

RELACIONES BÁSICAS ENTRE EVAPOTRANSPIRACIÓN,  
TEMPERATURA FOLIAR Y VARIABLES CLIMÁTICAS.  
2013

J. Pablo Zarazúa Bolaños



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

RELACIONES BÁSICAS ENTRE EVAPOTRANSPIRACIÓN,  
TEMPERATURA FOLIAR Y VARIABLES CLIMÁTICAS.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el título de  
Ingeniero Agroindustrial

PRESENTA:

José Pablo Zarazúa Bolaños

DIRIGIDO POR:

Dr. Enrique Rico García

Santiago de Querétaro, Querétaro. Abril 2013.

- Escudo y letras doradas
- Pastas duras color negro, tamaño carta



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

RELACIONES BÁSICAS ENTRE EVAPOTRANSPIRACIÓN, TEMPERATURA  
FOLIAR Y VARIABLES CLIMÁTICAS.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el título de  
Ingeniero Agroindustrial

PRESENTA:

José Pablo Zarazúa Bolaños

DIRIGIDO POR:

Dr. Enrique Rico García

Centro Universitario  
Santiago de Querétaro, Querétaro.  
Abril de 2013



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

RELACIONES BÁSICAS ENTRE EVAPOTRANSPIRACIÓN, TEMPERATURA  
FOLIAR Y VARIABLES CLIMÁTICAS.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el título de

Ingeniero Agroindustrial

PRESENTA:

José Pablo Zarazúa Bolaños

DIRIGIDO POR:

Dr. Enrique Rico García

SINODALES:

Dr. Enrique Rico García  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

M.C. Adán Mercado Luna  
Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Ramón Gerardo Guevara González  
Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

M.C. Oscar Alatorre Jácome  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

Centro Universitario  
Santiago de Querétaro, Querétaro.  
Abril de 2013

## Resumen

Recientemente, están adquiriendo una creciente importancia los esfuerzos encaminados a programar el riego en base a medidas del estado hídrico de las plantas. La evapotranspiración y el contenido de humedad del suelo no reflejan de forma directa el estado hídrico de las plantas. La temperatura foliar es un indicador del estado hídrico de la planta, y es factible de ser utilizado para la programación de riegos. El objetivo de este estudio fue determinar la correlación estadística de las variables evapotranspiración y temperatura foliar, en un cultivo de Tomate de Cáscara (*Physalis Ixocarpa*) variedad Gran Esmeralda, con las variables del microclima del invernadero. La investigación se desarrolló en el Campus Amazcala de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, ubicado en la comunidad de Amazcala, El Marqués, Querétaro. Se utilizó un invernadero tipo capilla, con un área de 108 m<sup>2</sup>, constituido por una nave de 9 m de ancho por 12 m de largo, una altura a la canaleta de 4.2 m y cenital de 6.2 m. Cuenta con una área de ventilación de 22.5 m<sup>2</sup> cubierta con malla antiáfidos de 250 hilos/pulg<sup>2</sup> y cubierto con plástico 800 galgas difuso. Además cuenta con riego automatizado y acolchado plástico. Se aplicaron cuatro tratamientos que consistieron en someter a la planta a un estrés hídrico, lo cual se logró dejando a la planta sin agua por cierto tiempo y los tratamientos consistieron en manejar estos diferentes tiempos. Se realizaron tres repeticiones del experimento, del 10-13 de Abril de 2012, del 16-19 de Mayo de 2012 y del 30 de Mayo a 2 de Junio de 2012. En esta última se manejaron tiempos más prolongados de ausencia de riego. Al interior del invernadero las variables climáticas se midieron mediante una micro estación WatchDog serie 1000, la radiación solar, temperatura ambiente y humedad relativa. La evapotranspiración se midió con un lisímetro de pesada (Báscula marca Avery Weigh-Tronix, modelo 3632B-50) y la temperatura foliar con un sensor infrarrojo modelo HER-425 marca STEREN. Al exterior del invernadero se midió, mediante una estación meteorológica Wireless Vantage Pro2 modelo 6152 marca DAVIS, la temperatura ambiente, la humedad relativa, la radiación solar y la velocidad del viento. Las mediciones se realizaron cada hora, con excepción de la evapotranspiración la cual se hizo cada minuto, durante las horas de mayor radiación solar. Se utilizó el método de regresión lineal para comparar las variables medidas. De los resultados obtenidos no se pudo determinar una relación entre la evapotranspiración y la temperatura foliar. Sin embargo se observó que la temperatura foliar representa una respuesta fisiológica de la planta a las condiciones ambientales y a la disponibilidad de agua, ya que a menor contenido de humedad en el suelo la temperatura foliar es más alta. Entre todas las relaciones, el mejor coeficiente de determinación fue entre temperatura foliar y temperatura ambiente (0.7562).

Palabras clave: Evapotranspiración, Temperatura foliar, Estrés hídrico, Termómetro infrarrojo, Lisímetro, Tomate de cáscara.

