Benavides *et al.*, (2003) mencionaron que el ácido cítrico en la solución fertilizante modificó la concentración foliar de elementos en el tomate, elevando el P, Na y N y disminuyendo el Mg y Mn. Finalmente Palomo *et al.*, (2006) citan un aumento en la disponibilidad y absorción de P aplicando ácido cítrico en háplicos y cambisoles, disminuyendo el pH, de la reacción del suelo, en los dos últimos.

III. ARTÍCULO No. 1:

ADICIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO PARA MODIFICAR ABSORCIÓN DE MINERALES EN TOMATE EN UN SUELO CALCÁREO

ADICIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO PARA MODIFICAR ABSORCIÓN DE MINERALES EN TOMATE EN UN SUELO CALCÁREO

Addition of Citric Acid to Modify Mineral Absorption in Tomato on a Calcareous Soil

**Fabián Pérez-Labrada¹, Adalberto Benavides-Mendoza*, Luis Alonso Valdés-Aguilar,
Valentín Robledo-Torres**

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura. Calzada Antonio Narro 1923, Saltillo, Coah., México, C.P. 25315. * Autor responsable: abenmen@uaaan.mx

RESUMEN

Los ácidos orgánicos, principalmente el ácido cítrico, contribuyen en el proceso de absorción de nutrientes minerales modificando las condiciones químicas de la rizosfera. El presente estudio se realizó con el objetivo de determinar el efecto de añadir ácido cítrico con la solución fertilizante, sobre la composición de la solución de los poros de un suelo calcáreo (SS) y su correlación con la composición química y calidad de la planta y del fruto de tomate. La adición del ácido cítrico (AC) en la solución fertilizante indujo un descenso en el pH, CE y potencial de óxido-reducción (ORP), así como cambios en la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ de la SS. Del mismo modo se presentó un aumento en el contenido de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y P en el tejido foliar del tomate. En el fruto se elevó el contenido de Mn, Na^+ y Mg^{2+} . Se observó una correlación negativa entre la concentración de Ca^{2+} , K^+ y Na^+ en la solución del suelo y la concentración de Ca^{2+} , K^+ y Na^+ del tejido foliar, también se presentó correlación negativa entre la concentración de K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en la solución del suelo y la concentración de K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en el tejido del fruto. La adición de AC modificó las propiedades de la solución del suelo, cambiando asimismo la composición química de la planta.

Palabras clave: ácidos orgánicos, solución del suelo, potencial de óxido-reducción.

ABSTRACT

Organic acids, especially citric acid, contribute in the process of absorption of mineral nutrients by modifying the chemical conditions of the rhizosphere. The aim of the present study was determining the effect of adding citric acid to the fertilizer solution on the composition of the water of soil pores (SS) of a calcareous soil, and their correlation with chemical composition and quality of the plant and tomato fruit. The addition of citric acid (CA) in the fertilizer solution induced a decrease in pH, EC and redox potential (ORP), as well as changes in the concentration of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ and K^+ in the SS. Likewise there was an increase in the content of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ and P in leaf tissue of the tomato. In the fruit increased the content of Mn, Na^+ and Mg^{2+} . There was a negative correlation between the concentration of Ca^{2+} , K^+ and Na^+ in the soil solution and the concentration of Ca^{2+} , K^+ and Na^+ in the leaf tissue, the same negative correlation was presented between the concentration of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} in the soil solution and the concentration of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} in the fruit tissue. The adding the CA modified the solution properties of the soil, changing also the chemical composition of the plant.

Keywords: organic acids, soil solution, redox potential.

INTRODUCCIÓN

Los ácidos orgánicos son producidos por diversas rutas metabólicas como el ciclo de los ácidos tricarboxílicos (Lehninger *et al.*, 2005) y el ciclo del glioxilato (Salceda, 2008) entre otros. Los ácidos orgánicos participan en gran cantidad de actividades en las plantas, pudiendo citarse el metabolismo energético, la biosíntesis de aminoácidos (López *et al.*, 2000), la función estomática (Wang y Blatt, 2011), el equilibrio iónico y el transporte de compuestos de la vacuola y la mitocondria hacia el citoplasma (Çalışkan, 2000). Son además muy importantes como parte de los mecanismos de tolerancia a los metales pesados (Anwer *et al.*, 2012), como en la respuesta frente a la deficiencias de nutrimentos (Dakora y Phillips, 2002), movilizand

nutrimentos como el Ca^{2+} , Fe^{+3} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} y PO_4^{-3} en suelos calcáreos (Wang *et al.*, 2008). De la misma manera los ácidos orgánicos permiten la acidificación de la rizosfera mediante el aporte de H^+ (Zhu *et al.*, 2005).

Dentro del grupo de ácidos orgánicos citado uno de los más más abundantes es el ácido cítrico (AC), que al desprotonarse forma complejos con elementos presentes en el suelo como Al, Fe, Mn y Cu (Campbell, 2010). La exudación de este ácido como anión citrato por las células radicales se presenta en respuesta al daño causado por el Al en suelos ácidos o bien frente a la deficiencia de Fe o P en suelos con reacción alcalina (Neumann *et al.*, 2000; Hu *et al.*, 2005; Shlizerman *et al.*, 2007), en este último caso el elemento es movilizado (Wang *et al.*, 2008) debido tanto a la acción complejante del AC así como a la habilidad de aportar protones a la solución del suelo (Jones y Darrah, 1994). Del mismo modo la presencia de AC aumenta la absorción de metales pesados como Cu, Pb, Zn, Al y Cd en la raíz (Bilkisu *et al.*, 2005).

La exudación del ácido cítrico requiere de un gasto metabólico por parte de la planta y los esqueletos de C necesarios son proveídos por la PEP-carboxilasa de las raíces (Peñaloza *et al.*, 2000). Las reacciones de síntesis del citrato y sus derivados son igualmente importantes en otras vías metabólicas aportando esqueletos de C necesarios para la asimilación de N o bien como equivalentes de reducción para otras reacciones biosintéticas (Popova y De Carvalho, 1998).

Considerando lo antes explicado se ha buscado elevar la concentración de ácidos orgánicos presentes tanto en los tejidos vegetales como en la solución del suelo (López *et al.*, 2000), ya sea aumentando la actividad fotosintética y el transporte de fotosintatos hacia las raíces (Watt y Evans, 1999), o bien mediante aplicaciones exógenas de estos ácidos (Palomo *et al.*, 2006).

Aunque ya fue demostrado que las aplicaciones exógenas de ácido cítrico modifican positivamente la absorción de minerales y el crecimiento de las plantas (Al-Bahrany y Al-Shabaan, 1995) no se han descrito los cambios que la aplicación de AC causa sobre las

características de la solución del suelo. Del mismo modo falta verificar la correlación entre la concentración de los iones de diferentes elementos en la solución del suelo y el contenido de los mismos en la planta, así como el efecto de ello sobre la composición mineral y calidad de la fruta. Por lo anterior, los objetivos del presente trabajo fueron: documentar el efecto de la adición de ácido cítrico en el suelo sobre las características químicas de la solución del suelo; verificar la correlación entre la concentración de los iones de diferentes elementos en la solución del suelo y el contenido de los mismos en la planta; determinar el impacto del ácido cítrico en la producción de fruto.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se llevó a cabo durante el 2012 en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila (25°22' N y 101°00' O, a 1760 msnm). El clima de región corresponde al tipo BWhw (x') (e): muy seco, semicálido, invierno fresco, extremo, lluvias en verano y precipitación invernal superior al 10% de la total anual.

Como material biológico se utilizó tomate (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Grande, producido bajo invernadero. El trasplante fue realizado en macetas de polietileno color negro de 17 litros utilizando un suelo cribado franco-arcilloso calizo, no salino, de pH= 8.7 y contenido muy bajo de materia orgánica y de prácticamente todos los elementos, salvo el calcio y el zinc. Las macetas se colocaron en un invernadero sobre suelo nivelado que se cubrió con polietileno color negro, evitando así malezas y el crecimiento de raíces fuera del volumen de la maceta.

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con cuatro tratamientos y cinco repeticiones. La unidad experimental fue una maceta con una planta. Los tratamientos consistieron en adicionar a una solución fertilizante Steiner completa (Steiner, 1961) el ácido cítrico (AC) ($C_6H_8O_7$) grado alimenticio en distintas concentraciones: 10^{-2} , 10^{-4} y 10^{-6} M (1.92, 0.0192 y 0.000192 g L⁻¹), siendo el tratamiento testigo la solución fertilizante sin AC. Los

tratamientos se comenzaron a aplicar inmediatamente después del trasplante, usando el sistema de riego, y se continuaron mediante los riegos diarios realizados a lo largo de la vida del cultivo.

Para la colecta de la solución del suelo (SS) se utilizaron lisímetros de succión, colocados a 15 cm de profundidad y con una presión de extracción de 50 kPa. Cada lisímetro fue colocado inmediatamente después del trasplante en una posición intermedia entre el borde de la maceta y el tallo de la planta. Se contó con seis lisímetros por cada tratamiento que permitieron obtener seis muestras de SS en cada muestreo. Se realizaron colectas de SS cada semana, verificándose *in situ* la conductividad eléctrica (CE) con un potenciómetro HI98130 de Hanna Instruments, mientras que el pH y el potencial de óxido-reducción se determinaron con un potenciómetro pH/mV/ISE HI98185 de Hanna Instruments.

