



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

**Centro Interdisciplinario de Investigación para el  
Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca**

**TESIS**

**“Efecto del ácido glutámico en plantas de tomate  
(*Solanum lycopersicum* L.)”**

Que para obtener el grado académico de:

**Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de  
Recursos Naturales**

Presenta:

**Ing. Miguel Ángel Ramírez Cruz**

Directora de Tesis

**Dra. Martha Angélica Bautista Cruz**

Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, enero de 2021



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-13  
REP 2017

### ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ciudad de México, a  de  del

El Colegio de Profesores de Posgrado de  en su Sesión

(Unidad Académica)

No.  celebrada el día  del mes  de  conoció la solicitud presentada por el (la) alumno (a):

<b>Apellido Paterno:</b>	Ramírez	<b>Apellido Materno:</b>	Cruz	<b>Nombre (s):</b>	Miguel Ángel
--------------------------	---------	--------------------------	------	--------------------	--------------

Número de registro:

del Programa Académico de Posgrado:

Referente al registro de su tema de tesis, acordando lo siguiente:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

Objetivo general del trabajo de tesis:

2.- Se designa como Directores de Tesis a los profesores:

Director:  2° Director:

No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora correspondiente.

Director(a) de Tesis  
  
Dra. Martha Angélica Bautista Cruz  
  
Aspirante  
  
Ramírez Cruz Miguel Angel

2° Director de Tesis (en su caso)  
  
Presidente del Colegio  
Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez





# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14  
REP 2017

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Santa Cruz Xoxocotlán, Oax., siendo las 10:00 horas del día 22 del mes de enero del 2021 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR UNIDAD OAXACA) para examinar la tesis titulada:

**Efecto del ácido glutámico en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)**

del (la) alumno (a):

<b>Apellido Paterno:</b>	<b>Ramírez</b>	<b>Apellido Materno:</b>	<b>Cruz</b>	<b>Nombre (s):</b>	<b>Miguel Ángel</b>
--------------------------	----------------	--------------------------	-------------	--------------------	---------------------

Número de registro: B 1 8 0 0 5 0

Aspirante del Programa Académico de Posgrado: **Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales**

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene **18%** de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo **SI**  **NO**  **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

### **JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:**

La similitud detectada por el software Turnitin se debe principalmente a fraseología de uso común.

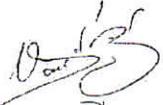
**\*\*Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente, y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR**  **SUSPENDER**  **NO APROBAR**  la tesis por **UNANIMIDAD**  o **MAYORÍA**  en virtud de los motivos siguientes:

El documento reúne las características de una tesis de Maestría en Ciencias y cuenta con el rigor científico de la misma.

### **COMISIÓN REVISORA DE TESIS**

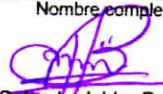
  
Dra. Martha Angélica Bautista Cruz  
Director de Tesis  
Nombre completo y firma

  
Dr. Gabino Alberto Martínez Gutiérrez  
Nombre completo y firma

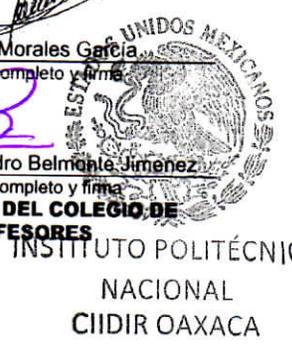
  
Dr. David Martínez Sánchez  
Nombre completo y firma

  
Dr. Teodulfo Aquino Bolaños  
Nombre completo y firma

  
Dr. Isidro Morales García  
Nombre completo y firma

  
Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez  
Nombre completo y firma

**PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES**





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de Oaxaca el día 22 del mes de enero el año 2021, el (la) que suscribe Miguel Ángel Ramírez Cruz alumno(a) del Programa de Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales con número de registro B180050, adscrito a Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la Dra. Martha Angélica Bautista Cruz y cede los derechos del trabajo titulado: **“Efecto del ácido glutámico en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)”** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección [mramirez100@gmail.com](mailto:mramirez100@gmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Miguel Ángel Ramírez Cruz

Nombre y firma

## ***Dedicatoria***

*A mis padres, por su amor, paciencia, comprensión y apoyo incondicional en  
cada etapa de mi vida.*

*A mi esposa e hijas por ser mi fuerza y motivación*

## **Agradecimientos**

*Al IPN-CIIDIR Unidad Oaxaca por brindarme las herramientas necesarias para culminar los estudios de maestría y dejar huella en mi formación académica y profesional.*

*Al CONACYT por el apoyo económico que permitió cumplir con éxito el plan de estudios en ésta institución.*

*A la Dra. Martha Angélica Bautista Cruz por compartir su experiencia profesional, brindar apoyo y seguimiento en cada etapa del proyecto de investigación y redacción del manuscrito de tesis.*

*Al Dr. Gabino Alberto Martínez Gutiérrez, Dr. Isidro Morales García, Dr. David Martínez Sánchez y Dr. Teodulfo Aquino Bolaños por sus comentarios y valiosas aportaciones a la versión final de este documento.*

*A la M. en C. Verónica del Carmen Martínez Gallegos por su valioso apoyo en la comprensión de procedimientos de laboratorio y preparación de reactivos.*

## INDICE GENERAL

	Página
ÍNDICE DE CUADROS .....	3
ÍNDICE DE FIGURAS .....	4
RESUMEN .....	6
ABSTRACT .....	7
I. INTRODUCCIÓN .....	8
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS .....	11
2.1 Objetivo general .....	11
2.1.1 Objetivos específicos .....	11
2.2 Hipótesis .....	12
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	13
3.1 Importancia del cultivo de tomate .....	13
3.2 Hidroponía .....	14
3.3 Metabolismo del nitrógeno .....	15
3.3.1 Formas químicas de absorción de nitrógeno .....	16
3.3.2 Asimilación y absorción de nitrógeno.....	17
3.3.2.1 Absorción .....	17
3.3.2.2 Reducción de nitrato a amonio.....	18
3.3.2.3 Asimilación del amonio.....	19
3.4 Glutamina sintetasa .....	21
3.5 Aminoácidos .....	22
3.5.1 Ácido glutámico.....	23
3.6 Valores SPAD y contenido de clorofila en hojas .....	24
3.7 Calidad física y química del fruto.....	24
IV. ANTECEDENTES .....	26
V. MATERIALES Y MÉTODOS .....	28
5.1 Ubicación .....	28
5.2 Material vegetal.....	28
5.3 Tratamientos y diseño experimental .....	28
5.4 Manejo agronómico.....	29
5.5 Variables respuesta .....	31
5.5.1 Variables de crecimiento y fisiológicas.....	31
5.5.2 Variables de calidad física y química de fruto y rendimiento.....	32
5.6 Análisis estadístico.....	34
VI. RESULTADOS .....	35
6.1 Variables de crecimiento y fisiológicas.....	35
6.2 Variables de calidad física y química del fruto y rendimiento.....	38
VII. DISCUSIÓN .....	43
VIII. CONCLUSIONES.....	48
IX. LITERATURA CITADA .....	49

## INDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Macroelementos de la solución nutritiva Steiner (1984) para el desarrollo de las plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) .....	30

## INDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. Asimilación del amonio por el ciclo GS-GOGAT. GS: glutamina sintetasa; GOGAT: glutamato sintasa (Azcón y Talon, 2008) .....	21
Figura 2. Plántulas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) en bolsas de cultivo con agrolita y vermiculita.....	30
Figura 3. Panorama del experimento y cosecha de frutos .....	33
Figura 4. Deshidratación parcial del fruto previa al procedimiento de secado en estufa para obtención de porcentaje de materia seca .....	34
Figura 5. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en altura de plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) cultivadas en condiciones protegidas. A) 97 días después del trasplante; B) 111 días después del trasplante; C) 125 días después del trasplante. ....	35
Figura 6. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en el área foliar de plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) de 167 días después del trasplante cultivadas en condiciones protegidas. ....	36
Figura 7. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en el contenido relativo de clorofila foliar en plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) de 125 días después del trasplante cultivadas en condiciones protegidas.....	36
Figura 8. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en el contenido relativo de clorofila y actividad de glutamina sintetasa en hojas de plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) de 167 días después del trasplante cultivadas en condiciones protegidas .....	37
Figura 9. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en el diámetro polar del fruto, contenido de sólidos solubles totales y pH del fruto de plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) de 97 días después del trasplante cultivadas en condiciones protegidas .....	38
Figura 10. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en el pH del fruto de plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) de 111 días después del trasplante cultivadas en condiciones protegidas .....	39
Figura 11. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en el pH, rendimiento, peso fresco del fruto y materia seca del fruto en plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) de 125 días después del trasplante cultivadas en condiciones protegidas. ....	40

Figura 12. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en el pH y peso fresco del fruto de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de 139 días después del trasplante cultivadas en condiciones protegidas..... 41

Figura 13. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en el diámetro ecuatorial del fruto, rendimiento, peso fresco del fruto, materia seca del fruto y pH del fruto de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de 167 días después del trasplante cultivadas en condiciones protegidas..... 42

## RESUMEN

En este estudio se evaluó el efecto del ácido glutámico aplicado vía foliar en algunas variables de crecimiento y fisiológicas de la planta y en la calidad física y química del fruto, además del rendimiento de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en condiciones protegidas. Los tratamientos fueron 1.5, 6.0 y 12.0 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico y el control con 0.0 y se condujeron bajo un diseño completamente al azar con 4 repeticiones y 4 plantas por repetición. Las variables respuesta fueron altura de la planta (AP) en cm, área foliar (AF) en cm<sup>2</sup>, contenido relativo de clorofila foliar (CRCF) en valores SPAD (Soil Plant Analysis Development) y la actividad de glutamina sintetasa (GS) en μM de γ-GHM·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>. Para la calidad del fruto: peso fresco (PFF) en g, diámetro polar (DPF) y ecuatorial (DEF) en cm, materia seca (MSF) en %, contenido de sólidos solubles totales (SST) en °Brix, pH (PHF) y; rendimiento (R) en Kg m<sup>-2</sup>. El CRCF en plantas de tomate con 167 días después del trasplante incrementó 8.9 y 6.0% con 6.0 y 12.0 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico, respectivamente. La concentración de 6.0 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico también incrementó 27.4% el R, 4.1% el DEF, 10.3% el PFF y 16.9% la MSF. El PHF aumentó 5.3% con 1.5 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico. Con la aplicación exógena de ácido glutámico se obtuvieron incrementos en CRCF, R y algunos atributos de la calidad física y química del fruto de tomate.

**Palabras clave:** aminoácido exógeno, rendimiento, tomate

## ABSTRACT

In this study, the effect of glutamic acid applied to foliage was evaluated on some growth and physiological variables of the plant, and on physical and chemical fruit quality, in addition to tomato yield (*Solanum lycopersicum* L.) cultivated under protected conditions. The treatments were 1.5, 6.0 and 12.0 g L<sup>-1</sup> of glutamic acid and the control with 0.0 and were conducted under a completely randomized design with four replications and four plants per replicate. The response variables were plant height (PH) in cm, leaf area (LA) in cm<sup>2</sup>, leaf relative chlorophyll content (LRCC) in SPAD values (Soil Plant Analysis Development) and glutamine synthetase activity (GS) in  $\mu\text{mol } \gamma\text{-glutamylhydroxamate g}^{-1} \text{ fresh weight h}^{-1}$ . For fruit quality: fresh weight (FFW) in g, polar (FPD) and equatorial (FED) diameter in cm, dry matter (FDM) in %, content of total soluble solids (TSS) in °Brix, pH (FpH) and yield (Y) in Kg m<sup>-2</sup>. The LRCC value in tomato plants with 167 days after transplant increased 8.9 and 6.0% after application of 6.0 and 12.0 g L<sup>-1</sup> of glutamic acid, respectively. The concentration of 6.0 g L<sup>-1</sup> of glutamic acid also increased Y by 27.4%, the FED by 4.1%, FFW by 10.3% and FDM by 16.9%. FpH increased 5.3% with 1.5 g L<sup>-1</sup> of glutamic acid. Exogenous application of glutamic acid increased in LRCC, Y, and some physical and chemical quality attributes of tomato fruits.

**Keywords:** exogenous amino acid, yield, tomato

## I. INTRODUCCIÓN

Los aminoácidos son compuestos orgánicos que forman parte de la estructura de las proteínas, éstos llevan a cabo funciones metabólicas y de transporte en las plantas (Liu *et al.*, 2008). Favorecen los procesos de respiración, fotosíntesis, mejoran el crecimiento de las plantas y su rendimiento (Davies, 2010; Mohammadipour y Souri, 2019a; Souri y Sooraki, 2019). Los aminoácidos también participan en la síntesis de otros compuestos orgánicos como proteínas, aminos, alcaloides, vitaminas, enzimas y terpenoides (Ibrahim *et al.*, 2010). La aplicación directa de aminoácidos y sus productos podría regular la absorción y asimilación de N por la planta (Calvo *et al.*, 2014; Souri, 2016).

