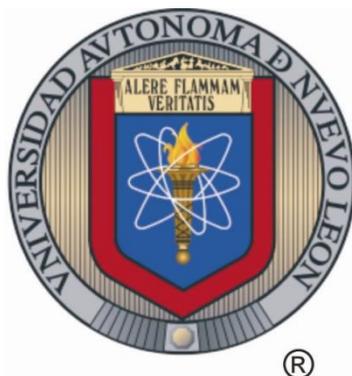


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**TESIS**

**EFFECTO DEL INJERTO SOBRE LA NUTRICIÓN Y FOTOSÍNTESIS DE  
TOMATE (*Lycopersicon esculentum Mill*) BAJO CONDICIONES DE  
INVERNADERO**

**PRESENTA**

**ERNESTO ALONSO CONTRERAS SALAZAR**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**Escobedo, N.L.**

**Enero de 2014**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**TESIS**

**EFFECTO DEL INJERTO SOBRE LA NUTRICIÓN Y FOTOSÍNTESIS DE  
TOMATE (*Lycopersicon esculentum Mill*) BAJO CONDICIONES DE  
INVERNADERO**

PRESENTA

**ERNESTO ALONSO CONTRERAS SALAZAR**

PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**Escobedo, N.L.**

**Enero de 2014**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**TESIS**

**EFFECTO DEL INJERTO SOBRE LA NUTRICIÓN Y FOTOSÍNTESIS DE  
TOMATE (*Lycopersicon esculentum Mill*) BAJO CONDICIONES DE  
INVERNADERO**

PRESENTA

**ERNESTO ALONSO CONTRERAS SALAZAR**

PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

Escobedo, N.L.

Enero de 2014

ESTA TESIS FUE REVISADA Y APROBADA POR EL COMITÉ PARTICULAR  
COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

COMITÉ PARTICULAR

---

Ph. D. Emilio Olivares Sáenz  
DIRECTOR

---

Ph. D. Rigoberto E. Vázquez Alvarado  
CO-DIRECTOR

---

Dr. Roberto Carranza de la Rosa  
ASESOR

---

Ph. D. Francisco Zavala García  
ASESOR

---

Ph. D. Ciro G. S. Valdés Lozano  
ASESOR

---

Ph. D. Rigoberto Vázquez Alvarado  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

## DEDICATORIA

A Jesucristo, porque Él es la imagen del Dios invisible y por Él fueron creadas todas las cosas, las que hay en los cielos y las que hay en la tierra, visibles e invisibles...

A mis padres, Bernardo Salazar Sánchez y Armida Contreras Arias por brindarme la oportunidad de ser.

A mi amada Esposa Beatriz Eugenia Téllez Yáñez por su gran amor, sacrificio, apoyo incondicional, paciencia y ejemplo de profesionalismo.

A mis hijos, Ernesto Alonso, Ernesto y Emilio Alonso por sus vidas.

A mis hermanos, Roberto, María de los Ángeles, Joel, Bernardo, Sergio, Jorge, Julio, Eunice, Guadalupe, Emma, Hugo y Gerardo

A mis compañeros de generación y maestros.

## **AGRADECIMIENTO**

Al Instituto Tecnológico de Culiacán (ITC) Por las facilidades otorgadas para la realización de esta meta.

A la SECRETARIA DE EDUCACIÓN PÚBLICA (SEP) a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y del Programa de Mejoramiento de Profesores (PROMEP) por brindarme el apoyo económico para la realización de los Estudios Doctorales.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) Por la oportunidad y apoyo recibido para esta etapa formativa.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ph. D. Emilio Olivares Sáenz, Dr. Roberto Carranza de la Rosa, Ph. D. Rigoberto Vázquez Alvarado, Ph. D. Ciro G. S. Valdés Lozano y Ph. D. Francisco Zavala García por formar parte del Comité de Tesis, así como por sus valiosas sugerencias y consejos, en la revisión del presente trabajo.

Al equipo de trabajo del Proyecto Invernaderos de la FAUANL por apoyarme y brindarme las facilidades pertinentes necesarias para sacar adelante y concluir el presente trabajo.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	iv
ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	xi
SUMMARY .....	xiii
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Hipótesis .....	6
1.2 Objetivo General .....	7
1.3 Objetivos Específicos .....	7
2. LITERATURA REVISADA.....	8
2.1 El tomate: aspectos generales .....	8
2.2 Propiedades del fruto de tomate.....	9
2.3 El cultivo de tomate en el mundo y en México .....	9
2.4 Agricultura protegida .....	11
2.4.1 Cultivos protegidos vs. cultivos a cielo abierto.....	11
2.4.2 El cultivo de invernaderos en el mundo .....	12
2.4.3 El cultivo en invernadero en México .....	12
2.5 El injerto.....	14
2.5.1 Importancia del injerto .....	14
2.5.2 El injerto en hortalizas .....	15
2.5.3 Definición y características del patrón .....	17
2.5.4 Fisiología del injerto .....	18
2.5.5 Factores que inciden en la unión del injerto.....	19
2.5.6 Incompatibilidad e interacción patrón*variedad .....	20
2.5.7 Tipos de injerto en hortalizas.....	23
2.5.8 El injerto y la absorción de nutrimentos .....	24

2.5.9	El injerto y la fotosíntesis.....	28
2.6	Generalidades de la fotosíntesis .....	30
2.6.2	Factores que influyen en la eficiencia fotosintética.....	33
2.7	Nutrición.....	39
2.7.1	Generalidades.....	39
2.7.2	Absorción del agua.....	40
2.7.3	Absorción de nutrimentos minerales en la planta .....	41
2.7.4	Elementos esenciales.....	42
3.	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>46</b>
3.1	Localidad, clima, suelo y agua.....	46
3.2	Clima.....	46
3.3	Suelo y agua .....	47
3.4	Tratamientos y diseño experimental .....	47
3.5	Establecimiento del experimento.....	49
3.5.1	Preparación del suelo.....	49
3.5.2	Preparación de plántulas e injerto .....	49
3.5.3	Trasplante .....	49
3.5.4	Polinización .....	51
3.5.5	Entutorado.....	51
3.5.6	Desbrote.....	52
3.5.7	Deshoje.....	53
3.5.8	Raleo de frutos.....	53
3.5.9	Control de plagas y enfermedades.....	54
3.5.10	Riego y fertilización .....	54
3.6	Análisis foliar .....	55
3.7	Análisis de fotosíntesis.....	55
3.8	Análisis económico de los tratamientos.....	59
3.9	Análisis de correlación fotosíntesis, transpiración y conductancia .....	59
3.10	Variables .....	59

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
4.1	Resultados y discusión sobre rendimiento en peso fresco del fruto.....	60
4.1.1	Efecto principal e interacciones factor variedades .....	60
4.1.2	Efecto principal e interacciones factor conducción de tallos .....	61
4.1.3	Efecto principal e interacciones factor injerto.....	62
4.1.4	Análisis económico (pesos México) sobre el rendimiento en peso fresco.....	63
4.2	Resultados y discusión concentración de nutrimentos en el tejido foliar .....	65
4.2.1	Concentración de nitrógeno (N) en el tejido foliar .....	65
4.2.2	Concentración de fósforo (P) en el tejido foliar .....	67
4.2.3	Concentraciones de calcio (Ca) y potasio (K) en el tejido foliar .....	69
4.2.4	Concentraciones de cobre, hierro, zinc y manganeso en el tejido foliar.....	70
4.3	Resultados y discusión sobre actividad fotosintética .....	72
4.3.1	Fotosíntesis (a) interacción injerto*tallo .....	72
4.3.2	Fotosíntesis (a) interacción variedad*tallo .....	74
4.3.3	Conductancia estomática (Gs) interacción injerto*tallo .....	75
4.3.4	Transpiración (E) interacción injerto*tallo .....	78
4.3.5	Transpiración (E) interacción tallo*variedad .....	80
4.3.6	Correlación entre A, Gs y E .....	79
5.	CONCLUSIONES.....	83
6.	BIBLIOGRAFÍA .....	84

## ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO		PÁGINA
1	Principales funciones de los macronutrientes y micronutrientes en las plantas.....	43
2	Temperatura y humedad relativa máxima, mínima y promedio dentro del invernadero durante período en que se llevó a cabo la investigación.....	47
3	Material vegetal: patrón y variedades.....	48
4	Descripción de factores y niveles.....	48
5	Descripción de los tratamientos.....	48
6	Análisis de varianza para rendimiento en peso fresco.....	59
7	Comparación de medias del rendimiento en peso fresco (kg) en plantas conducidas a uno y dos tallos.....	60
8	Comparación de medias del rendimiento en peso fresco de plantas injertadas, autoinjertadas y sin injerto.....	61
9	Parámetros de cálculo de la utilidad bruta $ha^{-1}$ (pesos México).....	63
10	Cálculos de la utilidad bruta $ha^{-1}$ (pesos México) de cultivar plantas conducidas a un tallo, a dos tallos, injertadas, no injertadas y sus combinaciones.....	63
11	Análisis de varianza concentración foliar de N.....	65
12	Comparación de medias de la concentración foliar de N en las variedades.....	65
13	Comparación de medias de la concentración foliar de N en los niveles del factor injerto.....	66
14	Análisis de varianza concentración foliar de P.....	67

15	Comparación de medias de la concentración foliar de P en los niveles de conducción a uno y dos tallos.....	68
16	Comparación de medias de la concentración foliar de P en los niveles del factor injerto.....	68
17	Análisis de varianza concentración foliar de Ca.....	69
18	Análisis de varianza concentración foliar de K.....	69
19	Concentraciones foliares de los macronutrientes: K y Ca.....	69
20	Análisis de varianza concentración foliar de Cu.....	70
21	Análisis de varianza concentración foliar de Fe.....	70
22	Análisis de varianza concentración foliar de Zn.....	70
23	Análisis de varianza concentración foliar de Mn.....	71
24	Concentraciones foliares de los micronutrientes: Fe, Zn, Cu y Mn.....	71
25	Análisis de varianza para fotosíntesis.....	71
26	Análisis de varianza conductancia estomática.....	74
27	Análisis de varianza transpiración.....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
1	Superficie (ha) cosechada de tomate fresco por país, en el Mundo, 2012.....	10
2	Superficie protegida en México (SAGARPA 2012).....	13
3	Planta injertada de tomate.....	14
4	Ejemplo de curva de respuesta fotosintética a la luz (A/PAR) que muestra la influencia de la intensidad luminosa (PAR) sobre la fotosíntesis neta (A) de la hoja, así como el Punto de Saturación ( <b>Is</b> ) y el Punto de Compensación ( <b>Ic</b> ).....	34
5	Invernadero israelita tipo gótico 1000 m <sup>2</sup> , FAUANL, Escobedo, N. L.....	46
6	Distribución de los tratamientos en el invernadero.....	49
7	Trasplante; a) Plántulas injertadas, autoinjertadas y sin injertar, b) Preparación de plántulas injertadas para el trasplante, c) Trasplante, d) Plántula trasplantada.....	50
8	Entutoreado a uno y dos tallos; a) Gancho de entutorado, b) Anillo de entutorado, c) Planta injertada conducida a un tallo, d) Planta injertada a dos tallos.....	51
9	Desbrote de planta de tomate.....	52
10	Deshoje de planta de tomate.....	52
11	Raleo de frutos de tomate.....	53
12	LICOR Li-6400 equipo medición actividad fotosintética.....	55
13	Medición de fotosíntesis con el LICOR Li-6400.....	56
14	Esquema del flujo de aire en un sistema abierto. (LICOR, 2004).....	57

15	Comparación de medias interacción injerto*tallo entre tratamientos para respuesta fotosintética.....	73
16	Comparación de medias interacción tallo*variedad entre tratamientos para respuesta fotosintética.....	74
17	Comparación de medias interacción injerto*tallo entre para conductancia estomática.....	75
18	Comparación de medias interacción injerto*tallo entre tratamientos para transpiración.....	78
19	Comparación de medias interacción tallo*variedad para transpiración.....	79
20	Gráfica de dispersión fotosíntesis (A) vs transpiración (E) vs conductancia estomática (Gs).....	80

## RESUMEN

La técnica del injerto en tomate se utiliza en México para prevenir y controlar enfermedades del suelo. El injerto también se utiliza en invernaderos y casas sombras en ausencia de enfermedades del suelo, buscando mejorar el desarrollo de las plantas y mayores rendimientos. Lo anterior, responde a que una de las principales características del patrón es su vigoroso sistema radicular. La gran cantidad, longitud, grosor y calidad de sus raíces por  $\text{cm}^3$  permite una mayor efectividad y eficiencia en la exploración, captura y absorción de nutrimentos y agua del suelo, que se traduce en una planta con hojas vigorosas, por lo que se espera una mayor actividad fotosintética. Por otro lado, el vigor que le proporciona el patrón a la variedad permite cultivar plantas a más de un tallo sin afectar la calidad y rendimiento de los frutos por tallo. Por lo tanto, en esta investigación, se evaluaron el efecto del injerto, conducción de tallos y variedades sobre el rendimiento en peso fresco, la concentración de nutrimentos en el tejido foliar y la actividad fotosintética. La investigación se realizó en los invernaderos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, ubicada en Escobedo N.L., México. Se utilizó un diseño Factorial ( $2 \times 2 \times 3$ ) en bloques al azar con 12 tratamientos y 4 repeticiones, donde la unidad experimental fue de 10 plantas y/o tallos. Los resultados del análisis de varianza y comparación de medias indicaron que las plantas a un tallo, mostraron un rendimiento superior en 32.6% con respecto a las plantas a dos tallos ( $p = 0.002$ ). No hubo diferencias significativas en rendimiento entre las variedades Pilavy y Macarena. Las plantas injertadas obtuvieron un rendimiento del 12.6% mayor que las plantas no injertadas y plantas auto-injertadas ( $p = 0.028$ ). La concentración foliar del nitrógeno (N) fue significativamente menor (8.57%) en las plantas auto-injertadas comparadas con las injertadas ( $p = 0.011$ ). La variedad Macarena mostró mayor concentración de N (8.51%) que la variedad Pilavy ( $p = 0.001$ ). Para el caso del fósforo (P), la concentración en el tejido foliar fue superior en los tratamientos conducidos a un tallo comparados con los conducidos a dos tallos en un 6.14%

( $p = 0.011$ ). También, se presentó concentración mayor de P en plantas injertadas en un 6.83% ( $p = 0.012$ ) comparadas con las plantas no injertadas y 11.54% respecto a las plantas auto-injertadas. No hubo diferencias significativas entre los tratamientos en la concentración foliar de Ca, K, Cu, Fe Zn y Mn. Con respecto a los resultados de la Actividad Fotosintética el análisis de varianza mostró efectos significativos en las interacciones de injerto\*tallo ( $p=0.001$ ) y variedad\*tallo ( $p=0.002$ ). El análisis de comparación de medias indicó que las plantas injertadas presentaron una mayor Actividad Fotosintética comparadas con las plantas auto-injertadas. Por otro lado, las plantas cultivadas a un tallo e injertadas obtuvieron las máximas actividades fotosintéticas comparadas con las plantas no injertadas y auto-injertadas. La variedad Macarena injertada y conducida a un tallo mostró la mayor actividad fotosintética comparada con la variedad Pilavy. Finalmente, las plantas auto-injertadas conducidas tanto a uno como a dos tallos, obtuvieron las menores respuestas fotosintéticas. Los resultados de esta investigación condujeron a concluir que el injerto de plantas de tomate incrementó la absorción de nutrientes (N y P) y mejoró la actividad fotosintética.

**Palabras clave:** Injerto, tomate, interacción variedad-patrón, concentración foliar de nutrientes, rendimiento, actividad fotosintética e invernadero.

## SUMMARY

Tomato grafting technique in Mexico is used to prevent and control soil diseases. Grafting is also used in greenhouses and shade houses in the absence of soil diseases, looking for increased plant growth and higher yields. Large quantity, length, thickness and quality of roots per cm<sup>3</sup> of soil allows for greater effectiveness and efficiency in the exploration, capture and absorption of nutrients and water from the soil, which results in a plant with vigorous leaves and consequently more photosynthetic activity. On the other hand, the force that gives the rootstock to the variety allows growing plants with two stems, without affecting the quality and yield of fruits per stem. Therefore, in this study, the effects of grafting, varieties and conducting plants to one and two stems on yield, leaf mineral concentration and photosynthetic activity were analyzed. The research was conducted in the greenhouses at the Facultad de Agronomía of the Universidad Autónoma de Nuevo León, located in Escobedo NL, México. A factorial 2x2x3 (two varieties: Macarena y Pilavy, conducted to one or two stems with grafting, auto-grafting or without grafting) in a randomized block design with 12 treatments and 4 replications was used. The experimental unit was 10 plants and / or stems. Results of analysis of variance and mean comparison indicated that plants conducted to one stem, showed superior yield by 32.6 % with respect to the plants with two stems ( $p = 0.002$ ). There were no significant differences in yield between varieties Pilavy and Macarena. Grafted plants obtained a yield of 12.6 % higher than non-grafted plants and self-grafted plants ( $p = 0.028$ ). Foliar concentration of nitrogen (N) was significantly lower (8.57%) in self-grafted plants compared with grafted plants ( $p = 0.011$ ). Macarena variety showed a higher concentration of N (8.51 %) than Pilavy variety ( $p = 0.001$ ). Phosphorus (P) concentration in leaf tissue was higher in the treatments led to one stem compared guided two stems in a 6.14 % ( $p = 0.011$ ). Higher concentrations of P were obtained in grafted plants on a 6.83 % ( $p = 0.012$ ) compared to non-grafted plants and 11.54 % compared to self-grafted plants. There were no significant differences between treatments in the foliar concentration of Ca, K,

Cu, Fe, Zn and Mn. Regarding the results of the Photosynthetic Activity analysis of variance showed significant effects on graft\*stem interaction ( $p = 0.001$ ) and variety\*stem interaction ( $p = 0.002$ ). The analysis of mean comparison indicated that the grafted plants had a higher photosynthetic activity compared to self-grafted plants. Furthermore, plants grafted and conducted to one stem had higher photosynthetic activities compared to non-grafted plants and auto-grafting. The Macarena variety grafted and conducted to one stem showed the highest photosynthetic activity compared to Pilavy variety. Finally, self-grafted plants conducted to one or two stems, obtained lower photosynthetic responses. The results of this research led to the conclusion that grafting tomato plants increased absorption of nutrients (N and P) and improved photosynthetic activity.

Keywords: Grafting, tomato, variety-rootstock interaction, foliar nutrient concentration, yield, photosynthetic activity and greenhouse.

## 1. INTRODUCCIÓN

El tomate es una de las especies hortícolas más importantes de nuestro país debido al valor de su producción y a la demanda de mano de obra que genera (Borbón-Morales y Castellanos, 2009). Es el principal producto hortícola de exportación, ya que representa el 37% del valor total de las exportaciones de legumbres y hortalizas y el 16% del valor total de las exportaciones agropecuarias, sólo superado por el ganado vacuno. Para mantener y superar los resultados en producción de tomate que se han observado en México se debe estar a la vanguardia en los avances científicos y tecnológicos, entre los que se encuentra la aplicación del injerto en solanáceas y la agricultura protegida.

Los cultivos bajo invernadero ofrecen al horticultor la ventaja de poder controlar con precisión el agua y fertilizantes aplicados a las plantas de acuerdo a su estado de crecimiento, Además, es posible controlar temperatura, control de insectos-plagas, enfermedades, etc. (Jones, 2008 y Castilla, 2005). La integración de los factores anteriores permite alcanzar altos rendimientos y productos de calidad que llegan a superar en la mayoría de los casos aquellos obtenidos bajo condiciones de campo (León, 2006). Sin embargo, los productores de cultivos bajo invernadero tienen muy pocas posibilidades de practicar rotación con diferentes especies vegetales y se ven obligados, en muchos casos, a repetir los mismos cultivos año tras año por cuestiones de mercado. Por consiguiente, los suelos están cada vez más contaminados por insectos, hongos, bacterias, virus y nematodos.

La mayoría de los agricultores en el país han cultivando sólo tomate en el mismo suelo, y han obtenido buenos resultados porque han recurrido al uso de bromuro de metilo, fumigante altamente tóxico para el medio ambiente y

acumulable en la atmósfera (actualmente prohibido). Debido a esto, el sector hortícola busca nuevas alternativas que permitan remplazar el bromuro de metilo, entre las cuales se pueden nombrar la esterilización de suelo por medio de métodos físicos (solarización y desinfección por vapor de agua); esterilización de suelo mediante métodos químicos (uso de basamid y metham sodio); cultivo sin suelo; control biológico; creación de variedades transgénicas e injertos en hortalizas, siendo este último el de mayores ventajas frente al medio ambiente (Miguel y Martín, 2007; Rivero *et al.*, 2003c).

El injerto es una alternativa para reducir las aplicaciones al suelo de agroquímicos, además de evitar o evadir algunas plagas o enfermedades del suelo, con una serie de ventajas frente a otras técnicas como solarización, uso de vapor de agua, utilización de cultivares resistentes, biofumigación y el cultivo sin suelo (Hartmann *et al.*, 2002). La variedad a cultivar se injerta sobre una planta resistente a la enfermedad que se desea prevenir, perteneciente a otra variedad, otra especie u otro género de la misma familia. En estas condiciones, el patrón resistente permanece sano y asegura, a partir del suelo, una nutrición normal de la planta, a la que aísla de los parásitos del suelo (Hartmann *et al.*, 2002). Por otro lado, en ausencia de enfermedades, una de las finalidades más importantes del injerto, es conseguir mayor producción y/o un ciclo más largo debido al vigor que confiere el patrón a la planta injertada. También se emplea en épocas de bajas temperaturas, y/o encharcamiento en el suelo, reduciendo el riesgo de detención del crecimiento o desórdenes fisiológicos. Algunos patrones son capaces de reducir el estrés iónico y mejorar la tolerancia a la salinidad del tomate (Miguel y Martín, 2007).

Existen pocos estudios sobre los efectos del injerto en la absorción de nutrientes y mejoramiento de la fotosíntesis en tomate. Aunque el injerto de hortalizas se inició en la década de 1920 utilizando patrones resistentes para el control de las enfermedades del suelo, este proceso es ahora común en Asia, partes de Europa y el Oriente Medio. En Japón y Corea, la mayoría de las

cucurbitáceas cultivadas son injertadas, así como el tomate (Lee 1994; Kurata, 1994 y Rivero *et al.*, 2003c).

El injerto en hortalizas es poco frecuente en los Estados Unidos y en México, y ha habido pocos experimentos para determinar las prácticas óptimas para la producción con plantas injertadas en diferentes regiones geográficas y climas (Kubota *et al.*, 2008). Según Godoy y Castellanos (2009) esto está empezando a cambiar como resultado de la eliminación gradual del bromuro de metilo. Por lo que varias instituciones de investigación han iniciado proyectos para evaluar las bondades del injerto, así como algunas empresas de semillas están validando el posible efecto que pueda tener el injerto sobre la calidad del producto, ya que existen investigaciones, como las realizadas por Davis *et al.* (2008) y Mišković y Marković (2009), que reportan efectos en las variables: pH, sabor, azúcar, color, contenido de carotenoides, textura y la eficiencia fotosintética, características que son afectadas por el tipo de injerto y de los patrones utilizados. Los resultados de dichas investigaciones varían sobre si el injerto es ventajoso o no, pero en general están de acuerdo en que la combinación patrón-variedad debe ser cuidadosamente elegida para una óptima calidad del fruto. Además, es importante estudiar las múltiples combinaciones patrones variedades bajo condiciones climáticas y geográficas distintas (Davis *et al.*, 2008).

En México las investigaciones más recientes llevadas a cabo por Godoy *et al.* (2009) tratan sobre el efecto en el crecimiento y rendimiento de tomate bajo condiciones de suelo y sustrato, así como en el contenido de licopeno de tomate sembrado en invernadero bajo diferentes sistemas de cultivo. En la investigación antes señalada, realizada en el INIFAP de Celaya Guanajuato, los resultados mostraron diferencias significativas a favor de las plantas injertadas tanto en mayor contenido de licopeno en fruto (calidad) como en mayor rendimiento total y calibre del fruto. Por otra parte, Davis *et al.* (2008) reportaron

mayor absorción de nutrimentos y contenido mineral en la parte aérea, el incremento en el vigor de la planta y la vida de poscosecha de la fruta.