Se tomaron adicionalmente muestras de SS a los 71, 83 y 119 días después del trasplante (ddt), mismas que se enviaron al laboratorio para determinarles la concentración de minerales (Fertilab, 2011). En este caso las seis muestras de cada tratamiento se mezclaron para formar una muestra compuesta.

El contenido de minerales en hojas y tallos (a los 71, 83 y 119 ddt) y del fruto (119 ddt) se determinó usando un espectrofotómetro de absorción atómica VARIAN AA 1275 (Jones y Case, 1990). El P se determinó por el método colorimétrico de Olsen (Olsen *et al.*, 1954), mientras que el N total (%) se determinó por el método micro Kjeldahl (Muller, 1961). Se determinó la extracción de nutriente por la planta, con base en la concentración de nutrientes minerales y la masa seca total de la planta (Rodríguez y Pire, 2004).

Se evaluó la producción de fruto como la suma del peso total de frutos por planta, obtenida con los datos de tres cortes realizados a los 119, 121 y 125 ddt. Se contabilizó igualmente el número de frutos por planta, el peso y el diámetro de todos los frutos cosechados.

Sobre los datos se realizó un ANVA, así como prueba de medias según la prueba LSD de Fisher con el programa SAS (Statistical Analysis System, 2002). Los datos de las

características químicas de la SS fueron analizados con la prueba de Wilcoxon. Sobre las variables se aplicó igualmente el cálculo de correlaciones usando la R de Spearman.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características Químicas de la Solución del Suelo

Conductividad Eléctrica. De acuerdo a la prueba de Wilcoxon se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) en la CE de la SS (Figura 1). Durante el tiempo de crecimiento del cultivo se verificó una cierta dinámica en la CE, la cual se conservó en forma aproximadamente constante en los diferentes tratamientos. Tomando como referencia la curva con valores más altos de CE de la Figura 1, que corresponde al tratamiento testigo, es posible ver que hasta los 39 ddt se observó una disminución seguida por un ligero aumento a los 52 ddt y un pequeño descenso a los 66 ddt, a partir de ese punto se ve un aumento considerable a partir de los 73 ddt, coincidiendo con el inicio de la floración del cultivo. El cambio observado a los 52 ddt correspondió con el aumento en la concentración de la solución Steiner utilizada.

Es posible que la respuesta dinámica de la CE observada en la Figura 1 dependa de la cantidad de fertilizantes aplicados (Bosch *et al.*, 2012), ya que conforme creció la planta requirió una mayor cantidad de agua de riego y una solución nutritiva más concentrada. Una explicación alternativa es que, bajo riegos constantes, las plantas muestran mayor transpiración, provocando acumulación de sales en la zona radical (Ferreira *et al.*, 1998).

En cuanto a la diferencia entre los tratamientos, en donde el testigo mostró invariablemente los valores más altos de CE, este efecto pudo deberse a la formación de complejos entre el AC con cationes de metales presentes en solución y al desplazamiento de aniones de la solución del suelo (Sagoe *et al.*, 1998) hacia la raíz, reduciendo así la cantidad de iones presentes en la SS.

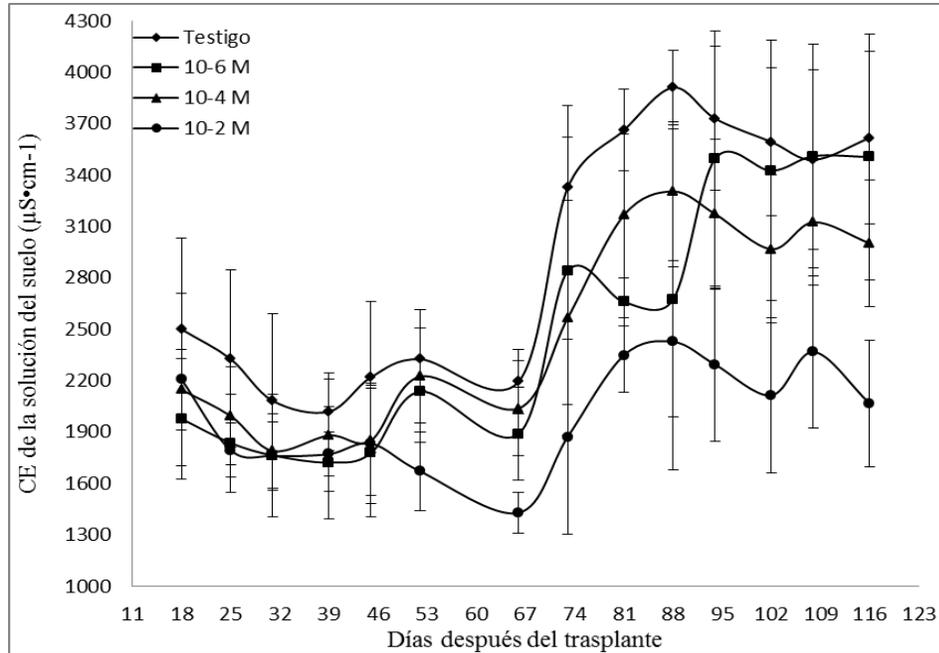


Figura 1. Dinámica de la CE determinada en la solución de suelo de un suelo calcáreo donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante.

pH. Según la prueba de Wilcoxon se presentaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en el pH de la SS entre los diferentes tratamientos (Figura 2). En promedio los valores más bajos de pH se obtuvieron con el tratamiento de AC de 10^{-4} M, mientras que las otras dos concentraciones no fueron diferentes al testigo. Al igual que con la CE, el comportamiento dinámico de los valores de pH mostró comportamientos muy parecidos entre los diferentes tratamientos.

En la Figura 2 es posible apreciar que después del trasplante se presenta un aumento constante en el pH de la SS de todos los tratamientos, presentando de nuevo los valores más altos el testigo, esta dinámica se revierte a la baja después de los 52 ddt, alcanzando valores cercanos a los iniciales hacia los 73 ddt, coincidiendo de nuevo con el inicio de la floración de las plantas. A partir de allí el pH vuelve a elevarse alcanzando un nuevo pico hacia los 88 ddt, para de nuevo volver a disminuir.

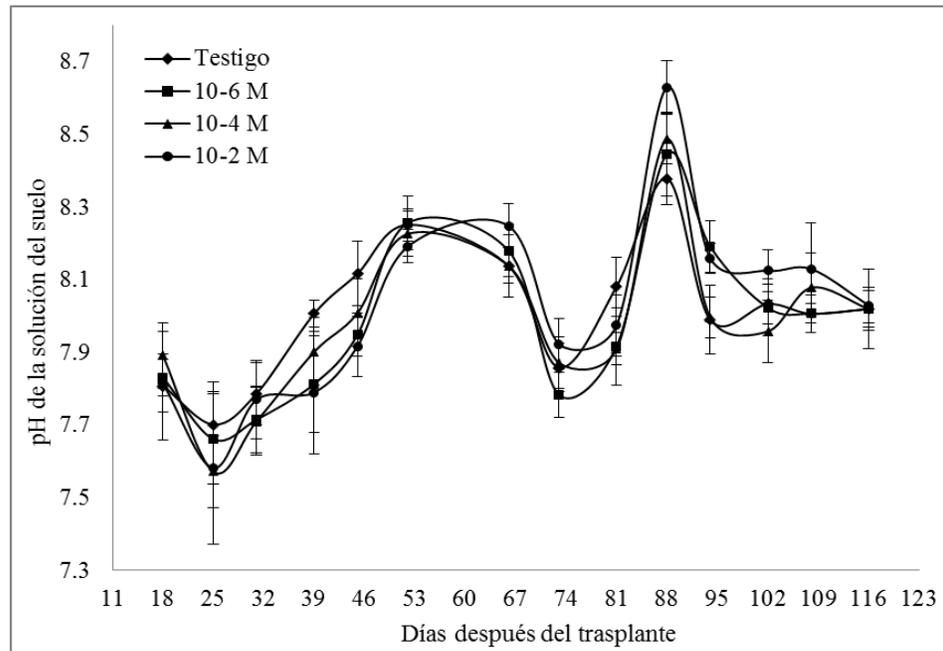


Figura 2. Dinámica del pH determinado en la solución de suelo de un suelo calcáreo donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante.

Tanto las diferencias entre los tratamientos, como el comportamiento observado en el pH de la SS a través del tiempo, no se explican atendiendo solamente a la habilidad del AC para ceder H^+ a la SS. Strobel (2001) y Liu *et al.* (2013) encontraron una relación entre la presencia de ácidos orgánicos en el suelo y el pH, pero en el actual experimento no se observó así, ya que la concentración intermedia de AC (10^{-4} M) fue la que indujo el mayor descenso en el valor promedio del pH. Lo mismo puede aplicarse al comportamiento dinámico oscilante que es patente en la Figura 2. Este pudiera ser el resultado de modificaciones en la absorción relativa de aniones vs cationes, lo cual pudiera cambiar el pH de la SS a través de la acción de las células radicales (Haynes, 1990; Thibaud *et al.*, 1994).

Potencial de Óxido-Reducción. Según la prueba de Wilcoxon la adición de AC dio lugar a diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) entre los diferentes tratamientos (Figura 3). El tratamiento de 10^{-2} M de AC indujo los valores más altos de ORP en la SS, seguido por la concentración 10^{-6} M, mientras que el tratamiento 10^{-4} M de AC mostró un valor muy similar al testigo. En lo que respecta a la dinámica del ORP esta mostró un comportamiento

oscilatorio durante el ciclo del cultivo (Figura 3) fluctuando entre +100 y +260 mV, mostrando los valores promedio más altos entre los 39 y 81 ddt.