Arjona *et al.* (2004) indicaron que aminoácidos, como el ácido glutámico, pueden ser absorbidos por las plantas vía radicular ó foliar e incorporarse de esta manera al metabolismo vegetal. El ácido glutámico aplicado vía foliar otorga beneficios a las plantas a pesar de no ser considerado como un nutriente, ya que participa en procesos metabólicos importantes como la asimilación de amonio y procesos de transaminación (Taiz y Zeiger, 2006). La glicina y el ácido glutámico son los principales substratos para la formación de tejido y síntesis de clorofila (Fischer *et al.*, 1998; Kan *et al.*, 2017), incrementando de esta manera la cantidad de azúcares formados durante la fotosíntesis (Takeuchi *et al.*, 2008). El ácido glutámico también contribuye a la polinización, ya que estimula la germinación del grano de polen y activa el crecimiento del tubo polínico (Cao, Peng *et al.*, 2010).

Actualmente, la aplicación exógena de bioestimulantes como los aminoácidos (Mohammadipour y Souri, 2019b; Souri y Hatamian, 2019) u otros compuestos orgánicos (Souri y Bakhtiarizade, 2019) han mostrado un efecto positivo para promover el crecimiento, facilitar la asimilación, translocación y uso de nutrientes y por ende, estimular el rendimiento (Rouphael *et al.*, 2018).

La calidad del fruto de tomate se evalúa por su apariencia, textura, color, valor nutricional, composición en madurez de consumo, sabor y aroma y sanidad (Kader, 2002). El sabor se determina por la cantidad de sólidos solubles y ácidos orgánicos. Los altos contenidos de azúcares (sólidos solubles) y la acidez titulable se consideran parámetros de buen sabor y aroma (Kader, 2008).

Los atributos de calidad de fruto que generalmente son afectados por variaciones genotípicas comprenden color, contenido de sólidos solubles totales, pH, índices de acidez, y firmeza, sin embargo, son críticos para la calidad, por lo que deben considerarse condiciones de crecimiento, irradiancia, temperatura, estación de cultivo, riego, nutrición, enfermedades y condiciones postcosecha (Brandt *et al.*, 2006; Turhan y Seniz, 2009). El incremento en la calidad química de fruto asociada a la aplicación exógena de aminoácidos se ha indicado previamente en manzana (*Malus domestica* Borkh) (Arabloo *et al.*, 2017; Ilie *et al.*, 2017) y pera (*Pyrus communis* L.) (Fayek *et al.*, 2011; Koksall *et al.*, 1999).

Boras *et al.* (2011) indicaron que el tratamiento de plantas de tomate con aminoácidos aumentó significativamente el crecimiento y la producción en comparación con el control. En general, la información sobre el efecto de la aplicación individual de aminoácidos en el crecimiento y fisiología vegetal, es

relativamente escasa, debido a que la mayoría de las investigaciones se han llevado a cabo aplicando una combinación de aminoácidos (Khan *et al.*, 2019).

## II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto del ácido glutámico aplicado vía foliar en algunas variables de crecimiento y fisiológicas de la planta, calidad física y química del fruto, así como rendimiento en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en condiciones protegidas.

#### 2.1.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar el efecto de la aplicación foliar de tres concentraciones de ácido glutámico en altura de plantas y algunos parámetros de la hoja como área, contenido relativo de clorofila y actividad de glutamina sintetasa.
- Evaluar el efecto de la aplicación foliar de tres concentraciones de ácido glutámico en el rendimiento y algunos parámetros de la calidad física y química del fruto como peso fresco, diámetro polar y ecuatorial, materia seca, contenido de sólidos solubles totales y pH.

## 2.2 HIPÓTESIS

**Ho:** Se promoverá una respuesta positiva en algunas variables de crecimiento y fisiológicas, así como el rendimiento y calidad del fruto de tomate, cultivado en condiciones protegidas con al menos una concentración de ácido glutámico aplicado vía foliar.

**Ha:** No se promoverá una respuesta positiva en algunas variables de crecimiento y fisiológicas, así como el rendimiento y calidad del fruto de tomate, cultivado en condiciones protegidas con al menos una concentración de ácido glutámico aplicado vía foliar.

### III. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1 Importancia del cultivo de tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es considerado como una de las hortalizas con mayor producción a nivel mundial, ya sea a campo abierto o bajo esquema de agricultura protegida. En el año 2019 a nivel global se produjeron alrededor de 180.76 millones de toneladas de tomate fresco en 5.03 millones de hectáreas (FAOSTAT, 2020). México produjo 3.44 millones de toneladas en 46,256 hectáreas (SIAP, 2021). El consumo de tomate en México se ubicó en 1.88 millones de toneladas, que representaron el 54.2% de la producción nacional. El consumo per cápita anual fue de 16 kg, inferior al consumo per cápita promedio mundial de 19 kg (FIRA, 2019).

En México, la superficie establecida con agricultura protegida ascendió a 15,198 hectáreas (FIRA 2019), de las cuales el 35.7% por ciento correspondió a tomate rojo, 30.8% a berries: fresa, frambuesa y arándano, 11.6% a pepino, 9.2% a pimiento y 4.9% a ornamentales. En el estado de Oaxaca se produjeron 103,622.27 toneladas de tomate fresco en 843.70 hectáreas, de las cuales 507.5 se destina a la producción en esquema de agricultura protegida, de esta superficie 71.55% se localiza en la región de los Valles Centrales, 17.73% en la Mixteca, 8.56% en la Sierra Norte y 2.16% en las regiones Sierra Sur, Istmo, Costa, Papaloapan y Cañada (SIAP, 2021).

### 3.2 Hidroponía

La hidroponía o cultivo sin suelo es un sistema de producción en el que las raíces de las plantas no se establecen en suelo sino en una solución nutritiva, con o sin un sustrato como medio de soporte (Urrestarazu, 2004). Para que la totalidad de nutrientes estén en forma asimilable para las plantas el intervalo de pH en la solución nutritiva debe estar entre 5.5 y 6.5, una conductividad eléctrica (CE) de 1.5 a 3.5 dS m<sup>-1</sup> y evitar la precipitación y antagonismo entre nutrientes minerales mediante su aplicación en forma iónica y concentración adecuada (Adams, 2004). Las fases de crecimiento y desarrollo modifican el consumo de nutrientes en la planta, carga de frutos, temperatura, intensidad y calidad de luz, humedad relativa, CE, oxígeno disuelto, pH y flujo de la solución nutritiva (Jones, 2005; Sonneveld y Voogt, 2009). La concentración de iones en la rizósfera incrementa la CE que debe corregirse con riegos que generen entre 10 y 40% de drenaje (Lieth y Oki, 2008). Los sistemas hidropónicos se clasifican en abiertos cuando la solución drenada no se reutiliza y se permite la infiltración ya sea en el sitio o al exterior del invernadero y en cerrados si la solución nutritiva se reutiliza en el cultivo, previo ajuste del pH, CE, nutrientes y esterilización (Urrestarazu, 2004).

La calidad de fruto relacionada a la apariencia, tamaño, textura, aroma, sabor, valor nutritivo y propiedades funcionales depende directamente de la nutrición del cultivo (López *et al.*, 2016). Para cubrir la demanda nutrimental de las plantas establecidas en sustrato se requieren soluciones nutritivas.

Existen distintas formulaciones para mejorar la producción y calidad de los cultivos de acuerdo a requerimientos nutrimentales y especie (Cruz *et al.*, 2017; Moreno *et al.*, 2015). La solución nutritiva de acuerdo a Steiner (1984) se utiliza con mayor frecuencia (Flores *et al.*, 2017; Parra *et al.*, 2016). Castellanos (2009) propuso una modificación a dicha solución nutritiva, específicamente para cultivo de tomate en México, que incluye mayor concentración de P, K y  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NH}_4^+$ .

La productividad de los cultivos depende de la relación entre nutrientes que conforman la solución nutritiva, debido a que existe una interacción entre aniones y cationes, además la absorción de nutrientes vía radical es selectiva, y depende de factores climáticos, así como de la fase de crecimiento específica del cultivo (Papadopoulos, 2004).

### **3.3 Metabolismo del nitrógeno**

El N es uno de los elementos con mayor abundancia en la naturaleza; distribuido en el suelo, biomasa vegetal y aproximadamente en un 78% en la atmósfera, sin embargo, se encuentra en forma de  $\text{N}_2$  (nitrógeno gas o dinitrógeno), no asimilable por las plantas excepto aquellas que tienen la capacidad de llevar a cabo la fijación biológica de este elemento (Azcón y Talon, 2008).

Para adquirir N atmosférico se debe producir amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) a través de la ruptura del enlace covalente triple entre los dos átomos de nitrógeno.

Estas reacciones, que se conocen como fijación del N, pueden ser el resultado de procesos naturales e industriales (Taiz y Zeiger, 2006).

Todos los aminoácidos contienen N (Azcón y Talon, 2008) que favorece el crecimiento de hojas y tallos, así como la producción de proteínas en frutos y granos, además estimula la utilización de otros nutrientes como potasio y fosforo (Kovacik *et al.*, 2007).

### **3.3.1 Formas químicas de absorción de nitrógeno**

Las formas iónicas para la absorción radicular de nitrógeno son preferentemente el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). El  $\text{N}_2$  atmosférico se obtiene debido a la fijación simbiótica en leguminosas y otras familias de plantas gracias a microorganismos como *Rhizobium* y *Frankia* y a la absorción e introducción de  $\text{NH}_3$  (gas) a la planta a través de los estomas; al final, ambos se convierten en  $\text{NH}_4^+$  (Azcón y Talon, 2008). Los iones son generados en la fijación o liberados en la descomposición de la materia orgánica del suelo, objetivo de una intensa competencia entre plantas y microorganismos (Taiz y Zeiger, 2006).

### **3.3.2 Asimilación y absorción de nitrógeno**

Los procesos biológicos de conversión de N inorgánico en N orgánico son la fijación de  $N_2$  y la asimilación del  $NO_3^-$ , ésta última consta de tres etapas: 1) absorción; 2) reducción de  $NO_3^-$  a  $NH_4^+$  y 3) asimilación del  $NH_4^+$  (Azcón y Talon, 2008).

#### **3.3.2.1 Absorción**

La absorción de  $NO_3^-$  está regulada positiva o negativamente. Esta última en función del nivel de N de la planta. Se ha propuesto que el ciclo de los aminoácidos entre el tallo y la raíz puede proporcionar información necesaria sobre el contenido de N en la planta que permite a la raíz regular su absorción (Cooper y Clarkson, 1989).

Las plantas disminuyen la absorción del  $NO_3^-$  del medio a bajas temperaturas, en la anaerobiosis, y en presencia de inhibidores metabólicos, lo que indica dependencia de energía metabólica, característica de un transporte activo. La absorción muestra una cinética de saturación de Michaelis-Menten, lo que demuestra que una permeasa o proteína transportadora facilita su transporte a través del plasmalema. La mayoría de las especies vegetales presentan más de un sistema de transporte. Generalmente se describen dos: de alta y de baja afinidad. El transporte de alta afinidad ( $K_m$  para el  $NO_3^-$  entre 20 y 100  $\mu M$ ) se satura a

concentraciones externas de  $\text{NO}_3^-$  por debajo de 1 mM y es capaz de ser inducido por el propio  $\text{NO}_3^-$ . Respecto al transporte de baja afinidad se sabe que este opera con concentraciones externas de  $\text{NO}_3^-$  superiores a 1 mM. Este se caracteriza por su cinética de transporte lineal y una menor sensibilidad a la temperatura y a los inhibidores metabólicos, lo que indica que está compuesto por canales iónicos (Azcón y Talon, 2008).

En términos de gradiente de potencial eléctrico (interior negativo) y químico, el transporte de  $\text{NO}_3^-$  a través de la membrana plasmática hasta el citoplasma se considera un proceso termodinámicamente desfavorable (Henriksen y Spanswick, 1993).

### **3.3.2.2 Reducción de nitrato a amonio**

El primer paso de la reducción de  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{NH}_4^+$  es la reducción del  $\text{NO}_3^-$  a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) en el citosol (Oaks, 1994), la enzima nitrato reductasa (NR) cataliza esta reacción:



Donde NAD(P)H indica NADH o NADPH. La forma más común de la NR utiliza solo NADH como donador de electrones; principalmente en raíces (tejidos no verdes) se localiza otra forma de la enzima que puede usar NADH o NADPH (Warner y Kleinhofs, 1992). Dicha reacción requiere dos electrones suministrados por una molécula de piridín nucleótido reducido (Azcón y Talon, 2008).

A continuación, el  $\text{NO}_2^-$  es reducido a  $\text{NH}_4^+$  por la nitrito reductasa (NiR). El  $\text{NO}_2^-$  es altamente reactivo y un ion potencialmente tóxico. Las células vegetales transportan inmediatamente el  $\text{NO}_2^-$  generado por la reducción del  $\text{NO}_3^-$  desde el citosol a los cloroplastos en hojas verdes y plastidios en raíces (Taiz y Zeiger, 2006). En estos orgánulos, la enzima nitrito reductasa reduce el  $\text{NO}_2^-$  a  $\text{NH}_4^+$  de acuerdo con la siguiente reacción global:



donde Fd y subíndices red y ox representan a la ferredoxina y los estados reducido y oxidado, respectivamente. La ferredoxina reducida deriva de la cadena de transporte electrónico fotosintética de los cloroplastos y del NADPH generado por la ruta oxidativa de las pentosas fosfato en tejidos no fotosintéticos. Ésta reacción requiere seis electrones donados por la ferredoxina reducida ( $\text{Fd}_{\text{red}}$ ). La reducción del  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{NH}_4^+$  consume un total de ocho electrones (Azcón y Talon, 2008).