El injerto de tomate sobre patrones vigorosos, normalmente híbridos inter-específicos, permite cultivar plantas con dos o más tallos y reducir el número de plantas empleadas y por ende, el costo de producción (Godoy y Castellanos, 2009). La selección de un patrón eficiente para la extracción de nutrimentos es poco frecuente, casi siempre se selecciona con el criterio de resistencia al estrés biótico y abiótico, este último causado por el medio ambiente. Sin embargo, el conocer el comportamiento nutricional que tienen las variedades al ser injertadas puede ayudar en la elaboración de un programa de fertilización óptimo y mejorar la calidad del fruto, así como evitar un crecimiento excesivo de la planta y mejorar la eficiencia de la absorción de nutrimentos (Khah *et al.*, 2006).

### Fotosíntesis

Todos los productos que se obtienen de los cultivos surgen a partir de la fotosíntesis. Las hojas fijan CO<sub>2</sub> de la atmósfera que con la energía del sol y el agua realizan la fotosíntesis, produciendo carbono orgánico, el cual queda disponible para el crecimiento vegetativo y para la producción de frutos. Como el rendimiento y la calidad del tomate dependen de la fotosíntesis, y a su vez, la fotosíntesis depende de diversos factores. Dentro de los factores climáticos destacan la luz, la temperatura y el agua disponible para la planta (Taiz y Zeiger, 2006). Estos factores pueden modificarse en gran medida por el horticultor manipulando diversos factores de cultivo: el injerto (con las ventajas antes mencionadas); el sistema de poda y conducción; la orientación de las camas; el espaciamiento entre plantas y entre camas; la utilización de sistemas de riego, entre otras. Estas decisiones permiten manipular los microclimas luminoso, térmico e higrométrico del cultivo.

La luz solar es uno de los factores más importantes que afectan a la capacidad fotosintética del cultivo. Es la energía que permite arrancar el aparato fotosintético. Sin embargo, no toda la radiación solar es útil para la fotosíntesis, sólo una parte puede utilizarse por el aparato fotosintético, de forma que la energía de los fotones incidentes pueda convertirse en energía química. A esta parte de la luz se le conoce como PAR (Radiación Fotosintéticamente Activa) y normalmente se acepta que está entre longitudes de onda de 400-700 nm

La superficie foliar representa la superficie de intercambio entre la planta y el medio aéreo y, por tanto, la intensidad y calidad de estos intercambios dependerá de ella. Ya que las hojas son las unidades funcionales de la fotosíntesis, su eficiencia en la captación y la utilización de la energía solar será determinante para la productividad (Taiz y Zeiger, 2006).

De acuerdo a lo anterior, la combinación variedad-patrón de las plantas injertadas de tomate podría contribuir a incrementar la productividad de los cultivos de tomate en invernadero, mediante una mayor asimilación de nutrimentos y una mejor eficiencia fotosintética dependiendo de la compatibilidad de los patrones y de las variedades de tomate involucradas, por lo anterior se planteó un objetivo general y tres objetivos particulares de estudio en la presente investigación

## 1.1 Hipótesis

Hipótesis general:

El injerto de plantas de tomate y sus interacciones con los factores de conducción a uno y dos tallos en diferentes genotipos tendrá efecto positivo sobre el rendimiento, la absorción de nutrimentos y la actividad fotosintética.

Hipótesis específicas:

- El injerto de plantas de tomate sobre el patrón Multifort tendrá mayor rendimiento, absorción de nutrimentos y actividad fotosintética comparado con plantas con auto-injerto y sin injerto.
- El efecto del injerto sobre el rendimiento, la absorción de nutrimentos y la actividad fotosintética depende de la conducción de las plantas a uno y dos tallos.
- El efecto del injerto sobre rendimiento, la absorción de nutrimentos y la actividad fotosintética depende de las variedades que se utilicen sobre el patrón.

## **1.2 Objetivo General**

Evaluar el efecto de dos variedades injertadas de tomate (*Lycopersicon esculentum Mill*) cultivadas a un tallo y dos tallos sobre el rendimiento, la absorción de nutrimentos y la fotosíntesis bajo condiciones de invernadero.

## **1.3 Objetivos Específicos**

- Evaluar el injerto de plantas de tomate sobre el patrón Multifort en cuanto al rendimiento, la absorción de nutrimentos y la actividad fotosintética.
- Evaluar el efecto de plantas conducidas a uno y dos tallos y su interacción con el injerto sobre el rendimiento, la absorción de nutrimentos y la actividad fotosintética.
- Evaluar el efecto de dos variedades de tomate y su interacción con el injerto sobre el rendimiento, la absorción de nutrimentos y la actividad fotosintética.

## 2. LITERATURA REVISADA

### 2.1 El Tomate: aspectos generales

El tomate es originario de América del Sur (tierras altas del Perú). La evidencia genética muestra que los progenitores de los tomates eran plantas herbáceas verdes, con pequeños frutos verdes. Una especie, *Solanum lycopersicum*, fue trasladada a México, donde se cultivó y se consumió por las civilizaciones mesoamericanas. La fecha exacta de la domesticación no se conoce. El primer tomate domesticado pudo haber sido un pequeño fruto de color amarillo, de tamaño similar a un tomate cherry, cultivado por los aztecas en el centro de México. Escritos Aztecas mencionan que los tomates eran preparados con chile, maíz y sal. El tomate deriva de la palabra azteca tomatl, que literalmente significa "fruto inflamado". Muchos historiadores creen que el español explorador Cortes pudo haber sido el primero en llevar el pequeño tomate amarillo a Europa después de que conquistó la ciudad azteca de Tenochtitlán, actual ciudad de México, en 1521.

Otros creen que Cristóbal Colón, fue el primer europeo en recolectar el tomate, en 1493. Las primeras discusiones sobre el tomate en la literatura europea aparecieron en un tratado sobre hierbas medicinales escrito en 1544 por Pietro Andrea Mattioli, un médico italiano y botánico que lo nombró "manzana de oro", tal vez porque las primeras plantas llevadas a Venecia producían frutos color amarillo dorado (Nuez, 2001).

## **2.2 Propiedades del fruto de tomate**

Un tomate se compone ante todo de un 94% de agua, 4% de hidratos de carbono, 0.0 % de grasas, 1.0% de proteínas, 0.3% de cenizas, 0.7% de otros compuestos (ácidos, vitaminas, etc.) y una serie de micronutrientes como calcio, hierro y fósforo, entre otros, así como vitaminas A y C. Un tomate fresco de 150 g contiene 35 calorías y proporciona el 40% de la vitamina C y el 20% de la vitamina A de la cantidad requerida diaria de ambas vitaminas. Además, junto con su agradable sabor y color, el tomate es la cuarta verdura más consumida después de la papa, lechuga y cebolla. El consumo promedio per cápita es de 8.5 kg (Lucier y Plummer, 2004).

Una de las propiedades que ha convertido al tomate en uno de los alimentos más estudiados es la presencia de licopeno, pigmento natural soluble en grasa miembro de la familia de los carotenoides y es responsable del color rojo. La estructura también contribuye a la reactividad química de los carotenoides hacia los radicales libres y los agentes oxidantes. El licopeno es un nutracéutico con capacidades antioxidantes. Es 100 veces más efectivo para destruir los radicales libres de oxígeno que la vitamina E. Su capacidad antioxidante le confiere propiedades anticancerígenas (Dorais *et al.*, 2008).

## **2.3 El cultivo de tomate en el mundo y en México**

El tomate es la hortaliza de mayor importancia al considerar el volumen de producción y el consumo en todo el mundo. En el año 2011 se registró una superficie plantada de 4;751,529.86 ha de tomate, a nivel mundial. Cabe destacar la participación de China con 985,817.00 ha, India con 865,000.00 ha y Turquía con 328,000.00 ha, que representaron el 28.0, 25.0 y 9.0 % de la

superficie mundial, respectivamente. México participó con 85,369.0 ha, con un porcentaje de 2.0% del total mundial (Figura 1).

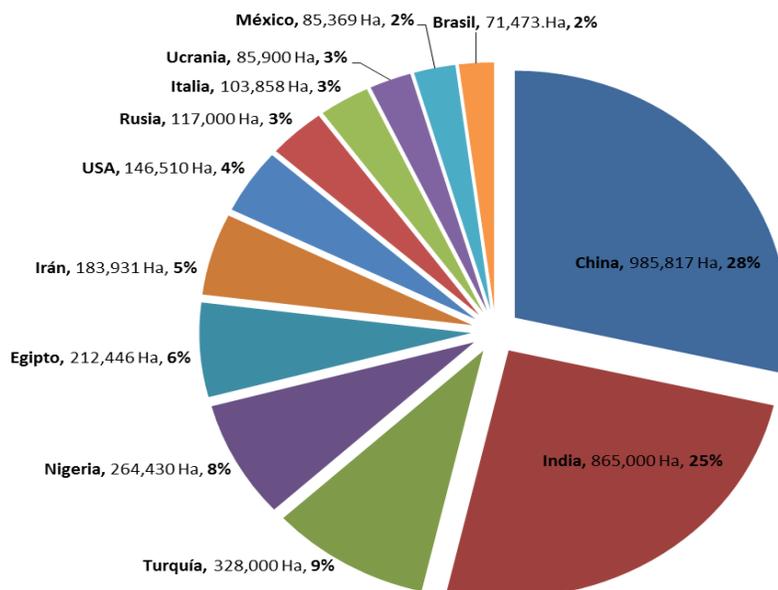


Figura 1. Superficie (ha) cosechada de tomate fresco por país, en el Mundo, 2012 (FAOSTAT, 2012).

En relación con la evolución de las superficies de tomate a nivel mundial desde 2001 con 3,885,685.00 ha hasta 2011 con 4,751,529.86 ha, se observa un incremento del 22% y el valor medio para el decenio 2001-2011 alcanza la cifra de 86,584.40 ha, que parece estabilizarse en los últimos años. En relación a la producción mundial de tomate, se observa ascendente desde el año 2001 hasta el 2011, alcanzando para este periodo un incremento del 47%. En 2001 hubo una producción mundial de 108,286,142.00 t, para finalizar el decenio en 2011 con una producción de 159,347,030.71 t (FAOSTAT, 2012).

El consumo del tomate en México, es principalmente en fresco. En el año 2011, se registró una producción nacional de 2,435.788.0 t y un consumo *per*

*cápita* de 13.1 kilogramos. La producción de tomate en México se destina en gran parte a la exportación. La mayor superficie establecida corresponde a los estados de Sinaloa, San Luís Potosí y Michoacán, con el 31.5, 10.6 y 9.0%, respectivamente. Este cultivo generó importantes divisas por las exportaciones, estas presentaron ingresos de 597.6 millones de dólares en 2010.

## **2.4 Agricultura protegida**

### **2.4.1 Cultivos protegidos Vs. Cultivos a cielo abierto**

En los sistemas modernos de producción hortícola, los cultivos protegidos se diferencian de los cultivos a cielo abierto debido a que requieren:

- Un nivel elevado de inversión inicial (estructuras, equipos de climatización, riego, fertilización, enriquecimiento en CO<sub>2</sub>, etc.)
- Un nivel elevado de insumos, ya sea de componentes físico-químicos (energía fósil, agua, abonos, productos fitosanitarios, etc.) o bien humanos (mano de obra)
- Una tecnología asociada (ordenadores, robots de manutención, maquinaria, etc.) que exige una formación específica del horticultor y un manejo adecuado del sistema de producción

En contrapartida, los cultivos bajo invernadero ofrecen al horticultor la ventaja de poder controlar con precisión el agua y fertilizantes aplicados a las plantas de acuerdo a su estado de crecimiento, aunado al manejo de la temperatura, ventilación, humedad, luminosidad, CO<sub>2</sub>, control de insectos, plagas y enfermedades, etc. La coincidencia de las mejores condiciones que requiere la planta durante su período de crecimiento y producción favorece el alcanzar rendimientos de calidad que llegan a superar en la mayoría de los casos aquellos obtenidos bajo condiciones de campo (Jones, 2008 y León, 2006).

## **2.4.2 El Cultivo de invernaderos en el mundo**

Al 2011 existen casi 406,000 hectáreas de superficie protegida en el mundo. Estas 406,000 hectáreas están presentes en 124 países y el tomate es el producto más importante producido en instalaciones invernadas. El estudio señala que tras el tomate, los pepinos, lechuga y pimientos dulces son las referencias hortícolas más plantadas en cultivos bajo invernadero. China es el país con más superficie protegida del mundo, en donde el invernadero de plástico y malla domina sobre el vidrio, que tan sólo se contempla en el Norte de Europa y en algunas zonas de USA (FAOSTAT, 2012).

## **2.4.3 El Cultivo en invernadero en México**

Actualmente la membrecía de la Asociación Mexicana de Horticultura Protegida (AMHPAC) se integra por 284 productores agrícolas distribuidos en 32 estados de la república. Los productores agrícolas alcanzan poco más de 21,000 hectáreas, de las cuales el 55% es de malla sombra y el 45% es de invernadero a nivel nacional. Cabe señalar que conforme a información emitida por la AMHPAC, la horticultura protegida en México representa alrededor de los 3,500 millones de dólares en infraestructura; con una capacidad productiva de más de 3.5 millones de toneladas de hortalizas con valor superior a los 1,500 millones de dólares en exportaciones y genera 240 mil empleos directos, 300 mil indirectos y generando 10 mil nuevos por año. Los principales cultivos se concentran en los siguientes:

- Tomate (70%)
- Pimiento (16%)
- Pepino (10%)
- Otros (4%)

El estado de Sinaloa es el mayor productor hortícola bajo cubierta en invernaderos y casas sombras (Figura 2).

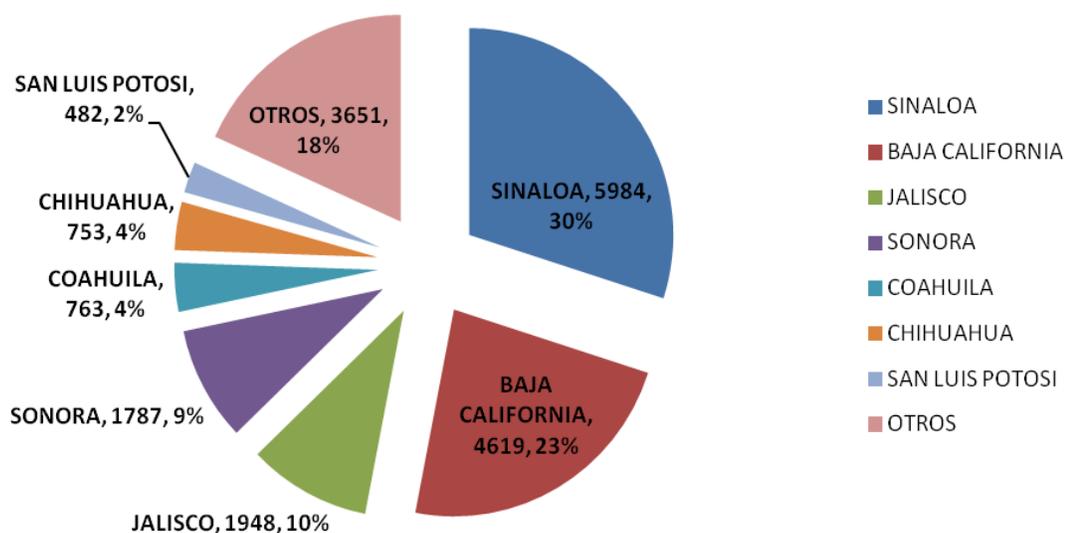


Figura 2. Superficie protegida en México (SAGARPA 2012).

En Sinaloa, la AMHPAC cuenta con productores que manejan algún sistema de protección en sus cultivos, éstos representan más de 5,984 ha de las cuales, alrededor de 2,694 ha corresponden a invernaderos y 3,390 ha son de casas sombra. Además de la agricultura bajo protección, los productores sinaloenses representan una superficie por más de 5,000 ha a campo abierto. La mayor superficie dedicada al cultivo en invernadero, se ubica en los estados de la República cercanos o fronterizos con Estados Unidos, debido a la facilidad para la exportación de la producción. Las tecnologías disponibles en México, provienen de países tales como: Holanda, Israel, Estados Unidos, Francia y España. Si se le asigna una calificación 100 al nivel tecnológico más avanzado (incluye, ventilación calefacción, fertirrigación e hidroponía automatizada y el uso de sustratos), puede decirse que el nivel global tecnológico de México se sitúa alrededor del 40.

## 2.5 El injerto.

### 2.5.1 Importancia del injerto

El injerto es el arte de unir dos piezas de tejido vivo de un determinado tipo de plantas, de tal forma que se junten y luego crezcan y se desarrollen como una sola planta (Figura 3). El Injerto es un técnica de propagación asexual o vegetativa artificial que permite unir dos partes vegetales, una el patrón que por medio de su sistema radical, y eventualmente de una parte del tallo, suministra los elementos necesarios para el crecimiento de la nueva planta y la otra, el injerto (variedad) aportará las características del vegetal a multiplicar (Hartmann *et al.*, 2002).

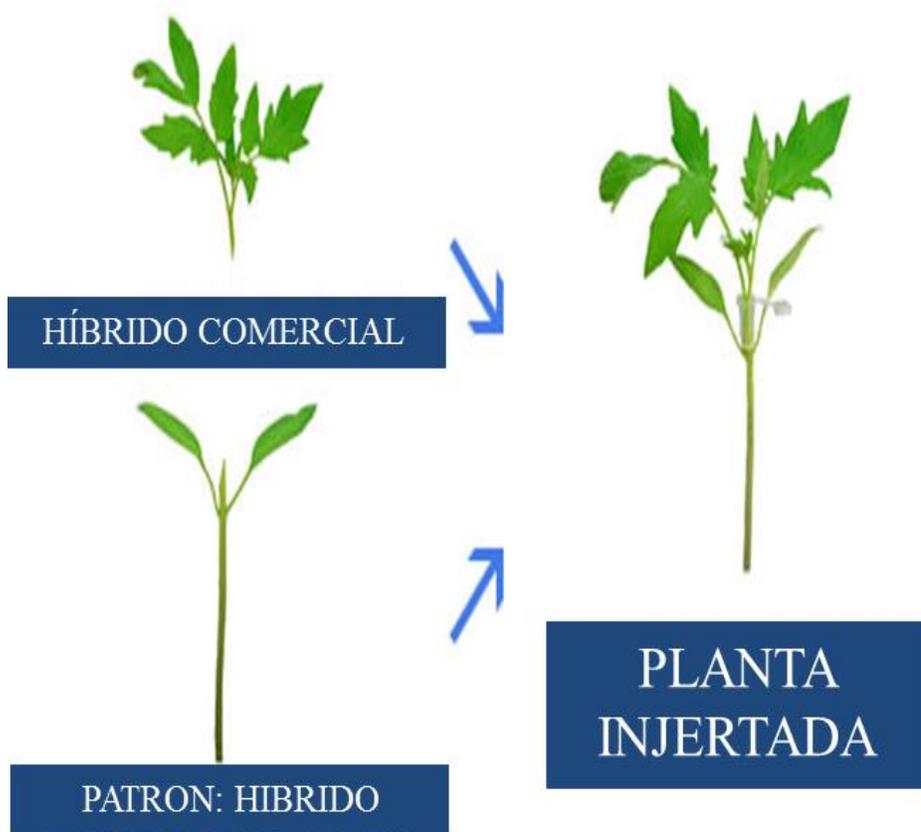


Figura 3. Procedimiento de injerto de una planta de tomate

La finalidad más conocida del injerto en hortalizas, particularmente en tomate, es obtener resistencia a las enfermedades transmitidas por patógenos presentes en el suelo (Ioannou, 2001 y Davis *et al.*, 2008). En ausencia de enfermedades transmitidas por el suelo, el injerto contribuye a incrementar la tolerancia contra estreses abióticos tales como la humedad excesiva, sequía, salinidad, temperaturas altas y bajas, heridas causadas por el manejo del cultivo, o por el proceso mismo del injerto (Abdelmageed y Gruda, 2009; Venema *et al.*, 2008 y Rivero *et al.*, 2003 a,b) También, contribuye a aumentar la absorción de agua y nutrimentos (Santa-Cruz *et al.*, 2002), así como a extender la duración de la época de la cosecha (Lee, 1994).

### **2.5.2 El injerto en hortalizas**

La producción de hortalizas injertadas es poco conocida y rara vez practicada en países donde la tierra no se usa tan intensamente y donde además se utiliza la rotación de cultivos. Sin embargo, esta técnica es altamente popular en Corea, Japón y algunos países de Asia y Europa donde el suelo se usa en forma intensiva y la superficie agrícola es pequeña. Entre las especies hortícolas, sólo se injertan en el ámbito comercial solanáceas (tomate, pimiento, berenjena) y cucurbitáceas (melón, sandía y pepino) aunque existen estudios sobre injertos en crucíferas.

La producción de plantas injertadas comenzó en Japón y Corea, con injertos en sandía (*Citrullus lanatus*) sobre calabaza (*Cucurbita moschata*). En los años 50, se injertó berenjena (*Solanum melongena*) sobre *Solanum integrifolium*. Desde entonces, la superficie destinada en Japón a hortalizas injertadas ha aumentado, correspondiendo a plantas injertadas un 93 % del total de la superficie cultivada en el caso de la sandía, 72 % en pepino, 50 % en berenjena, 32 % en tomate y 30 % en todos los tipos de melones. En España se han realizado experiencias en tomate, en relación al comportamiento de plantas injertadas, influencia de porta injertos en el proceso del injerto, conducción de

plantas y uso de agroquímicos. También en España se han realizado experimentos en plantas de pepino (*Cucumis sativus*) injertados, estudiando la respuesta de estas plantas aplicándoles distintas dosis de abono nitrogenado (Kakava, 2006; Lee, 1994; Kurata, 1994).

Aunque el injerto en hortalizas se inició en la década de 1920 utilizando patrones resistentes para el control de las enfermedades del suelo, este proceso es ahora común en Asia, partes de Europa y el Oriente Medio. En Japón y Corea, la mayoría de las cucurbitáceas cultivadas son injertadas, así como el tomate (Lee, 1994; Kurata, 1994; y Rivero *et al.*, 2003c).

El injerto en hortalizas es poco frecuente en Estados Unidos y en México se está utilizando en algunas entidades. En general, las ventajas del injerto en hortalizas se han estudiado en algunos experimentos en México; sin embargo, en muchas regiones del país falta información sobre las ventajas económicas de esta práctica (Kubota *et al.*, 2008). Según Godoy y Castellanos (2009), esto está empezando a cambiar como resultado de la eliminación gradual del bromuro de metilo. Por lo que varias instituciones de investigación han iniciado proyectos para evaluar las bondades del injerto, así como algunas empresas de semillas están validando el posible efecto que pueda tener el injerto sobre la calidad del producto. Ya que existen investigaciones recientes (Davis *et al.*, 2008); Mišković y Marković *et al.*, 2009), que reportan efectos en las variables: pH, sabor, color, contenido de azúcar y carotenoides y textura por el tipo de injerto y de los patrones utilizados. Los resultados de dichas investigaciones varían sobre si el injerto es ventajoso o no, pero en general están de acuerdo en que la combinación patrón / variedad debe ser cuidadosamente elegida para una óptima calidad del fruto. Además, es importante estudiar las múltiples combinaciones patrones variedades bajo distintas condiciones climáticas y geográficas (Davis *et al.*, 2008).

En México las investigaciones más recientes llevadas a cabo por Godoy *et al.* (2009) tratan sobre el efecto en el crecimiento y rendimiento de tomate bajo condiciones de suelo y sustrato. Así como el efecto del injerto en el contenido de licopeno de tomate sembrado en invernadero bajo diferentes sistemas de cultivo. En las dos investigaciones antes señaladas, ambas realizadas en el INIFAP de Celaya Guanajuato, los resultados mostraron diferencias significativas a favor de las plantas injertadas tanto en mayor contenido de licopeno en fruto (calidad) como en mayor rendimiento total y calibre del fruto.

El objetivo principal del injerto en tomate es obtener resistencia a patógenos del suelo. Debido a las cualidades del injerto, los objetivos a cumplir se han ido ampliando, entre ellos se cita: mayor absorción de nutrimentos y contenido mineral en la parte aérea, el incremento en el vigor de la planta y la vida de pos-cosecha de la fruta (Davis *et al.*, 2008). El injerto de tomate sobre patrones vigorosos, normalmente híbridos inter-específicos, permite cultivar plantas con dos o más tallos y reducir el número de plantas empleadas y por ende, el costo de producción (Godoy y Castellanos, 2009). La selección de un patrón eficiente para la extracción de nutrimentos es poco frecuente, casi siempre se selecciona con el criterio de resistencia al estrés biótico y abiótico, este último causado por el medio ambiente. Sin embargo, el conocer el comportamiento nutricional que tienen las variedades al ser injertadas puede ayudar en la elaboración de un programa de fertilización óptimo y, también, para mejorar la calidad del fruto, evitar un crecimiento excesivo de la planta y ser más eficiente en el aporte nutrimental (Khah *et al.*, 2006)

### **2.5.3 Definición y características del patrón**

Los patrones son plantas cuyo sistema radicular es vigoroso, rustico y resistente a enfermedades del suelo. Son plantas sobre las cuales se injertan las variedades a cultivar. Un patrón debe reunir las siguientes cualidades:

- Ser inmune a la enfermedad que se desea prevenir.
- Que no haya ningún otro parásito del suelo que le afecte.
- Que tenga vigor y rusticidad.
- Tener buena afinidad con la planta que se injerta.
- Contar con plántulas en buenas condiciones para la realización del injerto.
- No modificar desfavorablemente la calidad del fruto (Miguel y Martín, 2007).