De acuerdo con Liu *et al.* (2013) la influencia de los ácidos orgánicos (principalmente el pirúvico, oxálico y cítrico) en el comportamiento del ORP se debe a que estos actúan como ligandos orgánicos, induciendo la formación de complejos de Fe (II) y Fe (III). Un factor que pudiera explicar la fluctuación del ORP en la SS es la variación en el contenido de agua en el suelo (Pezeshki y DeLaune, 2012), sin embargo esta posibilidad no parece aplicable al caso actual ya que el contenido de agua se mantuvo relativamente constante en las plantas gracias al sistema de riego utilizado.

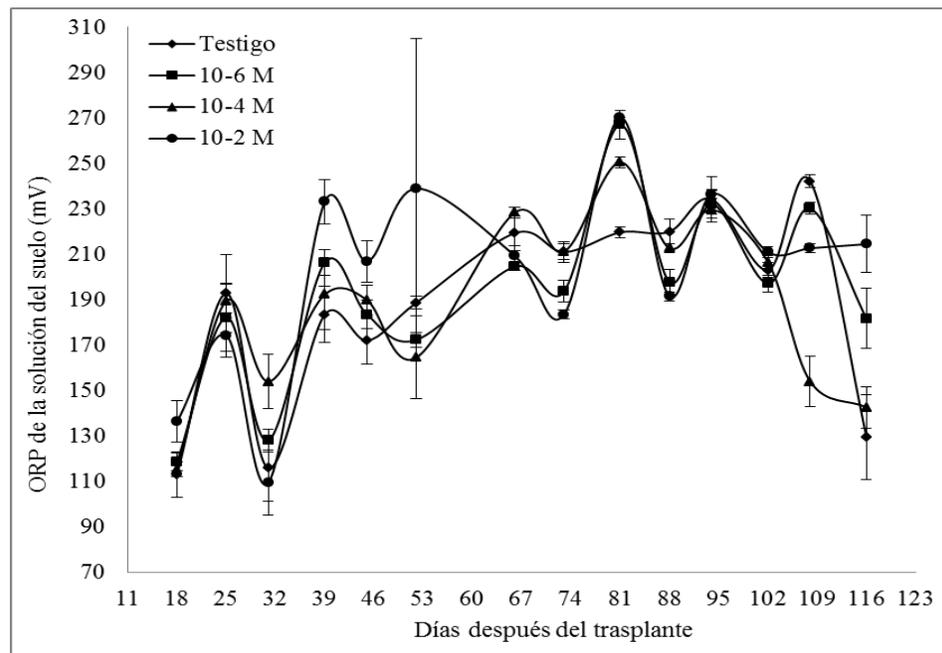


Figura 3. Dinámica del ORP determinado en la solución de suelo de un suelo calcáreo donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante.

De acuerdo con el análisis de correlación de Spearman las variables CE, pH y ORP de la SS mostraron correlación positiva estadísticamente significativa, la correlación más alta fue entre la CE y el ORP que se presentó en el testigo ($R=0.49$), mientras los tratamientos 10^{-2} y 10^{-6}

M de AC mostraron una mayor correlación entre las variables ORP y pH ($R=0.36$) así como para el pH y CE ($R=0.32$), respectivamente.

Características Químicas y Concentración de Minerales en la Solución del Suelo

En lo que respecta a la CE de la SS se observó que esta aumentó durante los muestreos (mostrando los sólidos disueltos totales prácticamente la misma tendencia), mientras que en promedio el pH disminuyó para todos los tratamientos incluido el testigo (Cuadro 1). Estos resultados son los esperados por la adición de solución fertilizante y por la acidificación que normalmente lleva a cabo la raíz en este tipo de suelos (Neumann y Römheld, 1999). La adición de AC causó que la CE de la SS fuera menor en comparación con el testigo pero no dio lugar a diferencias en cuanto al pH.

Los resultados de la primera colecta de SS a los 77 ddt mostraron una disminución en la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^- y Cl^- en la SS de los tratamientos con AC en comparación con el testigo, los valores más bajos se observaron en 10^{-2} y 10^{-4} M de AC, sin embargo la concentración de Na^+ solo disminuyó con la concentración 10^{-2} y 10^{-6} M de AC, mientras que el K^+ solo con la concentración de 10^{-2} M de AC (Cuadro 1). El efecto más notorio ocurrió con el SO_4^- en donde la diferencia entre el testigo y los tratamientos con AC es muy alta sobre todo en los dos primeros muestreos. Por otra parte, el aumento en los valores de SO_4^- a través del tiempo, que se obtuvo en todos los tratamientos, se explica posiblemente por el uso de pequeñas cantidades de ácido sulfúrico para acidificar el agua en cada riego.

Al comparar las concentraciones de cationes y aniones presentes en la SS del suelo calcáreo con los reportados por Román *et al.* (2002) en un suelo fluvisol se tiene que tanto el Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- y HCO_3^- presentan valores más bajos, mientras que las concentraciones de K^+ y CO_3^{2-} se encuentran por arriba de los valores reportados por estos autores, finalmente el Mg^{2+} y SO_4^- son muy similares. Dichas concentraciones estarán en función de la composición de cada

suelo estudiado. Los mismos autores mencionan la necesidad de realizar un gran número de muestreos debido al comportamiento fluctuante de los iones en el perfil del suelo.

Por otra parte, los valores de RAS fueron más altos para los tratamientos con AC. Se logró observar, sin embargo, una disminución paulatina de la RAS a lo largo de las tres colectas de SS. Los valores de la RAS son dependientes de las concentraciones de Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , las cuales fueron modificadas por la presencia de AC. A pesar de los cambios observados ninguno de los valores de RAS rebasó lo recomendado para el cultivo de tomate (Bosch *et al.*, 2012). En cuanto a la salinidad efectiva (SE) esta mostró una respuesta muy constante frente al AC, ya que el tratamiento 10^{-2} M siempre mostró los valores más bajos en las tres muestras de SS (Cuadro 1). Lo anterior puede deberse a que el tratamiento 10^{-2} M de AC generó menor aporte de aniones respecto a cationes en la SS (Valdivia *et al.*, 2009).

Cuadro 1. Caracteres químicos y concentración de elementos minerales determinados en la solución del suelo de un suelo calcáreo donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante en plantas de tomate.

Variable	77 ddt				83 ddt				119 ddt			
	Tratamientos				Tratamientos				Tratamientos			
	Test	10^{-6} M	10^{-4} M	10^{-2} M	Test	10^{-6} M	10^{-4} M	10^{-2} M	Test	10^{-6} M	10^{-4} M	10^{-2} M
CE	1109	907	945	828	2840	2560	2070	1388	2720	2830	2110	1538
pH	8.6	8.6	8.6	8.6	7.6	7.6	7.8	7.9	7.6	7.7	7.7	7.8
Ca^{2+}	315.99	238.08	255.39	212.1	605.21	525.05	404.81	189.58	537.07	609.22	432.86	232.46
Mg^{2+}	115.57	97.18	110.32	76.17	107.01	124.03	107.01	84.39	211.58	119.17	128.9	82.69
Na^+	86.64	81.74	87.86	82.96	87.86	92.76	93.99	84.19	86.64	90.31	90.31	85.41
K^+	45.14	45.14	48.39	44.05	44.05	47.85	45.68	44.59	40.25	44.05	42.97	40.25
CO_3^{2-}	0	0	0	0	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	8.4	8.4

HCO ₃ ⁻	153.75	175.71	197.67	241.6	136.66	153.75	119.58	170.83	119.58	136.66	170.83	204.99
SO ₄ ⁼	1186.87	912.86	991.68	681.02	1802.66	1716.3	1444.02	742.26	2087.77	1936.1	1547.38	870.02
RAS	1.06	1.13	1.16	1.24	0.87	0.95	1.07	1.28	0.8	0.88	0.98	1.23
Cl ⁻	117.02	106.38	102.83	109.93	117.02	99.29	85.1	92.2	106.38	99.29	74.47	74.47
TSD	709.76	580.48	604.8	529.92	1817.6	1638.4	1324.8	888.32	1740.8	1811.2	1350.4	984.32
SE	27.68	21.7	23.64	17.62	41.15	38.58	31.74	17.84	46.48	42.46	34.15	19.51

Tes=Testigo; CE= $\mu\text{S}/\text{cm}$; Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Carbonatos (CO₃²⁻), Bicarbonatos (HCO₃⁻), SO₄⁼, Cl⁻ y TSD en mg/l; RAS=Relación Absorción de Sodio; TSD=Total de Sólidos Disueltos; SE=Salinidad Efectiva (meq/l).

Contenido de minerales en hojas y tallos y fruta

Los resultados de los análisis de minerales de los diferentes órganos de la planta se anotan en los Cuadros 2 y 3. De acuerdo con el ANVA en las hojas y tallos solo se presentaron diferencias significativas para el K, Ca y N (a los 71 ddt), Cu, Na, Ca, N y P (83 ddt) y Zn y K (a los 119 ddt).