### **3.3.2.3 Asimilación del amonio**

El  $\text{NH}_4^+$  es generado en distintos procesos metabólicos como la reducción del  $\text{NO}_3^-$  y fijación del  $\text{N}_2$ , fotorrespiración y catabolismo de proteínas (Taiz y Zeiger, 2006; Azcón y Talon, 2008).

Las células vegetales evitan la toxicidad del  $\text{NH}_4^+$  generado a partir de la reducción del  $\text{NO}_3^-$ , convirtiéndolo rápidamente en aminoácidos. La principal ruta de

esta conversión implica la acción secuencial de la glutamina sintetasa y la glutamato sintasa (Lea *et al.*, 1990).

El  $\text{NH}_4^+$  que absorbe directamente la planta, o el que se produce metabólicamente en los tejidos, es asimilado o reasimilado, por la actuación complementaria de las enzimas glutamina sintetasa (GS) y glutamato sintasa (GOGAT: glutamina: 2-oxoglutarato amido-transferasa), que forman el ciclo GS-GOGAT (Azcón y Talon, 2008).

La glutamina sintetasa (GS) combina el  $\text{NH}_4^+$  con el glutamato para formar la glutamina:



En esta reacción se necesita hidrolizar un ATP e involucra directamente a un catión divalente,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  o  $\text{Co}^{2+}$ , como cofactor. Una clase de GS en las plantas se localiza en el citosol y la otra en los plastos de la raíz o en los cloroplastos de las hojas y cotiledones verdes (Taiz y Zeiger, 2006). La producción de glutamina para llevar a cabo el transporte intracelular se realiza gracias a la expresión de las formas citosólicas durante la germinación de las semillas o en los haces vasculares de raíces y brotes. Para el consumo local la GS de los plastos de la raíz genera N en forma amida, mientras que la GS de los cloroplastos del brote reasimila el  $\text{NH}_4^+$  fotorrespiratorio (Lam y col. 1994). Se inicia con la catálisis de incorporación del  $\text{NH}_4^+$ , dependiente de ATP por parte de la GS en una molécula de glutamato para formar glutamina. Posteriormente, la GOGAT produce dos moléculas de glutamato (Fig. 1), mediante catálisis de la transferencia reductiva del grupo amido de la

glutamina al C-2 del 2-oxoglutarato. Una de las moléculas de glutamato formadas se recicla, y la otra transfiere su grupo amino a diversos oxoácidos, en reacciones catalizadas por las aminotransferasas (transaminasas), con la finalidad de sintetizar los aminoácidos restantes (Azcón y Talon, 2008). Una vez asimilado el N en glutamina y glutamato, es incorporado a otros aminoácidos por reacciones de transaminación (Taiz y Zeiger, 2006).

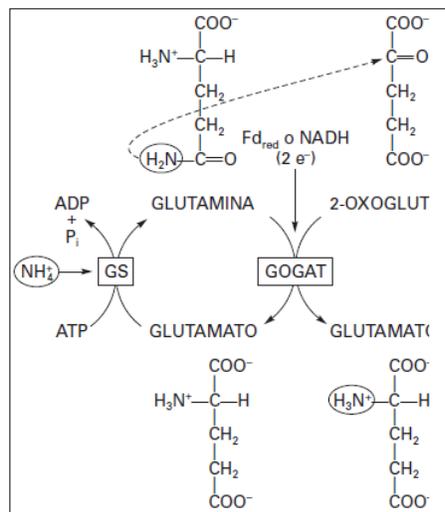


Figura 1. Asimilación del amonio por el ciclo GS-GOGAT. GS: glutamina sintetasa; GOGAT: glutamato sintasa (Azcón y Talon, 2008)

### 3.4 Glutamina sintetasa

La glutamina sintetasa (GS) de las plantas es una proteína octamérica con una alta afinidad por el NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (K<sub>m</sub> = 3-5 μM) (Azcón y Talon, 2008), posee una masa molecular de 320-360 kDa, constituida por ocho subunidades de 38 a 45 kDa (Llorca *et al.*, 2008).

Se localizan dos isoformas de GS en las hojas: GS1, ubicada en el citosol, y GS2 en los cloroplastos. Esta última es la isoforma que predomina en hojas y cotiledones verdes, en donde participa en la asimilación del  $\text{NH}_4^+$  producido en la reducción del nitrato y en la reasimilación del  $\text{NH}_4^+$  liberado durante la fotorrespiración (Azcón y Talon, 2008; Taiz y Zeiger, 2006). En el caso de tejidos etiolados, hojas y cotiledones senescentes, en los cuales la actividad proteolítica es intensa, se presentan niveles superiores de GS1 en comparación a GS2. La función de la GS localizada en el citosol consiste en formar glutamina y asparragina para el transporte de N a los órganos en crecimiento a través de la reasimilación del  $\text{NH}_4^+$  liberado en el catabolismo de los aminoácidos (Azcón y Talon, 2008).

### **3.5 Aminoácidos**

Los aminoácidos son componentes básicos de las proteínas y en las plantas tienen diversas funciones adicionales en la regulación del metabolismo, transporte y almacenamiento de N. Los aminoácidos se forman: 1) directamente de  $\text{NH}_4^+$  y los esqueletos de carbono apropiados; 2) por transaminación a partir de aminoácidos ya existentes; 3) por modificaciones o cambios en el esqueleto de carbono de aminoácidos ya formados (Bidwell, 1993).

Los aminoácidos más abundantes en el fluido del floema son el glutamato y el aspartato, ya sea en forma libre o como amidas (glutamina y asparagina). Muchas especies transportan el N en el xilema de esta manera (Azcón y Talón, 2008).

La idea de aplicar a las plantas sustancias propias de su metabolismo tales como aminoácidos y carbohidratos se debió a la sobrevaloración de las potencialidades autotróficas de los vegetales. Tales formulados, recibieron el nombre genérico de “bionutrientes”, para distinguirlos de los nutrientes convencionales (Montano *et al.*, 2007).

### **3.5.1 Ácido glutámico**

El ácido glutámico o en su forma ionizada L-glutamato es un aminoácido que presenta la siguiente estructura y propiedades: fórmula:  $C_5 H_9 O_4$ ; peso molecular:  $147.13 \text{ g mol}^{-1}$ ; solubilidad:  $0.864 \text{ H}^+/100 \text{ g H}_2\text{O}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ; punto de fusión:  $224\text{-}225 \text{ }^\circ\text{C}$ ; punto isoeléctrico: 3.08; constantes de disociación:  $pK_1$  2.1,  $pK_2$  4.07,  $pK_3$  9.47 (Cox y Nelson, 2006).

El ácido glutámico se distingue de forma particular respecto a otros aminoácidos por sus funciones biológicas tan diversas como metabolito, sustrato generador de energía, nutriente, un determinante estructural en las proteínas e incluso una molécula de señalización. Tiene una serie de propiedades químicas, incluida su reactividad, que lo hacen particularmente adecuado para su multiplicidad de funciones. En diferentes etapas de desarrollo, puede haber una gran variación en el contenido de aminoácidos solubles, pero el glutamato cambia menos que los otros aminoácidos, en particular la glutamina (Forde y Lea, 2007).

### **3.6 Valores SPAD y contenido de clorofila en hojas**

Para conocer el estado nutricional de las plantas, regularmente se recurre al análisis químico de hojas, sin embargo, este método presenta limitaciones en tiempos y costos, además requiere procedimientos de muestreo destructivo. Como alternativa se recomienda el uso de sensores portátiles que miden en tiempo real el contenido relativo de la clorofila en la hoja, altamente correlacionado a la absorción del nitrógeno (Taiz y Zeiger, 2006; Shanahan *et al.*, 2008) expresado en valores SPAD (Soil Plant Analysis Development) (Marek *et al.*, 2009) dichos valores se conservan según el tono verde de las hojas bajo el principio de transmitancia/absorbancia como parte de la interacción entre la radiación infrarroja y roja transmitida en 650 y 940 nm y absorbida en 650 nm según el contenido de clorofila, respectivamente (Fox y Walthall, 2008; Zhang *et al.*, 2008).

Los medidores del contenido relativo de clorofila SPAD-502 y atLEAF son algunos de los sensores portátiles más utilizados en cultivos hortícolas por presentar resultados positivos y altamente relacionados con el contenido real de clorofila foliar (Parry *et al.*, 2014). Respecto a resultado y costo, el medidor atLEAF representa la mejor opción (Padila *et al.*, 2018).

### **3.7 Calidad física y química del fruto**

El término “calidad” engloba a diversos parámetros que en conjunto determinan que un fruto sea apto para el consumo, tales como: sabor, color, aroma, tamaño, firmeza, sólidos solubles, etc. (Preciado *et al.*, 2011).

El tomate se consume en su máxima calidad organoléptica la cual depende principalmente de una mezcla formada por azúcares, ácidos orgánicos, aminoácidos y compuestos volátiles (Baldwin *et al.*, 2008). Para que exista una aceptación por parte de los consumidores, los frutos frescos deben caracterizarse principalmente por su calidad física y valor nutricional que representa un alto contenido en vitaminas, minerales, glucosinolatos, antioxidantes fenólicos, y diversas sustancias bioactivas, que constituyen fuente de fibra y energía (Ospina y Cartagena, 2008). El valor nutricional depende de diversos factores, pero los principales son las variedades y cultivares. Otros factores que afectan directamente en la composición química son el sistema de producción, la fertilización condiciones climáticas, riego, y el estado de desarrollo de la planta al momento de la cosecha (Cebula y Kalisz, 1996). En la actualidad, según Anjanappa *et al.* (2013) la calidad interna del tomate se estima a partir de indicadores como: pH, sólidos solubles totales y su relación con la acidez titulable. Urrieta *et al.* (2012) señalaron al pH de la pulpa como principal parámetro de calidad en la comercialización, mientras que Preciado *et al.* (2011) reportaron a la cantidad de sólidos solubles totales (°Brix) como indicador importante en las características sensoriales del fruto, además relacionaron este parámetro con las propiedades de la fuente de nutrientes y el estrés hídrico.

#### IV. ANTECEDENTES

Cao *et al.* (2010) aplicaron vía foliar en cebollino chino (*Allium tuberosum* Rottler Spreng) una concentración de 5 mmol L<sup>-1</sup> (0.735 g L<sup>-1</sup>) de ácido glutámico y encontraron un incremento con respecto al control en la actividad de glutamina sintetasa.

Yu *et al.* (2010) aplicaron vía foliar en espino (*Crataegus pinnatifida* Bge.) una concentración de 0.4 g L<sup>-1</sup> y 0.8 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico y encontraron un incremento con respecto al control en la actividad de glutamina sintetasa.

Serna *et al.* (2011) aplicaron vía foliar en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo condiciones de invernadero las siguientes concentraciones de ácido glutámico: 1.25, 2.50, 5.00, 10.00 y 20.00 g L<sup>-1</sup> y encontraron incrementos con respecto al control en peso fresco y seco de frutos, peso seco total de la planta, contenido de clorofila y actividad de glutamina sintetasa.

Alvarez-Rodríguez *et al.* (2015) utilizaron vía foliar en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) un producto comercial denominado “Fitomas-E” que incluía 0.05 % de ácido glutámico y encontraron incrementos con respecto al control en el número de flores por planta y peso del fruto.

Ariza *et al.* (2015) aplicaron vía foliar en lima mexicana (*Citrus aurantifolia* [Christm Swingle]) una concentración de 0.45 kg ha<sup>-1</sup> de ácido glutámico y encontraron incrementos con respecto al control en rendimiento, peso de fruto y diámetro ecuatorial.

Khan *et al.* (2012) aplicaron vía foliar en uva (*Vitis vinifera* L.) un producto denominado “L<sup>-1</sup> Primo” a base de aminoácidos y extracto de algas en una

concentración de  $0.5 \text{ mL L}^{-1}$  y encontraron incrementos con respecto al control en pH de jugo y contenido de sólidos solubles totales.

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Ubicación

Esta investigación se realizó de agosto 2018 a abril 2019 bajo una estructura metálica con cubierta de polietileno blanco de 200  $\mu\text{m}$  y malla antiáfidos situada en San Pedro Ixtlahuaca (17° 03' N, 96° 40' O, 1640 msnm), región de Valles Centrales de Oaxaca, México (INAFED, 2019).

### 5.2 Material vegetal

Se utilizaron semillas del híbrido de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de crecimiento indeterminado tipo saladette; Ramses F1 (Harris Moran®).

### 5.3 Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos fueron tres concentraciones de ácido glutámico (1.5, 6.0, y 12.0 g L<sup>-1</sup>) y como control, sin ácido glutámico. La fuente de ácido glutámico de acuerdo al certificado de análisis otorgado por el proveedor Future Foods, S.A. de C.V., corresponde a ácido L-glutámico (C<sub>5</sub>H<sub>9</sub>NO<sub>4</sub>) con 99.6% de pureza. La aplicación de los tratamientos inició a los 31 días después del trasplante (DDT) con intervalos de 14 días vía foliar sin adherentes. En total se realizaron 7 aplicaciones de ácido glutámico en un ciclo de 167 días. La distribución de tratamientos se hizo bajo un

diseño completamente al azar con 4 tratamientos, 4 repeticiones y 4 plantas por repetición.