#### **2.5.4 Fisiología del injerto**

El proceso de injerto, a través del cual dos partes vegetales se unen entre sí, presenta una secuencia de eventos mediante los cuales se logra una compatibilidad entre patrón y variedad. La secuencia de eventos es la siguiente: formación del callo en la interfase del injerto, seguido por una diferenciación de los elementos vasculares de las células del callo, cuatro días después de la unión, además del desarrollo de células parenquimáticas del patrón y la variedad; establecimiento de un nuevo continuo de conductos xilemáticos y floemáticos interconectando los haces vasculares cortados del porta injerto y la variedad, y finalmente, el desarrollo de nuevo cambium para la formación de elementos vasculares secundarios en la unión del injerto.

En el inicio del proceso del injerto, el tejido vegetal experimenta una reacción al corte la cual consiste en la formación de una capa aislada de material necrótico derivado de restos de pared, contenidos celulares y pectinasa, así como compuestos fenólicos secretados por células del callo. Las capas celulares dañadas en la zona del corte forman una capa de contacto; las células intactas, próximas a dicha capa, forman una masa de células de parénquima (callo), que llena el espacio entre variedad e injerto y luego estas capas son puestas en contacto a través de la zona cambial que se establece en el callo. El callo se origina de diferentes células vivas presentes en el tejido vascular, a continuación, las células del parénquima cercanas a células

cambiales del patrón y de la variedad se diferencian para formar nuevas células cambiales que permitirán la formación de un nuevo tejido vascular y la irrigación del patrón hacia la variedad para evitar su deshidratación (Fernández-García *et al.*, 2004 a).

El tiempo que demoran las células parenquimáticas en proliferar desde el patrón y desde la variedad es de uno a siete días. Estas células parenquimáticas penetran la capa necrótica, la cual es reabsorbida, en dos a tres días llenando el espacio entre los dos elementos del injerto, permitiendo así el paso del agua y nutrimentos. La diferenciación de las células parenquimáticas en nuevas células cambiales comienza en el día 10 después del injerto. Cabe destacar que la diferenciación de células parenquimáticas en células cambiales se prolonga por dos a tres semanas después de comenzado el proceso. El lugar en donde inicialmente se diferencian las células del callo en tejido cambial es en donde el callo está en contacto con el cambium del patrón y de la variedad. Así, las divisiones que forman el cambium en el callo avanzan unas hacia otras hasta tocarse. Los tejidos que resultan de la actividad de este cambium se disponen de manera continua con el xilema y el floema de ambos miembros del injerto (Hartmann *et al.*, 2002).

### **2.5.5 Factores que inciden en la unión del injerto**

Dentro de los factores que influyen en la cicatrización de la unión del injerto están las condiciones ambientales: temperatura, humedad relativa y oxígeno. La temperatura tiene un marcado efecto en la formación del tejido del callo y la diferenciación de nuevos haces vasculares; entre 4 y 32 °C, la producción del callo aumenta linealmente con la temperatura. Con temperaturas sobre 29 °C se obtiene una producción abundante de tejido calloso de tipo suave que se daña fácilmente, por otra parte, a menos de 20 °C la formación de callo es lenta y bajo los 15 °C, se inhibe totalmente, la temperatura óptima durante la fase de unión es de 25-28 °C. El contenido de humedad del aire es

muy importante para la unión del injerto, debido a que las células de parénquima que forman el tejido del callo son de paredes delgadas y sensibles a la deshidratación. Por lo tanto, contenidos de humedad del aire menor que el punto de saturación inhiben la formación del callo y aumentan la tasa de desecación de las células. La presencia de una película de agua sobre la superficie de encajecimiento es más estimulante que mantener 100% la humedad relativa. Debido a que la unión del injerto es un proceso en el cual se produce una división y crecimiento celular importante, acompañado de una respiración celular elevada, el oxígeno es altamente necesario para la optimización de este proceso, por esto, es importante que la ligadura del injerto permita el acceso de aire en la zona de unión (Hartmann *et al.*, 2002).

La técnica de propagación es un factor muy influyente, ya que es muy importante permitir que tanto los haces vasculares del porta injerto como los de la variedad se mantengan en contacto, maximizando el área de corte y presionando las superficies una contra otra. Un corte exacto realizado en ambas porciones del injerto acelera la formación de la conexión cambial; en cambio cortes mal realizados, con herramienta inexacta o con mala técnica no impiden necesariamente la unión, pero normalmente la retardan. En otro aspecto, una pequeña zona de unión impedirá el movimiento suficiente del agua cuando comience el crecimiento de la planta y esta alcance un desarrollo importante, produciéndose el colapso de la planta injertada, aun cuando haya una buena cicatrización (Miguel y Martín, 2007).

### **2.5.6 Incompatibilidad e interacción Patrón\*Variedad**

La capacidad de dos plantas diferentes de unirse y desarrollarse satisfactoriamente como una planta compuesta es lo que se llama compatibilidad, si se da el caso. La diferencia entre injerto compatible e incompatible, no está definida claramente, así como hay especies que tienen una estrecha relación botánica y se unen con facilidad, hasta otras no

relacionadas entre sí que son incapaces de unirse, existe una graduación intermedia de plantas que forman soldadura, pero con el tiempo muestran síntomas de anomalía en la unión o en su hábito de crecimiento.

La incompatibilidad suele manifestarse con algunos de los siguientes síntomas: alto porcentaje de inexactitudes en el injerto, clorosis del follaje, defoliación y falta de crecimiento, muerte prematura de la planta, diferencias marcadas en la tasa de crecimiento entre patrón y variedad, desarrollo excesivo de la unión, arriba o debajo de ella, y ruptura en la unión del injerto; sin embargo, la aparición, de forma aislada, de uno o varios de los síntomas antes mencionados no significa necesariamente que la unión sea incompatible, ya que estos síntomas pueden ser también una consecuencia de condiciones ambientales desfavorables, presencia de enfermedades o malas técnicas del injerto (Johkan *et al.*, 2009).

Hay descritos dos tipos de incompatibilidad: localizada y translocada. La incompatibilidad localizada depende del contacto porta injerto y variedad; si se utiliza un patrón intermedio se elimina esta reacción. En este tipo de ensamble, con frecuencia, la estructura de unión es mecánicamente débil, presentando una interrupción en la continuidad de los tejidos vasculares. Debido a las dificultades de translocación a través del injerto las raíces mueren por agotamiento. La incompatibilidad en la translocación produce una degeneración del floema, formando una línea de color pardo o una zona necrótica en el injerto, con esto, la unión presenta dificultades al movimiento de carbohidratos, con acumulación en la variedad y reducción en el porta injerto, anomalía que no puede ser corregida por un patrón intermedio compatible y en algunos casos se ha demostrado que determinados compuestos que produce el porta injerto reaccionan con otros de la variedad, generando nuevos compuestos que inhiben la actividad del cambium. La reducción de la concentración de azúcares puede liberar en ella compuestos tóxicos que producen su degeneración y muerte. En otros casos, sobre las superficies en contacto de dos especies

incompatibles se deposita una capa de suberina a lo largo de la pared celular, formando una capa necrótica de espesor creciente que conduce a la desecación de la variedad (Hartmann *et al.*, 2002)

Lo anterior coincide con Colla *et al.* (2006); Fernández-García *et al.* (2004 a,b) y Moore (1984 a, b) quienes reportaron que las plantas injertadas por lo general muestran un aumento de la absorción de agua y minerales en comparación con las plantas no injertadas y autoinjertadas, como consecuencia principalmente de las características físicas del sistema radicular vigoroso del patrón, tales como el desarrollo lateral y vertical, así como la mayor cantidad y grosor de las raíces, siempre y cuando la unión entre la variedad y el patrón en el proceso del injerto sea completa y compatible. Andrews y Márquez (1993) y Hartmann *et al.* (2002) afirman que la formación del callo puente entre el patrón y la variedad, la diferenciación de nuevo tejido vascular a partir de células del callo, junto con la producción de xilema y floema secundario, son cruciales para una buena unión e interacción patrón-variedad.

Por otra parte, Miguel y Martín (2007); Oda *et al.* (2005); Johkan *et al.* (2009); Torii *et al.* (1992); y Atkinson y Else (2001) coinciden en que una conexión vascular incompatible o insuficiente del callo en la interface patrón-variedad, aunque haya una buena cicatrización, un crecimiento normal e inclusive un desarrollo importante de la variedad, podría ocasionar la disminución o bloqueo del flujo de agua y nutrimentos de la raíz a la parte aérea de la planta y por consiguiente una reducción de la transpiración, conductancia estomática y fotosíntesis de la planta injertada. La incompatibilidad entre el patrón y la variedad por lo general ocurre en las primeras etapas, cuando se están formando las conexiones vasculares, pero puede aparecer hasta la etapa de fructificación, cuando la planta tiene una alta demanda de agua y nutrimentos (Kawaguchi *et al.*, 2008).

### 2.5.7 Tipos de injerto en hortalizas

Miguel y Martín (2007) describen dos métodos básicos para realizar un injerto tanto en solanáceas como en cucurbitáceas: el primero es el injerto por aproximación, el cual se caracteriza porque durante el proceso de unión se mantienen los dos sistemas radiculares del patrón y la variedad, separando con posterioridad la variedad de su sistema radicular y decapitando el tallo del porta injerto sobre la unión, y el segundo es el injerto de púa o empalme, que consiste en que la púa de la variedad se une a la planta del porta injerto decapitado. Dentro de este último, existen dos variantes: de hendidura para cucurbitáceas y de púa terminal para solanáceas. Este último método se utiliza en solanáceas, y en cucurbitáceas. Tiene la ventaja de ser de fácil manejo, además de ahorrar espacio ya que se puede realizar en la bandeja almaciguera, con plántulas jóvenes cuyo hipocótilo tenga 2 mm de diámetro. Esta técnica se caracteriza por la rapidez con que se puede realizar y por la ventaja de no favorecer deformaciones a nivel del punto del injerto.

En relación con lo anterior, señalan que esta técnica de injerto se realiza en el período en que las plantas se encuentran todavía en un estado muy joven, en el momento en que la variedad a injertar tiene 15-20 días (1.2-2 mm de diámetro) o cuando el porta injerto tiene 20-30 días desde su siembra. Se debe realizar un corte diagonal sobre el cotiledón del patrón, con una inclinación de 45°. Este debe ser exacto al corte realizado en la variedad, que se ha hecho bajo cotiledón, ya que el empalme entre uno y otro debe ser perfecto, sin espacios libres. Por ello, tanto el patrón como la variedad deben presentar un diámetro idéntico al momento del injerto (Hartmann *et al.*, 2002).

Se recomienda el corte siempre sobre los cotiledones. Además, se recomienda hacerlo a una altura de 2 cm desde el cuello de la plántula ya que si se realiza a una altura mayor se corre el riesgo que se caiga el brote una vez injertado y si es menor, la variedad puede generar raíces para sostener el

injerto, y fijar las dos porciones injertadas, tanto el patrón como la variedad. Para la unión se utiliza un clip de silicón, que permite su reutilización, pero con el problema de añadir una labor adicional al proceso, ya que una vez cicatrizada la herida el clip debe ser removido. El clip se coloca en el extremo del corte del porta injerto, el cual tiene un ángulo de corte de 45° aproximadamente. El extremo del corte de la variedad a injertar, que también posee un ángulo similar y complementario al anterior, se inserta dentro de éste, de manera que ambas superficies queden en contacto (Villasana, 2010).

### **2.5.8 El injerto y la absorción de nutrimentos**

Las plantas almacenan minerales y otros nutrimentos en diferentes órganos, tales como raíces, tallos, hojas y frutos. Estos órganos tienen una influencia importante en la absorción y translocación de nutrimentos minerales en las plantas y esto juega un papel esencial en los procesos fisiológicos como el crecimiento y el desarrollo (Wang *et al.*, 2006; Flowers y Colmer, 2008).

Heo (1991) y Jang (1992) concluyeron que la influencia del patrón sobre el contenido de minerales en el tejido foliar se atribuye a las características físicas del sistema de raíces, tales como el desarrollo lateral y vertical, lo que resultó en incremento de la absorción de agua y minerales. Por otro lado, Tagliavani *et al.* (1993) indicaron que el vigor tanto de la variedad como del patrón tuvo un papel importante en la absorción y translocación de los nutrimentos en plantas injertadas. Por lo tanto, los contenidos de macro y micronutrimentos se ven afectados por las características del patrón y de la variedad. Empero, dependiendo de las condiciones del medio ambiente, el efecto del patrón y/o variedad puede cambiar.

### 2.5.8.1 El injerto y la absorción de macronutrientos

Ruiz *et al.* (1997) probaron los efectos de dos patrones diferentes en el contenido de macronutrientos en hojas de plantas de melón, quienes concluyeron que, en general, el contenido de N fue más influenciado por el genotipo del patrón que por el de la variedad. Por otra parte, Ruiz y Romero (1999) midieron la actividad de la nitrato reductasa y la acumulación de nitratos en plantas injertadas y no injertadas de melón: ambos parámetros se afectaron significativamente por la interacción variedad\*patrón y por el genotipo del patrón, mientras que el genotipo de la variedad no mostró ningún efecto. Las características de los patrones podrían dar lugar al aumento de la absorción, transporte y acumulación de  $\text{NO}_3^-$  en la variedad, estimulando así la actividad de la nitrato reductasa y asimilación  $\text{NO}_3^-$ . Esto explicaría la disminución de la concentración foliar de  $\text{NO}_3^-$  y el aumento de la actividad de la nitrato reductasa en plantas injertadas en comparación con las plantas no injertadas (Sivasank y Oaks, 1996; Ruiz *et al.*, 1998). Resultados similares se obtuvieron por Pulgar *et al.* (2000) en plantas de sandía, donde los niveles de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  fueron más bajos en las hojas de plantas injertadas comparadas con las plantas no injertadas, lo que indica que algunos patrones mejoran la eficiencia de la enzima nitrato reductasa favoreciendo la integración de  $\text{NO}_3^-$  en aminoácidos y proteínas (Ruiz and Romero de 1999; Pulgar *et al.*, 2000 y Ruiz *et al.*, 1997 ).

Kawaguchi *et al.* (2008) investigaron la compatibilidad del injerto con la nutrición en cuatro combinaciones de injerto (tomate/tomate, tomate/pimiento, pimiento/tomate y pimiento/pimiento) sin diferencias significativas en la concentración de nitrógeno. Del mismo modo, Colla *et al.* (2010a) no encontraron diferencias significativas en los niveles de nitrógeno de los diferentes tratamientos de injerto que probaron en sandía para mejorar la tolerancia a la alcalinidad. Además de la interacción patrón\*variedad, el contenido de nitrógeno depende de las condiciones ambientales en las que las plantas se desarrollan. La concentración total de nitrógeno en plantas de tomate

aumentó en las plantas injertadas bajo condiciones de temperaturas bajas en la zona de la raíz, comparadas con las no injertadas (Venema *et al.*, 2008). Se ha comprobado que los patrones pueden mejorar algunas características morfológicas y/o fisiológicas de plantas de melón, aumentando de este modo la absorción de P del suelo y su translocación a las hojas de la variedad (Ruiz *et al.*, 1996).

Ruiz *et al.* (1997) demostraron que la concentración de P en plantas de melón injertado puede afectarse tanto por la variedad como por la interacción patrón\*variedad. Sin embargo, Kawaguchi *et al.* (2008) llegaron a la conclusión de que el patrón fue el factor principal que afectó a la absorción y translocación de P en las diferentes combinaciones de injerto en plantas solanáceas. Las concentraciones de P en las hojas y tallos de las plantas de pepino se vieron afectadas significativamente por la combinación del injerto, siendo los valores de las plantas injertadas mayores que las plantas no injertadas (Rouphael *et al.*, 2008).

Colla *et al.* (2010a) y Uygur y Yetisir (2009) obtuvieron resultados similares para las concentraciones de P en las hojas de sandía injertada y Fernández-García *et al.* (2004c) en plantas de tomate, estos últimos autores concluyen que la combinación de injerto puede afectar absorción P de manera positiva. Sin embargo, en otra investigación no se encontraron diferencias significativas en la concentración de P en plantas de pepino injertadas en dos patrones diferentes (Uygur y Yetisir, 2009). Todos estos resultados indican que las diferentes características morfológicas del patrón no son los únicos factores que influyen en la absorción y translocación de P en plantas y que los genotipos de la variedad y/o de cada especie se deben tomar en cuenta también. En las plantas de sandía injertadas en *Cucurbita maxima*, las concentraciones de  $Ca^{2+}$  fueron más bajas que en las plantas no injertadas, independientemente del patrón o la variedad utilizada, mientras que se observó el comportamiento opuesto en  $Mg^{2+}$  (Ruiz *et al.*, 1997). Sin embargo, los niveles de ambos

minerales disminuyeron cuando se injertaron plantas de tomate en plantas de pimiento y viceversa, comparadas con plantas no injertadas (Kawaguchi *et al.*, 2008). Estas variaciones pueden explicarse por el sistema de raíces más pequeño y la restricción de la conductividad hidráulica en xilema del patrón con respecto a la variedad.

En otros experimentos con tomate, se observó un aumento significativo de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en el tejido foliar cuando se compararon las plantas injertadas con las plantas no injertadas (Fernández- García *et al.*, 2004c). Sin embargo, en las plantas injertadas, no se observaron diferencias significativas para  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  comparadas con las plantas no injertadas en pepino (Rouphael *et al.*, 2008), melón (Edelstein *et al.*, 2005) o de tomate (Chen *et al.*, 2003). Todos los resultados indican que los contenidos de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  pueden ser influenciados significativamente por el patrón, pero en general, no hay ningún efecto de la variedad en su absorción. Las características fisiológicas y físicas de los patrones probablemente afectan la absorción y translocación de estos minerales en las plantas. En el tomate, no se encontraron diferencias significativas entre el contenido de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  en plantas injertadas y no injertadas (Santa Cruz *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2003; He *et al.*, 2009) pero en otros informes se obtuvieron aumentos significativos de  $\text{K}^+$  y no se observaron diferencias en las concentraciones de  $\text{Na}^+$  (Fernández-García *et al.*, 2004c y Martínez-Rodríguez *et al.*, 2008).

#### **2.5.8.2 El injerto y la absorción de micronutrientos**

Los micronutrientos son esenciales para el crecimiento de plantas ya que están involucrados en un gran cantidad de funciones, como el metabolismo de la energía, el metabolismo primario y secundario, la protección celular, la regulación de genes, la actividad hormonal, la transducción de señales y la reproducción (Hansch y Mendel, 2009).

Savvas *et al.* (2009) encontraron una menor absorción de Cu, Fe y Mg en las hojas de las plantas injertadas en la variedad “He-Man” de tomate, en comparación con las plantas no injertadas. Estos resultados sugieren que las plantas injertadas pueden limitar el transporte de Cu de las raíces a las hojas de manera más eficiente, lo que reduce el efecto perjudicial de la toxicidad de Cu sobre el crecimiento y rendimiento de planta. Kawaguchi *et al.* (2008) mostraron que las plantas de tomate injertadas en patrones de pimiento mostraron menores concentraciones de Cu, Mn y Zn, en relación con las plantas no injertadas, pero sin diferencias significativas para B, Fe y Mo.. Por otro lado, cuando se injertaron plantas de pimiento en patrones de tomate no hubo diferencias significativas en el contenido Cu, Fe y Mn mientras que las concentraciones de B, Mo y Zn mostraron una disminución significativa en comparación con las plantas no injertadas. Por lo tanto, en general, se observaron menores niveles de los micronutrientes en plantas injertadas, esto puede explicarse por la restricción de la conductividad hidráulica del xilema del patrón a la variedad.

### **2.5.9 El injerto y la fotosíntesis**

El crecimiento de la planta depende de varios factores (condiciones ambientales, el estado nutricional de la planta y las actividades hormonales) relacionados con diferentes procesos fisiológicos, como la fotosíntesis. El desarrollo de una estructura adecuada del sistema radicular se ha relacionado con el mayor crecimiento de plantas de melón injertadas sobre especies de calabaza (Bletsos, 2005). De acuerdo con Yetisir *et al.* (2007), todas las plantas injertadas de sandía mostraron un mayor número de hojas y mayor peso seco que las plantas de control no injertadas.

Los resultados obtenidos por Rouphael *et al.* (2008), He *et al.* (2009) y Zheng *et al.* (2009), en experimentos de plantas injertadas de pepino sobre patrones de calabaza, indicaron que no sólo el patrón sino también la variedad influye en el desempeño de los estomas, produciendo mayor tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> y menor resistencia estomática que las plantas no injertadas y/o plantas autoinjertadas.

Colla *et al.* (2010a) observaron que en plantas de sandía no injertadas, el área de la hojas estaba restringida en comparación con las sandías injertadas sobre patrones de calabaza, concluyendo que la restricción del área foliar es consecuencia de la inhibición de la fotosíntesis neta, lo que disminuye la disponibilidad de asimilados para el crecimiento de las mismas hojas. También, observaron que en plantas de pepino injertadas sobre patrones de calabaza, obtuvieron mayor rendimiento de follaje, probablemente debido a su capacidad para mantener la mayor asimilación neta de CO<sub>2</sub>. Además, se ha reportado por Zhou *et al.* (2009) que la mayor asimilación de CO<sub>2</sub> en plantas de pepino injertadas sobre patrones de calabaza podría deberse en parte a la mayor fuerza de las raíces del patrón.

El injerto mejora la fotosíntesis, mediante el incremento de las actividades de las enzimas antioxidantes, en el tomate (He *et al.*, 2009) y en la berenjena (Liu *et al.*, 2007). Los cambios en la bioquímica de la hoja pueden ocurrir en respuesta a la menor disponibilidad de sustratos de carbono bajo estrés prolongado, dando como resultado una baja regulación del metabolismo fotosintético (Chaves y Oliveira, 2004; Flexas *et al.*, 2006). La reducción de la actividad fotoquímica se considera que es uno de los factores, independientes al desempeño de los estomas, que limitan la fotosíntesis (Souza *et al.*, 2004). Por lo tanto, se ha demostrado que diferentes niveles de estrés disminuyen el contenido de clorofila (Liu *et al.*, 2007 y Rouphael *et al.*, 2008.) y la eficiencia fotoquímica del fotosistema II (PSII) pero estos efectos pueden mejorar con el injerto (Zheng *et al.*, 2009 y He *et al.*, 2009 ).

Mediciones in vivo de la fluorescencia de la clorofila se han utilizado para detectar los efectos del estrés sobre el funcionamiento del sistema fotosintético (Lichtenthaler y Rinderle, 1988). La actividad fotosintética de los cloroplastos es considerada como una de las funciones de las células más sensibles al calor. Abdelmageed y Gruda (2009) indicaron que las plantas injertadas (variedad de tomate sensible al calor injertada sobre patrones de tomate y berenjena resistentes al calor) se desarrollaron mejor bajo condiciones de estrés por altas temperaturas comparadas con las plantas no injertadas, la fluorescencia de la clorofila fue significativamente mayor en la etapa de fructificación-tardía para las plantas injertadas. La relación de la fluorescencia variable y la fluorescencia máxima ( $F_v/F_m$ ), indica la eficiencia fotoquímica del PSII (Öquist y Wass, 1988). Ahn *et al.* (1999) reportaron que la relación  $F_v/F_m$  mejoró en condiciones de baja temperatura mediante el injerto de pepino sobre un patrón de calabaza.

Estos resultados concuerdan con los de Zheng *et al.* (2009), quienes encontraron que el injerto reduce el daño al aparato fotosintético. Se observó un efecto similar cuando se injertó tomate sobre un patrón tolerante a la sal, ya que este mantiene mayor actividad fotoquímica del PSII (He *et al.*, 2009). De acuerdo con esto, Albacete *et al.* (2009) relacionaron un aumento inducido por el patrón en la productividad de los cultivos con los cambios en el área de la hoja y la capacidad fotosintética.