La respuesta obtenida en la concentración de minerales en las hojas y tallos es parecida a la reportada por Al-Bahrany y Al-Shabaan (1995), quienes encontraron que al aplicaciones exógenas de ácidos orgánicos (cítrico y oxálico) en suelos calcáreos dieron lugar a un aumento en la absorción de Ca, K, Mg, Fe y Zn, así como a la disminución en la concentración de Mn y ausencia de efecto sobre el Cu. La absorción de P parece responder de la misma manera a lo citado por Hu *et al.* (2005) y Palomo *et al.* (2006) quienes reportaron un aumento en la disponibilidad y absorción de P aplicando ácido cítrico en suelos calcáreos, cambisoles y háplicos.

Cuadro 2. Elementos minerales en tejido foliar de plantas de tomate cultivadas sobre suelo calcáreo donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la

solución fertilizante. Cu, Mn, Zn, y Fe se expresan en ppm. K, Na, Mg, Ca, N y P se expresan en porcentaje.

Muestreo	Trat.	Cu	Mn	Zn	Fe	K	Na	Mg	Ca	N	P
71 ddt	Test	20.00a ^{&}	388.0 a	77.50 b	115.50 ab	1.90 a	0.12 a	1.02 a	1.02 b	0.22 b	0.091 a
	10 ⁻⁶ M	17.75 a	329.0 a	87.75 ab	124.25 ab	1.29 b	0.11 a	1.21 a	1.43 b	2.25 a	0.084 a
	10 ⁻⁴ M	18.25 a	458.8 a	91.75 ab	136.75 a	1.53 ab	0.13 a	0.98 a	2.57 a	2.53 a	0.076 a
	10 ⁻² M	15.50 a	532.0 a	104.75 a	106.50 b	1.34 b	0.13 a	1.09 a	2.38 a	2.21 a	0.079 a
83 ddt	Test	19.50 a	234.25 a	84.50 a	123.75 ab	2.00 a	0.03 c	1.77 a	2.55 ab	2.58 b	0.142 a
	10 ⁻⁶ M	19.75 a	251.00 a	87.00 a	99.00 b	1.84 a	0.04 bc	1.65 a	2.26 b	3.37 a	0.144 a
	10 ⁻⁴ M	19.25 a	239.50 a	108.25 a	133.50 a	1.99 a	0.09 a	1.78 a	2.73 a	3.57 a	0.156 a
	10 ⁻² M	14.25 b	271.50 a	124.25 a	101.00 b	1.67 a	0.06 ab	1.60 a	2.55 ab	3.20 ab	0.101 b
119 ddt	Test	19.50 a	189.25 a	74.00 b	143.25 a	1.72 a	0.07 a	2.26 a	2.49 a	1.89 a	0.091 a
	10 ⁻⁶ M	20.75 a	176.00 a	64.75 b	145.25 a	1.46 ab	0.08 a	2.14 a	2.49 a	2.19 a	0.103 a
	10 ⁻⁴ M	19.25 a	244.50 a	77.25 b	165.25 a	1.48 ab	0.11 a	2.23 a	2.55 a	2.16 a	0.105 a
	10 ⁻² M	18.75 a	228.00 a	117.25 a	143.50 a	1.22 b	0.10 a	2.37 a	2.81 a	1.85 a	0.073 a

Trat.= tratamiento; Test= testigo; [&]= Medias con la misma letra son estadísticamente iguales entre tratamientos (LSD, $\alpha \leq 0.05$).

En los tejidos foliares la concentración de N, Fe y Cu se encontró dentro de los rangos de suficiencia, el P y K por debajo, mientras que el Ca, Mg, Zn y Mn se hallaron elevados de acuerdo a los rangos de suficiencia reportados por Mills y Jones (1996).

En los frutos la concentración de minerales presentó diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) para los elementos Mn, Na, Mg y P (Cuadro 3). Estas diferencias se obtuvieron en los tratamientos 10⁻² M y 10⁻⁴ M de AC. Cabe mencionar que las concentraciones de los diferentes minerales en los frutos se encontraron dentro de los rangos reportados por González *et al.*, (2005) y Hernández *et al.*, (2008).

Cuadro 3. Elementos minerales en fruto de plantas de tomate cultivadas sobre suelo calcáreo donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante. Cu, Mn, Zn, y Fe se expresan en ppm. K, Na, Mg, Ca, N y P se expresan en porcentaje.

Tratamiento	Cu	Mn	Zn	Fe	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	N	P
Testigo	8.00 a ^{&}	4.50 b	27.00 ab	203.25 a	1.38 a	0.01 b	0.25 b	0.11 a	2.66 a	0.118 b
10 ⁻⁶ M AC	9.00 a	7.00 ab	29.75 a	204.50 a	1.14 a	0.02 ab	0.31 ab	0.08 a	2.76 a	0.138 ab
10 ⁻⁴ M AC	7.00 a	6.50 ab	24.25 b	125.25 a	1.61 a	0.05 ab	0.27 ab	0.11 a	2.69 a	0.145 a
10 ⁻² M AC	8.50 a	9.50 a	29.00 ab	68.50 a	1.54 a	0.06 a	0.32 a	0.13 a	2.65 a	0.122 ab

Trat.= tratamiento; Test= Testigo; [&]= Medias con la misma letra son estadísticamente iguales entre tratamientos (LSD, $\alpha \leq 0.05$).

Correlación entre la Concentración de Minerales en la Solución del Suelo y la Concentración en Hojas y Tallos

De acuerdo con el análisis de correlación de Spearman se encontró correlación positiva entre la concentración de Mg²⁺ de la SS y la del tejido foliar (R=0.27). En tanto que el Ca²⁺, K⁺ y Na⁺ de la SS mostraron correlación negativa con las respectivas concentraciones en el tejido foliar (R=-0.10, R=-0.18 y R=-0.32). Sobre ello Gagnon *et al.* (2003) reportaron una correlación positiva entre las concentraciones de Ca²⁺ y el K⁺ del suelo con las concentraciones en el tejido foliar de diversos forrajes, sin embargo los resultados aquí reportados se refieren a la SS, y es posible que la respuesta en este caso no sea directa, sino mediada a través de las interacciones entre las células radicales y la SS, pudiendo ser modificadas por la presencia de AC. Tal vez ello explique los valores tan bajos del coeficiente de correlación. Por otra parte no se presentaron correlaciones estadísticamente significativas entre las concentraciones de elementos en la SS y las de los tejidos de los frutos.

Extracción de minerales

Con base en el contenido mineral del tejido foliar (tallo + hojas) y del fruto, la extracción total de micro y macronutrientes de plantas de tomate cultivadas en suelo calcáreo resultó favorecido con la adición de AC, siendo el tratamiento 10^{-4} M de AC el que presentó los valores más elevados de extracción, principalmente en Mn, K, Na, N y P (Cuadro 4), lo cual puede ser consecuencia de la solubilidad y disponibilidad propiciada por la aplicación exógena de este ácido orgánico (Dakora y Phillips, 2002).

Cuadro 4. Extracción total de micro y macronutrientes (g planta⁻¹) de plantas de tomate cultivadas sobre suelo calcáreo donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante.

Tratamiento	Cu	Mn	Zn	Fe	K	Na	Mg	Ca	N	P
Testigo	0.0008	0.0054	0.0028	0.0087	0.894	0.024	0.707	0.729	1.263	0.058
10^{-6} M AC	0.0007	0.0042	0.0022	0.008	0.592	0.022	0.559	0.59	1.135	0.055
10^{-4} M AC	0.0008	0.0077	0.0031	0.0087	0.913	0.049	0.753	0.813	1.381	0.076
10^{-2} M AC	0.0005	0.0042	0.0027	0.0038	0.513	0.03	0.515	0.556	0.836	0.036

Por otra parte las plantas correspondientes a los tratamientos 10^{-6} y 10^{-2} M de AC mostraron valores más bajos de extracción respecto al testigo, lo anterior pudiera sugerir algún tipo de respuesta dependiente de una concentración óptima de AC, tal como se desprende de los reportes de Hu *et al.*, 2005, Zhu *et al.*, 2005 y Palomo *et al.*, 2006.

Producción de Fruto

La producción de frutos por planta, el número de frutos por planta así como el peso seco del fruto presentaron diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) en respuesta a la adición de AC (Cuadro 5). El tratamiento 10^{-6} M de AC mostró la mayor producción de fruto

por planta pero con el menor peso seco por fruto. Considerando que no se presentaron diferencias en el peso fresco de los frutos es posible que este resultado fuera consecuencia de un desbalance en la relación fuente/sumidero, es decir, a mayor número de frutos por planta la partición de biomasa seca fue menor (Peil y Galvez, 2005).

Cuadro 5. Producción y características de los frutos de plantas de tomate cultivadas en suelo calcáreo donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante.

Variable	Tratamientos			
	Testigo	10 ⁻⁶ M AC	10 ⁻⁴ M AC	10 ⁻² M AC
Producción de fruto (g planta ⁻¹)	559.5 b ^{&}	945.7 a	690.6 ab	556.6 b
Número de frutos por planta	9.5 ab	12.0 a	10.0 ab	7.0 b
Diámetro polar (cm)	56.63 a	57.25 a	62.10 a	60.25 a
Diámetro ecuatorial (cm)	44.13 a	56.25 a	47.96 a	44.38 a
Peso fresco por fruto (g)	58.84 a	78.65 a	70.66 a	71.52 a
Peso seco por fruto (g)	6.71 a	3.77 b	8.53 a	6.47 ab

[&]= Medias con la misma letra son estadísticamente iguales entre tratamientos (LSD, $\alpha \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

La adición de ácido cítrico con la solución fertilizante dio lugar a la disminución del pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción de la solución del suelo.