#### **5.4 Manejo agronómico**

La germinación de semillas se hizo en charolas de poliestireno de 200 cavidades y como sustrato tierra de monte y agrolita en una proporción (2:1 v/v) esterilizados previamente en autoclave a 121 °C durante 90 min. Después de la siembra de las semillas, las charolas se cubrieron con un plástico negro durante cuatro días para mantener la humedad, incrementar la temperatura y estimular la germinación. Cuando las plántulas tenían dos hojas verdaderas se inició con la aplicación de solución nutritiva de acuerdo a Steiner (1984) al 15% dos veces al día hasta que tuvieron una altura de 15 cm aproximadamente para realizar el trasplante. Los sustratos utilizados para el cultivo en condiciones protegidas fueron agrolita y vermiculita en una proporción (1:1 v/v) en bolsas de polietileno con capacidad de 16 L (Fig. 2).

El riego fue por goteo con goteros tipo botón autocompensados de 8 L h<sup>-1</sup> y la fertirrigación se hizo de acuerdo a Steiner (1984) (Cuadro 1). Para la incorporación de microelementos se utilizaron 20 g m<sup>-3</sup> de agua, de la mezcla de nutrientes quelatados Harvest More<sup>®</sup> que contiene azufre, magnesio, zinc, boro, hierro, cobre manganeso y molibdeno. El pH de la solución nutritiva fue de 5.5 y la conductividad eléctrica (CE) de 2.6 dS m<sup>-1</sup>.

Cuadro 1. Macroelementos de la solución nutritiva Steiner (1984) para el desarrollo de las plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

Fuente	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
				meq L <sup>-1</sup>		
Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	12	7	9	4	7	1
KNO <sub>3</sub>	9		9			
KNO <sub>3</sub>	3	3				
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		3			3	
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>		1				1
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O				4	4	



Figura 2. Plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en bolsas de cultivo con agrolita y vermiculita.

## **5.5 Variables respuesta**

Se evaluaron algunas variables de crecimiento como altura de la planta (AP) y área foliar (AF) y variables fisiológicas como contenido relativo de clorofila foliar y actividad de la glutamina sintetasa (GS), respecto al fruto se consideraron variables de calidad de física como peso fresco (PFF), diámetro polar (DPF) y ecuatorial (DEF) y materia seca (MSF) y química como contenido de sólidos solubles totales (SST) y pH del fruto (PHF). También se consideró el rendimiento por metro cuadrado (R). Todas las variables se evaluaron durante la etapa de fructificación y hasta el octavo racimo, sin eliminar el meristemo apical para evitar la interferencia esta práctica con el efecto del ácido glutámico. De acuerdo con Quintana-Baquero *et al.* (2012) y Suárez *et al.* (2018) la producción en plantas de tomate de crecimiento indeterminado se puede llevar a ocho racimos gracias a que la eliminación del ápice favorece el incremento del tamaño de fruto.

### **5.5.1 Variables de crecimiento y fisiológicas**

La altura de planta (AP) se midió desde el cuello hasta el meristemo apical de la planta a los 97, 111 y 125 DDT. Área foliar (AF), se determinó a los 167 DDT mediante el software ImageJ. Se utilizó un medidor atLEAF CHL PLUS para determinar el contenido relativo de clorofila foliar (CRCF) en unidades SPAD con apoyo de la página oficial <https://www.atleaf.com/SPAD> para realizar las conversiones correspondientes. La actividad de glutamina sintetasa (GS) en hojas se determinó a los 167 DDT, después de la séptima aplicación de ácido glutámico.

Para ello se utilizó la metodología de análisis enzimático propuesta por Alcántar y Sandoval (1999), se maceraron 0.5 g de material vegetal fresco y se añadieron 5 mL de tris-HCl 0.1 M pH 7.8 preparado con 12.5 mM de mercaptoetanol. Esta mezcla se filtró con tela de algodón y se colectó el filtrado en frascos a una temperatura menor de 4°C. Posteriormente, se agregaron en estricto orden tanto en tubos con muestra como testigos los siguientes reactivos: 0.2 mL de L-glutamato 0.6 M, 0.2 mL de clorhidrato de hidroxilamina 0.045 M, 0.2 mL de sulfato de magnesio 0.45 M. A los tubos con muestra únicamente se les agregó 0.2 mL de trifosfato de adenosina 0.06 M. Después 0.1 mL de extracto vegetal a ambos tubos y finalmente 0.6 mL de regulador tris hidrocloreuro (tris-HCl) a los tubos con muestra y 0.8 mL a los tubos testigos. Posteriormente se colocaron en baño maría a 30°C durante 20 min; la reacción se detuvo con la mezcla de reactivos cloruro férrico (FeCl<sub>3</sub>) + ácido tricloroacético + HCl. Los tubos se centrifugaron a 4800 rpm durante 10 min a temperatura ambiente en el equipo Eppendorf® Centrifuge 5430 y después se leyó la absorbancia a 540 nm en el espectrofotómetro Marca VELAB® Modelo VE-5100UV para medir la cantidad de  $\gamma$ -glutamil hidroxamato formado.

### **5.5.2 Variables de calidad física y química del fruto y rendimiento**

Las variables respuesta relacionadas con la calidad física y química se evaluaron en dos frutos tomados al azar que mostraban visualmente un color rojo en cada unidad experimental a los 97, 111, 125, 139, 153 y 167 DDT, simultáneamente a la evaluación del rendimiento. El peso fresco del fruto (PFF) se determinó mediante una balanza electrónica marca Rhino®, el diámetro polar (DPF) y ecuatorial (DEF)

del fruto con un vernier digital marca Maxwell<sup>®</sup>, el rendimiento (R) se determinó a través del peso fresco en Kg m<sup>-2</sup> (Fig. 3) para la obtención de la materia seca en frutos (MSF), primero se determinó el peso fresco de las muestras, luego se cortaron en rodajas y se colocaron en charolas de aluminio al interior del invernadero durante 7 días para deshidratarlos parcialmente (Fig. 4), posteriormente se colocaron en una estufa de secado marca Binder<sup>®</sup> a 60 °C hasta peso constante, el cual se determinó en la balanza analítica VELAB<sup>®</sup> VE-2014 y por diferencia con el peso fresco se obtuvo el porcentaje de materia seca. El contenido de sólidos solubles totales en el fruto (SST) se obtuvo con un refractómetro portátil RHB-32 ATC. El pH del fruto (PHF) se determinó con un medidor portátil digital de pH modelo HI98107 pHep<sup>®</sup> de la marca Hanna<sup>®</sup> Instruments



Figura 3. Panorama del experimento y cosecha de frutos



Figura 4. Deshidratación parcial del fruto previa al procedimiento de secado en estufa para obtención de porcentaje de materia seca

## 5.6 Análisis estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de homogeneidad de varianza por el método de Levene y prueba de normalidad de datos por el método de Shapiro-Wilk. Posteriormente se realizó un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias por el método de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) (Infante y Zárate, 1990), utilizando los programas estadísticos SAS ver. 9.0 y SPSS para Windows ver. 25.

## VI. RESULTADOS

### 6.1 Variables de crecimiento y fisiológicas

La aplicación foliar de ácido glutámico no tuvo efecto significativo en las variables de crecimiento AP (Fig. 5) y AF (Fig. 6) evaluadas en plantas de tomate.

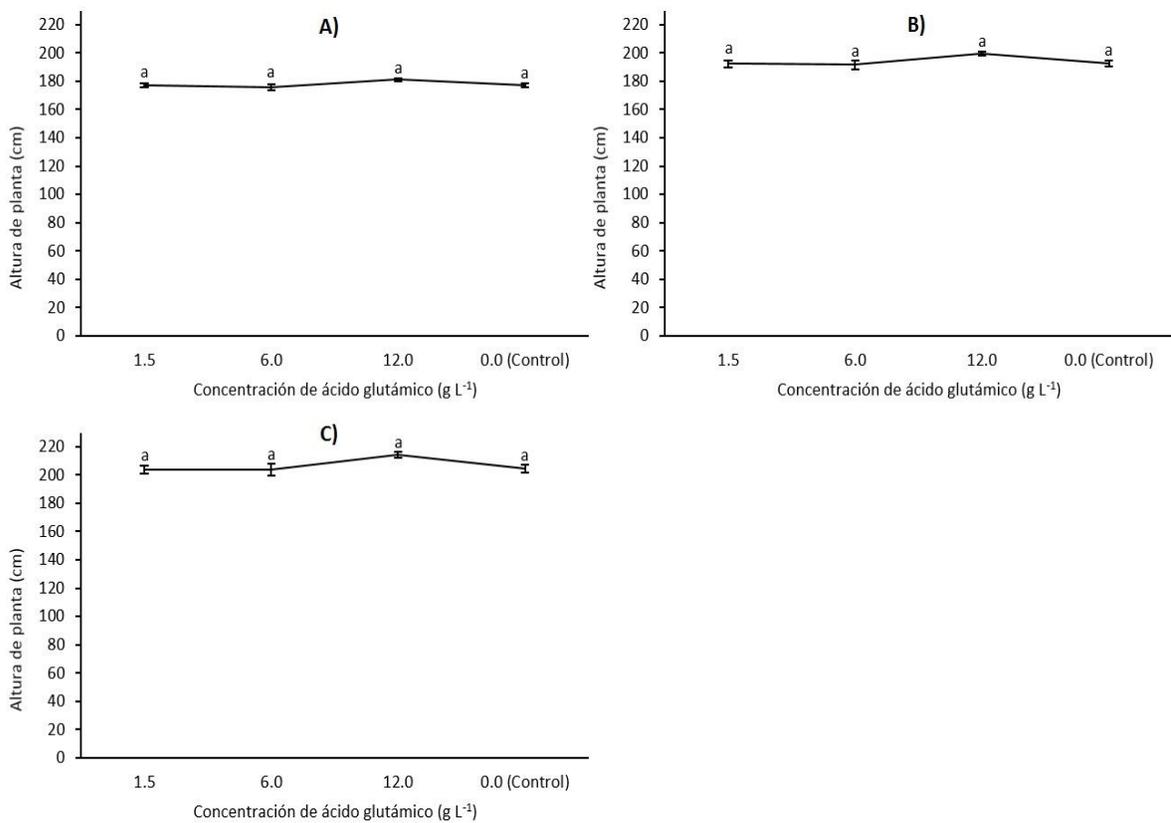


Figura 5. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en altura de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivadas en condiciones protegidas. A) 97 días después del trasplante; B) 111 días después del trasplante; C) 125 días después del trasplante.

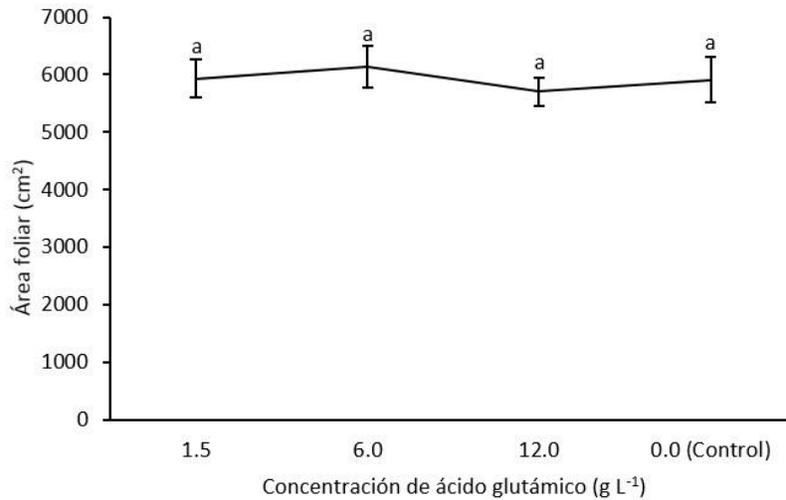


Figura 6. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en el área foliar de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de 167 días después del trasplante cultivadas en condiciones protegidas.

Con respecto al control, el CRCF en plantas de tomate con 125 días después del trasplante incrementó 6.1 y 4.8% con la aplicación foliar de 1.5 y 6.0 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico, respectivamente (Fig. 7).

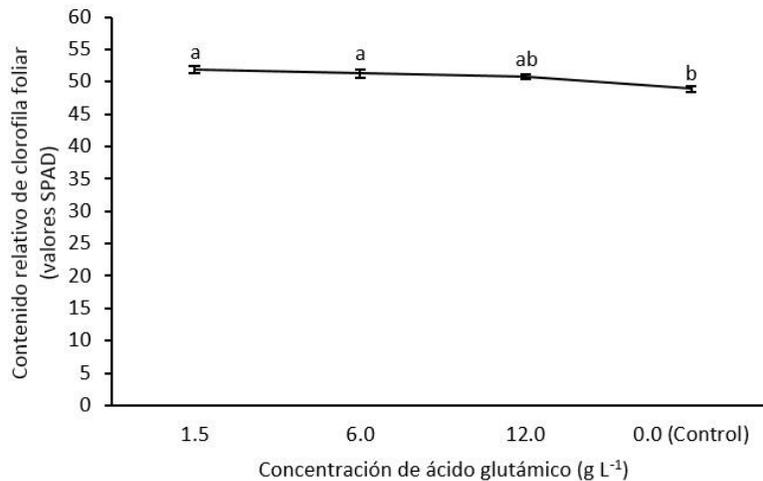


Figura 7. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en el contenido relativo de clorofila foliar en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de 125 días después del trasplante cultivadas en condiciones protegidas.