## **2.6 Generalidades de la fotosíntesis**

La fotosíntesis consiste en una serie de procesos que ocurren a través de los estomas, pequeñas aberturas situadas principalmente en la epidermis del envés de la hoja de las plantas verdes, en presencia de la luz solar mediante los cuales se transforman los minerales absorbidos por las raíces (savia bruta) en materias orgánicas (savia elaborada) que se reparte por todo el vegetal para

alimentar a todos los órganos de la planta y para reserva de alimentos. La fotosíntesis es una función de la planta, por la cual toma anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) de la atmósfera, agua y sales minerales procedentes de las raíces y desprende ( $\text{O}_2$ ). El  $\text{CO}_2$  atraviesa los estomas de las hojas, llega al mesófilo y finalmente a los cloroplastos. Esta difusión de  $\text{CO}_2$  a través de los estomas depende de la diferencia entre la concentración existente en los cloroplastos y la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera. También está relacionada con el contenido de humedad de las plantas, pues si hay estrés hídrico las hojas cierran los estomas y se anula la entrada de  $\text{CO}_2$  interrumpiéndose la fotosíntesis (Reche, 2008; Salisbury y Ross, 2000b).

En la fotosíntesis se pueden distinguir dos fases bien diferenciadas. Una primera de absorción y conversión de energía y otra de toma y asimilación de elementos constituyentes de la materia orgánica (C, H, O, N, S, etc.). La energía luminosa es absorbida por biomoléculas fotosensibles y transformada en una forma de energía bioquímica estable. Los elementos constitutivos son tomados de fuentes minerales inorgánicas (principalmente agua,  $\text{H}_2\text{O}$  y dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ ) e incorporados en biomoléculas orgánicas metabolizables. Ambas fases, la toma de energía y la toma de elementos, están perfectamente coordinadas e interrelacionadas. Así se puede decir que existe una foto-absorción de energía y una foto-asimilación de los elementos esenciales. La primera fase es un proceso de conversión de energía luminosa en energía electroquímica. Se inicia con la absorción de la luz por ciertos complejos pigmento-proteína denominados antenas, “cosechadora” de luz (LHC, Light Harvesting Complexes), y la posterior canalización de la energía de los fotones hacia los centros de reacción de los fotosistemas I y II, donde la energía se transforma en una corriente de electrones entre moléculas óxido-reductoras. Las reacciones de óxido-reducción producen, en último término, dos biomoléculas estables (NADPH y ATP) que se van acumulando. Estas biomoléculas son útiles como fuente de energía asimiladora, ya que proporcionan poder de reducción (el NADPH) y poder de enlace (el ATP)

necesarios para la siguiente fase. En la segunda fase de la fotosíntesis, se sucede toda una serie de reacciones de asimilación de elementos necesarios para la construcción biomolecular: C, H, O, N, S, etc. El elemento esencial y mayoritario en la materia orgánica es el carbono. El carbono, en la fotosíntesis, es tomado del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del aire (Taiz y Zeiger, 2006; Salisbury y Ross, 2000b).

La fotosíntesis se divide en dos fases: la primera ocurre en los tilacoides, en donde se capta la energía de la luz y ésta se almacena en dos moléculas orgánicas sencillas (ATP y NADPH). La segunda tiene lugar en el estroma y las dos moléculas producidas en la fase anterior se utilizan en la asimilación del CO<sub>2</sub> atmosférico para producir hidratos de carbono e indirectamente el resto de las moléculas orgánicas que componen los seres vivos (aminoácidos, lípidos, nucleótidos, etc). Tradicionalmente, a la primera fase se le denominaba *fase luminosa* y a la segunda *fase oscura* de la fotosíntesis. Sin embargo, la denominación como "fase oscura" de la segunda etapa es incorrecta, porque actualmente se conoce que los procesos que la llevan a cabo solo ocurren en condiciones de iluminación. Es más preciso referirse a ella como fase de fijación del dióxido de carbono (ciclo de Calvin) y a la primera como "fase fotoquímica" o reacción de Hill.

En la fase luminosa o fotoquímica, la energía de la luz captada por los pigmentos fotosintéticos unidos a proteínas y organizados en los denominados "fotosistemas" produce la descomposición del agua, liberando electrones que circulan a través de moléculas transportadoras para llegar hasta un aceptor final (NADP<sup>+</sup>) capaz de mediar en la transformación del CO<sub>2</sub> atmosférico (o disuelto en el agua en sistemas acuáticos) en materia orgánica. Este proceso luminoso está también acoplado a la formación de moléculas que funcionan como intercambiadores de energía en las células (ATP). La formación de ATP es necesaria también para la fijación del CO<sub>2</sub> (Taiz y Zeiger, 2006; Azcón-Bieto y Talón, 2008).

Todos los productos que se obtienen de la horticultura surgen a partir de la fotosíntesis. Las hojas fijan  $\text{CO}_2$  de la atmósfera que, con la energía del sol y el agua del suelo, realizan la fotosíntesis. Este azúcar, producto de la fijación del  $\text{CO}_2$ , queda disponible para el crecimiento vegetativo y para la producción de tomate. Como el rendimiento y la calidad del tomate dependen de la fotosíntesis, y a su vez, la fotosíntesis depende de diversos factores. Dentro de los factores climáticos destacan la luz, la temperatura y el agua disponible para la planta. Estos factores pueden modificarse en gran medida por el horticultor manipulando diversos factores de cultivo: el injerto (con las ventajas antes mencionadas); el sistema de poda y conducción; la orientación de las camas; el espaciamiento entre plantas y entre camas; la utilización de sistemas de riego, entre otras, ya que estas decisiones permiten manipular los microclimas luminoso, térmico e higrométrico del cultivo (Taiz y Zeiger, 2006; Bidwell, 1993).

## **2.6.2 Factores que influyen en la eficiencia fotosintética.**

### **2.6.2.1 Luz**

Los procesos fisiológicos de las plantas están estrechamente ligados a los tres parámetros esenciales antes mencionados: luz, temperatura y agua. La radiación solar captada por las hojas condiciona el equilibrio fisiológico de la planta, ya que incide sobre la temperatura foliar, el estado hídrico de la planta y, muy especialmente, sobre la producción de carbohidratos (capacidad fotosintética) de la planta entera. Todo ello afectará, en último término, al potencial cualitativo de los racimos. La determinación de la radiación absorbida por las hojas, y su distribución, es un elemento esencial para la comprensión de los fenómenos fisiológicos de la planta.

La luz solar es uno de los factores más importantes que afectan a la capacidad fotosintética del cultivo. Es la energía que permite arrancar el aparato fotosintético. Sin embargo, no toda la radiación solar es útil para la fotosíntesis, sólo una parte puede ser utilizada, de forma que la energía de los fotones

incidentes pueda convertirse en energía química ATP (adenosina trifosfato). A esta parte de la luz solar se le conoce como PAR (Radiación Fotosintéticamente Activa) y normalmente se acepta que está entre longitudes de onda de 400-700 nm (Taiz y Zeiger, 2006).

La fotosíntesis responde positivamente al incremento del PAR. A partir del valor de PAR en el que no hay asimilación neta ( $I_c$ , punto de compensación), donde la respiración iguala a la fijación de carbono, la fotosíntesis aumenta rápidamente frente al incremento del PAR, para luego ir disminuyendo su tasa de crecimiento hasta entrar en una fase de saturación, donde el PAR que recibe permite que la asimilación neta sea máxima ( $I_s$ , punto de saturación) (Taiz y Zeiger, 2006). A partir de entonces, la fotosíntesis varía muy poco aunque aumente significativamente el PAR (Figura 4).

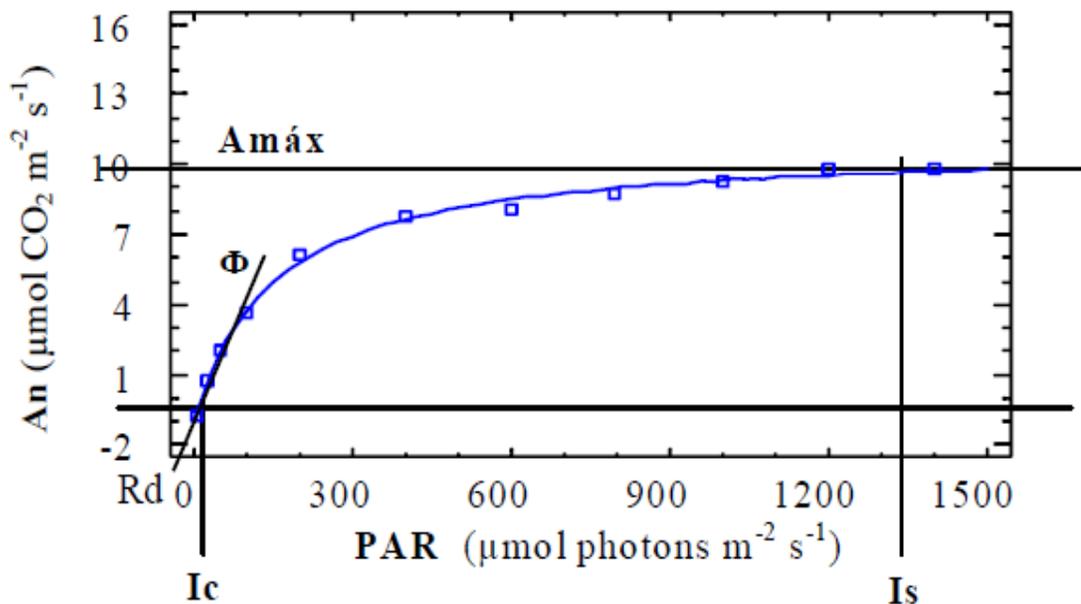


Figura 4. Ejemplo de curva de respuesta fotosintética a la luz (A/PAR) que muestra la influencia de la intensidad luminosa (PAR) sobre la fotosíntesis neta (A) de la hoja, así como el Punto de Saturación ( $I_s$ ) y el Punto de Compensación ( $I_c$ ). (Taiz y Zeiger, 2006).

El PAR captado por el cultivo influye en la fotosíntesis. Aquellas estructuras foliares que permiten mayor intercepción solar, presentarán

mayores tasas de fotosíntesis. Por otro lado, en la intercepción y distribución de la energía luminosa, y en la eficiencia con la que es aprovechada fotosintéticamente, no sólo depende de la superficie foliar total y de su densidad sino también de la distribución de sus hojas, en la medida que estén expuestas las hojas maduras, las hojas senescentes o jóvenes, o las de posiciones inferiores o superiores. Así, las hojas que se encuentren desfavorecidas en el microclima luminoso, es decir, que reciban y se adapten a la sombra, presentarán menor fotosíntesis neta, y se saturan a intensidades de PAR más bajas y reducen su eficiencia en la carboxilación (Iacono *et al.*, 1995). En los sistemas de conducción con cubiertas vegetales densas, las hojas internas y las hojas adultas de la zona inferior tienen estas características fotosintéticas por lo que, en muchas ocasiones, se les ha calificado como parasitarias.

La mayor parte de la fotosíntesis se realiza en las hojas más externas ya que las hojas internas están expuestas a bajos niveles de radiación, o a radiación difusa, con lo que contribuyen mucho menos en la fotosíntesis global del cultivo. Sin embargo, la sobreexposición lleva consigo efectos negativos. En iluminaciones excesivas, la fotosíntesis no puede consumir toda la energía absorbida por las clorofilas, con lo que queda una energía en exceso almacenada que puede desencadenar reacciones oxidativas en los centros de reacción del aparato fotosintético.

#### **2.6.2.2 Humedad**

El contenido de humedad de la planta incidirá, al mismo tiempo en la apertura de los estomas y en la absorción de nutrimentos, , con escasez de agua los estomas tenderán a cerrarse e igualmente la disponibilidad de nutrimentos en el suelo.

### 2.6.2.3 Respiración

Es un proceso inverso a la fotosíntesis mediante el cual la planta absorbe oxígeno (O<sub>2</sub>) a través de todos sus órganos y desprende **CO<sub>2</sub>** por las hojas, tallos y raíces. El proceso de respiración se puede resumir en la siguiente ecuación:  $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 = 6CO_2 + 6H_2O + \text{energía}$  (675000 calorías por mol de glucosa). La respiración, al contrario de la fotosíntesis, es un proceso continuo durante el día y la noche, muy activo en hortalizas de invernadero, y no es más que una combustión de alimentos con la participación del oxígeno que actúa de carburante. El oxígeno captado a través de los estomas llega a las mitocondria, gránulos filamentosos que se encuentran flotando en el interior de todas las células vegetales, donde se realiza la respiración quemando materia orgánica transportada por la savia elaborada. La respiración es más intensa durante la noche, ya que durante el día la función clorofílica limita el consumo de oxígeno. El proceso respiratorio se produce esencialmente a expensas de la energía procedente de la función clorofílica, por lo tanto cuanto mayor sea la respiración el rendimiento de la actividad fotosintética será menor (Salisbury y Ross, 2000b).

### 2.6.2.4 Transpiración

Mediante este proceso se expulsa vapor de agua a través de la epidermis, principalmente por las estomas, que son los encargados de regular dicha función, eliminando el exceso de agua que lleva la savia ascendente. El agua evaporada representa el 99% del agua absorbida por las raíces. Todas las partes de la planta, especialmente las hojas, eliminan vapor de agua mediante la transpiración. Al absorber las sales minerales, la planta toma más agua que la que normalmente necesita, por lo que debe eliminar parte de ella, permitiendo una mayor concentración de agua en las hojas. Con este proceso la planta regula su temperatura desprendiendo vapor de agua y facilitando el ascenso de la savia bruta.

La transpiración se produce esencialmente durante el día, dependiendo de las condiciones ambientales (luminosidad, temperatura, humedad, etc.), las cuales van a influir en mayor o menor cantidad en el agua transpirada. La transpiración vegetal es más intensa cuanto más seco y cálido es el ambiente del invernadero. Similarmente, en períodos críticos provocados por estrés hídrico, los estomas tienden a cerrarse y la transpiración se reduce. La capacidad hídrica de la planta depende del aporte a través de la humedad del suelo y el nivel de transpiración que regula las pérdidas. Finalmente, el equilibrio entre entrada y salida del agua dependerá esencialmente, de la superficie y apertura estomática de la planta, de la intensidad de la iluminación que estimula la apertura de estomas y de la concentración de CO<sub>2</sub> (Azcón-Bieto y Talón, 2008; Bidwell, 1993).

Alrededor del 80% de la radiación que incide sobre las hojas es energía que las calentará y que será disipada por transpiración. Intriari *et al.* (1998) indican que la transpiración está estrechamente relacionada con la radiación absorbida por la planta, observaron que la transpiración estaba correlacionada con la iluminación de manera que aumentaba hasta los 1200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  de PAR, donde se saturaba. La superficie foliar representa el área de intercambio entre la planta y el medio aéreo y, por tanto, la intensidad y calidad de estos intercambios dependerá de ella. Ya que las hojas son las unidades funcionales de la fotosíntesis, su eficiencia en la captación y la utilización de la energía solar será determinante para la productividad.

Por otra parte, el agua es uno de los reactivos de la reacción fotosintética que, a la vez, juega un papel importante en la regulación estomática y en la hidratación de las hojas activas. La cantidad del agua absorbida por las raíces, que se combina con el CO<sub>2</sub> atmosférico en la reacción fotosintética es únicamente el 1%. El 99% restante se pierde por transpiración. Si la demanda evaporativa de la atmósfera supera el suministro de agua a través de las raíces,

se producirá un déficit hídrico en la hoja. Si este estrés foliar, medido como potencial hídrico foliar, supera los -1.0 MPa, los estomas empiezan a cerrarse y la fotosíntesis se frena. Si hay suficiente agua en el suelo, la planta podrá recuperar su estado hídrico foliar, principalmente por la noche cuando la demanda evaporativa es menor y los estomas permanecen cerrados por la falta de luz. Si no fuese así, los estomas pueden sufrir un daño reversible que retarden la recuperación de su funcionalidad y por tanto la activación de la fotosíntesis.

#### **2.6.2.5 La conductancia estomática**

Otros factores que afectan a la fotosíntesis son internos a la planta. Dentro de los factores intrínsecos están las características estomáticas y la capacidad del proceso fotosintético *per se*, las relaciones fuente a demanda, y la edad foliar. Las hojas tienen una capacidad de fijar CO<sub>2</sub> limitada, debido a la resistencia que opone a su difusión desde los estomas hasta el cloroplasto, siendo la resistencia estomática la más importante. En ausencia de limitaciones hídricas, la conductancia estomática está fuertemente correlacionada con el microclima luminoso y térmico de las hojas. Iacono *et al.* (1995) resumieron el efecto de la luz en el comportamiento estomático: los estomas se abren y se cierran como respuesta a la luz. La apertura comienza al amanecer con muy bajas intensidades, de tal forma que cuando se alcanzan los 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  están completamente abiertos. En el transcurso del día, la combinación de factores ambientales e intrínsecos de la planta determina el comportamiento estomático, pero en cualquier caso, al atardecer como consecuencia de la caída de la luz, se cerrarán y permanecerán así durante toda la noche.

La pérdida de vapor de agua en las plantas, es un proceso controlado, tanto por factores físicos externos, como factores fisiológicos. La radiación solar proporciona la fuente de energía para la transpiración, siendo la evaporación del agua en la hoja la que establece el gradiente de potencial hídrico en la planta. La intensidad transpiratoria depende del suministro de energía, del

gradiente de presión de vapor y de la magnitud de las resistencias. La resistencia difusiva al movimiento del vapor de agua desde la hoja al aire tiene tres componentes: cuticular, estomático y de capa límite. La resistencia cuticular es, ordinariamente, muy elevada y, por tanto, la mayor parte del vapor se mueve a través de los estomas. Las variaciones en la abertura estomática se producen como consecuencia de cambios en la turgencia de las células oclusivas. La regulación de la abertura estomática es muy compleja, ya que los estomas responden a una diversidad de influencias ambientales (por ejemplo, luz, humedad, temperatura, concentración de CO<sub>2</sub>) y endógenas, tales como producción y liberación de hormonas en raíz y hoja. etc. (Azcón-Bieto y Talón 2008; Taiz and Zeiger, 2006)

## **2.7 Nutrición**

### **2.7.1 Generalidades**

La nutrición depende de varios factores: unos proporcionan energía, como son las condiciones ambientales, temperatura y luminosidad, y otros proporcionan nutrientes químicos, como son los macro elementos y micro elementos, agua, anhídrido de carbónico etc. Además, otros factores también incluyen en la nutrición, entre los que se encuentran:

- El suelo de donde la planta extrae, a través de las raíces, minerales disueltos en agua. El suelo ha de reunir condiciones físicas, químicas y biológicas que aseguren el buen desarrollo de las raíces.
- La dosificación del agua y fertilizantes de acuerdo con las exigencias de cada especie vegetal y de cada etapa de crecimiento.

- Las condiciones ambientales del invernadero que procuran rodear la planta del clima más favorable en cada una de sus fases vegetativas.
- El control racional de los patógenos.

Para la absorción de los elementos, a excepción de los gases, es imprescindible que estén disueltos en agua. De esta forma las sales minerales y el agua penetran continuamente a través de las unidades celulares de los pelos absorbentes (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

### **2.7.2 Absorción del agua**

El sistema radical sirve para sujetar la planta al suelo y, sobre todo, para encontrar las grandes cantidades de agua que la planta requiere. El agua entra en la mayoría de las plantas por las raíces, especialmente por los pelos radicales, situados unos milímetros por encima de la cofia. Estos pelos, largos y delgados poseen una elevada relación superficie/volumen y, pueden introducirse a través de los poros del suelo de muy pequeño diámetro. Los pelos absorbentes incrementan de esta manera la superficie de contacto entre la raíz y el suelo. Desde los pelos radicales, el agua se mueve a través de la corteza, la endodermis (la capa más interna de la corteza) y el periciclo, hasta penetrar en el xilema primario. Este movimiento estará causado por la diferencia del potencial hídrico entre la corteza de la raíz y el xilema de su cilindro vascular, y el camino seguido estará determinado por las resistencias que los caminos alternativos pongan a su paso. Hay que distinguir dos caminos alternativos: el simplasto (conjunto de protoplastos interconectados mediante plasmodesmos) y el apoplasto (conjunto de paredes celulares y espacios intercelulares).

En general, se considera que el apoplasto formado principalmente por celulosa y otras sustancias hidrófilas, presenta una menor resistencia al paso

de agua que el simplasto, en el que abundan lípidos, sustancias hidrófobas, orgánulos y partículas que aumentan la viscosidad del medio. El camino que siguen el agua y los solutos en la planta puede ser apoplástico o simplástico, o una combinación de ambos (Marschner, 1986).

### **2.7.3 Absorción de nutrimentos minerales en la planta**

Las plantas toman los componentes esenciales de su biomasa del suelo, a excepción del C, H y O. Así macronutrimentos y micronutrimentos son incorporados desde la solución salina del suelo hasta el interior de las células, donde son almacenados, metabolizados o transportados a otras células, tejidos u órganos. Una característica que comparten todas las células vivas es su capacidad de mantener en su interior iones y moléculas notablemente fuera del equilibrio externo. En gran medida, esa propiedad se debe a las características estructurales y funcionales de la membrana plasmática, plasmalema en las células vegetales.

Los iones alcanzan la zona de absorción de la raíz por difusión a través de la solución salina del suelo, son arrastrados por el movimiento del agua hacia la raíz o entran en contacto con las zonas de absorción a medida que la raíz crece. Los nutrimentos minerales se distribuyen por toda la planta a través del xilema impulsados por la corriente ascendente de agua que genera el flujo de transpiración. Así, de la misma forma que el agua debe transportarse radialmente en la raíz para alcanzar el xilema, los iones siguen un camino similar. Al igual que el agua, el transporte radial de iones por la raíz tiene lugar a través del apoplasto y del simplasto. Las células vegetales están separadas por la pared celular, que forma una matriz porosa continua denominada espacio libre aparente, espacio periplásmico o apoplasto. Agua, iones y moléculas de pequeño tamaño se pueden difundir libremente a través del apoplasto de forma que, en teoría, un ion puede viajar radialmente en la raíz por esta vía. A lo largo de este recorrido, los iones pueden absorberse por las células tanto de la

epidermis como del córtex. La existencia de la banda de Caspari en las células de la endodermis supone una barrera infranqueable en el camino hacia el xilema: tanto del agua como de los nutrientes que deben obligatoriamente atravesar el plasmalema de las células que componen la endodermis. La permeabilidad, selectividad y afinidad de los canales y transportadores localizados en el plasmalema de las células de la endodermis determinan, en última instancia, qué solutos y a qué velocidad se incorporan o se liberan.

Otra vía posible para la entrada de iones es la simplástica. En este caso, los iones son primero incorporados a las células de la epidermis o incluso del córtex y luego son transportados, célula a célula, a través del córtex, la endodermis y el periciclo hasta el xilema. El transporte de una célula a otra se lleva a cabo a través de los plasmodesmos, que son conexiones tubulares (de 20 a 60 nm de diámetro) entre células, que atraviesan la pared celular y la lámina media y que ponen en contacto los citoplasmas de dos células adyacentes en la mayoría de las plantas. Dentro de los plasmodesmos hay otro tubo que parece estar ocluido, denominado desmotúbulo, formado por membranas del retículo endoplásmico, que se extendería así de una célula a otra. La densidad de plasmodesmos es muy alta unos 15 por  $\mu\text{m}^2$  y, cuantitativamente, parecen ser la vía principal para el transporte transcelular de agua e iones (Taiz y Zeiger, 2006; Azcón-Bieto y Talón, 2008).

#### **2.7.4 Elementos esenciales**

En las plantas cultivadas se han descrito 17 elementos, denominados esenciales, para que estas puedan completar adecuadamente su desarrollo. El 95 % del peso fresco total de las plantas lo constituyen tres elementos, el carbono (C), el hidrogeno (H) y el oxígeno (O), todos provenientes de la atmosfera y del agua, los que se incorporan a las plantas mediante el proceso de la fotosíntesis. El carbono proviene del  $\text{CO}_2$  del aire, así como la mayor parte

del O<sub>2</sub> en cambio el H y una menor parte O<sub>2</sub> provienen del agua, la cual debe llegar al suelo para ser absorbida por las plantas y trasladada por su sistema vascular hasta las hojas donde se realiza el proceso fotosintético. El resto de los elementos las plantas los toman desde el suelo en distintas cantidades, por ello se les agrupa en macro elementos para referirse a aquellos que las plantas los requieren en mayor cantidad, como es el caso del nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S); y micro elementos cuando son requeridos en pequeñas cantidades, como fierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn) boro (B), molibdeno (Mo), cloro (Cl) y níquel (Ni) (Azcón-Bieto y Talón, 2008)

#### 2.7.4.1 Funciones de los elementos esenciales de las plantas

Los nutrimentos minerales tienen funciones específicas y esenciales en el metabolismo vegetal. Un nutrimento mineral puede funcionar como un constituyente de una estructura orgánica, como un activador de reacciones enzimáticas, ó como un carrier de carga y osmorregulador. En el Cuadro 1 se sintetizan las principales funciones de cada uno de los macronutrimentos y micronutrimentos (Marschner, 1986 y Favela *et al.*, 2006)

Cuadro 1. Principales funciones de los macronutrimentos y micronutrimentos en las plantas (Marschner, 1986 y Favela *et al.*, 2006).