Del mismo modo la adición de ácido cítrico con la solución fertilizante indujo cambios en la concentración de K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ y Na⁺ de la solución del suelo.

La concentración foliar de K, Ca, N, Na y P y la concentración en el fruto de Mn, Na y Mg se elevaron al aplicar el ácido cítrico con la solución fertilizante.

Se encontró correlación positiva entre la concentración de Mg^{2+} en la solución del suelo y la concentración de Mg^{2+} en el tejido foliar, de igual manera se presentó correlación negativa entre la concentración de Ca^{2+} , K^+ y Na^+ en la solución del suelo y la concentración de Ca^{2+} , K^+ y Na^+ en el tejido del fruto. Se verificó asimismo correlación negativa entre la concentración de K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en la solución del suelo y la concentración de K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en el tejido del fruto.

La producción de fruto en el tomate en suelo calcáreo fue elevada al añadir el ácido cítrico con la solución fertilizante.

LITERATURA CITADA

- Al-Bahrany, A.M. and A.M. Al-Shabaan. 1995. The effect of oxalic and citric acids on the plant absorption of phosphate and other nutrients from fertilizer added to calcareous soil. *Ann. Agric. Sci. Cairo* 40:943-951.
- Anwer, S.; Ashraf, M.Y.; Hussain, M.; Ashraf, M. and Jamil, A. 2012. Citric acid mediated phytoextraction of cadmium by maize (*Zea mays* L.). *Pak. J. Bot.* 44:1831-1836.
- Bilkisu A. A.; Huang, P.; Dong, P.B.; Xiao, Y.M.; Bao, H.J.; Zhu, J.; Heng, G.S. and Yong, H.Y. 2005. Effects of citric acid on soybean seedling growth under aluminum stress. *J. Plant Nutr.* 27:367-375.
- Bosch, M.M.; Costa, J.L.; Cabría F.N. y Aparicio, V.C. 2012. Relación entre la variabilidad espacial de la conductividad eléctrica y el contenido de sodio del suelo. *CI. Suelo (Argentina)* 30:95-105.
- Çalışkan, M. 2000. The metabolism of oxalic acid. *Turk J Zool.* 24:103-106.
- Campbell, B. 2010. Organic matter application can reduce copper toxicity in tomato plants. *J. Natural Resources & Life Sci. Educ.* 39:45-48.
- Dakora, F.D. and Phillips, D.A. 2002. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil* 245:35-47.

- Ferreira, E.R.; Peralta, A.J.; Sadzawka, R.A.; Valenzuela, B.J. and Muñoz, S.C. 1998. Effect of acid application on some chemical characteristics of a calcareous soil. *Agricultura Técnica (Chile)* 58:163-170.
- Fertilab. 2011. Manual de muestreo de Suelo, Planta y Agua. 2ª edición. Celaya, Gto., México. 18 p.
- Gagnon, B.; Bélanger, G.; Nolin, M.C. and Simard, R.R. 2003. Relationships between soil cations and plant characteristics based on spatial variability in a forage field. *Can. J. Plant Sci.* 83:343-350.
- González, R.E.; Benavides, M.A.; Ramírez, R.H.; Robledo, T.V.; Maiti, R.; Reyes, L.A.; Aguilera, C.A.; Fuentes, L.L. y Hernández, V.R. 2005. Crecimiento de jitomate y calidad de frutos con diferentes concentraciones de nitrato. *TERRA Latinoamericana* 23:105-111.
- Haynes, R.J. 1990. Active ion uptake and maintenance of cation-anion balance: A critical examination of their role in regulating rhizosphere pH. *Plant Soil* 126:247-264.
- Hernández, M.I.; Nasarova, L.; Chailloux, M. y Salgado, J.M. 2008. Evaluación agronómica de fertilizantes líquidos cubanos en el cultivo protegido del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) híbrido HA 3019. *Cultivos Tropicales* 29:73-81.
- Hu, H.; Tang, C. and Rengel, Z. 2005. Role of Phenolics and Organic Acids in Phosphorus Mobilisation in Calcareous and Acidic Soils. *J. Plant Nutr.* 28:1427-1439.
- Jones, D.L. and Darrah, P. R. 1994. Role of root derived organic acids in the mobilization of nutrients from the rhizosphere. *Plant and Soil* 166:247-257.
- Jones Jr., J. and Case, V. 1990. Sampling, Handling and Analyzing Plant Tissue Samples. In: *Soil Testing and Plant Analysis*. SSSA Book Series N° 3. 3ra edic. Westerman. Madison. Wi. EUA
- Lehninger, A.L.; Nelson, D.L. y Cox, M.M. 2005. Principios de Bioquímica. 4ta ed. Edit. Omega, S.A. Barcelona, España.

- Liu, Y.; Li, Fang-Ba.; Xia, W.; Xu, Jian-Ming. and Yu, Xiong-Sheng. 2013. Association between ferrous iron accumulation and pentachlorophenol degradation at the paddy soil–water interface in the presence of exogenous low-molecular-weight dissolved organic carbon. *Chemosphere* 91:1547-1555.
- López, B.J.; Nieto, J.M.; Ramírez, R.V. and Herrera, E.L. 2000. Organic acid metabolism in plants: from adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils. *Plant Sci.* 160:1-13.
- Mills, H.A. and Jones, J.B. Jr. 1996. *Plant analysis handbook II: a practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide.* Athens (GA): Micro-Macro Publishing. 365 p.
- Muller, L. 1961. Un aparato micro-Kjeldahl simple para análisis rutinarios de materiales vegetales. *Turrialba* 11:17-25.
- Neumann, G. and Römheld, V. 1999. Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus-deficient plants. *Plant Soil* 211:121-130.
- Neumann, G.; Massonneau, A.; Langlade, N.; Dinkelaker, B.; Hengeler, C.; Römheld, V. and Martinoia, E. 2000. Physiological Aspects of Cluster Root Function and Development in Phosphorus-deficient White Lupin (*Lupinus albus* L.). *Ann. Bot.* 85:909-919.
- Olsen, S.R.; Cole, C.V.; Watanabe, F.S. and Dean, L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Washington, D.C. Circ. 939.
- Palomo, L.; Claassen, N. and Jones, D.L. 2006. Differential mobilization of P in the maize rhizosphere by citric acid and potassium citrate. *Soil Biol. Biochem.* 38:683-692.
- Peñaloza, H.E.; Carvajal, B.N.; Corcuera, J.L. and Martínez, O.J. 2000. Citrate release and activity of phosphoenolpyruvate carboxylase in roots of white lupin in response to varying phosphorus supply. *Agricultura Técnica (Chile)* 60:89-98.

- Peil, R.M. y Galvez, J.L. 2005. Reparto de materia seca como factor determinante de la producción de las hortalizas de fruto cultivadas en invernadero. R. Bras. Agrociência 11:5-11.
- Pezeshki, S.R. and DeLaune, R.D. 2012. Soil Oxidation-Reduction in Wetlands and Its Impact on Plant Functioning. Biology 1:196-221.
- Popova and De Carvalho, P. 1998. Citrate and isocitrate in plant metabolism. Biochim. Biophys. Acta 1364:307-325.
- Rodríguez, Z. and Pire, R. 2004. Extraction of N, P, K, Ca and Mg by cantaloupe plants (*Cucumis melo* L.) packstar hybrid under Tarabana conditions, Lara State. Rev. Fac. Agron. 21:141-154.
- Román, R.; Caballero, R. and Bustos, A. 2002. Variability of soil solution ions in fallowland fields in central Spain. Edafologia 9:161-172.
- Sagoe, C.I.; Ando, T.; Kouno, K. and Nagaoka, T. 1998. Effects of organic-acid treatment of phosphate rock on the phosphorus availability to Italian ryegrass. Soil Sci. Plant Nutr. 43:1067-1072.
- Salceda, S.R. 2008. Peroxisomas: organelos polifacéticos. REB 27:85-92.
- Statistical Analysis System (SAS Institute). 2002. PROC users manual, version 9.0.0. 380. SAS Institute Inc., Cary, NC USA.
- Shlizerman, L.; Marsh, K.; Blumwald, E. and Sadk, A. 2007. Iron-shortage-induced increase in citric acid content and reduction of cytosolic aconitase activity in Citrus fruit vesicles and calli. Physiol. Plant. 131:72-79.
- Strobel, B.W. 2001. Influence of vegetation on low-molecular-weight carboxylic acids in soil solution—a review. Geoderma 99:169-198.
- Steiner A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. Plant Soil. 15:134-154.