Al término del experimento, el CRCF en plantas de tomate con 167 días después del trasplante incrementó 8.9% con la aplicación foliar de 6.0 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico y 6.0% con la aplicación foliar de 12 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico (Fig. 6). La actividad de GS aumentó 85.4% con 1.5 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico (Fig. 8).

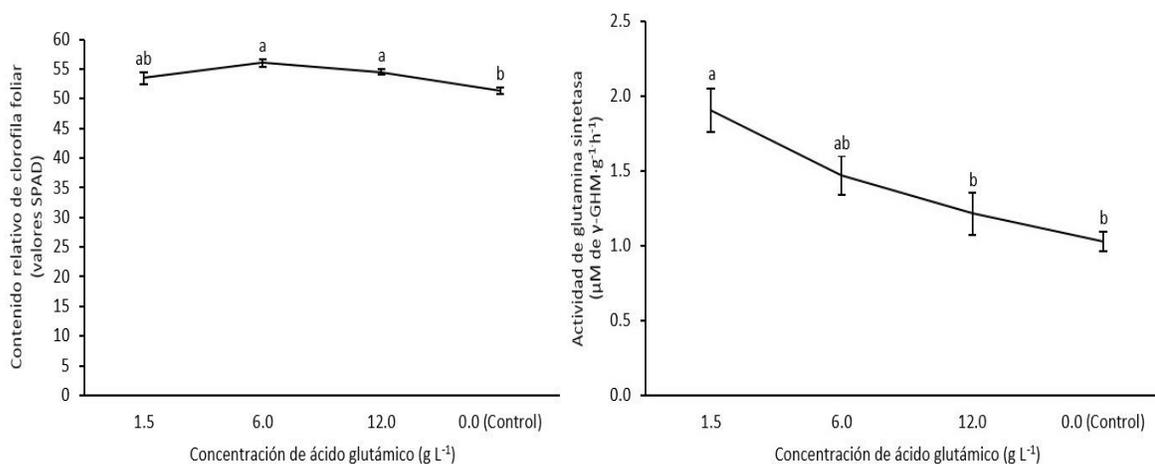


Figura 8. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en el contenido relativo de clorofila y actividad de glutamina sintetasa en hojas de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de 167 días después del trasplante cultivadas en condiciones protegidas.

## 6.2 Variables de calidad física y química del fruto y rendimiento

Con respecto al control, la aplicación foliar de 1.5 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico incrementó 7.6% el DPF, 9.8% el SST y 1.5% el PHF en plantas de tomate de 97 días después del trasplante (Fig. 9).

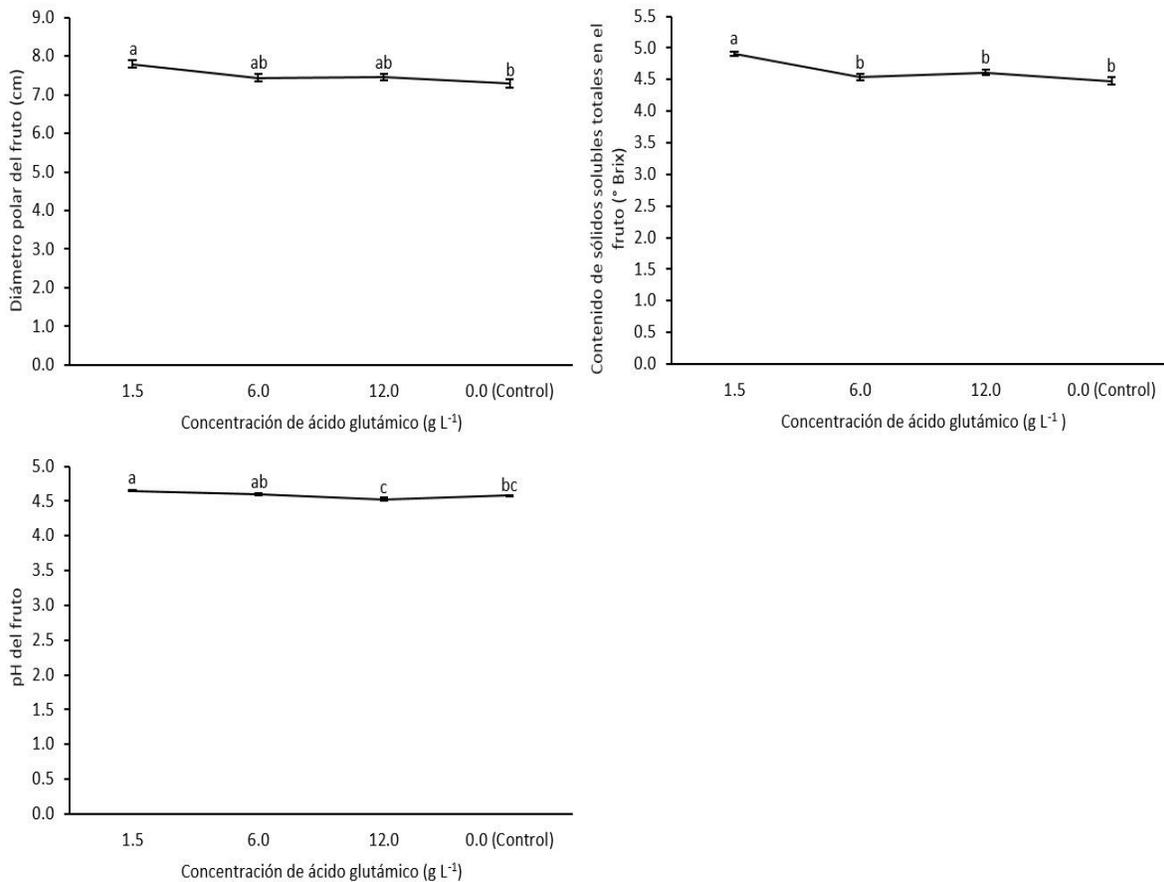


Figura 9. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en el diámetro polar del fruto, contenido de sólidos solubles totales y pH del fruto de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de 97 días después del trasplante cultivadas en condiciones protegidas.

En plantas de tomate de 111 días después del trasplante solamente el PHF incrementó 1.5% con la aplicación foliar de 6.0 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico (Fig. 10).

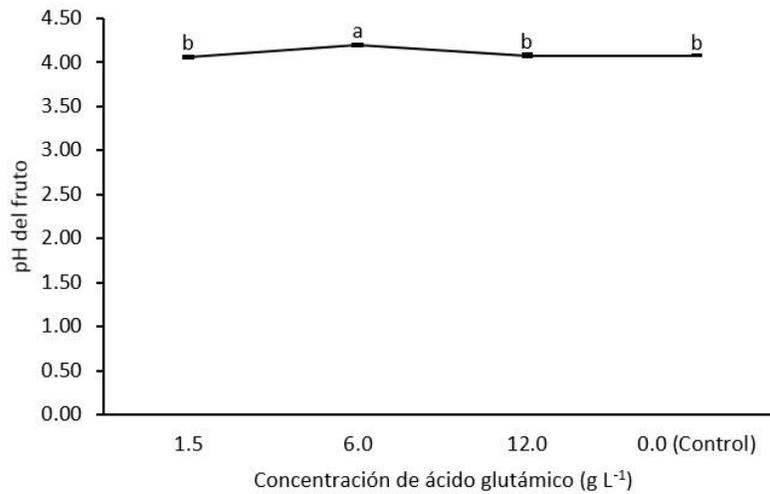


Figura 10. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en el pH del fruto de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de 111 días después del trasplante cultivadas en condiciones protegidas.

En plantas de tomate con 125 días después del trasplante la aplicación foliar de 1.5 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico incrementó 2.6% el PHF, 13.5% el R, 8.0% el PFF y 13.7% la MSF (Fig. 11).

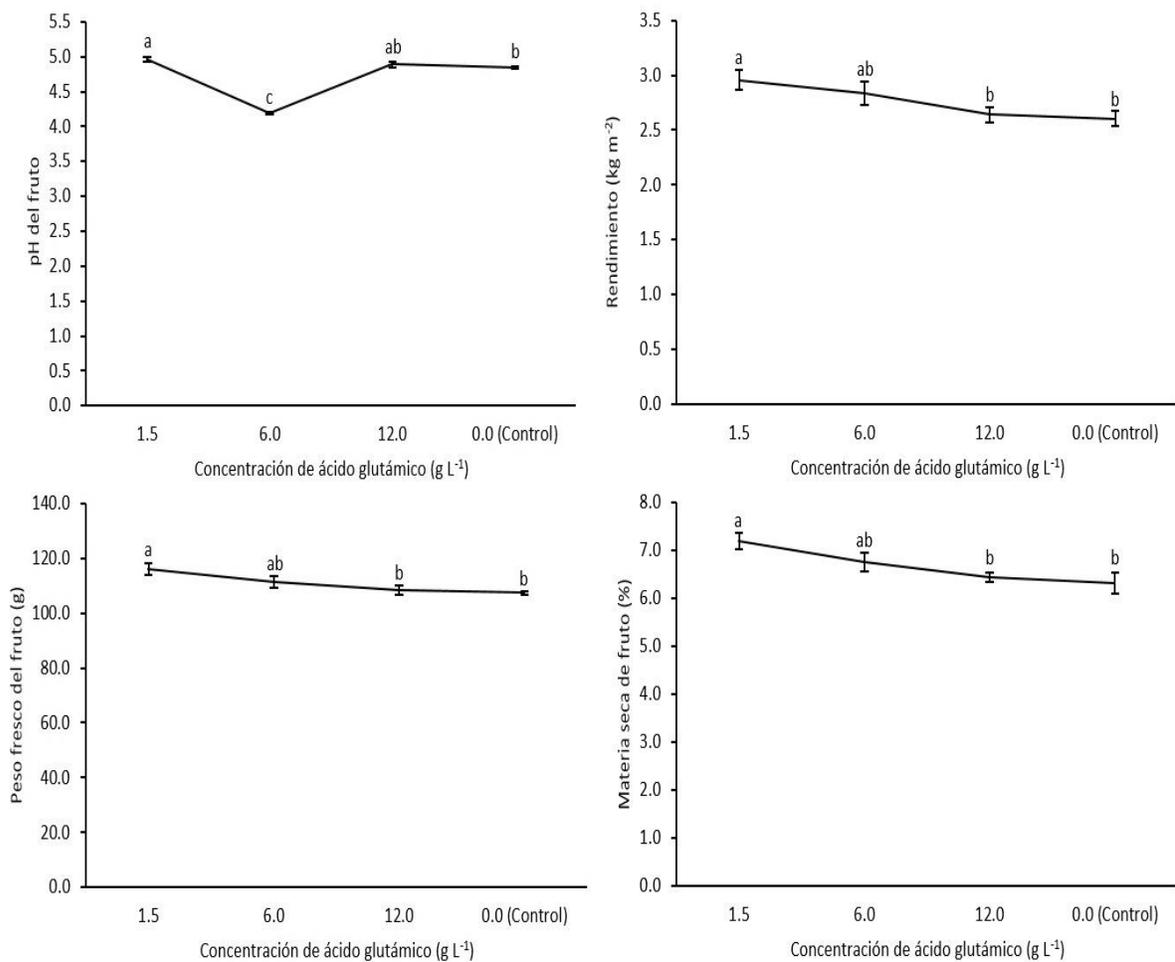


Figura 11. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en el pH, rendimiento, peso fresco del fruto y materia seca del fruto en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de 125 días después del trasplante cultivadas en condiciones protegidas.

En plantas de tomate de 139 días después del trasplante, el PHF aumentó 3.5% con la aplicación foliar de 12 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico y el PFF incrementó 11.2% con la concentración de 1.5 g L<sup>-1</sup> y 10.1% con la concentración de 6.0 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico (Fig. 12).

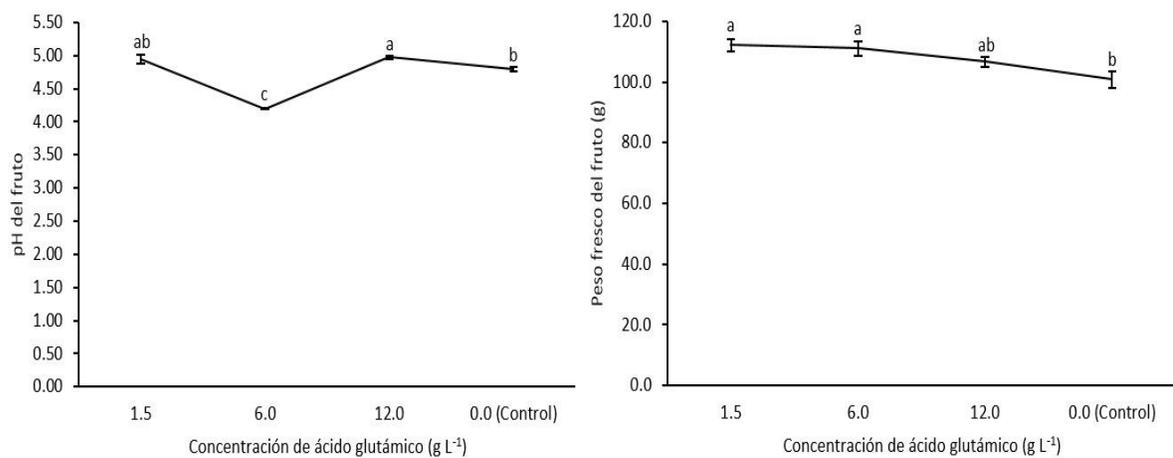


Figura 12. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en el pH y peso fresco del fruto de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de 139 días después del trasplante cultivadas en condiciones protegidas.