Elemento	Función
Nitrógeno	Después del carbono, el hidrógeno, el oxígeno y el potasio, el N es uno de los elementos más abundante en las plantas. El N se encuentra en la planta en forma orgánica e inorgánica, y forma parte de los aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, enzimas clorofila y alcaloides. Aunque el N inorgánico se puede acumular en forma de nitrato, el N orgánico predomina por el mayor peso molecular de las proteínas vegetales. Alrededor del 80 % del N que absorbe la planta, se utiliza para formar proteínas, el 10 % ácidos nucleicos, el 5 % aminoácidos solubles y clorofila.
Fósforo	El P es un componente de ciertas enzimas y proteínas, adenosina trifosfato (ATP), ácido ribonucleico (ARN) y ácido desoxirribonucleico (ADN); el ATP participa en varias reacciones de transferencia de energía, el ARN y el ADN son componentes de la información genética; también el P

	forma parte del ácido fítico, principal forma de P en las semillas.
Potasio	El K actúa como coenzima o activador de coenzimas. La síntesis de proteínas requiere altos niveles de K. Este elemento no forma parte estable en la estructura de ninguna de las moléculas que se encuentran dentro de las células vegetales. El K es un activador en gran cantidad de procesos, los cuales son necesarios para la conservación del estado del agua de la planta y de la presión de la turgencia de las células, así como para la apertura y el cierre estomático. El K promueve la acumulación y la rápida translocación de los carbohidratos elaborados recientemente.
Azufre	La función más importante del S se relaciona con su participación en la síntesis de las proteínas. El azufre forma parte de los aminoácidos cisteína, cistina, tiamina y metionina; también de compuestos como la coenzima A, vitamina B1 y algunos glúcidos, los cuales dan el olor y sabor característicos a algunas plantas, como las crucíferas y liliáceas.
Magnesio	El Mg es la parte esencial de la molécula de clorofila y es necesario para la actividad de muchas enzimas incluyendo aquellos pasos más importantes en la actuación del ATP. Es esencial para mantener la estructura del ribosoma.
Calcio	El Ca se encuentra a menudo precipitado como cristales de oxalato cálcico en las vacuolas. Se encuentra también en las paredes de la célula como pectato cálcico, el cual une las paredes primarias de las células adyacentes. Mantiene la integridad de la membrana y forma parte de la enzima $\alpha$ -amilasa. Algunas veces interfiere la capacidad del Magnesio para activar las enzimas.
Hierro	El Fe actúa como portador de electrones en la fotosíntesis y la respiración. Forma también parte esencial de la ferredoxina y, posiblemente, de la nitrato reductasa, activando también algunas otras enzimas. El Fe presenta dos estados de oxidación ( $Fe^{2+}$ y $Fe^{3+}$ ). El Fe es de gran importancia en los sistemas redox biológicos y puede funcionar como componente estructural o como cofactor enzimático. Forma parte estructural de: citocromo (paso final de la respiración), citocromo oxidasa (transporte de electrones), catalasa, peroxidasa y ferredoxina; es necesario para la reducción del nitrato y sulfato, la asimilación del N atmosférico y la producción de energía (NADP); también se encuentra asociado con la síntesis de la clorofila.
Cloro	El Cl es un micronutriente esencial para las plantas y su función se le relaciona con la evolución del oxígeno en el proceso de fotosíntesis, especialmente unida al fotosistema II en los cloroplastos. En ausencia de $Cl^-$ , los cloroplastos se deterioran rápidamente con la luz, Este nutriente aumenta la presión osmótica celular y participa en la regulación del nivel de turgencia de la planta, a través de la regulación de la apertura y cierre de estomas.
Manganeso	El Mn activa una o más enzimas en la síntesis de los ácidos grasos. Activa también la enzima responsable de la formación del DNA y RNA, actuando también en la enzima: deshidrogenasa en el ciclo de Krebs. Participa directamente en la producción fotosintética de oxígeno molecular $O_2$ a partir de $H_2O$ y puede tomar parte en la formación de la clorofila.

Boro	La función más conocida del B es la transportación de azúcares a través de la planta; también participa en la síntesis del ácido giberélico y en el metabolismo del ARN. El papel que desempeña el B en la germinación del polen y su viabilidad, es de gran importancia.
Zinc	Es fundamental en la síntesis de auxinas, especialmente en la ruta metabólica del triptófano que conduce a la formación del ácido indolacético. Las enzimas que requieren zinc para su actividad, son: anhidrasa carbónica, alcohol deshidrogenasa, algunas piridina nucleotido deshidrogenasa, glucosa-fosfato deshidrogenasa y trifosfato deshidrogenasa. Activa las enzimas alcohol deshidrogenasa, ácido láctico deshidrogenasa, ácido glutámico deshidrogenasa y carbopeptidasa.
Cobre	El Cu, Por su importancia en procesos redox, es un nutrimento con características similares a las del hierro. El Cu es un componente de la proteína del cloroplasto denominada plastocinina, que toma parte en el sistema de transporte de electrones en el fotosistema I y II; también participa en el metabolismo de las proteínas y carbohidratos, en la fijación del N atmosférico, y es un componente de las enzimas (citocromo oxidasa, polifenol oxidasa y ácido ascórbico oxidasa), las cuales reducen el oxígeno molecular (O <sub>2</sub> ), al catalizar procesos de oxidación
Molibdeno	Su función parece estar relacionada con las reacciones de transferencia de electrones. El Mo es constituyente de las enzimas nitrato reductasa y nitrogenasa; la primera, indispensable en la reducción de los nitratos, la segunda, en la fijación biológica de nitrógeno.
Carbono	El C es el constituyente de todos los compuestos orgánicos encontrados en las plantas.
Hidrógeno	El H es el constituyente de todos los compuestos orgánicos en los cuales el carbono también se encuentra formando parte. Es muy importante su acción en el intercambio de cationes en la relación planta-suelo.
Oxígeno	El O forma parte de la mayoría de los compuestos orgánicos de las plantas. Solamente unos pocos de estos compuestos orgánicos, como, por ejemplo, el caroteno, no contienen oxígeno. También da lugar al intercambio de aniones entre las raíces y el medio exterior. Es por último, receptor terminal de electrones en la respiración aerobia.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Localidad, clima, suelo y agua

El experimento se llevó a cabo en los invernaderos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León ubicada en el Municipio de Escobedo N.L. (Figura 5) Las principales características climáticas del área de trabajo son: altura sobre el nivel del mar de 427 m, siendo sus coordenadas geográficas 25° 45' LN y 100° 17' LW. El clima de la región es semiárido con una precipitación pluvial de 550 mm anuales y temperatura media anual de 23 °C.



Figura 5. Invernadero israelita tipo gótico 1000 m<sup>2</sup>, FAUANL, Escobedo, N. L

#### 3.2 Clima

El clima de Escobedo se puede situar entre los climas secos (Bso), asociado al tipo de vegetación de los matorrales espinosos y desérticos. La mayor parte del territorio está catalogado como sub-tipo seco cálido con lluvias en verano; dentro de la estación de lluvias también se presenta sequía de medio verano. Una precipitación anual que oscila entre los 400 y 600 mm; la mayor parte del municipio presenta una temperatura media anual que fluctúa entre los 22 y 24°C. En cuanto a humedad, es bastante baja y se deriva de los

factores antes mencionados y de la influencia de vientos secos en la zona, esta sequedad es un poco suavizada por los vientos alisios que le proporcionan humedad en cierta medida. En el Cuadro 2 se presentan los datos de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero.

Cuadro 2. Temperatura y humedad relativa máxima, mínima y promedio dentro del invernadero durante período en que se llevó a cabo la investigación.

	TEMPERATURA °C			HUMEDAD RELATIVA %		
	Max	Min	Prom	Max	Min	Prom
FEBRERO	21.2	9.3	15.2	79.9	58.6	69.2
MARZO	36.2	9.6	22.9	87.5	18.0	52.7
ABRIL	39.3	18.5	28.9	91.0	83.0	87.0
MAYO	40.9	20.6	30.8	85.0	33.5	59.2
JUNIO	38.5	23.0	30.7	92.5	64.5	78.5
JULIO	39.6	22.7	31.1	99.5	68.0	83.8

### 3.3 Suelo y agua

El suelo del invernadero es de textura arcillosa ya que tiene 19.54% de arena, 25.28% de limo y 54.88% de arcilla. La conductividad eléctrica es de 6.8 dS/m por lo que es un suelo salino. En cuanto a la calidad del agua tiene una CE de 2.47 dS/m y un pH de 7.1, la cual tiene niveles altos de sales.

### 3.4 Tratamientos y diseño experimental

En el experimento se evaluaron dos variedades de tomate indeterminado (Macarena y Pilavy de la compañía Syngenta), injertadas sobre el patrón multifort. Los testigos: variedades autoinjertadas (variedades injertadas sobre sí mismas para evaluar el efecto del estrés por el corte) y variedades sin injertar. Las plantas se condujeron a uno y dos tallos. En el Cuadro 3 se presenta el material vegetal utilizado. El experimento se estableció bajo un diseño experimental factorial (2x2x3) en bloques al azar con 12 tratamientos y 4

repeticiones, donde la unidad experimental fue de 10 plantas y/o tallos (Cuadros 4, 5 y Figura 6). El modelo estadístico utilizado es el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + \beta_i + A_j + B_k + C_l + (AB)_{jk} + (AC)_{jl} + (BC)_{kl} + (ABC)_{jkl} + \varepsilon_{ijkl}$$

Cuadro 3. Material vegetal: Patrón y Variedades

VARIEDADES	PATRÓN
	MULTIFORT (M)
PILAVY (P)	M*P
MACARENA (Ma)	M*Ma

Cuadro 4. Descripción de factores y niveles

	FACTOR A	FACTOR B	FACTOR C
<b>NIVEL 1</b>	UN TALLO	PILAVY	INJERTO EN MULTIFORT
<b>NIVEL 2</b>	DOS TALLOS	MACARENA	VARIEDAD EN VARIEDAD
<b>NIVEL 3</b>	-	-	TESTIGO

Cuadro 5. Descripción de los tratamientos

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN
<b>A-B-C</b>	
T1 (1- 1- 1)	1M*P
T2 (1 -1- 2)	1P*P
T3 (1- 1- 3)	1P
T4 (1- 2- 1)	1M*Ma
T5 (1- 2- 2)	1MA*Ma
T6 (1- 2- 3)	1Ma
T7 (2- 1- 1)	2M*P
T8 (2- 1- 2)	2P*P
T9 (2- 1- 3)	2P
T10 (2- 2- 1)	2M*Ma
T11 (2- 2- 2)	2MA*Ma
T12 (2- 2- 3)	2Ma

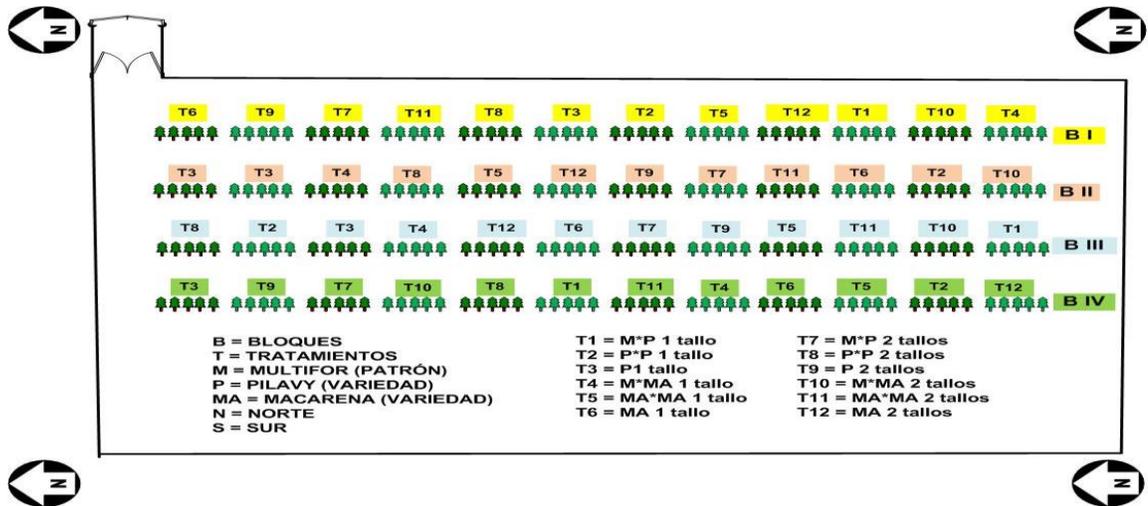


Figura 6: Distribución de los tratamientos en el invernadero

### 3.5 Establecimiento del experimento

#### 3.5.1 Preparación del Suelo

El suelo se preparó mediante el uso de cinceles, se inundó para lixiviar sales y posteriormente en la línea de las camas se pasó una roto-cultivadora para romper terrones grandes y dejar lista la cama de siembra para el trasplante. Posteriormente se inundó el suelo para lixiviar sales, se instaló el sistema riego por cintillas y se desinfectó el suelo utilizando Buzan (Metam Sodio).

#### 3.5.2 Preparación de plántulas e injerto

Las plantas injertadas se mandaron maquilar a Viveros Biota S.A. de C.V., empresa especializada en la producción de plántulas e injertos que cuenta con alta tecnología y amplia experiencia ubicada en la Ciudad de Querétaro, Qro.

#### 3.5.3 Trasplante

Las plántulas injertadas y conducidas a 1 y 2 tallos se recibieron el 12 de febrero, se aclimataron 3 días en el semillero y posteriormente se procedió al

trasplante en el invernadero el 15 de febrero del 2010 (Figura 7). El marco de plantación fue a doble hilera con una distancia entre hileras y entre plantas de 50 cm y entre camas de 1.80 m. El total de plantas por cama fue de 180. Se utilizó el sistema de plantación tresbolillo. Después del trasplante se colocaron los ganchos y la rafia para tener listo el sistema de entutorado.



**b**





Figura 7. Trasplante; a) Plántulas injertadas, autoinjertadas y sin injertar, b) Preparación de plántulas injertadas para el trasplante, c) Trasplante, d) Plántula trasplantada

### 3.5.4 Polinización

Se polinizó con una caja conteniendo 80 abejorros (*Bombus terrestris* L) para 1000 m<sup>2</sup> de invernadero, los cuales tienen un ciclo de vida productiva de 12 semanas.

### 3.5.5 Entutorado

El cultivo se tutoró a uno y dos tallos por planta, según el tratamiento. El tutorado se inició con la colocación de un anillo de plástico en la base del tallo para sostener la rafia, la cual se amarró en la parte superior a un gancho colgado a un alambre a 3 m de altura; en el proceso se utilizan 10 m de rafia

por planta, enredándose en el gancho 7 m. A medida que crecieron las plantas, estas se enredaron en la rafia en sentido contrario a las manecillas del reloj. (Figura 8)

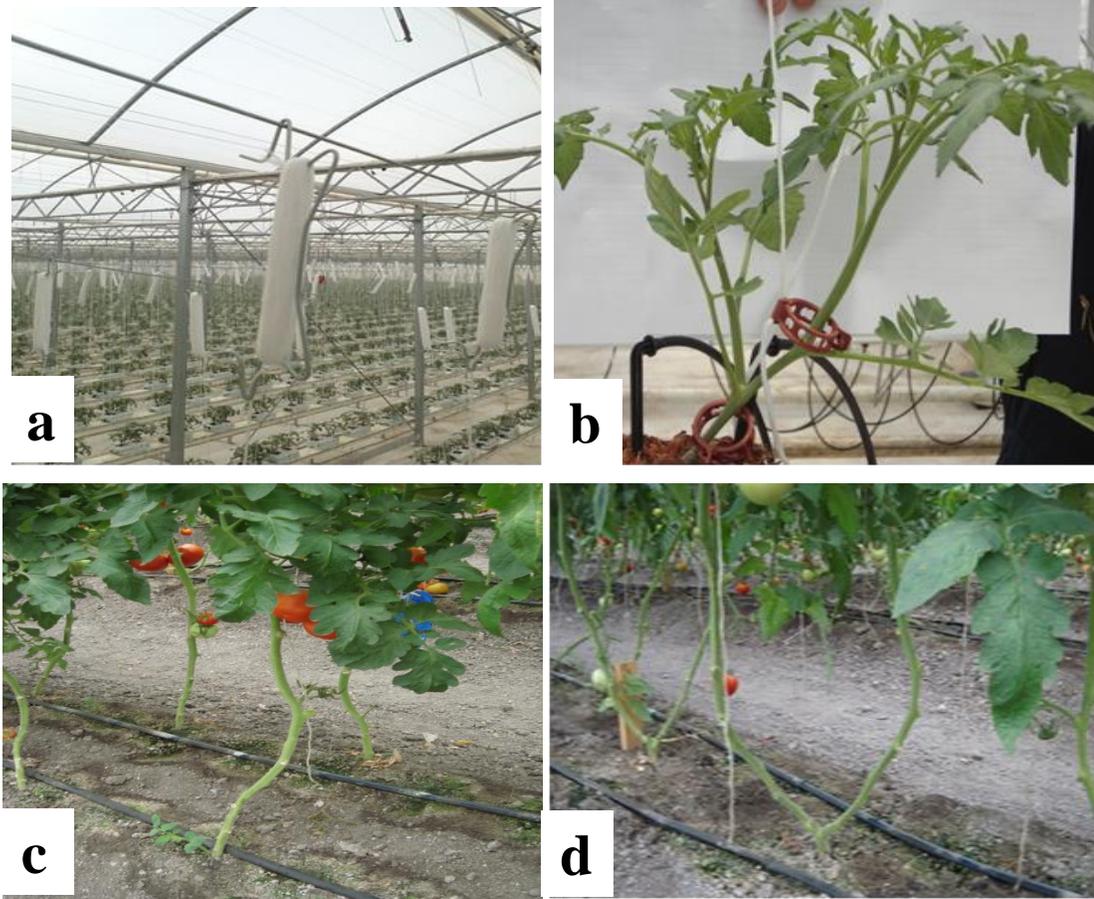


Figura 8. Entutoreado a uno y dos tallos; a) Gancho de entutorado, b) Anillo de entutorado, c) Planta injertada conducida a un tallo, d) Planta injertada a dos tallos.

### 3.5.6 Desbrote

Se retiraron todos los brotes nuevos que crecían en la axila de cada hoja verdadera con la finalidad de tener 1 ó 2 tallos según el tratamiento. La actividad de desbrote se realizó una vez a la semana (Figura 9).



Figura 9. Desbrote de planta de tomate.

### 3.5.7 Deshoje

El deshoje se realizó cuando los frutos del racimo inferior alcanzaron el tamaño comercial. El corte de las hojas por abajo del racimo inferior se realizó con tijeras podadoras (Figura 10).



Figura 10. Deshoje de planta de tomate.

### 3.5.8 Raleo de frutos

El aclareo de frutos se llevó a cabo con la finalidad de tener una mayor proporción de frutos grandes y evitar un debilitamiento prematuro de la planta.

En los primeros cinco racimos se dejaron cinco frutos y en los siguientes únicamente cuatro (Figura 11).



Figura 11. Raleo de frutos de tomate

### 3.5.9 Control de plagas y enfermedades

Para prevenir y controlar plagas y enfermedades se aplicó el insecticida: Bifentrina a  $0.15 \text{ ppm}$  y los fungicidas: Previcur (*Propamocarb-HCl*) a  $1.5 \text{ ml L}^{-1}$ , Derosal (*Metilbenzimidazol-2-ilcarbamato*) a  $0.5 \text{ ml L}^{-1}$  y Amistar (*Azoxystrobin*) en dosis de  $1,5 \text{ g L}^{-1}$ .

### 3.5.10 Riego y Fertilización

Los riegos se aplicaron de acuerdo a las lecturas del tensiómetro (20-25 centibares). La solución nutritiva se aplicó uniformemente a todos los tratamientos, ajustada al análisis del suelo y a la demanda requerida en las

etapas fenológicas de crecimiento y producción. Las dosis aplicadas y la frecuencia fueron las siguientes:

Crecimiento: 30 kg ha<sup>-1</sup> sem<sup>-1</sup> de (19 N - 19 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 19 K<sub>2</sub>O) y  
70 kg ha<sup>-1</sup> sem<sup>-1</sup> de (12 N - 00 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 43 K<sub>2</sub>O)

Producción: 40 kg ha<sup>-1</sup> sem<sup>-1</sup> de (19 N - 19 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 19 K<sub>2</sub>O) y  
120 kg ha<sup>-1</sup> sem<sup>-1</sup> de (12 N - 00 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 43 K<sub>2</sub>O)

### **3.6 Análisis foliar**

El muestreo de hojas para llevar a cabo el análisis foliar se realizó considerando la quinta hoja desde el ápice de crecimiento (Jones, 1998 y Cadahía, 2005) en tres plantas tomadas completamente al azar de cada unidad experimental. La determinación de fósforo (P) se hizo por colorimetría, la determinación de Nitrógeno (N) por kjeldhal y las determinaciones de K, Ca, Mn, Cu, Fe y Zn se realizaron por espectrofotometría de absorción atómica (Jones, 2001).

### **3.7 Análisis de fotosíntesis**

Para evaluar el efecto del injerto de tomate sobre la actividad fotosintética, todos los tratamientos se mantuvieron bajo las mismas condiciones: nutrición, riego, labores culturales, manejo del invernadero, control de plagas y enfermedades, etc. En el caso de la medición de la Fotosíntesis o Tasa de Asimilación Neta de CO<sub>2</sub> (A), Conductancia Estomática (Gs) y Transpiración (E) se mantuvieron constantes los parámetros Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) 800 μmol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> y la concentración de CO<sub>2</sub> (400 μmol de CO<sub>2</sub>.mol<sup>-1</sup>) con la finalidad de mantener a todos los tratamientos

bajo las mismas condiciones y facilitar la toma de datos de PAR y A. Las mediciones se tomaron en la quinta hoja desde el ápice de crecimiento (Jones, 1998 y Cadahía, 2005) de dos plantas tomadas completamente al azar de cada una de las unidades experimentales con el aparato **LICOR LI-6400**, sistema portátil, que sirve para medir la fotosíntesis (Figura 12 y 13).



Figura 12. LICOR LI-6400, equipo de medición actividad fotosintética en  $\mu\text{mol}$  de  $\text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$



Figura 13. Medición de fotosíntesis con el LICOR LI-6400.

Se adaptó una cámara de asimilación ventilada a través de un abanico; las dimensiones de la cámara fueron de 3 cm por 2 cm ( $6 \text{ cm}^2$ ) donde se introdujo una parte de la hoja (Patishtan, 2008). Las medidas se realizaron utilizando un sistema abierto de medida de intercambio de gases infrarrojos (IRGA), modelo Li-6400 (Li-Cor Inc., USA). Este sistema permite medir la tasa instantánea de asimilación de  $\text{CO}_2$  de las hojas (A), como parámetro calculado, y otros parámetros que ayudan a entender A, como, Gs y E. El Li-6400 mide el intercambio de  $\text{CO}_2$  y de  $\text{H}_2\text{O}$  simultáneamente porque son intercambios sinérgicos. Las vías de difusión del  $\text{CO}_2$  al interior de las hojas y las del vapor de  $\text{H}_2\text{O}$  hacia fuera de las mismas son, en gran medida, compartidas por ambos procesos. Las respuestas estomáticas que tienden a reducir las pérdidas de  $\text{H}_2\text{O}$  por transpiración (E), también reducen A; igual que las que aumentan A, aumentan E. Las limitaciones a dichas difusiones resultan de la relación entre las respuestas que tienden a incrementar A y las que tienden a reducir las pérdidas de agua. En un sistema abierto, la corriente de aire atraviesa constantemente la cámara donde se encuentra la hoja metabólicamente activa, y lo hace con flujo constante para que la concentración de aire en la cámara también sea constante (Figura 14).