- Thibaud, J.B.; Sentenac, A. and Grignon. C. 1994. The role of root apoplast acidification by the H^+ pump in phosphorus mineral nutrition of terrestrial plants. Pag. 309-323. In: J.A. Manthey; D.E. Crowley y D.G. Luster. Biochemistry of metal micronutrients in the rhizosphere. Lewis publishers, Boca Raton.
- Valdivia, Z.B.; Ormachea, M.M. y García M.E. 2009. Estudio de la calidad de los recursos hídricos en la localidad de Apolo, Departamento de La Paz. Rev. Boliviana de Química 26:57-62.
- Wang, Y. and Blatt, R.M. 2011. Anion channel sensitivity to cytosolic organic acids implicates a central role for oxaloacetate in integrating ion flux with metabolism in stomatal guard cells. Biochem. J. 439:161-170.
- Wang, Y.; He, Y.; Zhang, H.; Schroder, J.; Li, C. and Zhou, D. 2008. Phosphate mobilization by citric, tartaric, and oxalic acids in a clay loam utisol. J. Soil Sci. Soc. Amer. 72:1263-1268.
- Watt M. and Evans J.R. 1999. Proteoid roots. Physiology and development. Plant Physiology 121:317-324.
- Zhu, Y.; Yan, F.; Zörb, C. and Schubert, S. 2005. A link between citrate and proton release by proteoid roots of white lupin (*Lupinus albus* L.) grown under phosphorus-deficient conditions? Plant Cell Physiol. 46:892-901.

IV. ARTÍCULO No. 2:

ADICIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO EN LA SOLUCIÓN FERTILIZANTE PARA TOMATE EN UN SUELO CALCÁREO

ADICIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO EN LA SOLUCIÓN FERTILIZANTE PARA TOMATE EN UN SUELO CALCÁREO

**Addition of Citric Acid in Fertilizer Solution to Tomato Cultivated in Calcareous
Soil**

**Fabián Pérez-Labrada¹, Adalberto Benavides-Mendoza*, Mario Ernesto Vázquez-Badillo,
Homero Ramírez**

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura. Calzada Antonio Narro 1923, Saltillo, Coah., México, C.P. 25315. * Autor responsable: abenmen@uaaan.mx

RESUMEN

Los ácidos orgánicos, principalmente el ácido cítrico, pueden mejorar la disponibilidad de nutrimentos para las plantas, de igual manera mejoran la calidad de la planta y del fruto. El objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto de la adición de ácido cítrico (AC), aplicado en la solución fertilizante, sobre el impacto en el crecimiento, producción y calidad de fruta del tomate en un suelo calcáreo. La adición del AC propició modificaciones positivas en la longitud de tallo, el peso fresco y biomasa seca de planta. La producción de fruto aumentó en 69 % con el tratamiento 10^{-6} M de ácido cítrico. El potencial antioxidante, la conductividad eléctrica, la acidez titulable y la vitamina C en el fruto respondieron también favorablemente a la adición de ácido cítrico en la concentración de 10^{-6} y 10^{-4} M.

Palabras clave: *ácidos orgánicos, calidad del fruto, potencial de óxido-reducción, Solanum lycopersicum.*

SUMMARY

Organic acids, especially citric acid, may improve the availability of nutrients for plants, likewise improves the quality of the plant and the fruit. The aim of this study was to determine the effect of the addition of citric acid, applied in the fertilizer solution, on the growth, yield and fruit quality of tomato growth in a calcareous soil. The addition of citric acid (CA) on tomato plants grown in calcareous soil generated positive changes in stem length, fresh weight and plant dry biomass. The fruit production in a plant basis increases 69 % with 10^{-6} M CA application. The antioxidant potential, electrical conductivity, titratable acidity and vitamin C in the fruit responded favorably to the addition of citric acid in concentration of 10^{-6} and 10^{-4} M.

Index words: *organic acids, fruit quality, redox potential, Solanum lycopersicum.*

INTRODUCCIÓN

El ácido cítrico (AC) es uno de los ácidos orgánicos más importantes entre las plantas (Campbell, 2010), su exudación como anión citrato se presenta en respuesta al daño causado por Al o bien frente a la deficiencia de Fe o P (Hu *et al.*, 2005; Shlizerman *et al.*, 2007), siendo proveídos los esqueletos de C necesarios por la PEP-carboxilasa de las raíces (Peñaloza *et al.*, 2000). Por lo mencionado anteriormente se considera conveniente elevar la concentración de ácidos orgánicos presentes tanto en los tejidos vegetales como en la solución del suelo (López-Bucio *et al.*, 2000).

Al respecto Hu *et al.*, (2005) citan un aumento en la disponibilidad y absorción de P aplicando ácido cítrico en suelos calcáreos. De igual manera las aplicaciones exógenas de AC aumentaron la conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, pH y disponibilidad de Ca, Mg, HCO_3 , Cl, K, Fe, Mn, Cu y Zn sobre suelo calcáreo (Ferreya *et al.*, 1998). Por su parte Yong-Hua y Hong-Yan (1998) mencionan un aumento en la altura de plántulas, peso fresco de la plántula y peso seco de la raíz en frijol, como respuesta a aplicaciones de AC. Finalmente Benavides *et al.* (2003) reportaron que la aplicación de este ácido, en solución fertilizante,

disminuyó el pH y elevó la concentración de P en fruto, mejorando el rendimiento así como el número de frutos. El objetivo del presente trabajo fue verificar el efecto de la adición de ácido cítrico en el suelo sobre el crecimiento, producción y calidad de fruta del tomate.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila (25°22' N y 101°00' O, a 1760 msnm). Como material biológico se utilizó tomate (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Grande. El trasplante fue realizado en macetas de polietileno color negro de 17 litros utilizando suelo calcáreo cribado de tipo franco-arcilloso calizo, no salino, de pH=8.7, con muy bajo contenido de materia orgánica y de todos los elementos, excepto el calcio y el zinc. Las macetas fueron colocadas en un invernadero sobre suelo nivelado cubierto con polietileno negro, evitando malezas y el crecimiento de raíces fuera del volumen de la maceta.

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. La unidad experimental correspondió a una maceta con una planta. Los tratamientos consistieron en adicionar a la solución fertilizante Steiner (1961) ácido cítrico (AC) ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$) grado alimenticio en distintas concentraciones: 10^{-2} , 10^{-4} y 10^{-6} M (1.92, 0.0192 y 0.000192 g L⁻¹), el tratamiento testigo correspondió a la solución fertilizante sin AC. Los tratamientos se aplicaron después del trasplante, mediante el sistema de riego, continuándose de manera constante a lo largo del ciclo del cultivo.

Se determinó el diámetro del tallo, el número de hojas, la longitud de la planta y la biomasa (fresca y seca) a los 71, 83 y 119 días después del trasplante (ddt). Mientras que la producción de fruto por planta se calculó mediante la suma del peso total de frutos por planta, obtenida en los tres cortes realizados (119, 121 y 125 ddt). Se contabilizó el número, peso y diámetro de los frutos cosechados.

A los 121 ddt se tomaron cuatro frutos por cada tratamiento, macerándose el mismo día, y determinándose inmediatamente en la pulpa el índice refractométrico (% sólidos solubles), con un refractómetro manual de 0 a 32% Atago modelo ATC1E, la conductividad eléctrica (CE) con un potenciómetro HI 98130 de Hanna Instruments, en tanto que el pH y potencial de óxido-reducción se determinaron con un potenciómetro pH/mV/ISE HI 98185 de Hanna Instruments. De igual manera se determinó la acidez titulable, tomando 10 ml de pulpa, a la cual se añadieron 2 gotas de fenolftaleína al 1%, y se tituló con NaOH (0.1 N).

El contenido de vitamina C en el fruto se determinó por el método de titulación con 2,6-diclorofenolindofenol (Padayatt *et al.*, 2001). Finalmente el contenido de licopeno se determinó mediante la metodología citada por Fish *et al.*, (2002).

Los datos fueron sometidos a un ANVA, así como prueba de medias según la prueba LSD de Fisher con el programa SAS (Statistical Analysis System, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables morfológicas

Las diferentes concentraciones de AC aplicadas indujeron cambios solo en tres de las variables morfológicas de las plantas, el diámetro del tallo, el peso fresco y la biomasa seca (Cuadro 1).

Las aplicaciones de AC indujeron un aumento en el diámetro de tallo, lo cual refleja una mayor acumulación de fotosintatos (Preciado *et al.*, 2002) en respuesta a este ácido orgánico. De igual manera se logró observar que las aplicaciones de AC indujeron cambios en el peso fresco, modificando la proporción de agua en las plantas, ya que esta constituye en mayor medida el peso fresco (Ludlow y Muchow, 1990).

En cuanto al peso seco de las plantas, durante los dos primeros muestreos fue posible ver diferencias entre las aplicaciones de AC de 10^{-6} M, sin embargo en el último muestreo dicha diferencia ya no se observó y se encontró por el contrario un menor peso seco en las plantas con

aplicación de AC 10^{-2} M (Cuadro 1). Las diferencias encontradas se deben a que el peso seco de la planta constituye la parte fibrosa, el contenido nutrimental de la estructura vegetal (Loomis y Connor, 1992), la cual pudo ser modificada por la adición del AC.

Cuadro 1. Variables morfológicas de plantas de tomate cultivadas sobre suelo calcáreo que mostraron respuesta a la adición de ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante.

Variable	Muestreo	Tratamientos			
		Testigo	10^{-6} M AC	10^{-4} M AC	10^{-2} M AC
Diámetro de tallo (cm)	71 ddt	0.65 b	0.81 a	0.65 b	0.63 b
	83 ddt	0.72 a	0.85 a	0.65 b	0.67 ab
	119 ddt	0.83 b	1.05 a	0.90 b	1.13 a
Peso fresco de planta (g)	71 ddt	32.03 b	51.44 a	23.39 b	20.49 b
	83 ddt	62.19 b	105.21 a	54.00 b	39.38 b
	119 ddt	124.75 a	106.87 a	123.20 a	84.85 a
Peso seco de planta (g)	71 ddt	5.37 b	8.40 a	3.62 b	3.52 b
	83 ddt	9.89 b	16.54 a	7.51 b	6.46 b
	119 ddt	21.14 a	19.13 a	21.81 a	12.13 b

[§]= Medias con la misma letra son estadísticamente iguales entre tratamientos (LSD, $\alpha \leq 0.05$).