En plantas de tomate de 153 días después del trasplante ninguna variable respuesta mostró cambios significativos a la aplicación foliar de ácido glutámico.

Al término del experimento, en plantas de tomate con 167 días después del trasplante, la concentración de 6.0 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico incrementó 4.1% el DEF, 27.4% el R, 10.3% el PFF y 16.9% la MSF (Fig. 11). El PHF aumentó 5.3% con 1.5 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico (Fig. 13).

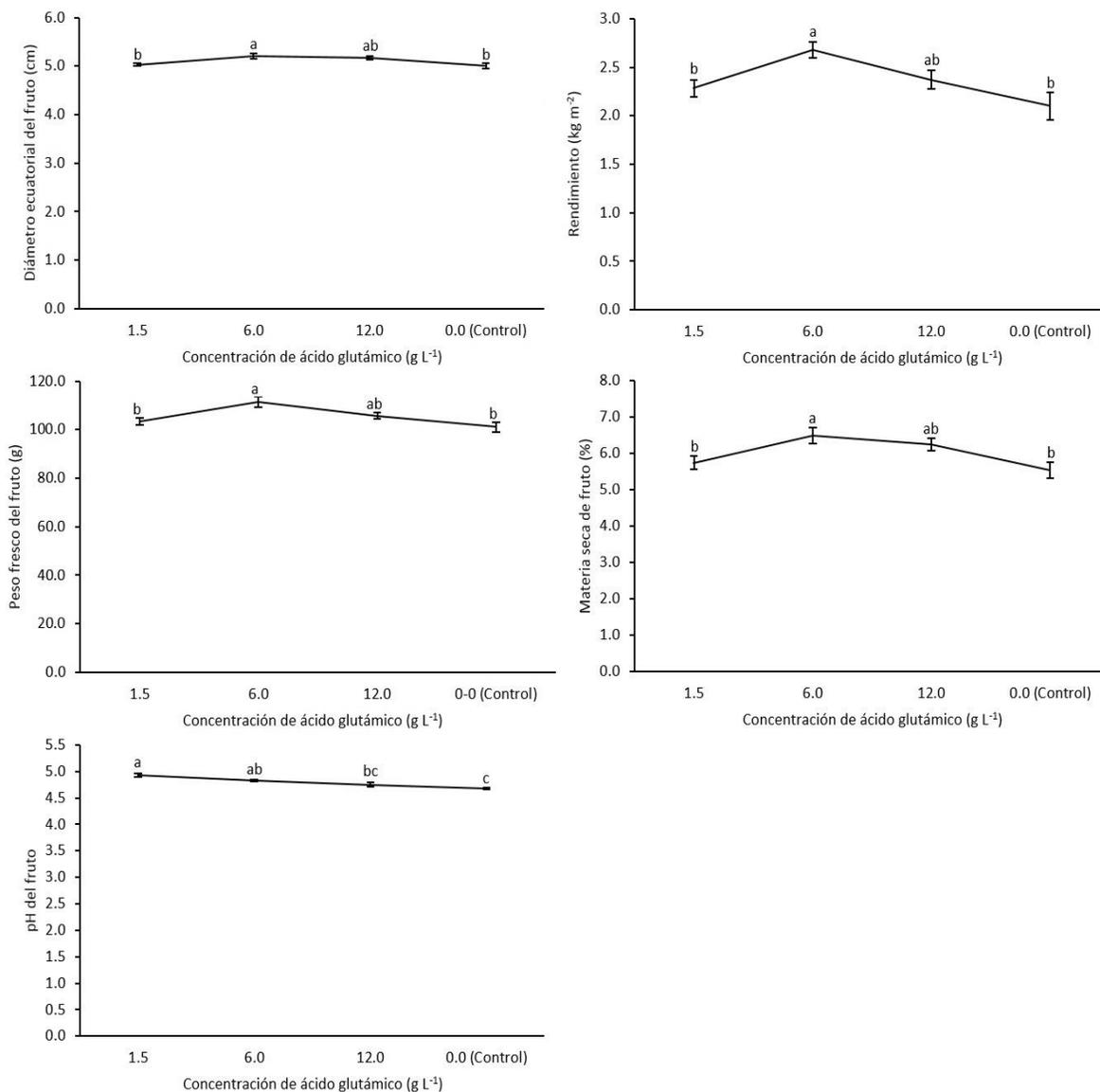


Figura 13. Efecto de la aplicación foliar de distintas concentraciones de ácido glutámico en el diámetro ecuatorial del fruto, rendimiento, peso fresco del fruto, materia seca del fruto y pH del fruto de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de 167 días después del trasplante cultivadas en condiciones protegidas.

## VII. DISCUSIÓN

La aplicación de aminoácidos es una práctica común en los cultivos hortícolas a nivel mundial. Sin embargo, la información sobre el efecto de la aplicación individual de aminoácidos en el crecimiento y fisiología de las plantas, es relativamente escasa, debido a que la mayoría de las investigaciones se han llevado a cabo empleando una mezcla de aminoácidos (Khan *et al.*, 2019). Las plantas utilizan los aminoácidos de acuerdo con sus necesidades nutricionales y sus antecedentes genéticos, también en sincronía con las señales ambientales y de crecimiento (Sebastian y Prasad, 2014; Singh *et al.*, 2018). Esta puede ser la razón por la que las variables fisiológicas y de crecimiento evaluadas, así como el rendimiento y la calidad física y química del fruto respondieron de manera distinta a la aplicación foliar de diferentes concentraciones de ácido glutámico en plantas de tomate de diferente edad.

Actualmente, los análisis de intensidad del verde de las hojas en valores SPAD basados en una relación transmitancia/absorbancia han sido una técnica ampliamente utilizada en la evaluación del contenido de nitrógeno en una planta (Zhang *et al.*, 2008), debido a que existe una correlación directa entre dicha concentración con la intensidad del verde y el contenido de clorofila ya que el nitrógeno participa en la estructura de la molécula de clorofila (Taiz y Zeiger, 2006). Los dispositivos portátiles Minolta SPAD-502 y AtLEAF CHL PLUS (utilizado en este estudio) determinan un contenido relativo de clorofila que, normalmente, es altamente correlacionado con el contenido de clorofila foliar (Da Cunha *et al.*, 2015).

El ácido L-glutámico endógeno es un precursor de la síntesis de clorofila de las hojas en desarrollo. El aumento en el contenido relativo de clorofila foliar expresado en valores SPAD en las plantas de tomate como respuesta a la aplicación foliar de ácido glutámico indicó la absorción y metabolización de este aminoácido, corroborando los resultados de Beale *et al.* (1975), quienes demostraron la absorción foliar del ácido L-glutámico y su función en la síntesis de clorofila. Resultados similares a los obtenidos en este estudio fueron reportados por García *et al.* (2011), quienes indicaron que los aminoácidos en soluciones nutritivas tuvieron un efecto favorable en el contenido foliar de nutrientes y clorofila en las

hojas de plantas de tomate (*S. lycopersicum*). Serna-Rodríguez *et al.* (2011) también encontraron que la aplicación de 1.25, 2.50 y 10.00 g·L<sup>-1</sup> de ácido glutámico aumentó el contenido de clorofila en las hojas de plantas de tomate de 116 días de edad cultivadas en invernadero. Los resultados de Cao, Gao *et al.* (2010) mostraron que la clorofila incrementó en plantas de cebollino chino (*Allium tuberosum* Rottler Spreng) que recibieron ácido glutámico en un intervalo de 5 a 10 mmol L<sup>-1</sup> (0.735 a 1.47 g L<sup>-1</sup>). Yu *et al.* (2010) encontraron que la aplicación de 0.8 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico en espino (*Crataegus pinnatifida* Bge.) incrementó significativamente la clorofila en comparación con las plantas control. Zhang *et al.* (2009) indicaron que añadir aminoácidos a la solución nutritiva puede incrementar la clorofila en las hojas de las plantas de tomate. Además, en varios estudios, se ha demostrado que la aplicación foliar de compuestos nitrogenados tiene efectos profundos sobre las características de crecimiento de las plantas, incluidos los parámetros de calidad del fruto (Aslani y Souri, 2018; Dehnavard *et al.*, 2017; Noroozlo *et al.*, 2019a; Souri y Dehnavard, 2018).

Dahab y Abd El-Aziz (2006) mostraron que el contenido de clorofila en plantas de *Philodendron erubescens* K. Koch & Augustin tratadas con aminoácidos fue más alto que en las plantas no tratadas. Röder *et al.* (2018) evaluaron el efecto de aplicaciones foliares de melaza de caña de azúcar fermentada por la bacteria *Corynebacterium glutamicum*, que contenía 30% (p/v) de ácido L-glutámico en papa (*Solanum tuberosum*) cultivada orgánicamente. Estos autores también encontraron un aumento en el contenido de clorofila en las hojas de papa a los 50 días después del trasplante. El ácido glutámico desempeña una función clave en la eficiencia del metabolismo del nitrógeno. Es el primer compuesto producido en la asimilación de este elemento, formando glutamina y asparagina, y a partir de éstas, el transporte de nitrógeno a los diferentes órganos de la planta, también para su uso en la síntesis de clorofila y aminoácidos (Forde y Lea, 2007). Noroozlo *et al.* (2019b) evaluaron la aplicación foliar de glicina o glutamina a diferentes concentraciones 0 (control), 250, 500 y 1000 mg L<sup>-1</sup> en el desarrollo y absorción nutrimental de plantas de lechuga romana (*Lactuca sativa* subvar Sahara) en condiciones de invernadero. Sus resultados mostraron un incremento significativo en el contenido de clorofila con la

aplicación de 250 mg L<sup>-1</sup> de glicina y 1000 mg L<sup>-1</sup> de glutamina. Los aminoácidos probablemente actúan contra la oxidación, peroxidación y degradación de los componentes celulares, particularmente de la clorofila y, por lo tanto, aumentan la vida útil de la célula (Noroozlo *et al.*, 2019b).

Un incremento en la biomasa y en el rendimiento de otros cultivos como consecuencia de la aplicación foliar de aminoácidos ya ha sido reportado (e.g. Basanth y Mahesh, 2018; Souri *et al.*, 2017). En este estudio la aplicación foliar de 6.0 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico incrementó el R, el PFF y la MSF en plantas de tomate de 167 días después del trasplante. Es posible que el PFF y la MSF en plantas de tomate aumentara debido a la disponibilidad del glutamato que generó su aplicación vía foliar y posteriormente haya enviado los carbohidratos directamente al fruto en lugar de utilizarlos para la producción de glutamato (Serna-Rodríguez *et al.*, 2011). Otra probable explicación es que el incremento en la biomasa y el rendimiento de las plantas de tomate promovido por la aplicación foliar de ácido glutámico posiblemente se deba a una mayor biosíntesis de proteínas y de clorofila, así como a un aumento en la tasa fotosintética (Khan *et al.*, 2012; Souri y Hatamian, 2019).

Investigaciones previas también han indicado un incremento en el PFF y el peso seco del fruto en plantas de tomate de 158 días de edad con la aplicación de 1.25, 2.50 y 5.00 g·L<sup>-1</sup> de ácido glutámico (Serna-Rodríguez *et al.*, 2011).

Similarmente, Noroozlo *et al.* (2019b) reportaron que el peso seco y fresco de los tallos de lechuga romana (*Lactuca sativa* subvar Sahara) aumentó con la aplicación de 500 mg L<sup>-1</sup> de glicina en condiciones de invernadero. Amin *et al.* (2011) mostraron que la aplicación foliar de 200 mg L<sup>-1</sup> de glutamina incrementó significativamente el peso fresco y seco de plantas de cebolla (*Allium cepa* L. cv. 'Giza 20'), así como el rendimiento, longitud, diámetro y calidad de los bulbos. De manera similar, en plantas de ajo (*Allium sativum* L.), tres aplicaciones foliares del producto comercial "Amino Total" incrementaron significativamente la AP, el número de hojas por planta y el rendimiento comercial de los bulbos (Shalaby y El-Ramady 2014). En el trabajo de Popko *et al.* (2018) se encontró que en los experimentos en campo el rendimiento de grano del trigo aumentó con la aplicación de productos comerciales basados en aminoácidos, 5.4% con la aplicación de AminoPrim y 11.0% con AminoHort en

comparación con las plantas control. Ariza-Flores *et al.* (2015) encontraron que la aplicación foliar de 0.45 kg ha<sup>-1</sup> de ácido glutámico en lima mexicana (*Citrus aurantifolia* Christm Swingle) incrementó el rendimiento en comparación con plantas control.