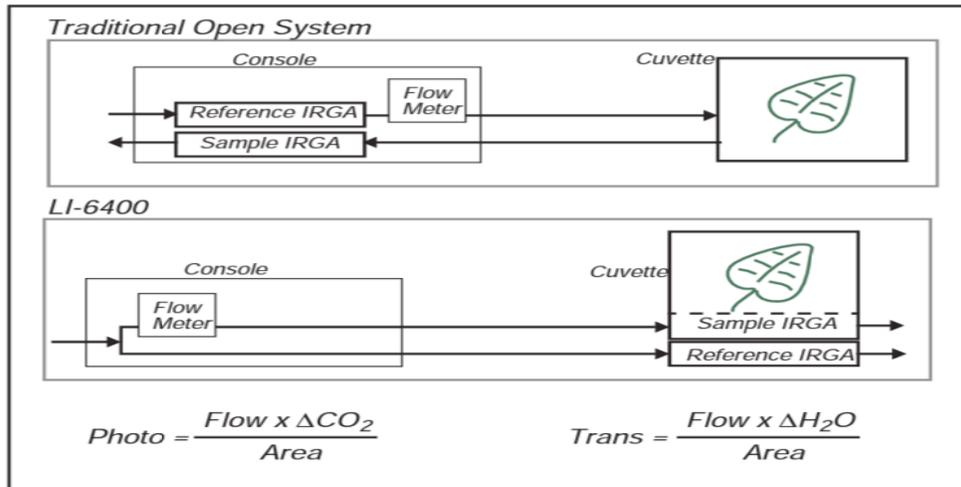


Figura 14: Esquema del flujo de aire en un sistema abierto. (LI-COR, 2004).

El sistema se basa en la determinación de la concentración de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O en el aire que ha atravesado la cámara y en el aire de referencia. Para ello consta de dos detectores de infrarrojos (uno analiza el aire pasado a través de la muestra y otro el aire control), que detectan las variaciones de CO<sub>2</sub> y agua en el aire a partir de medidas de absorbancia en ciertas bandas de infrarrojo, ya que estos dos gases son diatómicos y las absorben. Como en la cámara hay una hoja que fotosintetiza y transpira, el aire que la atraviesa, abandona la cámara con menos CO<sub>2</sub> y con más vapor de agua en relación con el aire de referencia. Conocida esta variación, el flujo de aire y la superficie de la hoja analizada pueden calcularse: la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub>, en  $\mu\text{mol de CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; y la tasa de transpiración (E), expresada en  $\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . La cámara del Li-6400 lleva incorporado un termopar que permite la medida de la temperatura de la hoja insertada en el interior de la cámara, y otro para la medida de la temperatura del aire. (LI-COR, 2004). A partir de estas medidas, pueden calcularse, siguiendo el modelo de Caemmerer y Faquhar (1981), otros parámetros fotosintéticos como la conductancia estomática (Gs), expresada en  $\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . La cámara utilizada lleva acoplada una lámpara LED (6400-02B LED Light Source, Li-

Cor Inc) con la que se puede regular el PAR que incide sobre la hoja, con una precisión de  $1 \mu\text{mol fotones}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , en un rango que va desde 0 hasta  $2500 \mu\text{mol fotones}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , aproximadamente. La temperatura puede controlarse con un sistema peltier de refrigeración y la humedad con el desecante.

### **3.8 Análisis económico de los tratamientos**

Los tratamientos fueron evaluados económicamente para determinar la utilidad o ganancia en pesos mexicanos del rendimiento en  $\text{t ha}^{-1}$  del tomate en peso fresco de cada uno de los tratamientos. En base al diseño y establecimiento del experimento; y los rendimientos obtenidos en la presente investigación se estimaron los costos e ingresos  $\text{ha}^{-1}$  por tratamiento.

### **3.9 Análisis de correlación de las variables fotosíntesis (A), transpiración (E) y conductancia estomática (Gs)**

Las variables de respuesta A, E y Gs fueron sometidas a un análisis de correlación para facilitar la evaluación de la actividad fotosintética.

### **3.10 Variables**

Las variables estudiadas fueron: rendimiento de frutos en peso fresco, concentración foliar de nutrimentos (N, P, K, Ca, Mn, Cu, Fe y Zn), fotosíntesis, conductancia estomática y transpiración, las cuales se analizaron estadísticamente de acuerdo a un modelo de bloques al azar con arreglo factorial (Montgomery, 2003). Los análisis de varianza se realizaron con el programa SPSS versión 20 y las comparaciones de medias mediante la prueba de Tukey, a un nivel de significancia de 0.05 con el programa estadístico Minitab, versión 16.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Resultados y discusión sobre rendimiento en peso fresco del fruto.

En la presente investigación se experimentó con las combinaciones patrón Multifort y variedades Pilavy y Macarena en ciclo corto a uno y dos tallos. El patrón “Multifort” es indicado para cultivos en suelo y sustrato artificial por su alta tolerancia contra las enfermedades más frecuentes de suelo. Cuenta con un alto vigor, por lo que es recomendado para cultivos de ciclos largos.

#### 4.1.1 Efecto principal e interacciones factor variedades

Las variedades de tomate bola Macarena y Pilavy no mostraron diferencias significativas en el rendimiento en el análisis de varianza ( $p = 0.067$ ), las interacciones de variedades con los otros factores tampoco resultaron con efectos significativos (cuadro 6). Estas variedades son relativamente nuevas en México y no hay investigaciones formales respecto a sus rendimientos.

Cuadro 6. Análisis de varianza para rendimiento en peso fresco.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	G.L.	Cuadrado Medio	F	Sig.
Bloques	3054556	3	834237	2.78	.956
Tallo	15210008	1	15210008	44.17	.002
Variedad	1036644	1	1036644	3.01	.067
Injerto	2715984	2	1357992	3.944	.028
Tallo * Variedad	492480	1	492480	1.430	.240
Variedad * Injerto	1649544	2	824772	2.396	.106
Tallo * Injerto	1799394	2	899697	2.613	.087
Tallo * Var. * Injerto	28541	2	14270	.041	.959
Error	12394750	36	344299		
Total	799460226	48			

#### 4.1.2 Efecto principal de la conducción a uno y dos tallos y la interacción con el factor injerto

El tomate injertado frecuentemente se conduce a dos tallos y las variedades no injertadas a un tallo, por lo que en este estudio se consideraron estos factores para estudiar su posible interacción. Los resultados del análisis de varianza (Cuadro 6), no mostraron una interacción significativa entre los factores: injerto y conducción de tallos. Sin embargo, se encontró una diferencia significativa en el rendimiento a favor de las plantas cultivadas a un tallo ( $p = 0.002$ ). La comparación de medias mostró que las plantas conducidas a un tallo tuvieron un rendimiento de 32.85 % mayor que las conducidas a dos tallos (Cuadro 7). El mayor rendimiento en las plantas conducidas a un tallo es el esperado en este tipo de experimentos debido a que el sistema radicular no tiene que dividir el agua y nutrimentos absorbidos en dos tallos. Sin embargo, se esperaba una interacción significativa con el factor injerto, debido a que, considerando el mayor desarrollo radicular en las plantas injertadas, se esperaba que pudiera mantener la demanda de dos tallos, situación que no se presentaría en las plantas sin injertar.

Miguel y Martín (2007) mencionan que las plantas injertadas conducidas a uno y dos tallos no tienen diferencias importantes en rendimiento. Sin embargo en esta investigación las plantas conducidas a dos tallos obtuvieron rendimientos menores que las conducidas a un tallo.

Cuadro 7. Comparación de medias del rendimiento en peso fresco (kg) en plantas conducidas a uno y dos tallos.

TALLO	Media	Diferencia en %	Error Std.	95% Intervalo de Confianza	
				Límite Inferior	Límite Superior
1	4552.833 a		119.774	4309.921	4795.746
2	3427.000 b	32.85	119.774	3184.087	3669.913

a,b letras diferentes en la columna indican medias diferentes ( $p < 0.05$ )

### 4.1.3 Efecto principal e interacciones factor injerto

La plantas injertadas mostraron mayores rendimientos que las plantas no injertadas, de acuerdo a los resultados (Cuadro 6) del análisis de varianza ( $p=0.028$ ); sin embargo, no se encontraron interacciones significativas entre el injerto y los otros factores estudiados (variedades y conducción a uno y dos tallos). La comparación de medias indicó que las plantas injertadas obtuvieron un rendimiento superior en un 12.88 % (Cuadro 8) en contraste con las plantas no injertadas y 13.51% con respecto a las plantas autoinjertadas.

Cuadro 8. Comparación de medias del rendimiento en peso fresco de plantas injertadas, autoinjertadas y sin injerto

INJERTO	Media	Diferencia en %	Error Std.	95% Intervalo de Confianza	
				Límite Inferior	Límite Superior
Injerto	4326.094 a		146.692	4028.588	4623.600
Auto-Injerto	3811.188 b	13.51	146.692	3513.682	4108.693
Sin injerto	3832.469 b	12.88	146.692	3534.963	4129.975

a,b letras diferentes en la columna indican medias diferentes ( $p<0.05$ )

En relación al injerto, la diferencia en rendimiento antes mencionada coincide con Dieleman y Heuvelik (2005), quienes reportaron rendimientos entre un 5 a 15% a favor de las plantas injertadas. En otros estudios también se han reportado incrementos en el rendimiento debido al injerto de plantas de tomate. Miskovic *et al.* (2009) reportaron diferencias entre un 6 y 39% de rendimiento; y Godoy *et al.* (2009) reportaron un 9% de incremento en el rendimiento en las plantas injertadas. Las explicaciones del por qué los patrones pueden influir en la absorción de nutrimentos y por lo tanto en el rendimiento de la planta injertada, incluyen factores fisiológicos y bioquímicos. Los mayores rendimientos en las plantas injertadas se explican por el mayor vigor de las raíces del patrón, las cuales se pueden extender de manera más amplia y profunda. Por lo tanto, acceder a mayor cantidad de nutrimentos y fuentes de agua (Castle y Krezdorn, 1975) o los mecanismos de transporte de nutrimentos asociados con patrones particulares pueden ser más eficientes o variar en sus

afinidades por determinados nutrimentos (Glass, 2003; Leonardi y Giuffrida, 2006; Ruiz *et al.*, 1996 y 1997).

El diferencial en la síntesis hormonal (citoquininas, ácido abscísico, etileno, giberelinas, auxinas), controlada por el sistema de raíces podría dar lugar a variaciones en el crecimiento y en la relación raíz-tallo (Itai y Birnbaum, 1991; Zijlstra *et al.*, 1994). Por último, las interacciones entre los exudados de la raíz y los microorganismos en la rizófora pueden ser diferentes entre plantas injertadas y no injertadas, resultando en mayor disponibilidad de nutrimentos (Bowen y Rovira, 1991).

#### **4.1.4 Análisis económico (pesos México) sobre el rendimiento en peso fresco**

El marco de plantación que se utilizó en este experimento resultó en una densidad de 25,000 tallos  $\text{ha}^{-1}$  con plantas conducidas a uno y dos tallos. Los resultados indicaron un (32.85%) más de rendimiento a favor de las plantas conducidas a un tallo respecto a las conducidas a dos tallos. Por lo que, de acuerdo a la estimación realizada en base a los datos obtenidos en esta investigación se cosecharon 7 racimos con los pesos indicados en el Cuadro 6 tanto para plantas conducidas a un tallo como a dos tallos. El peso por racimo de las plantas conducidas a dos tallos fue de 0.490 kg tallo $^{-1}$  (3.427 kg / 7). Si en un ciclo largo se cosechan en promedio 20 racimos tallo $^{-1}$  el rendimiento sería de 9.8 kg tallo $^{-1}$  (0.490\*20) y con una densidad de 25,000 tallos  $\text{ha}^{-1}$  el rendimiento total  $\text{ha}^{-1}$  sería de 245 t (25000\* 9.8 kg).

En los Cuadros 9 y 10, se presenta un análisis de costos donde se observa la ventaja económica de conducir a un tallo contra conducir a dos tallos, independientemente de sí se injerta o no. También, se observa la ventaja de injertar independientemente si se cultiva a un tallo o a dos.

Cuadro 9. Parámetros de cálculo de la utilidad bruta ha<sup>-1</sup> (pesos México)

	Costo semilla variedad	Costo semilla patrón	Costo de producción de plántula variedad	Costo de producción de plántula patrón	Costo de Injerto	Costo total/Plántula	Precio/ton
Plantas injertadas conducidas a un tallo	\$1.20	\$1.20	\$0.30	\$0.30	\$8.00	\$11.00	
Plantas no injertadas conducidas a un tallo	\$1.20	\$0.00	\$0.30	\$0.00	\$0.00	\$1.50	
Plantas autoinjertadas conducidas a un tallo	\$1.20	\$0.00	\$0.30	\$0.00	\$8.00	\$9.50	\$10,000.00
Plantas injertadas conducidas a dos tallos	\$1.20	\$1.20	\$0.30	\$0.30	\$8.00	\$11.00	
Plantas no injertadas conducidas a dos tallos	\$1.20	\$0.00	\$0.30	\$0.00	\$0.00	\$1.50	
Plantas autoinjertadas conducidas a dos tallos	\$1.20	\$0.00	\$0.30	\$0.00	\$8.00	\$9.50	

Cuadro 10. Cálculos de la utilidad bruta ha<sup>-1</sup> (pesos México) de cultivar plantas conducidas a un tallo, a dos tallos, injertadas, no injertadas y sus combinaciones.

	Costo total Plántula <sup>-1</sup>	Tallos ha <sup>-1</sup>	Plantas ha <sup>-1</sup>	Costo ha <sup>-1</sup>	% de rendimiento en base a resultados	Rendimiento estimado en t ha <sup>-1</sup>	Ingreso ha <sup>-1</sup>	Utilidad Bruta ha <sup>-1</sup>
Plantas injertadas conducidas a un tallo	11.00	25000	25000	275,000.00	46%	357	3,570,385.00	3,295,385.00
Plantas no injertadas conducidas a un tallo	1.50	25000	25000	37,500.00	33%	325	3,254,825.00	3,217,325.00
Plantas autoinjertadas conducidas a un tallo	9.50	25000	25000	237,500.00	33%	325	3,250,000.00	3,012,500.00
Plantas injertadas conducidas a dos tallos	11.00	25000	12500	137,500.00	13%	277	2,765,560.00	2,628,060.00
Plantas no injertadas conducidas a dos tallos	1.50	25000	12500	18,750.00	0%	245	2,450,000.00	2,431,250.00
Plantas autoinjertadas conducidas a dos tallos	9.50	25000	12500	118,750.00	0%	245	2,450,000.00	2,331,250.00

La máxima utilidad ha<sup>-1</sup>, se presentó en las plantas injertadas y cultivadas a un tallo \$ 3,295,385.00 seguidas por plantas sin injertar cultivadas a un tallo \$ 3,217,325.00 con una diferencia de \$78,060.00 a favor de las plantas injertadas. Mientras que la mínima utilidad se observó en las plantas cultivadas a dos tallos y autoinjertadas \$ 2,331,250.00 seguidas por las plantas cultivadas a dos tallos y sin injertar \$ 2,431,250.00, prácticamente la diferencia de \$100,000.00 a favor de las no injertadas se debe al costo de autoinjertar. Por otro lado, de las plantas cultivadas a dos tallos, las injertadas obtuvieron la mayor utilidad \$

2,628,060.00. Sin embargo, la diferencia con las conducidas a un tallo e injertadas es de \$864,135.00 (Cuadro 10).

El análisis económico mostró una diferencia en ingresos netos de \$78,060.00 ha<sup>-1</sup> a favor de las plantas injertadas a un tallo comparadas con las plantas no injertadas. Este resultado se obtuvo bajo condiciones de ausencia de enfermedades transmitidas a través del suelo, por lo que si estas se hubieran presentado, la diferencia en ingresos entre plantas injertadas y no injertadas hubiera sido mayor debido a la resistencia del patrón a las enfermedades causadas por patógenos del suelo. La inversión en el costo del injerto se justifica sólo como estrategia de protección vegetal amigable con el medio ambiente. Además, en esta investigación el injerto tuvo un efecto en el incremento del rendimiento en un 12.6% que se traduce en \$78,060.00 ha<sup>-1</sup>. Por lo tanto, la mejor opción para generar la mayor contribución económica fue injertar plántulas y conducir las a un tallo.

## **4.2 Resultados y discusión sobre concentración de nutrimentos en el tejido foliar**

### **4.2.1 Concentración de nitrógeno (N) en el tejido foliar**

Los análisis foliares mostraron una concentración promedio de Nitrógeno (N) de 4.3 %, valor que se encuentra arriba del rango de suficiencia (3.3 - 3.7 %) para plantas de tomate reportado por Castellanos y Ojodeagua (2009). En el análisis de varianza (Cuadro 11), se encontraron diferencias significativas entre las variedades para la concentración foliar de N; la variedad Macarena resultó con mayores niveles en el tejido foliar comparada con la variedad Pilavy (Cuadros 12). El mayor contenido de N en la variedad Macarena no tuvo un impacto importante en el rendimiento (Cuadro 6), debido a que en todos los tratamientos los niveles de N estuvieron por encima del rango de suficiencia.

Sin embargo, bajo condiciones limitadas de N en el suelo, la variedad Macarena pudiera tener ventajas sobre la variedad Pilavy, si es que no hay una interacción entre el contenido foliar de N en las variedades y diferentes niveles de N en el suelo. Como se mencionó anteriormente, ambas variedades son nuevas y no hay investigaciones formales respecto a su desempeño bajo invernadero en cuanto a la acumulación foliar de nutrimentos.

El injerto (patrón-variedad) tuvo un efecto positivo sobre la concentración foliar de N, debido a que se encontraron diferencias significativas entre las plantas injertadas y las autoinjertadas. La concentración de N en las plantas injertadas (patrón-variedad) fue mayor que la concentración en las autoinjertadas, sin embargo, no hubo diferencias significativas con las plantas no injertadas (Cuadro 13).

Cuadro 11. Análisis de varianza concentración foliar de N

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Sig.
Bloque	3	0.053	0.018	0.164	0.92
Tallo	1	0.017	0.017	0.158	0.693
Var	1	1.572	1.572	14.657	0.001
Injerto	2	1.117	0.559	5.208	0.011
Tallo * Var	1	0.014	0.014	0.135	0.716
Tallo * Injerto	2	0.025	0.013	0.118	0.889
Var * Injerto	2	0.041	0.021	0.192	0.826
Tallo * Var * Injerto	2	0.062	0.031	0.288	0.752
Error	33	3.549	0.107		
Total	48	6.441			

Cuadro 12. Comparación de medias de la concentración foliar de N en las variedades

	Media	Error Std.	Límite Inferior	Límite Superior
Pilavy	4.193 b	.067	4.057	4.329
Macarena	4.555 a	.067	4.419	4.691

a,b letras diferentes en la columna indican medias diferentes ( $p < 0.05$ )

Cuadro 13. Comparación de medias de la concentración foliar de N en los niveles del factor injerto

Injerto	Media	Error Std.	Límite Inferior	Límite Superior
Injerto	4.505 a	.082	4.338	4.671
Autoinjerto	4.160 b	.082	3.994	4.327
Sin injerto	4.458 ab	.082	4.292	4.625

a,b letras diferentes en la columna indican medias diferentes ( $p < 0.05$ )

El efecto del injerto sobre el incremento de la absorción de nutrimentos ha sido explicado por las características del sistema radicular de los patrones (Savvas et al., 2010); muchos patrones utilizados en injertos de plantas hortícolas son genotipos silvestres de la misma especie que la planta a injertar, los cuales se caracterizan por tener sistemas radiculares muy vigorosos.

Leonardi and Giuffrida (2006) compararon diferentes patrones de tomate en la absorción de macronutrimentos, encontrando que la combinación patrón-injerto inducía diferentes niveles de N en el tejido foliar; sin embargo este efecto no se observó en todos los patrones. El efecto del injerto sobre la concentración de N también depende de la parte de la planta, esto evidenciado en los resultados de Godoy *et al.* (2009), quienes estudiaron la concentración de nutrimentos en hojas y tallos en la variedad de tomate Gironada injertada sobre el patrón Maxifort y sin injertar; los resultados en esta investigación mostraron mayores concentraciones de N en los tallos de las plantas injertadas comparados con las no injertadas; sin embargo, este efecto no lo encontraron en las hojas.

#### 4.2.2 Concentración de fósforo (P) en el tejido foliar

La concentración promedio de P en las hojas fue de 0.62 %, valor que se encuentra en el rango de suficiencia (0.50 - 0.70 %) para plantas de tomate reportado por Castellanos y Ojodeagua (2009). La concentración de P en el tejido vegetal fue diferente ( $p = 0.011$ ) en las plantas conducidas a uno y dos

tallos, de acuerdo con los resultados del análisis de varianza (Cuadro 14). Al comparar las medias se observaron mayores concentraciones de P a favor de la conducción a un tallo en un 6.14%, contra la conducción a dos tallos (cuadro 15).

Para el factor injerto, también se encontró diferencia significativa entre tratamientos ( $p = 0.0012$ ) a favor de las plantas injertadas en un 6.83% más de concentración de P con respecto a las plantas sin injertar y 11.54% más comparadas con las plantas autoinjertadas (Cuadro 16). La mayor concentración de P en el tejido foliar en las plantas injertadas se explica debido a que en este caso existe un mayor desarrollo radicular, lo que promueve una mayor absorción de P por difusión e intercepción radicular. La importancia de la movilidad de los nutrimentos en los suelos en relación a la disponibilidad para las plantas se resume en el concepto de “biodisponibilidad de nutrimentos” que tiene tres mecanismos de disposición: intercepción radicular, flujo de masas y difusión (Marschner, 1986).

El efecto del injerto sobre la concentración de P en diferentes partes de la planta puede variar de acuerdo a un estudio realizado por Godoy *et al.* (2009) utilizando la variedad Girona injertada sobre el patrón Maxifort; sin embargo, encontraron mayores concentraciones de P en los frutos de plantas injertadas, así como una mayor extracción de P por las plantas injertadas.

Cuadro14. Análisis de varianza concentración foliar de P

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Sig,
Bloque	3	0.006	0.002	0.836	0.484
Tallo	1	0.016	0.016	7.216	0.011
Var	1	0.006	0.006	2.66	0.112
Injerto	2	0.038	0.019	8.512	0.012
Tallo * Var	1	0.001	0.001	0.23	0.635
Tallo * Injerto	2	0.01	0.005	2.306	0.115
Var * Injerto	2	0.002	0.001	0.418	0.662
Tallo * Var * Injerto	2	0.004	0.002	0.798	0.459
Error	33	0.073	0.002		
Total	48	18.632			

Cuadro 15. Comparación de medias de la concentración foliar de P en los niveles de conducción a uno y dos tallos.

Tallo	Media	Diferencia en %	Error Std.	95% Intervalo de Confianza	
				Límite Inferior	Límite Superior
1.00	0.639 a		.010	.619	.658
2.00	0.602 b	6.14	.010	.587	.617

a,b letras diferentes en la columna indican medias diferentes ( $p < 0.05$ )

Cuadro 16. Comparación de medias de la concentración foliar de P en los niveles del factor injerto.

Injerto	Media	Diferencia en %	Error Std.	95% Intervalo de Confianza	
				Límite Inferior	Límite Superior
Injerto	0.657 a		.012	.633	.681
Autoinjerto	0.589 b	11.54	.012	.565	.613
Sin injerto	0.615 b	6.82	.012	.591	.639

a,b letras diferentes en la columna indican medias diferentes ( $p < 0.05$ )

#### 4.2.3 Concentraciones de macronutrientes Calcio (Ca) y Potasio (K) en el tejido foliar

Las concentraciones de los macronutrientes Ca y K no fueron diferentes significativamente entre los tratamientos estudiados (Cuadros 17 y 18), y no hubo interacción entre factores. En el Cuadro 19, se muestra que la concentración foliar del K estuvo entre los niveles de referencia recomendados para el cultivo de tomate. Sin embargo, el Ca estuvo por arriba del máximo recomendado (Cuadro 19), y esto se debe a que tanto el agua como el suelo son altos en Ca. Este resultado difiere de lo reportado por Godoy *et al.* (2009), quienes encontraron que las plantas injertadas (Variedad “Gironda” en Patrón “Maxifort”) mostraron una mayor concentración de Ca y K.