Producción de Fruto

El número de frutos por planta así como el peso seco del fruto presentaron diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) en respuesta a la adición de AC. De acuerdo a la prueba de medias (LSD, $\alpha \leq 0.05$) la concentración 10^{-6} M de AC indujo mayor producción de fruto por planta, pero con menor peso seco, debido posiblemente a un desbalance en la relación

fuente/sumidero, la cual pudo manifestarse con una menor acumulación de biomasa en los frutos (Peil y Galvez, 2005).

Cuadro 2. Producción de frutos (g/planta) y características de los frutos de tomate cultivadas en suelo calcáreo en donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante.

Variable	Tratamientos			
	Testigo	10 ⁻⁶ M AC	10 ⁻⁴ M AC	10 ⁻² M AC
Producción de fruto (g/planta)	559.5 b [§]	945.7 a	690.6 ab	556.6 b
Peso Seco Fruto (g)	6.71 a	3.77 b	8.53 a	6.47 ab

[§]= Medias con la misma letra son estadísticamente iguales entre tratamientos (LSD, $\alpha \leq 0.05$).

La producción de fruto obtenida en este trabajo se encuentra dentro del rango de valores reportados por Benavides-Mendoza *et al.*, (2007) quienes aplicaron otro ácido orgánico, el ácido benzoico, en tomate cultivado bajo suelo calcáreo. En lo que respecta al peso seco del fruto las diferencias encontradas pudieran explicarse a que el AC indujo una mayor cantidad de fotoasimilados producidos por la planta, los cuales son almacenados por los frutos (Peil y Galvez, 2005).

Calidad del fruto

Las variables que presentaron diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) en respuesta a la adición de AC al suelo calcáreo se muestran en el Cuadro 3. Los tratamientos 10⁻⁶ y 10⁻⁴ M de AC elevaron la CE del fruto respecto al testigo, lo cual pudo deberse a un aumento en la disponibilidad o transporte de nutrientes minerales lo cual está en función a que el ácido cítrico tiene un papel importante en el intercambio de iones en la raíz (Lobit *et al.*, 2003) así como en el transporte interno de los mismos (Durrett *et al.*, 2007).

Cuadro 3. Calidad de frutos de plantas de tomate cultivadas sobre suelo calcáreo en donde se adicionó ácido cítrico en diferentes concentraciones en la solución fertilizante. La CE se expresa como $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y el potencial de óxido-reducción como mV.

Variable	Tratamientos			
	Testigo	10^{-6} M AC	10^{-4} M AC	10^{-2} M AC
Potencial de óxido-reducción (mV)	135.3 a [§]	124.3 ab	127.0 ab	115.0 b
Conductividad eléctrica	3360.0 b	3861.7 a	3872.0 a	3643.0 ab
Acidez titulable (% ácido cítrico)	0.397 b	0.580 a	0.530 ab	0.443 ab
Vitamina C (mg/100 g peso fresco)	11.66 b	15.62 a	16.06 a	14.08 ab

[§]= Medias con la misma letra son estadísticamente iguales entre tratamientos (LSD, $\alpha \leq 0.05$).

La adición de AC redujo los valores de potencial de óxido-reducción, valores bajos de esta variable indican calidad adecuada en el fruto, ya que implica un mayor potencial antioxidante (Benavides *et al.*, 1999). La acidez titulable (expresado como % de ácido cítrico) aumentó con las aplicaciones de AC, este resultado posiblemente derive de una mejora en el balance de cationes/aniones en el citoplasma, generando menor gasto metabólico del fruto y mayor acumulación de ácido cítrico en el mismo (Lobit *et al.*, 2003), como respuesta a la aplicación exógena de este ácido. Del mismo modo, se encontró mayor concentración de vitamina C en los tratamientos con AC, es posible que esta respuesta sea dependiente de una mayor disponibilidad de fotosintatos en la planta (Arrigoni y De Tullio, 2002).

CONCLUSIONES

Las variables agronómicas longitud de tallo, peso fresco y biomasa seca de planta fueron modificadas favorablemente con las aplicaciones de ácido cítrico 10^{-6} M.

El tratamiento 10^{-6} M de ácido cítrico dio lugar a un aumento del 69 % de la producción de fruto por planta en comparación con el testigo.

La calidad del fruto de tomate, en términos del potencial de óxido-reducción, la conductividad eléctrica, la acidez titulable y el contenido de vitamina C fueron modificados positivamente en respuesta a la adición de ácido cítrico en concentraciones de 10^{-6} y 10^{-4} M.

LITERATURA CITADA

- Arrigoni, O. and M.C De Tullio. 2002. Ascorbic acid: much more than just an antioxidant. *Biochim Biophys Acta*. 1569(1-3):1-9.
- Benavides, A., R. Foroughbakhch y M.J. Verde. 1999. Alta correlación de la productividad con los sólidos solubles y redox de peciolos en espinacas. *Ciencia UANL* 2(4):373-378.
- Benavides-Mendoza, A., D. Burgos-Limón, H. Ortega-Ortiz y H. Ramírez, 2007. El ácido benzoico y el poliácido acrílico-quitosán en la calidad y el rendimiento del tomate cultivado en suelo calcáreo. *Terra Latinoamericana* 25(3): 261-268.
- Benavides-Mendoza, A., C. García-Pacheco, L.O. Fuentes-Lara, A.F. Aguilera-Carbó, H. Ramírez, J. Hernández-Dávila y V. Robledo-Torres. 2003. Efecto del ácido cítrico aplicado en soluciones fertilizantes de diferente conductividad eléctrica en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Agrofaz* 3(2): 321-329.
- Campbell, B. 2010. Organic Matter Application Can Reduce Copper Toxicity in Tomato Plants. *J. Nat. Resour. Life Sci. Educ.* 39: 45-48. (DOI:10.4195/jnrlse.2010.0002se).
- Durrett T.P., W. Gassmann and E.E. Rogers. 2007. The FRD3-mediated efflux of citrate into the root vasculature is necessary for efficient iron translocation. *Plant Physiol* 144:197–205
- Ferreira, E.R.; J.A. Peralta.; A.R. Sadzawka, J.B. Valenzuela y C.S. Muñoz. 1998. Efecto de la aplicación de ácido sobre características químicas de un suelo calcáreo. *Agricultura Técnica (Chile)* 58(2): 163-170.
- Fish, W.W., P. Perkins-Veazie and J.K. Collins. 2002. A quantitative assay for lycopene that utilizes reduced volumes of organic solvents. *J. Food Composites Annals* 15(3): 309-317.
- Hu, H.; C. Tang and Z. Rengel. 2005. Role of Phenolics and Organic Acids in Phosphorus Mobilisation in Calcareous and Acidic Soils. *J. Plant Nutr.* 28(8): 1427-1439. (DOI: 10.1081/PLN-200067506).
- Lobit, P., M. Genard, B.H. Wu, P. Soing and R. Habib. 2003. Modelling citrate metabolism in fruits: responses to growth and temperature. *J. Experimental Botany* 54(392): 2489-2501. (DOI: 10.1093/jxb/erg264).

- Loomis, R.S. and D.J. Connor. 1992. *Crop Ecology: Productivity and Management of Agricultural Systems*. Cambridge University Press, UK. 538 pp.
- López-Bucio, J., M.F. Nieto-Jacobo, V. Ramírez-Rodríguez and L. Herrera-Estrella. 2000. Organic acid metabolism in plants: from adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils. *Plant Sci.* 160: 1-13
- Ludlow, M.M. and Muchow, R.C., 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Adv. Agron.* 43:107-153.
- Padayatt, S.J., R. Daruwala, Y. Wang, P.K. Eck, J. Song, W.S. Koh and M. Levine. 2001. Vitamin C: from molecular actions to optimum intake. *In: Handbook of Antioxidants*. Cadenas, E.; Packer, L. (eds) 2nd edition. CRC Press. Washington DC, EE.UU. pp. 117-145.
- Peil, M.R. and J.L. Galvez. 2005. Reparto de materia seca como factor determinante de la producción de las hortalizas de fruto cultivadas en invernadero. *R. Bras. Agrociência* 11(1): 05-11.
- Peñaloza, H.E., N.B. Carvajal, L.J. Corcuera y J.O. Martínez. 2000. Exudación de citrato y actividad de la enzima fosfoenolpiruvato carboxilasa en raíces de Lupino blanco en respuesta a variaciones en la disponibilidad de fósforo. *Agricultura Técnica (Chile)* 60(2): 89-98.
- Preciado, R.P., G.A.B. Castillo, J.L.T. Torres, J.K. Shibata, L.T. Chávez, A.M. Garza. 2002. Nitrógeno y potasio en la producción de plántulas de melón. *Terra* 20(3): 267-276.
- SAS. 2002. SAS versión 9.0.0. 380. SAS Institute Inc., Cary, NC USA.
- Shlizerman, L., K. Marsh, E. Blumwald and A. Sadk. 2007. Iron-shortage-induced increase in citric acid content and reduction of cytosolic aconitase activity in Citrus fruit vesicles and calli. *Physiol. Plant.* 131(1): 72-79.(DOI: 10.1111/j.1399-3054.2007.00935.x).
- Steiner, A.A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil.* 15:134-154.
- Yong-Hua, Y. and Z. Hong-Yan. 1998. Effect of citric acid on aluminum toxicity in the growth of mungbean seedlings. *J. Plant Nutr.* 21(5): 1037-1044 (DOI: 10.1080/01904169809365462).