La glutamina sintetasa es una enzima involucrada en la asimilación de N por las plantas. Esta enzima participa en la primera etapa de asimilación del NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, el cual es responsable de la síntesis de glutamina (Zhang *et al.*, 2017). La aplicación de 1.5 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico aumentó la actividad de GS. Resultados con valores superiores fueron reportados por Serna-Rodríguez *et al.* (2011) quienes encontraron que la actividad de la GS fue mayor en plantas de tomate de 158 días de edad que recibieron 5 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico en comparación con las plantas control. Cao *et al.* (2010) también encontraron que la AGS incrementó en plantas de cebollino chino (*Allium tuberosum* Rottler Spreng) que fueron tratadas con 5 mmol L<sup>-1</sup> (0.735 g L<sup>-1</sup>) de ácido glutámico respecto a las plantas control. Yu *et al.* (2010) encontraron un resultado similar respecto al incremento de la AGS en espino (*Crataegus pinnatifida* Bge.) con la aplicación de 0.4 g L<sup>-1</sup> y 0.8 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico en comparación con las plantas control.

La aplicación foliar de ácido glutámico favoreció algunos atributos de la calidad física y química del fruto de tomate como el DEF, PFF, MSF, SST y PHF. Ariza-Flores *et al.* (2015) encontraron que la aplicación foliar de 0.45 kg ha<sup>-1</sup> de ácido glutámico en lima mexicana (*Citrus aurantifolia* Christm Swingle) incrementó el DEF en comparación con plantas control, pero no observaron un efecto positivo en la acidez del jugo ni en el contenido de SST.

De manera similar a lo encontrado en esta investigación, Khan *et al.* (2012) establecieron que con tres aplicaciones foliares de 0.5 mL L<sup>-1</sup> del producto “L<sup>-1</sup> Primo” a base de aminoácidos y extracto de algas en uva (*Vitis vinifera* L.) incrementó el pH del jugo y el contenido de SST. Los resultados de Abd El-Aal *et al.* (2010) también mostraron un incremento en el contenido de SST con tres aplicaciones foliares de 1000 ppm del producto comercial “Aminovit Plus” que contiene (55 g 100 cm<sup>-3</sup>) de ácido glutámico en plantas de calabaza (*Cucurbita pepo* L.) en comparación con las plantas control.

Los resultados obtenidos muestran que la aplicación foliar de una concentración moderada, en este caso, 6.0 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico fue la que mejor promovió el contenido relativo de clorofila foliar, algunos parámetros de la calidad física y química del fruto, así como el rendimiento en plantas de tomate de 167 días después del trasplante. Las otras dos concentraciones evaluadas (1.5 y 12.0 g L<sup>-1</sup>) fueron demasiado bajas que no tuvieron efecto, o demasiado altas y pudieron haber sido una fuente de estrés para la planta. La concentración óptima requerida es esencial para el óptimo desarrollo y crecimiento de la planta (Khan *et al.*, 2019). En este sentido, estudios previos sugieren que los niveles óptimos de varios aminoácidos pueden depender de la especie o del genotipo, lo cual se debe determinar antes de recomendar su uso (El-sharabasy *et al.*, 2015).

## VIII. CONCLUSIONES

El contenido relativo de clorofila foliar en plantas de tomate con 167 días después del trasplante incrementó 8.9% con la aplicación foliar de 6.0 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico y 6.0% con 12.0 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico. El diámetro ecuatorial del fruto incrementó 4.1%, el rendimiento 27.4%, el peso fresco del fruto 10.3% y la materia seca del fruto 16.9% con la concentración de 6.0 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico. El pH del fruto aumentó 5.3% con 1.5 g L<sup>-1</sup> de ácido glutámico. Con la aplicación exógena de ácido glutámico se obtuvieron resultados satisfactorios en contenido relativo de clorofila foliar, rendimiento y algunos atributos de la calidad física y química del fruto de tomate.

## IX LITERATURA CITADA

- Abd El-Aal F S, Shaheen A M, Ahmed A A, Mahmoud A R. 2010. Effect of foliar application of urea and amino acids mixtures as antioxidants on growth, yield and characteristics of squash. *Res J Agric Biol Sci.* **6**:583-588.
- Adams P. 2004. Aspectos de la nutrición mineral en cultivos sin suelo en relación al suelo en Tratado de Cultivo sin Suelo, ed. por Urrestarazu GM. Editorial Mundi-Prensa, Madrid, España, pp: 81–111.
- Alcántar G G, Sandoval V M. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal: guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación, Publicación Especial 10, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, México.
- Alvarez-Rodríguez A, Campo-Costa A, Batista-Ricardo E, Morales-Miranda A. 2015. Evaluación del efecto del bionutriente Fitomas-E como alternativa ecológica en el cultivo del tomate. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar.* **49**:3-9.
- Amin A A, Gharib F A E, El-Awadi M, Rashad E S M. 2011. Physiological response of onion plants to foliar application of putrescine and glutamine. *Sci Hortic.* **129**:353-360. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.03.052>
- Anjanappa M, Jayaramana-Gowda G S, Suresh-Kumara B. 2013. Shelf life and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) as influenced by 1-methylcyclopropene (MCP) under cold storage conditions. *Mysore J Agric Sci.* **47**:58-65.
- Arabloo M, Taheri M, Yazdani H, Shahmoradi M. 2017. Effect of foliar application of amino acid and calcium chelate on some quality and quantity of Golden Delicious and Granny Smith apples. *Trakia J Sci.* **15**:14-19. <https://doi.org/10.15547/tjs.2017.01.003>
- Ariza-Flores R, Barrios-Ayala A, Herrera-García M, Barbosa-Moreno F, Michel-Aceves A, Otero-Sánchez M A, Alía-Tejagal I. 2015. Fitohormonas y bioestimulantes para la floración, producción y calidad de lima mexicana de invierno. *Rev Mex Cienc Agric.* **6**:1653-1666.

- Arjona H D, Herrera J E, Gómez J A, Ospina J. 2004. Evaluation of the application of urea, molasses and amino acids on growth and yield of onion plants (*Allium cepa* L. Group cepa) in the Bogotá Savanna. *Agron Colomb*. **22**:177-184.
- Aslani M, Souri M K. 2018. Growth and quality of green bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under foliar application of organic-chelate fertilizers. *Open Agric*. **3**:146-154. <https://doi.org/10.1515/opag-2018-0015>
- Azcón-Bieto J, Talon M. 2008. Fundamentos de fisiología vegetal, 2a ed. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- Baldwin E A, Goodner K, Plotto A. 2008. Interaction of volatiles, sugars and acids on perception of tomato aroma and flavor descriptors. *J Food Sci*. **73**: 294-307.
- Basanth N, Mahesh G. 2018. Bioefficacy of Nova Nutri Boost for yield and yield components in paddy (*Oryza sativa* L.). *Int J Curr Microbiol Appl Sci*. **7**:2250-2253. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.710.259>
- Beale S I, Gough S P, Granick S. 1975. Biosynthesis of  $\delta$ -aminolevulinic acid from the intact carbon skeleton of glutamic acid in greening barley. *Proc Natl Acad Sci USA*. **72**:2719-2723. <https://doi.org/10.1073/pnas.72.7.2719>
- Bidwell R G S. 1993. Fisiología Vegetal, 1a ed. AGT Editor, México D.F.
- Boras M, Zidan R, Halloum W. 2011. Effect of amino acids on growth, production and quality of tomato in plastic greenhouses. *Biol Sci Ser*. **33**:229-238.
- Brandt S, Pék Z, Barna É, Lugasi A, Helyes L. 2006. Lycopene content and colour of ripening tomatoes as affected by environmental conditions. *J Sci Food Agric*. **86**:568-572. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2390>
- Calvo P, Nelson L, Kloeppel J W. 2014. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil*. **383**:3-41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
- Cao J X, Peng Z P, Huang J C, Yu J H, Li W N, Yang L X, Lin Z J. 2010. Effect of foliar application of amino acid on yield and quality of flowering chinese cabbage. *Chin Agric Sci Bull*. **26**:162-165.
- Cao Y P, Gao Z K, Li J T, Xu G H, Wang M. 2010. Effects of extraneous glutamic acid on nitrate contents and quality of Chinese chive. *Acta Horti*. **856**:91-98. <https://doi.org/10.17660/ActaHorti.2010.856.11>

- Castellanos R J Z. 2009. Manual de Producción de Tomate en Invernadero. OCMA Soluciones Impresas. Celaya, Gto, México.
- Cebula S, Kalisz A. 1996. Effect of the degree of fruit harvest maturity and partial defoliation on the growth, yields, and quality of sweet pepper in greenhouse production. *Biul Warzywn.* **44**:15-27.
- Cooper H D, Clarkson D T. 1989. Cycling of amino-nitrogen and other nutrients between shoots and roots in cereals. A possible mechanism integrating shoot and root in the regulation of nutrient uptake. *J Exp Bot.* **40**:753-762.
- Cox M M, Nelson D L. 2006. Lehninger Principios de Bioquímica 4a ed. Omega. España.
- Cruz C E, Can C Á, Loera R L J, Aguilar B G, Pineda P J, Bugarín M R. 2017. Extracción de N-P-K en *Coriandrum sativum* 'Pakistan' en hidroponia. *Rev Mex Cienc Agríc.* **8**:355- 367.
- Da Cunha A R, Katz I, de Pádua S A, Martínez U R A. 2015. Índice SPAD en el crecimiento y desarrollo de plantas de lisanthus en función de diferentes dosis de nitrógeno en ambiente protegido. *Idesia (Arica).* **33**:2 97-105.
- Dahab T A M A, Abd El-Aziz N G. 2006. Physiological effect of diphenylamine and tryptophan on the growth and chemical constituents of *Philodendron erubescens* plants. *World J Agric Sci.* **2**:75-81.
- Davies P J. 2010. The plant hormones: their nature, occurrence, and functions. In Davies P J (ed.) Plant hormones. Springer, Dordrecht. pp. 1-15. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2686-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2686-7_1)
- Dehnavard S, Souri M K, Mardanlu S. 2017. Tomato growth responses to foliar application of ammonium sulfate in hydroponic culture. *J Plant Nutr.* **40**:315-323. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1240191>
- El-Sharabasy S, Issa F, Hammad G, El-Dawayaty M. 2015. Effect of different amino acids at different concentrations on multiplication and rooting stage of in vitro propagation of strawberries (*Fragaria x Ananassa* Duch cv. Chandler). *Egypt J Genet Cytol.* **44**:31-45.

- FAOSTAT. 2020. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Statistics Division. Disponible en línea <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (verificado el 5 de febrero de 2020)
- Fayek M A, Yehia T A, El-Fakhrany E M M, Farag A M. 2011. Effect of ringing and amino acids application on improving fruiting of Le Conte Pear trees. *J Horti Sci Ornam Plants*. **3**:01-10.
- FIRA. 2019. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. Panorama Agroalimentario. Dirección de investigación y Evaluación económica y sectorial. Tomate Rojo 2019. FIRA Banco de México. México.
- Fischer W N, André B, Rentsch D, Krolkiewicz S, Tegeder M, Breitzkreuz K, Frommer W B. 1998. Amino acid transport in plants. *Trends Plant Sci*. **3**:188-195. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(98\)01231-X](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01231-X)
- Flores-Hernández L A, Lobato-Ortiz R, García-Zavala J J, Molina-Galán J D, Sargerman-Jarquín D M, Velasco-Alvarado M D J. 2017. Parientes silvestres del tomate como fuente de germoplasma para el mejoramiento genético de la especie. *Rev Fitotec Mex*. **40**:83-91.
- Forde B G, Lea P J. 2007. Glutamate in plants: metabolism, regulation, and signaling. *J Exp Bot*. **58**:2339-2358. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm121>
- Fox R H, Walthall C L. 2008. Crop monitoring technologies to assess nitrogen status, *In Nitrogen in Agricultural Systems*, Agronomy Monograph No. 49 (Schepers J S, Raun W R. Eds.). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 647-674.
- Garcia A L, Madrid R, Gimeno V, Rodriguez-Ortega W M, Nicolas N, Garcia-Sanchez F. 2011. The effects of amino acids fertilization incorporated to the nutrient solution on mineral composition and growth in tomato seedlings. *Span J Agric Res*. **9**:852-861. <https://doi.org/10.5424/sjar/20110903-399-10>
- Hendriksen G H, Spanswick R M. 1993. Investigation of the apparent induction of nitrate uptake in barley (*Hordeum vulgare* L.) using NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-selective microelectrodes. *Plant Physiol*. **103**:885-892.