Cuadro 17. Análisis de varianza concentración foliar de Ca

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Sig,
Bloque	3	15.66	5.22	8.153	0.467
Tallo	1	0.133	0.133	0.207	0.652
Var	1	0.551	0.551	0.86	0.360
Injerto	2	1.48	0.74	1.156	0.327
Tallo * Var	1	0.063	0.063	0.099	0.755
Tallo * Injerto	2	0.113	0.056	0.088	0.916
Var * Injerto	2	0.478	0.239	0.373	0.691
Tallo * Var * Injerto	2	0.179	0.089	0.14	0.870
Error	33	21.129	0.64		
Total	48	777.884			

Cuadro 18. Análisis de varianza concentración foliar de K

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Sig,
Bloque	3	.281	.094	.237	.870
Tallo	1	.018	.018	.046	.832
Var	1	.384	.384	.970	.332
Injerto	2	2.012	1.006	2.544	.094
Tallo * Var	1	.010	.010	.025	.876
Tallo * Injerto	2	1.044	.522	1.319	.281
Var * Injerto	2	.808	.404	1.021	.371
Tallo * Var * Injerto	2	.048	.024	.061	.941
Error	33	13.052	.396		
Total	47	639.197			

Cuadro 19. Concentraciones foliares de los macronutrientes: K y Ca

Nutriente	Media de concentración	Niveles de referencia
Macros	%	%
K	3.6	3.5 – 5.0
Ca	3.9	2.0 – 3.0

#### 4.2.4 Concentraciones de Cobre (Cu), Hierro (Fe), Zinc (Zn) y Manganese (Mn) en el tejido foliar

Las concentraciones de los micronutrientes Cu, Fe, Zn y Mn no fueron diferentes significativamente entre los tratamientos estudiados (Cuadros 20, 21, 22 y 23), ni hubo interacción entre factores. En el Cuadro 24, se observa que la concentraciones foliares del Cu, Fe, Zn y Mn estuvieron dentro de los niveles de referencia recomendados para la planta de tomate.

Contrario a los resultados encontrados en el presente trabajo, el efecto del injerto sobre la concentración de micronutrientos en el tejido foliar fue reportado por Godoy *et al.* (2009), quienes encontraron que las plantas injertadas (Variedad “Gironda” en Patrón “Maxifort”) mostraron una mayor concentración Cu, Fe, Zn y Mn comparadas con las plantas no injertadas.

Cuadro 20. Análisis de varianza concentración foliar de Cu

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Sig,
Bloque	3	18.563	6.188	1.178	.333
Tallo	1	.058	.058	.011	.917
Var	1	.836	.836	.159	.693
Injerto	2	.597	.299	.057	.945
Tallo * Var	1	9.188	9.188	1.750	.195
Tallo * Injerto	2	2.588	1.294	.246	.783
Var * Injerto	2	.310	.155	.030	.971
Tallo * Var * Injerto	2	6.542	3.271	.623	.543
Error	33	173.299	5.251		
Total	47	8986.993			

Cuadro 21. Análisis de varianza concentración foliar de Fe

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Sig,
Bloque	3	189.584	63.195	.195	.899
Tallo	1	.231	.231	.001	.979
Var	1	18.750	18.750	.058	.812
Injerto	2	589.352	294.676	.908	.413
Tallo * Var	1	352.084	352.084	1.085	.305
Tallo * Injerto	2	103.241	51.621	.159	.854
Var * Injerto	2	593.056	296.528	.914	.411
Tallo * Var * Injerto	2	29.167	14.583	.045	.956
Error	33	10707.634	324.474		
Total	47	408011.078			

Cuadro 22. Análisis de varianza concentración foliar de Zn

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Sig,
Bloque	3	168.570	56.190	2.204	.106
Tallo	1	38.527	38.527	1.511	.228
Var	1	80.938	80.938	3.175	.084
Injerto	2	20.079	10.040	.394	.678
Tallo * Var	1	35.026	35.026	1.374	.250
Tallo * Injerto	2	20.664	10.332	.405	.670
Var * Injerto	2	13.349	6.674	.262	.771
Tallo * Var * Injerto	2	15.162	7.581	.297	.745
Error	33	841.255	25.493		
Total	47	95367.868			

Cuadro 23. Análisis de varianza concentración foliar de Mn

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Sig,
Bloque	3	2669.295	889.765	3.058	.042
Tallo	1	67.886	67.886	.233	.632
Var	1	21.668	21.668	.074	.787
Injerto	2	130.612	65.306	.224	.800
Tallo * Var	1	205.909	205.909	.708	.406
Tallo * Injerto	2	25.556	12.778	.044	.957
Var * Injerto	2	268.564	134.282	.462	.634
Tallo * Var * Injerto	2	275.056	137.528	.473	.627
Error	33	9600.622	290.928		
Total	47	380429.822			

Cuadro 24. Concentraciones foliares de los micronutrientes: Fe, Zn, Cu y Mn

Micro-nutrientes	Media de concentración	Niveles de referencia
Micros	Ppm	Ppm
Fe	90.7	80 – 150
Zn	44.3	20 – 50
Cu	13.5	5 – 15
Mn	87.5	60 – 200

## 4.3 Resultados y discusión sobre actividad fotosintética

### 4.3.1 Fotosíntesis (A). Interacción Injerto\*Tallo

El análisis de varianza para la fotosíntesis (Cuadro 25) mostró efectos significativos en las interacciones de injerto\*tallo ( $p= 0.001$ ) y variedad-tallo ( $p=0.002$ ).

Cuadro 25 Análisis de varianza para fotosíntesis

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Sig,
Bloque	3	.883	.294	.298	.826
Tallo	1	51.935	51.935	52.670	.000
Var	1	9.312	9.312	9.444	.004
Injerto	2	83.530	41.765	42.356	.000
Tallo * Var	1	14.931	14.931	15.142	.002
Tallo * Injerto	2	2.329	1.165	1.181	.320
Var * Injerto	2	17.168	8.584	8.705	.001
Tallo * Var * Injerto	2	1.102	.551	.559	.577
Error	33	32.540	.986		
Total	47	214.158			

El análisis de comparación de medias para el estudio de la interacción injerto\*tallo mostró que las plantas conducidas a un tallo tuvieron mayor fotosíntesis que las conducidas a dos tallos para las plantas injertadas y autoinjertadas y sin diferencia significativas en las plantas sin injerto (Figura 15). En las plantas cultivadas a un tallo se encontró que las injertadas tuvieron mayor actividad fotosintética; en las plantas conducidas a dos tallos también se observó la superioridad de las plantas injertadas sobre las autoinjertadas, sin embargo no hubo diferencia significativa respecto a las plantas sin injerto. Estos resultados coinciden con los de He et al. (2009) quienes reportaron que el injerto mejoró la actividad fotosintética bajo condiciones salinas de cultivo, lo que indujo mayor crecimiento de las plantas de tomate.

Estos resultados muestran que el patrón ejerció un efecto importante en la actividad de A el cual puede deberse a una mayor absorción de agua y nutrimentos. La interacción Injerto\*Tallo también mostró que las plantas no injertadas tuvieron mayor actividad de A comparadas con las plantas autoinjertadas. Las plantas no injertadas y auto injertadas tienen el mismo genotipo en el sistema radicular y en la parte aérea, teniendo como única diferencia el estrés causado por el injerto en las plantas autoinjertadas. Por lo tanto, este estrés tiene un efecto importante sobre la actividad de (A) debido probablemente a obstrucción en el sistema vascular de la planta en el período post-injerto, el cual no se recupera completamente en el ciclo completo de la planta.

La interacción Injerto\*Tallo también mostró que las plantas tutoradas a dos tallos tuvieron una menor actividad de A comparadas con las tutoradas a un tallo y este efecto fue más importante en las plantas autoinjertadas comparada con las no injertadas. Estos resultados ponen en evidencia que el estrés causado al sistema radicular por el mantenimiento de dos tallos tiene impacto en la actividad de (A) además si a esto se le añade el estrés del injerto

en las plantas autoinjertadas hay un efecto aditivo de los dos tipos de estreses y una interacción entre ellos.

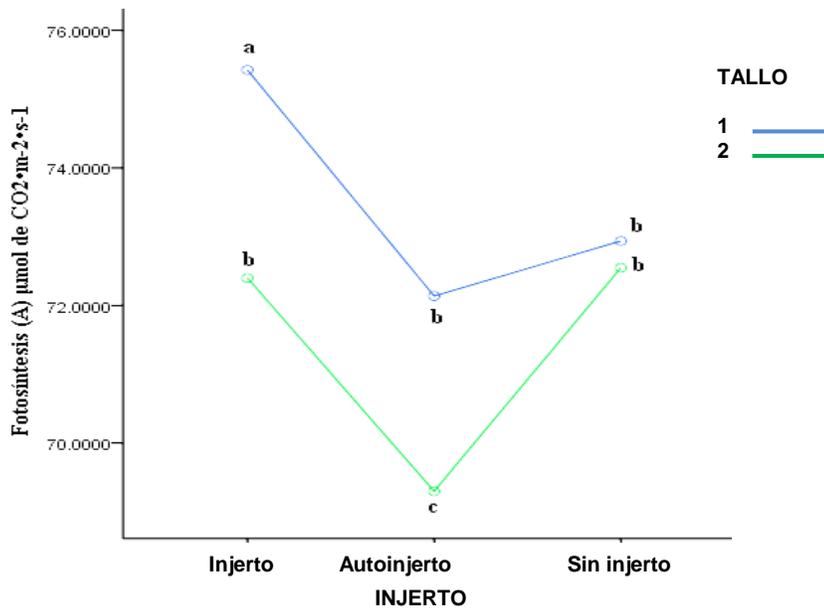


Figura 15. Comparación de medias interacción Injerto\*Tallo entre tratamientos para respuesta fotosintética

#### 4.3.2 Fotosíntesis (A) Interacción Variedad\*Tallo

La interacción variedad\*tallo resultó significativa ( $P= 0.002$ ) en el análisis de varianza (Cuadro 25). Las plantas conducidas a un tallo tuvieron mayor actividad fotosintética, principalmente en la variedad Macarena en donde las diferencias entre uno y dos tallos fueron significativas. La variedad Macarena conducida a un tallo tuvo los mayores registros de actividad fotosintética; sin embargo, esta variedad conducida a dos tallos presentó la menor eficiencia fotosintética, aunque no fue diferente de la variedad Pilavy conducida a dos tallos (Figura 16). Estos resultados son consistentes con los antes discutidos debido a que las mayores respuestas de (A) fueron para los tratamientos cultivados a un tallo. Por lo tanto, tomando en cuenta la interacción

Tallo\*Variedad los mejores tratamientos fueron los diseñados con la variedad Macarena conducidos a un tallo.

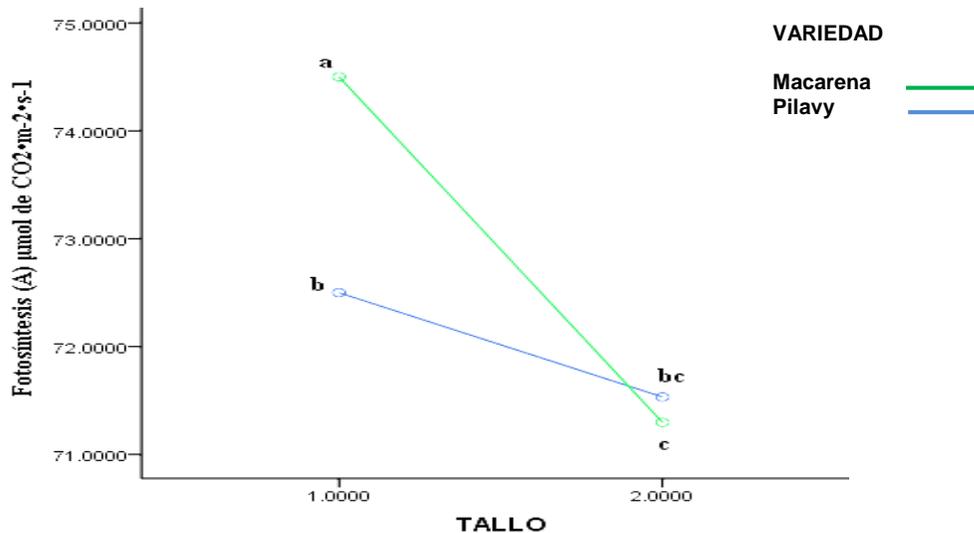


Figura 16. Comparación de medias, interacción Tallo\*Variedad entre tratamientos para respuesta fotosintética

### 4.3.3 Conductancia Estomática (Gs) Interacción Injerto\*Tallo

El análisis de varianza (Cuadro 26) para conductancia estomática, mostró diferencias significativas ( $p=0.011$ ) en la interacción injerto\*tallo.

Cuadro 26 Análisis de varianza para conductancia estomática

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Sig,
Bloque	3	.378	.126	3.868	.018
Tallo	1	.369	.369	11.344	.002
Var	1	.059	.059	1.815	.187
Injerto	2	.590	.295	9.065	.001
Tallo * Var	1	.041	.041	1.272	.268
Tallo * Injerto	2	.094	.047	1.437	.252
Var * Injerto	2	.342	.171	5.244	.011
Tallo * Var * Injerto	2	.104	.052	1.603	.217
Error	33	1.075	.033	3.868	.018
Total	47	3.052			

Las plantas conducidas a un tallo obtuvieron el mayor valor de conductancia estomática (Gs) en las plantas injertadas y autoinjertadas con respecto a las conducidas a dos tallos. Sin embargo, no hubo diferencias entre las plantas sin injertar tanto en las conducidas a un tallo como a dos tallos.

En cuanto al factor injerto se encontró una mayor actividad de Gs en las plantas injertadas comparadas con las autoinjertadas y sin injerto para el caso del tutoreo a un tallo. Cuando las plantas fueron conducidas a dos tallos, las plantas injertadas no difirieron significativamente de las plantas sin injerto, en este caso las plantas autoinjertadas tuvieron los menores valores de Gs (Figura 17). Estos resultados coinciden con los de Hu et al. (2009) quienes reportaron que el injerto mejoró el Gs bajo condiciones salinas de cultivo, concluyendo que debido a esto se mejoró la actividad fotosintética en las plantas injertadas.

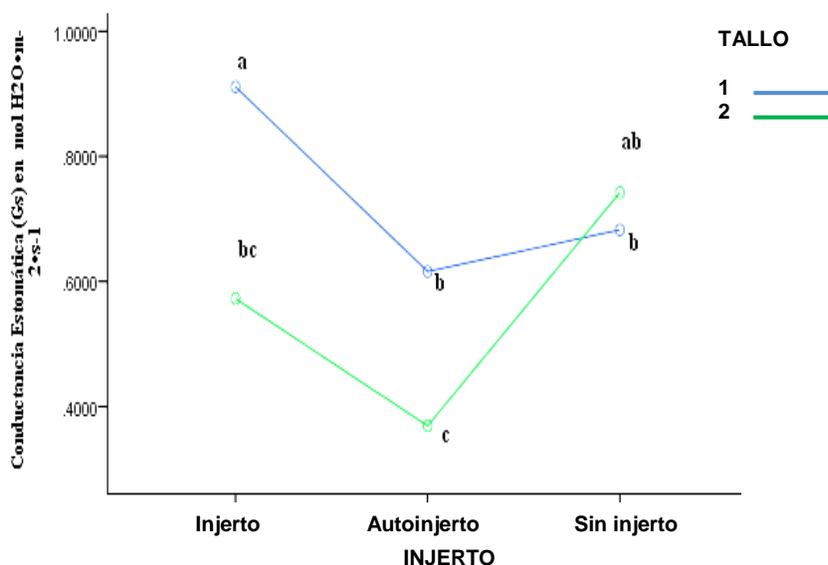


Figura 17. Comparación de medias interacción Injerto\*Tallo entre para Conductancia Estomática

Las plantas conducidas a dos tallos se sometieron a un mayor estrés por el corte en el proceso del injerto de la variedad sobre el patrón o de la variedad sobre la parte baja de sí misma. Por otro lado, una fuente adicional de

estrés fue la carga de los dos tallos y sus frutos con sus respectivas labores culturales. Bajo tales condiciones podría haberse manifestado alguna incompatibilidad o insuficiente conexión entre los haces vasculares durante la formación del callo en la unión del injerto ya sea de la variedad sobre el patrón o de la variedad sobre sí misma, provocando una disminución significativa en el flujo de agua y nutrimentos a la parte aérea de la planta donde se lleva a cabo el proceso de asimilación de CO<sub>2</sub> a través de las estomas de la hojas.

Miguel y Martín (2007); Oda *et al.* (2005); Johkan *et al.* (2009); Torii *et al.* (1992); y Atkinson y Else (2001) coinciden en que una conexión vascular incompatible o insuficiente del callo en la interface patrón-variedad, aunque haya una buena cicatrización, un crecimiento normal e inclusive un desarrollo importante de la variedad, podría ocasionar la disminución o bloqueo del flujo de agua y nutrimentos de la raíz a la parte aérea de la planta y por consiguiente una reducción de la conductancia estomática de la planta injertada. La incompatibilidad entre el patrón y la variedad por lo general ocurre en las primeras etapas, cuando se están formando las conexiones vasculares, pero puede aparecer hasta la etapa de fructificación, cuando la planta tiene una alta demanda de agua y nutrimentos (Kawaguchi *et al.*, 2008). Las plantas conducidas a dos tallos fueron sometidas a un mayor estrés por el corte en el proceso del injerto de la variedad sobre el patrón o de la variedad sobre la parte baja de sí misma. Por otro lado, una fuente adicional de estrés fue la carga de los dos tallos y sus frutos con sus respectivas labores culturales. Bajo tales condiciones podría haberse manifestado alguna incompatibilidad o insuficiente conexión entre los haces vasculares durante la formación del callo en la unión del injerto ya sea de la variedad sobre el patrón o de la variedad sobre sí misma, provocando una disminución significativa en el flujo de agua y nutrimentos a la parte aérea de la planta donde se lleva a cabo el proceso fotosintético

#### 4.3.4 Transpiración (E) Interacción Injerto\*Tallo

El análisis de varianza de la transpiración (Cuadro 27) mostró diferencias significativas para las interacciones: injerto\*tallo ( $p = 0.008$ ) y variedad\*tallo ( $p = 0.007$ ). Al realizar la comparación de medias para la interacción injerto\*tallo se encontró que las plantas injertadas, cultivadas tanto a un tallo como a dos tallos tuvieron mayores tasas de transpiración que las plantas autoinjertadas. Sin embargo, las plantas injertadas no fueron diferentes a las plantas sin injertar en ambos niveles de conducción de la planta (uno y dos tallos) (Figura 18).

La diferencia entre plantas injertadas y autoinjertadas se debe a que las plantas injertadas sobre un patrón seleccionado por su amplio desarrollo radicular y resistencia a enfermedades proporciona una mayor cantidad de agua, en plantas conducidas a uno y dos tallos.

La explicación a los resultados anteriores podría ser que en la etapa de fructificación cuando la demanda de agua y nutrimentos es mayor que en cualquier otra etapa del desarrollo de una planta en condiciones normales (tomate cultivado a un tallo) es mucho mayor para plantas de tomate conducidas a dos tallos. Además, de la mayor demanda de agua y nutrimentos, las plantas conducidas a dos tallos por un lado, fueron sometidas a un mayor estrés por el corte en el proceso del injerto de la variedad sobre el patrón o de la variedad sobre la parte baja de sí misma. Por otro lado, una fuente adicional de estrés fue la carga de los dos tallos y sus frutos con sus respectivas labores culturales. Bajo tales condiciones podría haberse manifestado alguna incompatibilidad o insuficiente conexión entre los haces vasculares durante la formación del callo en la unión del injerto ya sea de la variedad sobre el patrón o de la variedad sobre sí misma, provocando una disminución significativa en el flujo de agua y nutrimentos a la parte área de la planta donde se lleva a cabo el proceso fotosintético. Lo anterior coincide con Colla *et al.* (2006); Fernández

García *et al.* (2004 a, b) y Moore (1984 a, b) quienes reportaron que las plantas injertadas por lo general muestran un aumento de la absorción de agua y minerales en comparación con las plantas no injertadas y autoinjertadas, como consecuencia principalmente de las características físicas del sistema radicular vigoroso del patrón, tales como el desarrollo lateral y vertical, así como la mayor cantidad y grosor de las raíces, siempre y cuando la unión entre la variedad y el patrón en el proceso del injerto sea completa y compatible.

Cuadro 27. Análisis de varianza para transpiración.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	G.L.	Cuadrado Medio	F	Sig.
Bloques	18.997	3	6.332	7.415	.001
Tallo	23.575	1	23.575	27.606	.000
Variedad	7.415	1	7.415	8.683	.006
Injerto	54.309	2	27.154	31.798	.000
Tallo * Variedad	6.997	1	6.997	8.194	.007
Variedad * Injerto	2.119	2	1.059	1.241	.302
Tallo * Injerto	9.704	2	4.852	5.682	.008
Tallo*Var. * Injerto	3.330	2	1.665	1.950	.158
Error	28.181	33	.854		
Total	154.245	47			

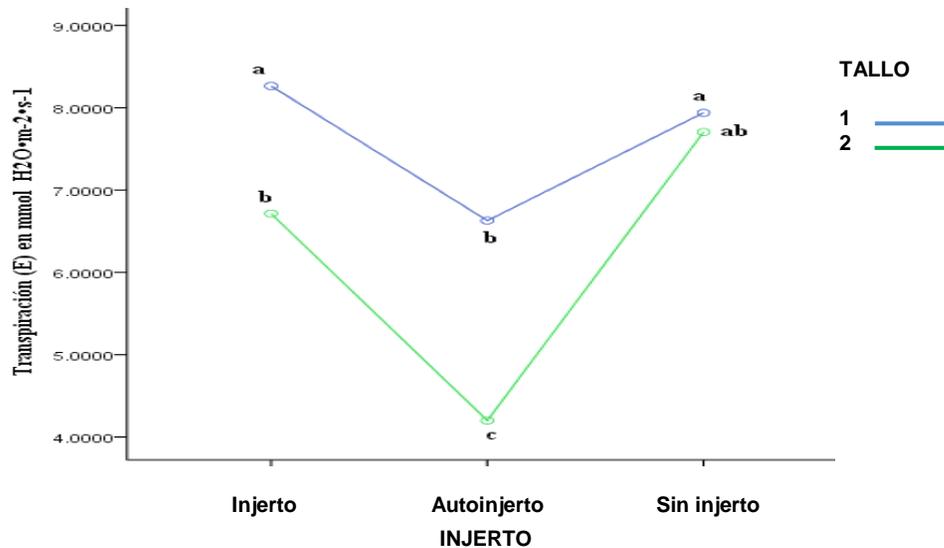


Figura 18. Comparación de medias interacción Injerto\*Tallo entre tratamientos para Transpiración

#### 4.3.5 Transpiración (E) Interacción Tallo\*Variedad

La comparación de medias para la interacción tallo\*variedad (Figura 19), indicó que la variedad Macarena tuvo mayores niveles de transpiración que la variedad Pilavy en plantas conducidas a un tallo. Sin embargo, no hubo diferencias significativas entre variedades en las conducidas a dos tallos

Las variedades Macarena y Pilavy cultivadas a dos tallos presentaron la menor tasa transpiratoria (E) y sin diferencias entre ellas comparados con los demás tratamientos. Entre los tratamientos de las plantas de la variedad Pilavy cultivada a un tallo y a dos tallos no hubo diferencias. Por lo tanto, tomando en cuenta la interacción Tallo\*Variedad los mejores tratamientos fueron los diseñados con la variedad Macarena conducidos a un tallo.

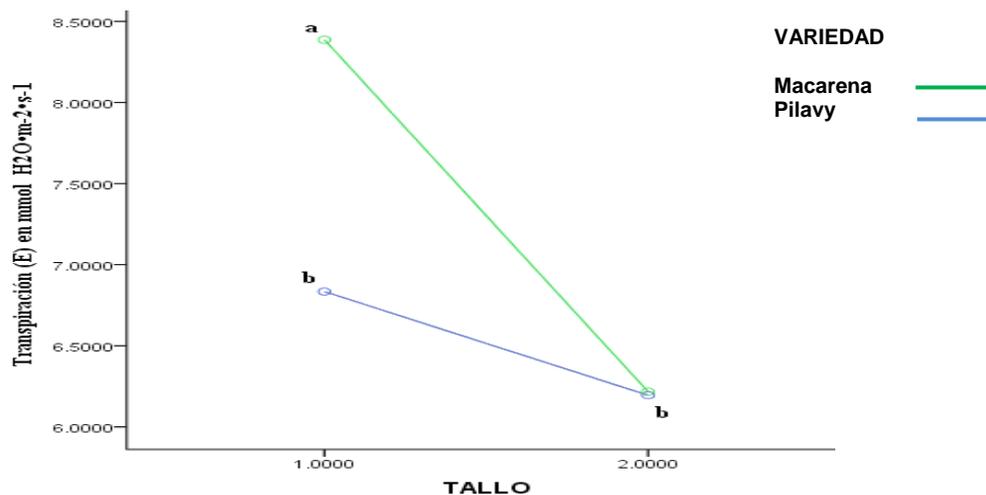


Figura 19. Comparación de medias interacción Tallo\*Variedad para Transpiración

#### 4.3.6 Correlación entre A, Gs y E

Los resultados obtenidos en la presente investigación son consistentes, ya que muestran que existe una correlación positiva entre las variables Fotosíntesis (A), Transpiración (E) y Conductancia Estomática (Gs) ( $r_{A,E}$

$=0.819$ ,  $r_{A,Gs} = 0.747$  y  $r_{E,Gs} = 0.849$ , en los tres casos  $p = 0.000$ ). Los coeficientes de correlación son positivos, por lo que al aumentar la transpiración, aumenta la conductancia y a su vez la fotosíntesis (Figura 20).