V. CONCLUSIONES

La adición de ácido cítrico sobre suelo calcáreo propicio disminución del pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción de la solución del suelo, así como cambios en la concentración de nutrimentos minerales de la solución del suelo.

Las concentraciones foliares de minerales y en el fruto se elevaron al aplicar el ácido cítrico con la solución fertilizante.

Se presentó correlación positiva entre la concentración de nutrimentos minerales presentes en la solución del suelo y las concentraciones del tejido foliar, mientras que la correlación entre la concentración de minerales en solución del suelo y el fruto de tomate fue negativa.

La producción y calidad del fruto de tomate en suelo calcáreo fueron modificados favorablemente al añadir el ácido cítrico con la solución fertilizante, de igual manera indujo cambios en las variables agronómicas longitud de tallo, peso fresco y biomasa seca de planta.

VI. LITERATURA CITADA

- Al-Bahrany, A.M. and A.M. Al-Shabaan. 1995. **The effect of oxalic and citric acids on the plant absorption of phosphate and other nutrients from fertilizer added to calcareous soil.** Ann. Agric. Sci. Cairo. 40(1): 943-951.
- Benavides, M.A.; García, P.C.; Fuentes, L.L; Aguilera, C.A.; Homero, R.; Hernández, Dávila.J.; Robledo, T.V 2003. **Effect of Citric Acid Applied in Fertilizer Solution with Different Electrical Conductivity Over Tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill).** Agrofaz 3(2): 321-329.
- Bilkisu A. A.; Huang, P.; Dong, P.B.; Xiao, Y.M.; Bao, H.J.; Zhu, J.; Heng, G.S.; Yong, H.Y. 2005. **Effects of Citric Acid on Soybean Seedling Growth Under Aluminum Stress.** J. Plant Nutr. 27(2): 367-375.
- Çalışkan, M. 2000. **The Metabolism of Oxalic Acid.** Turk J Zool. 24(1): 103-106.
- Campbell, B. 2010. **Organic Matter Application Can Reduce Copper Toxicity in Tomato Plants.** J. of Natural Resources & Life Sci. Educ. 39: 45-48.
- Crane, J.; Schaffer, B.; Li, Y.; Evans, E.; Montas, W.; Li, C. 2007. **Effect of foliarly-applied acids and ferrous sulfate on iron nutrition of avocado trees.** Proceedings VI World Avocado Congress. Viña Del Mar, Chile. 12-16 Nov.
- Dakora, F.D. and Phillips, D.A. 2002. **Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments.** *Plant and Soil* 245: 35-47.
- Ferreyra, E.R.; Peralta, A.J.; Sadzawka, R.A.; Valenzuela, B.J.; Muñoz, S.C. 1998. **Effect of acid application on some chemical characteristics of a calcareous soil.** Agricultura Técnica (Chile) 58(2): 163-170.

- Hu, H.; Tang, C.; Rengel, Z. 2005. **Role of Phenolics and Organic Acids in Phosphorus Mobilisation in Calcareous and Acidic Soils.** *J. Plant Nutr.* 28(8): 1427-1439.
- Jones, D.L. and Darrah, P. R. 1994. **Role of root derived organic acids in the mobilization of nutrients from the rhizosphere.** *Plant and Soil* 166: 247-257.
- Jones, D.L. 1998. **Organic acids in the rhizosphere – a critical review.** *Plant and Soil* 205(1): 25-44.
- Lehninger, A.L.; Nelson, D.L.; Cox, M. M. 2005. **Principios de Bioquímica.** 4ta ed. Edit. Omega, S.A. Barcelona, España.
- López, B.J.; Nieto, J.M.; Ramírez, R.V.; Herrera, E.L. 2000. **Organic acid metabolism in plants: from adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils.** *Plant Sci.* 160: 1-13.
- Luo, C.; Shen, Z.; Li, X. 2005. **Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS.** Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University. Nanjing, China.
- Lüttge, U. 1998. **Day-night changes of citric acid levels in crassulacean acid metabolism: Phenomenon and ecophysiological significance.** *Plant Cell Environ.* 11(6): 445- 451.
- Massonneau, A.; Langlade, N.; León, S.; Smutny, J.; Vogt, E.; Neumann, G.; Martinoia, E. 2001. **Metabolic changes associated with cluster root development**

in with lupin (*Lupinus albus* L.): relationship between organic acid excretion, sucrose metabolism and energy status. *Planta* 213: 534-542.

Mimmo, T.; Terzano, R.; Medici, L.; Lettino, A.; Fiore, S.; Tomasi, N.; Pinton, R.; Cesco, S. 2012. **Interaction of root exudates with the mineral soil constituents and their effect on mineral weathering.** *Geophysical Research Abstracts* 14(1): 11494.

Moradi, N.; Rasouli Sadaghiani, M.H.; Sepehr, E.; Abdolahi Mandoulakani, B. 2012. **Effects of low-molecular-weight organic acids on phosphorus sorption characteristics in some calcareous soils.** *Turk. J. Agric. For.* 36(1): 459-468.

Navarro, G.M. 2010. **Nutrición y fertirrigación del tomate en suelos calcáreos.** *Memorias 6to. Simposio Nacional de Horticultura: Producción de Tomate en el Norte de México. Del 8 al 10 de Septiembre. Saltillo, Coahuila.* 85-99 p.

Oburger, E.; Leitner, D.; Jones, D.L.; Zygalkis, K.C.; Schnepf, A.; Roose, T. 2011. **Adsorption and desorption dynamics of citric acid anions in soil.** *European J. of Soil Science* 62(1): 733-742.

Palomo, L.; Claassen, N.; Jones, D.L. 2006. **Differential mobilization of P in the maize rhizosphere by citric acid and potassium citrate.** *Soil Biol. Biochem.* 38: 683-692.

Peñaloza, H.E.; Carvajal, B.N.; Corcuera, J.L.; Martínez, O.J. 2000. **Citrate release and activity of phosphoenolpyruvate carboxylase in roots of white lupin in response to varying phosphorus supply.** *Agricultura Técnica (Chile)* 60(2): 89-98.

- Popova y De Carvalho, P. 1998. **Citrate and isocitrate in plant metabolism**. *Biochim. Biophys. Acta* 1364(3): 307-325.
- Rivera, O.P.; Etchevers, B.J.; Hidalgo, M.C.; Castro, M.B.; De la Garza, R. F.; Rodríguez, A.J.; Martínez, G.A. 2008. **Acid-Iron Fertigation of Citrus Established in Calcareous Soils**. *TERRA Latinoamericana* 26(2): 119-125.
- Román, M.L. and Gutiérrez, C.A. 1998. **Evaluation of Carboxylic Acids and Calcium Nitrate to Increase Quality, Yield, and Shelf Life of Three Types of Muskmelon**. *TERRA Latinoamericana* 16(1): 49-54.
- Ryan, P.R.; Delhaize, E.; Jones, D.L. 2001. **Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots**. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 52(1): 527-560.
- Salceda, S.R. 2008. **Peroxisomas: organelos polifacéticos**. *REB* 27(3): 85-92.
- Shlizermana, L.; Marshb, K.; Blumwaldc, E.; Sadka, A. 2007. **Iron-shortage-induced increase in citric acid content and reduction of cytosolic aconitase activity in Citrus fruit vesicles and calli**. *Physiol. Plant.* 131(1): 72-79.
- Silva, I.R.; Smyth, T.J.; Israel, D.W.; Raper, C.D.; Rufty, T.W. 2001. **Magnesium Ameliorates Aluminium Rhizotoxicity in Soybean by Increasing Citric Acid Production and Exudation by Roots**. *Plant Cell Physiol.* 42(5): 546-554.
- Wang, Y. and Blatt, R.M. 2011. **Anion channel sensitivity to cytosolic organic acids implicates a central role for oxaloacetate in integrating ion flux with metabolism in stomatal guard cells**. *Biochem. J.* 439(1): 161-170.

- Wang, Y.; He, Y.; Zhang, H.; Schroder, J.; Li, C.; Zhou, D. 2008. **Phosphate Mobilization by Citric, Tartaric, and Oxalic Acids in a Clay Loam Ustisol.** J. Soil Sci. Soc. Amer. 72(5): 1263-1268.
- Watt, M. and Evans, R.J. 1999. **Linking Development and Determinacy with Organic Acid Efflux from Proteoid Roots of White Lupin Grown with Low Phosphorus and Ambient or Elevated Atmospheric CO₂ Concentration.** Plant Physiol. 120: 705-716.
- Wasaki, J.; Kojima, S.; Maruyama, H.; Haase, S.; Osaki, M.; Kandeler, E. 2008. **Localization of acid phosphatase activities in the roots of white lupin plants grown under phosphorus-deficient conditions.** Soil Sci. Plant Nutr. 54(1): 95-102.