- Ibrahim S M M, Taha L S, Farahat M M. 2010. Influence of foliar application of pepton on growth, flowering and chemical composition of *Helichrysum bracteatum* plants under different irrigation intervals. *Ozean J Appl Sci.* **3**:143-155.
- Ilie A V, Petrisor C, Hoza D. 2017. Influence of foliar application of amino acids to yield and quality attributes of apple. *J Hortic Forest Biotechnol.* **21**:104-107.
- INAFED. 2019. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México, Estado de Oaxaca. Disponible en línea <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM20oaxaca/municipios/20310a.html> (verificado el 5 de agosto de 2019)
- Infante G S, Zárate L G P. 1990. Métodos estadísticos: Un enfoque interdisciplinario, 2a ed. Trillas, México.
- Jones J B. 2005. The plant root: its roles and functions. *In Hydroponics: A Practical Guide for the Soilles Grower*, ed. by Jones JB. CRS PRESS, USA, pp: 19-28.
- Kader A A. 2002. Fruits in the global market. *In Knee M (ed.) Fruit quality and its biological basis.* Sheffield Academic Press, UK. pp. 1-16.
- Kader A A. 2008. Flavor quality of fruits and vegetables. *J Sci Food Agric.* **88**: 1863-1868. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3293>
- Kan C C, Chung T Y, Wu H Y, Juo Y A, Hsieh M H. 2017. Exogenous glutamate rapidly induces the expression of genes involved in metabolism and defense responses in rice roots. *BMC Genom.* **18**:186-202. <https://doi.org/10.1186/s12864-017-3588-7>
- Khan A S, Ahmad B, Jaskani M J, Ahmad R, Malik A U. 2012. Foliar application of mixture of amino acids and seaweed (*Ascophylum nodosum*) extract improve growth and physicochemical properties of grapes. *Int J Agric Biol.* **14**:383-388.
- Khan S, Yu H, Li Q, Gao Y, Sallam B N, Wang H, Liu P, Jiang W. 2019. Exogenous application of amino acids improves the growth and yield of lettuce by enhancing photosynthetic assimilation and nutrient availability. *Agronomy.* **9**:266-282. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050266>

- Kichey T, Hirel B, Heumez E, Dubois F, Le Gouis J. 2007. In winter wheat (*Triticum aestivum* L.), post-anthesis nitrogen uptake and remobilisation to the grain correlates with agronomic traits and nitrogen physiological markers. *Field Crops Res.* **102**:22–32. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.01.002>
- Köksal A İ, Dumanoğlu H, Güneş N T, Aktaş M. 1999. The effect of different amino acid chelate foliar fertilizers on yield, fruit quality, shoot growth and Fe, Zn, Cu, Mn content of leaves in Williams pear cultivar (*Pyrus communis* L.). *Turk J Agric For.* **23**:651-658.
- Kováčik J, Bačkor M. 2007. Changes of phenolic metabolism and oxidative status in nitrogen-deficient *Matricaria chamomilla* plants. *Plant soil* **297**:255-265.
- Lea P J, Blackwell R D, Chen F-L and Hecht U.1990. Enzymes of ammonia assimilation. *In* Methods in Plant Biochemistry (Lea PJ, Ed.), Academic Press, pp. 257-277.
- Lieth J H and Oki L R. 2008. Irrigation in soilless production. *In* Soilless Culture: Theory and Practice, ed. by Raviv M and Lieth J H, Elsevier, USA, pp: 117-156.
- Liu X Q, Ko K Y, Kim S H, Lee K S. 2008. Effect of amino acid fertilization on nitrate assimilation of leafy radish and soil chemical properties in high nitrate soil. *Commun Soil Sci Plant Anal.* **39**:269-281. <https://doi.org/10.1080/00103620701759301>
- Llorca O, Betti M, Gonzalez J, Valencia A, Marquez A, Valpuesta J. 2006. The three-dimensional structure of an eukariotic glutamine synthetase: functional implications of its oligomeric structure. *J Struct Biol.* **156**:469-479
- López-Martínez J D, Vázquez-Díaz D A, Esparza-Rivera J R, García-Hernández J L, Castruita-Segura M A, Preciado-Rangel P. 2016. Yield and nutraceutical quality of tomato fruit produced with nutrient solutions prepared using organic materials. *Rev Fitotec Mex.* **39**:409-414.
- Marek S S, Tremblay N, Fallon E. 2009. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. *Agron J.* **101**: 800-816.

- Mohammadipour N, Souri M K. 2019a. Beneficial effects of glycine on growth and leaf nutrient concentrations of coriander (*Coriandrum sativum*) plants. *J Plant Nutr.* **42**:1637-1644. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1628985>
- Mohammadipour N, Souri M K. 2019b. Effects of different levels of glycine in the nutrient solution on the growth, nutrient composition and antioxidant activity of coriander (*Coriandrum sativum* L.). *Acta Agrobot.* **72**:1759-1767. <https://doi.org/10.5586/aa.1759>
- Molina-Romero D, Bustillos-Cristales M D R, Rodríguez-Andrade O, Morales-García Y E, Santiago-Saenz Y, Castañeda-Lucio M, Muñoz-Rojas J. 2015. Mecanismos de fitoestimulación por rizobacterias, aislamientos en América y potencial biotecnológico. *Rev DES Cienc Biolo Agropecu* **17**:24-34.
- Montano R, Zuaznabar, R, García A, Viñals M, Villar J. 2007. Fitomas E: Bionutriente derivado de la industria azucarera. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar.* **41**: 14-21.
- Moreno V D, Hernández H B N, Barrios D J M, Ibáñez M A, Cruz R W, Berdeja A R. 2015. Calidad poscosecha de frutos de pepino cultivados con diferente solución nutritiva. *Rev Mex Cienc Agríc.* **6**:637-643.
- Noroozlo Y A, Souri M K, Delshad M. 2019a. Effects of foliar application of glycine and glutamine amino acids on growth and quality of sweet basil. *Commun Soil Sci Plant Anal.* **50**:2864–2872. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1689249>
- Noroozlo Y A, Souri M K, Delshad M. 2019b. Stimulation effects of foliar applied glycine and glutamine amino acids on lettuce growth. *Open Agric.* **4**:164-172. <https://doi.org/10.1515/opag-2019-0016>
- Oaks A. 1994. Primary nitrogen assimilation in higher plants and its regulation. Review-Synthese. *Can. J. Bot.* **72**: 739-750.
- Ospina M, Cartagena V. 2008. La atmósfera modificada: una alternativa para la conservación de los alimentos. *Rev Lasallista Investig.* **5**:112-123.
- Padilla F M, de Souza R, Peña-Fleitas M T, Gallardo M, Giménez C, Thompson R B. 2018. Different responses of various chlorophyll meters to increasing nitrogen supply in sweet pepper. *Front Plant Sci.* **9**:1752.

- Papadopoulos T. 2004. "Manejo del ambiente y los factores nutricionales para la producción de tomate de alta calidad en invernaderos". In *Memorias del Congreso Internacional de Hidroponía 2004*. Universidad Autónoma de Chihuahua, Chih, México.
- Parra-Gómez M A, Lobato-Ortiz R, García-Zavala J J, Reyes-López D, Velasco-Alvarado M J. 2016. Evaluación de líneas de una cruce interespecífica de tomate. *Rev Fitotec Mex.* **39**:59-65.
- Parry C, Blonquist J M, Bugbee B. 2014. In situ measurement of leaf chlorophyll concentration: analysis of the optical/absolute relationship. *Plant Cell Environ.* **37**: 2508–2520.
- Popko M, Michalak I, Wilk R, Gramza M, Chojnacka K, Górecki H. 2018. Effect of the new plant growth biostimulants based on amino acids on yield and grain quality of winter wheat. *Molecules.* **23**:470-482. <https://doi.org/10.3390/molecules23020470>
- Preciado R P, Fortis H M, García-Hernández J L, Rueda P E, Esparza R J R, Lara H A, Segura C M A, Orozco V J. 2011. Evaluación de soluciones nutritivas orgánicas en la producción de tomate en invernadero. *Interciencia.* **36**:689-693.
- Quintana-Baquero R A, Balaguera-López H E, Álvarez-Herrera J G, Cárdenas-Hernández J F, Pinzón E H. 2012. Efecto del número de racimos por planta sobre el rendimiento de tomate (*Solanum Lycopersicum* L.). *Rev Colomb Cienc Hortic.* **4**: 185-98.
- Röder C, Mógor Á F, Szilagyi-Zecchin V J, Gemin L G, Mógor G. 2018. Potato yield and metabolic changes by use of biofertilizer containing L-glutamic acid. *Comun Sci.* **9**:211-218. <https://doi.org/10.14295/cs.v9i2.2564>
- Rouphael Y, Kyriacou M C, Petropoulos S A, De Pascale S, Colla G. 2018. Improving vegetable quality in controlled environments. *Sci Hortic.* **234**:275-289. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.033>
- Sebastian A, Prasad M N V. 2014. Vertisol prevent cadmium accumulation in rice: Analysis by ecophysiological toxicity markers. *Chemosphere.* **108**:85-92. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.02.077>

- Serna-Rodríguez J R, Castro-Brindis R, Colinas-León M T, Sahagún-Castellanos J, Rodríguez-Pérez J E. 2011. Aplicación foliar de ácido glutámico en plantas de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Rev Chapingo Ser Hortic*. **17**:9-13.
- Shalaby T A, El-Ramady H. 2014. Effect of foliar application of bio-stimulants on growth, yield, components, and storability of garlic (*Allium sativum* L.). *Aust J Crop Sci*. **8**:271-275.
- Shanahan J F, Kitchen N R, Raun W R, Schepers J S. 2008. Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Comput Electron Agric*. **61**: 51-62.
- SIAP. 2021. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Disponible en línea <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (verificado el 18 de enero de 2021)
- Singh R, Parihar P, Prasad S M. 2018. Sulfur and calcium simultaneously regulate photosynthetic performance and nitrogen metabolism status in as-challenged *Brassica juncea* L. seedlings. *Front Plant Sci*. **9**:1-18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00772>
- Sonneveled C, Voogt W. 2009. Substrates: Chemical characteristics and preparation. *In Plant Nutrition of Greenhouse Crops*, ed. by Sonnevled C and Voogt W, Springer, Dordrecht, pp: 227-252.
- Souri M K, Bakhtiarizade M. 2019. Biostimulation effects of rosemary essential oil on growth and nutrient uptake of tomato seedlings. *Sci Hortic*. **243**:472-476. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.056>
- Souri M K, Dehnavard S. 2018. Tomato plant growth, leaf nutrient concentrations and fruit quality under nitrogen foliar applications. *Adv Hortic Sci*. **32**:41-47. <https://doi.org/10.13128/ahs-21894>
- Souri M K, Hatamian M. 2019. Aminochelates in plant nutrition: a review. *J Plant Nutr*. **42**:67-78. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1549671>
- Souri M K, Sooraki F Y, Moghadamyar M. 2017. Growth and quality of cucumber, tomato, and green bean under foliar and soil applications of an aminochelate fertilizer. *Hortic Environ Biotechnol*. **58**:530-536. <https://doi.org/10.1007/s13580-017-0349-0>

- Souri M K, Sooraki F Y. 2019. Benefits of organic fertilizers spray on growth quality of chili pepper seedlings under cool temperature. *J Plant Nutr.* **42**:650-656. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1568461>
- Souri M K. 2016. Aminochelate fertilizers: the new approach to the old problem; a review. *Open Agric.* **1**:118-123. <https://doi.org/10.1515/opag-2016-0016>
- Steiner A A. 1984. The Universal Nutrient Solution. *In* International Society for Soilless Culture (eds.) Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands. pp. 633-650.
- Suárez O, Hurtado-Salazar A, Ceballos-Aguirre N. 2017. Número de racimos y la sostenibilidad económica del tomate bajo condiciones semicontroladas. *Temas Agrarios* **23**: 55–61.
- Taiz L, Zeiger E. 2006. Plant Physiology. 4th ed. Sinauer Associates, Sunderland, USA.
- Takeuchi M, Arakawa C, Kuwahara Y, Gemma H. 2008. Effects of L-proline foliar application on the quality of 'Kosui' Japanese pear. *Acta Hortic.* **800**:549-554. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.800.72>
- Turhan A, Şeniz V. 2009. Estimation of certain chemical constituents of fruits of selected tomato genotypes grown in Turkey. *Afr J Agric Res.* **4**:1086-1092.
- Urrestarazu M. 2004. Tratado de cultivo sin suelo. 3a ed. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Almería. Mundi-Prensa, España.
- Urrieta-Velázquez J A, Rodríguez-Mendoza M D L N, Ramírez-Vallejo P, Baca-Castillo G A, Ruiz-Posada L D M y Cueto-Wong J A. 2012. Variables de producción y calidad de tres selecciones de jitomate de costilla (*Solanum lycopersicum* L.). *Rev Chapingo Ser Hortic.* **18**: 371-381.
- Warner R, Kleinhofs A. 1992. Genetics and molecular biology of nitrate metabolism in higher plants. *Physiol Plant* **85**: 245-252.
- Yu C, Lv D G, Qin S J, Yang L, Ma H Y, Liu G C. 2010. Changes in photosynthesis, fluorescence, and nitrogen metabolism of hawthorn (*Crataegus pinnatifida*) in response to exogenous glutamic acid. *Photosynthetica.* **48**:339-347. <https://doi.org/10.1007/s11099-010-0044-1>

- Zhang J, Blackmer A M, Blackmer T M. 2008. Differences in physiological age affect diagnosis of nitrogen deficiencies in cornfields. *Pedosphere*. **18**:545-553. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(08\)60048-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(08)60048-X)
- Zhang S, Hu F, Li H, Li X. 2009. Influence of earthworm mucus and amino acids on tomato seedling growth and cadmium accumulation. *Environ Pollut*. **157**:2737-2742. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.04.027>
- Zhang Z, Xiong S, Wei Y, Meng X, Wang X, Ma X. 2017. The role of glutamine synthetase isozymes in enhancing nitrogen use efficiency of N-efficient winter wheat. *Sci Rep*. **7**:1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01071-1>