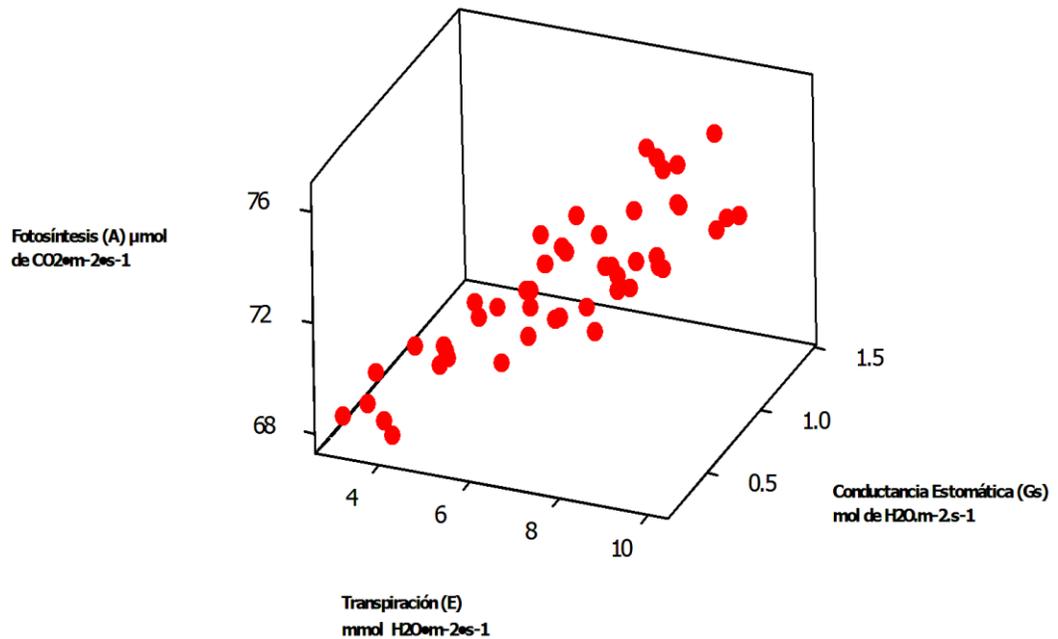


Figura 20. Gráfica de dispersión fotosíntesis (A), Transpiración (E) y Conductancia Estomática (Gs).

Lo anterior coincide con Bidwell (1993), Salisbury y Ross. (2000a) y Taiz y Zeiger (2006), quienes afirman que en el proceso fotosintético, **la transpiración** es muy importante ya que consiste en la absorción de grandes cantidades de agua y nutrimentos a partir del suelo, su transporte a través de la misma y la salida eventual de vapor de agua hacia la atmósfera circundante garantizando el suministro de agua necesario para que en conjunto con la energía solar (PAR) inicie la fotosíntesis en su primera fase.

Por otro lado, en la segunda fase de la fotosíntesis que consiste en la asimilación del  $\text{CO}_2$  atmosférico hacia el espacio intercelular de la hoja, específicamente en el estroma, lugar donde se fija el carbono para formar carbohidratos, juega un papel importante debido a que las plantas se la

conductancia estomática enfrentan con demandas opuestas. Por un lado, la atmósfera se encuentra tan alejada de la saturación de agua, que la planta corre peligro de deshidratación, a pesar de que la cutícula sirve como barrera efectiva a la pérdida de agua. Por otro lado, una barrera completa bloquearía el intercambio de  $O_2$  y  $CO_2$ , que es esencial para la respiración y fotosíntesis. La solución a este problema es la regulación temporal de las aberturas estomáticas. Por la noche, cuando no hay fotosíntesis y por tanto, no existe demanda por el  $CO_2$ , en el interior de la hoja, las aberturas estomáticas se reducen, impidiéndose la pérdida innecesaria de agua. Por la mañana, cuando el suministro de agua es abundante y la radiación solar favorece la actividad fotosintética, la demanda por el  $CO_2$  en el interior de la hoja es grande, y los poros estomáticos están muy abiertos, disminuyendo la resistencia estomática a la difusión del  $CO_2$ . En estas condiciones, la transpiración estomática origina la corriente transpiratoria que transporta rápidamente los nutrimentos minerales y el agua desde las raíces a las partes aéreas en crecimiento y, en segundo lugar, enfría las hojas cuando el tiempo es caluroso, o radiación solar muy elevada.

## 5 CONCLUSIONES

- El injerto de plantas de tomate tuvo efecto positivo sobre el rendimiento y concentración de N y P en el tejido foliar.
- La actividad fotosintética fue superior en las plantas injertadas comparadas con las autoinjertadas, sin embargo no se encontró este efecto al comparar las plantas injertadas con las no injertadas.
- Las plantas cultivadas a un tallo presentaron mayor rendimiento y concentración foliar de P comparadas con las cultivadas a dos tallos.
- Las plantas conducidas a un tallo tuvieron mayor actividad fotosintética en las plantas injertadas y autoinjertadas.
- La variedad Macarena tuvo mayores niveles de N en el tejido foliar y mayor actividad fotosintética en el caso de los tratamientos con injerto.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- Abdelmageed, A. H. and N. Gruda. 2009. Influence of grafting on growth, development and some physiological parameters of tomatoes under controlled heat stress conditions. *Eur. J. Hortic. Sci.* 74: 16–20.
- Ahn, S. J., Y. J. Chung, G. C. Cho and B. H. Suh. 1999. Physiological responses of grafted cucumber leaves and rootstock roots as affected by low root temperature. *Sci. Hortic.* 81: 397- 408.
- Albacete, A., C. Martínez-Andújar, M. Edmond Ghanem, M. Acosta, J. Sánchez-Bravo, M. L. Asins, J. Cuartero, S. Lutts, I. C. Dodd and F. Pérez-Alfocea. 2009. Rootstock- mediated changes in xylem ionic and hormonal status are correlated with delayed leaf senescence, and increased leaf area and crop productivity in salinized tomato. *Plant Cell Environ.* 32: 928–938.
- AMHPAC. 2013. La agricultura protegida en México.  
[Amhpac.org/es/index.php/hmepage/agricultura-prtegida-en-mexico](http://Amhpac.org/es/index.php/hmepage/agricultura-prtegida-en-mexico).
- Andrews, P. K. and C. S. Márquez. 1993. Graft incompatibility. *Hortic. Rev.* 15: 183–232.
- Atkinson, C. J. and M. A. Else. 2001. Understanding how rootstock dwarf fruit trees. *Compact Fruit Tree.* 34: 46–49.
- Azcón-Bieto, J. y M. Talón., 2008. *Fundamentos de fisiología vegetal*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana. 651 p.
- Bidwell, R. G. S. 1993. *Fisiología vegetal*. México, D. F. AGT Editor 784 p.

- Bletsos, F.A., 2005. Use of grafting and calcium cyanamide as alternatives to methyl bromide soil fumigation and their effects on growth, yield, quality and fusarium wilt control in melon. *J. Phytopathol.* 153: 155–161.
- Borbon-Morales, C. y J. Z. Castellanos. 2009. Panorama de la horticultura protegida en México. In: Manual de producción de tomate en invernadero. J. Z. Castellanos (Ed) Editorial Intagri, S.C. pp: 1-18.
- Cadahía, C. 2005. Fertirrigación cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. 3.<sup>ra</sup> edición. Ediciones Mundi-Prensa México. pp: 44-48.
- Caemmerer, S. and G. Farquhar. 1981. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and gas exchange of leaves. *Planta*: 376-387.
- Castellanos, Z. J. y J. L. Ojodeagua. 2009. Panorama de la horticultura protegida en México. In: J. Z. Castellanos (Ed). Manual de producción de tomate en invernadero. Intagri. 458 p.
- Castilla, N. 2005. Invernaderos de plástico, tecnología y manejo. Madrid, España; México, D.F. Ediciones Mundi-Prensa. pp: 25-35
- Castle, W. S. and A. H. Krezdorn. 1975. Effect of citrus rootstocks on root distributleaf mineral content of “Orlando” Tangleo trees. *J. Amer. Soc. of Hort. Sci.* 100:1-10.
- Chaves, M. M. and M. Oliveira. 2004. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. *J. Exp. Bot.* 55: 2365– 2384.
- Chen, G.X., X.P. Fu, S.H. Lips and M. Sagi. 2003. Control of plant growth resides in the shoot, and not in the root, in reciprocal grafts of flacca and wild-type tomato

(*Lycopersicon esculentum*), in the presence and absence of salinity stress. Plant Soil 256: 205–215.

Colla, G., Y. Roupael, M. Cardarelli, D. Massa, A. Salerno and E. Rea. 2006. Yield, fruit quality and mineral composition of grafted melon plants grown under saline conditions. J. Hortic. Sci. Biotechnol. 81: 146–152.

Davis, R., P. Perkins, R. Hassell, A. Levi, S. King and X. Zhang. 2008 Grafting Effects on Vegetable. Quality HortScience, October 43: 1670 - 1672.

Delshad, M., A. Kashi and M. Babalar. 2009. Water Stress in Grafted and Non-grafted Greenhouse Tomato Plants by Chlorophyll Fluorescence Parameters. Acta Hort. 807: 643-647.

Dieleman, A. and E. Heuvelink. 2005. Gebruik van onderstammen bij vruchtgroenten. Plant Res. Inter. 367: 1-37.

<http://www.tuinbouw.nl/website/ptcontent.nsf/vwAllOnID/>

Dorais, M., D. L. Ehret, A. and P. Papadopoulos. 2008. Tomato (*Solanum lycopersicum*) health components: from the seed to the consumer. Phytochem Rev 7: 231-250.

Edelstein, M., M. Ben-Hur, R. Cohen, Y. Burger and I. Ravina. 2005. Boron and salinity effects on grafted and non-grafted melon plants. Plant Soil 269: 273–284.

FAOSTAT. 2012. División Estadística de la FAO. <http://faostat.fao.org>

Favela, C. E., R. P. Preciado y M. A. Benavides. 2006. Manual para Preparación de soluciones nutritivas” Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México. 148 p.

- Fernández-García, N., M. Carvajal and E. Olmos. 2004a. Graft union formation in tomato plants. Peroxidase and catalase involvement. *Ann. Bot.* 93: 53–60.
- Fernández-García, N., V. Martínez, A. Cerdá, A. and M. Carvajal. 2004b. Fruit quality of grafted tomato plants grown under saline conditions. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 79: 995–1001.
- Fernández-García, N., V. Martínez and M. Carvajal. 2004c. Effect of salinity on growth, mineral composition, and water relations of grafted tomato plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167: 616–622.
- Flexas, J., M. Ribas-Carbó, J. Bota, J. Galmés, M. Henkle, S. Martínez-Canellas, and H. Medrano. 2006. Decreased Rubisco activity during waterstress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO<sub>2</sub> concentration. *New Phytol.* 172: 73–82.
- Flowers, T.J. and T.D. Colmer. 2008. Salinity tolerance in halophytes. *New Phytol.* 179: 945–963.
- Godoy, H., J. Castellanos, G. Alcántar, M. Sandoval, J. Muñoz. 2009. Efecto del injerto y nutrición de tomate sobre rendimiento, materia seca y extracción de nutrimentos. *Terra Latinoamericana* 27:1-11
- Godoy, H., J. Castellanos. 2009. El injerto de tomate. In: *Manual de producción de tomate en invernadero México*. J. Z. Castellanos (Ed). Editorial Intagri, S.C. pp: 93-104.
- Glass, A. D. M. 2003. Nitrogen use efficiency of crop plants: physiological constraints upon nitrogen absorption. *Crit. Rev. in Plant Sci.* 22(5):453-470.

- Hansch, R. and R. R. Mendel. 2009. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Curr. Opin. Plant Biol.* 12: 259–266.
- Hartmann, H., D. Kester, R. Geneve. 2002. *Plant propagation, principles and practices.* 7<sup>th</sup> ed. Prentice Hall. NJ, USA. pp 411-460.
- He, Y., Z.J. Zhu, J. Yang, X.L. Ni, and B. Zhu. 2009. Grafting increases the salt tolerance of tomato by improvement of photosynthesis and enhancement of antioxidant enzymes activity. *Environ. Exp. Bot.* 66: 270–278.
- Heo, Y.C., 1991. Effects of rootstocks on exudation and mineral elements contents in different parts of Oriental melon and cucumber (in Korean with English summary). M. S. Thesis, Kyung Hee University, Seoul, South Korea, p. 53.
- Heuvelink, E. and M. Dorais. 2005. Crop growth and yield. pp. 85-144. *In*: Heuvelink (ed.). *Tomatoes*. CAB Publishing. Wallingford, UK.
- Ioannou, N. 2001. Integrating soil solarization with grafting on resistant rootstocks for management of soil-borne pathogens of eggplant. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 76: 396–401.
- Iacono, F., M. Bertamini, A. Scienza and B. G. Coombe. 1995. "Differential effects of canopy manipulation exchange, photosynthetic electron transport rate and sugar accumulation in berries." *Vitis* 34(4): 201-205.
- Intrieri, C., S. Poni, B. Rebucci and E. Magnanini. 1998. "Row orientation effects on whole canopy gas exchange of potted and field grown grapevines." *Vitis* 37(4): 147-154.
- Itai, C., H. Birnbaum. 1991. Synthesis of plant growth regulators by roots. *In* *Hidden Half*. Eds. Y Waisel, A Eshel and U Kafkafi. Marcel Dekkar, NY. P. 948 p.

- Jang, K.U., 1992. Utilization of Sap and Fruit Juice of *Luffa cylindrica* L. Res. Rpt. Korean Ginseng and Tobacco Institute, Taejon, South Korea, 116 p.
- Johkan, M., K. Mitukuri, S. Yamasaki, G. Mori y M. Oda. 2009. Causes of defoliation and low survival rate of grafted sweet pepper plants. *Sci. Hortic.* 119: 103–107.
- Jones, B. 2008. Tomato plant culture: in the field, greenhouse and home garden. Second ed. CRC Press. Florida, USA. pp: 1-35
- Jones, B. 2001. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. CRC Press. Florida, USA. pp: 191-256
- Jones B. 1998. Plant nutrition manual. First edition. CRC Press. Florida, USA. pp: 77-100
- Kakava, E. 2006. Effect of grafting on growth and yield of tomato en greenhouse and open-field. *Journal of applied horticulture.* 8(1): 3-7
- Kawaguchi, M., A. Taji, D. Backhouse, M. Oda. 2008. Anatomy and physiology of graft incompatibility in solanaceous plants. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 83: 581–588.
- Khah, E. M., E. Kakava, A. Mavromatis, D. Chachalis and C. Goulas. 2006. Effect of grafting on growth and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in greenhouse and open-field. *Journal of Applied Horticulture.* 8(1): 3-7
- Kubota, C., M. McClure, N. Kokalis, M. Bausher y E. Roskopf. 2008. Vegetable Grafting: History, Use and Current Technology Status in North America. *HortScience.* 43: 1664-1669.

- Kurata, K. 1994. Cultivation of Grafted Vegetables II. Development of Grafting Robots in Japan HortScience. 29: 240 - 244.
- Lee, J. M. 1994. Cultivation of Grafted Vegetables I. Current Status, Grafting Methods, and Benefits HortScience. 29: 235 - 239.
- León, H. 2006. Manual para el cultivo de tomate en invernaderos. SEP-INDAUTOR. 263 p.
- Leonardi, C. and F. Giuffrida. 2006. Variation of plant growth and macronutrient uptake in grafted tomatoes and eggplants on three different rootstocks. European J. of Hort. Sci. 71: 91-101.
- Lichtenthaler, H.K. and U. Rinderle. 1988. The role of chlorophyll fluorescence in the detection of stress conditions in plants. Crit. Rev. Anal. Chem. 19: 529–581.
- LI-COR. 2004. Using the LI-6400, Portable Photosynthesis System (Software version 5). LI-COR, Inc. Publication Number 9806-122. Lincoln, NE. s/n p.
- Liu, Z.L., Y.L. Zhu, C.M. Hu, G.P. Wei, L.F. Yang and G.W. Zhang. 2007. Effects of NaCl stress on the growth, antioxidant enzyme activities and reactive oxygen metabolism of grafted eggplant. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao 18: 537–541.
- Lucier, G. and C. Plummer. 2004. Vegetables & melons outlook. USDA, Electronic Outlook Report from the ERS. Washington, D.C. VGS-303. pp.1-24.
- Martínez-Rodríguez, M.M., M.T. Estañ, E. Moyano, J.O. García-Abellán, F.B. Flores, J.F. Campos, M.J. Al-Azzawi, T.J. Flowers and M.C. Bolarín. 2008. The effectiveness of grafting to improve salt tolerance in tomato when an 'excluder' genotype is used as scion. Environ. Exp. Bot. 63: 392–401.

- Marschner, H. 1986. Mineral nutrition of higher plants. 2nd Ed., Academic Press, Burlington, MA. pp. 92-95, 159-218, 429-482.
- Miguel de A. y M. Martín. 2007. Injerto de hortalizas Ministerio agricultura, pesca y alimentación. España pp.63-92
- Mišković Ž. I. and V. Marković. 2009. Effect of Different Rootstock Type on Quality and Yield of Tomato Fruits. Faculty of Agriculture. The University of Novi Sad Serbia. 619-624
- Montgomery, D. C. 2004. Design and Analysis of Experiments, Sixth Edition. John Wiley & Sons, Inc. 686 p.
- Moore, R. 1984a. A model for graft compatibility–incompatibility in higher plants. *Am. J. Bot.* 71: 752–758.
- Moore, R. 1984b. The role of direct cellular contact in the formation of compatible autografts in *Sedum telephoides*. *Ann. Bot.* 54: 127–133.
- Nuez, F. 2001. El cultivo del tomate. Editorial Mundi-Prensa Madrid. pp 253, 254.
- Oda, M., M. Maruyama and G. Mori. 2005. Water transfer at graft union of tomato plants grafted onto *Solanum* rootstocks. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 74: 458–463.
- Öquist, G. and R. Wass. 1988. A portable, microprocessor operated instrument for measuring chlorophyll fluorescence kinetics in stress physiology. *Physiol. Plant.* 73: 211–217.
- Patishtan, J. 2008. Conductancia estomática, asimilación de CO<sub>2</sub>, transpiración y crecimiento en hojas de *Aloe vera* (sábila) bajo déficit hídrico en suelo en dos

- localidades. Tesis de maestría, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. pp. 25-28.
- Pulgar, G., G. Villora, D.A. Moreno and L. Romero. 2000. Improving the mineral nutrition in grafted melon plants: nitrogen metabolism. *Biol. Plant.* 43: 607–609.
- Reche, M. 2008. Agua, suelo y fertirrigación de cultivos hortícolas en invernadero. Primera edición. Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino España. pp 37-75.
- Rivero, R. M., J. M. Ruiz, Sánchez and L. Romero. 2003a. Does grafting provide tomato plants an advantage against H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> production under conditions of thermal shock? *Physiol. Plant.* 117: 44–50.
- Rivero, R. M., J. M. Ruiz, Sánchez and L. Romero. 2003b. Can grafting in tomato plants strengthen resistance to thermal stress? *J. Sci. Food Agric.* 83: 1315–1319.
- Rivero R. M., J. M. Ruiz, and L. Romero 2003c. Role of grafting in horticultural plants under stress conditions. *Food, Agriculture, & Environment* 1:70-74.
- Rouphael, Y., M. Cardarelli, E. Reab and G. Colla. 2008. Grafting of cucumber as a means to minimize copper toxicity. *Environ. Exp. Bot.* 63: 49–58.
- Ruiz, J. M., A. Belakbir, I. López-Cantarero and L. Romero. 1997. Leaf-macronutrient content and yield in grafted melon plants: A model to evaluate the influence of rootstock genotype. *Sci. Hort.* 71:227-234.
- Ruiz, J. M., A. Belakbir, and L. Romero. 1996. Foliar level of phosphorus and itbioindicators in *Cucumis melo* grafted plants: A possible effect of rootstocks. *J. Physiol.* 149:400-404.

Ruiz, J.M. and L. Romero. 1999. Nitrogen efficiency and metabolism in grafted melon plants. *Sci. Hortic.* 81: 113–123.

SAGARPA. 2012. Agricultura Protegida <http://2006-2012.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura-Protegida2012.aspx>

Salisbury, F. B. y C. W. Ross. 2000a. Fisiología de las plantas 1. Agua, soluciones y superficies. Células. Paraninfo, Editorial S. A., 305 p.

Salisbury, F. B. y C. W. Ross. 2000b. Fisiología de las plantas 2. Bioquímica Vegetal. Paraninfo, Editorial S. A., 212 p.

Santa-Cruz, A., M. M. Martínez-Rodríguez, F. Pérez-Alfocea, R. Romero-Aranda and M. C. Bolarin. 2002. The rootstock effect on the tomato salinity response depends on the shoot genotype. *Plant Sci.* 162: 825–831.

Savvas, D., D. Papastavrou, G. Ntatsi, A. Ropokis, C. Olympus, H. Hartmann, and D. Schwarz. 2009. Interactive effects of grafting and manganese supply on growth, yield, and nutrient uptake by tomato. *HortScience* 44:1978-1982.

Sivasankar, S. and A. Oaks. 1996. Nitrate assimilation in higher plants: the effect of metabolites and light. *Plant Physiol. Biochem.* 34: 609–620.

Souza, R. P., E. C. Machado, J. A. Silva, A. Lagoa and J. A. Silveira. 2004. Photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and some associated metabolic changes in cowpea (*Vigna unguiculata*) during water stress and recovery. *Environ. Exp. Bot.* 51: 45–56.

Tagliavani, M., D. Bassi and B. Marangoni. 1993. Growth and mineral nutrition of pear rootstocks in lime soils. *Sci. Hortic.* 54: 13–22.

- Taiz, L. and E. Zeiger. 2006. Plant Physiology. 4th ed. Sinauer Associates, Inc. Publishers. Sunderland, Massachusetts. USA. 764 p.
- Torii, T., M. Kawazaki, T. Okamoto and O. Kitani. 1992. Evaluation of graft-take using a thermal camera. Acta Hortic. 319: 631–634.
- Uygur, V. and H. Yetisir. 2009. Effects of rootstock on some growth parameters, phosphorous and nitrogen uptake by watermelon under salt stress. J. Plant Nutr. 32: 629–643.
- Wang, H., Y. Inukai and A. Yamauchi. 2006. Root development and nutrient uptake. Crit. Rev. Plant Sci. 25: 279–301.
- Yetisir, H., F. Kurt, N. Sari and F. M. Tok. 2007. Rootstock potential of Turkish *Lagenaria siceraria* germplasm for watermelon: plant growth, graft compatibility, and resistance to *Fusarium*. Turk. J. Agric. For. 31: 381–388.
- Venema, J. H., B. E. Dijk, J. M. Bax, P. R. Van Hasselt, and J. T. Elzenga. 2008. Grafting tomato (*Solanum lycopersicum*) onto the rootstock of a high-altitude accession of *Solanum habrochaites* improves suboptimal-temperature tolerance. Environ. Exp. Bot. 63: 359–367.
- Villasana R. A. 2010. Efecto del injerto en la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) bajo condiciones de invernadero en Nuevo León. Tesis de Maestría. Facultad de Agronomía de la UANL pp. 9-18
- Zijlstra, S., S. P. Groot, and J. Jansen. 1994. Genotypic variation of rootstocks for production in cucumber: possibilities for improving the root system by plant breeding Scientia Horticulturae, Elsevier Science Pub., B.V. Amsterdam. 56:185-196.

Zheng, N., M. L. Wang, H. T. Wang and X. Z. Ai. 2009. Effects of grafting on photosynthesis of sweet pepper seedlings under low temperature and weak light intensity. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao* 20: 591–596.

Zhou, Y., J. Zhou, L. Huang, X. Ding, K. Shi and J. Yu. 2009. Grafting of *Cucumis sativus* onto *Cucurbita ficifolia* leads to improved plant growth, increased light utilization and reduced accumulation of reactive oxygen species in chilled plants. *J. Plant Res.* 122: 529–540.