## Summary

Recently, the efforts to schedule irrigation based on measures of plant water status are becoming more important. Evapotranspiration and soil moisture content do not reflect the plant water status. Leaf temperature is an indicator of plant water status, and is feasible to be used for irrigation scheduling. The objective of this study was to determine the statistical correlation of the variables evapotranspiration and leaf temperature, in culture husk tomato (*Physalis ixocarpa*) great emerald variety, with the greenhouse microclimate variables. The research was conducted in Amazcala Campus School of Engineering at the Autonomous University of Querétaro, located in the community of Amazcala, El Marqués, Querétaro. The greenhouse had an area of 108 m<sup>2</sup>, constituted by a vessel of 9 m wide by 12 m long, height conduit of 4.2 m and cenital of 6.2 m. It had a ventilation area of 22.5 m<sup>2</sup> which was protected with anti-aphids mesh of 250 threads/inch<sup>2</sup> and covered diffuse plastic of 800 gauges. It also has automatic irrigation and plastic mulch. Four treatments were applied which consisted of subjecting the plant to water stress, which was achieved, leaving the plant without water for some time and the treatments consisted of handling these different times. There were three replications of the experiment, from 10-13 April 2012, 16-19 May 2012 and May 30 to June 2, 2012. The latter managed to longer time. Inside the greenhouse the climate variables were measured by a micro station WatchDog 1000 Series, solar radiation, ambient temperature and relative humidity. Evapotranspiration was measured with a weighing lysimeter (Scales Avery Weigh-Tronix, Model 3632B-50) and leaf temperature with an infrared sensor model HER-425 brand STEREN. The climate outside the greenhouse was measured by a weather station Wireless Vantage Pro2 model 6152 brand DAVIS, ambient temperature, relative humidity, solar radiation and wind speed. Measurements were taken every hour, except evapotranspiration which made every minute, during peak hours sunlight. Method was used linear regression to compare the measured variables. From the results a relationship between evapotranspiration and leaf temperature could not be determined. However, leaf temperature represents a physiological response of the plant to the environmental conditions and the availability of water, as a lower moisture content in the soil foliar temperature is higher. Among all relationships, the best coefficient of determination was between leaf temperature and ambient temperature (0.7562).

Keywords: Evapotranspiration, leaf temperature, water stress, Infrared Thermometer, Lysimeter, husk tomato.

## Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mi familia; mi padre el señor Antonio Zarazúa, mi madre la señora María Bolaños y mis hermanos: María de los Ángeles, Leticia, María Guadalupe, José Antonio y Fabián, que siempre creyeron en mí y me apoyaron a seguir adelante con mis estudios. Les agradezco los sacrificios que todos hicieron porque yo persiguiera mi sueño, y la forma de compensarlos es demostrándoles que todos esos esfuerzos valieron la pena y que juntos hemos salido adelante.

También está dedicado a una persona muy especial que llegó a mi vida. Almita te agradezco que me hayas acompañado en mis horas de trabajo, en esos días cuando las listas de números parecían interminables y que al final siempre había tiempo para todo. Cuando parecía que todo se ponía difícil tú estabas ahí y te agradezco que seas parte de mi vida y me ayudes a cumplir mis sueños, Te amo cosita...

## Agradecimientos

Antes que nada debo agradecer a Dios por darme la oportunidad de llegar hasta esta etapa de mi vida, de darme la paciencia, la fuerza y la constancia de luchar todos los días por perseguir mis sueños.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro por brindarme las herramientas para construir mi formación académica. A mi asesor el Dr. Enrique Rico García por el apoyo, los conocimientos y el tiempo dedicado para la realización de este proyecto. Al M.C. Adán Mercado Luna, al Dr. Ramón Gerardo Guevara González y al M.C. Oscar Alatorre Jácome por darse el tiempo de revisar mi tesis, por sus comentarios y observaciones que ayudaron a la mejora de este proyecto.

También debo agradecer a mis compañeros Héctor, Hernán, Antonio, Edgar y Karen por todos los conocimientos aprendidos, por las experiencias, y lo más importante por su amistad.

A todas las personas que contribuyeron en mi formación académica y en la realización de este proyecto, simple y humildemente gracias...

## Índice

Resumen	I
Summary	II
Dedicatoria	III
Agradecimientos	IV
Índice	V
Índice de cuadros	VIII
Índice de figuras	IX
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Justificación	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Cultivo	4
2.1.1. Clasificación taxonómica	5
2.1.2. Descripción botánica	5
2.1.3. Fenología y desarrollo del cultivo	6
2.1.4. Condiciones edafoclimáticas	6
2.1.4.1. Temperatura	6
2.1.4.2. Luz	7
2.1.4.3. Suelo	7
2.2. Factores que intervienen en el crecimiento de los cultivos	7
2.2.1. Radiación solar	8
2.2.2. Temperatura ambiente	9
2.2.3. Humedad relativa	10
2.2.4. Viento	11
2.3. Evapotranspiración	12
2.3.1. Medición de la evapotranspiración	13
2.4. Temperatura foliar	15
2.4.1. Medición de la temperatura foliar	16
2.5. Contenido de humedad en un sustrato	17

III.	OBJETIVO E HIPÓTESIS	19
3.1.	Objetivo	19
3.2.	Hipótesis	19
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS	20
4.1.	Descripción del sitio de estudio	20
4.2.	Material biológico	21
4.3.	Trasplante	21
4.4.	Solución nutritiva	22
4.5.	Diseño experimental	22
4.6.	Evaporación del sustrato	23
4.7.	Medición de las variables	23
4.7.1.	Exterior del invernadero	23
4.7.2.	Interior del invernadero	24
4.7.2.1.	Temperatura y humedad relativa	24
4.7.2.2.	Radiación solar	25
4.7.2.3.	Temperatura foliar	25
4.7.2.4.	Evapotranspiración	26
4.7.3.	Instalación de los sensores	26
4.7.3.1.	Instalación de la estación meteorológica Wireless Vantage Pro2	26
4.7.3.2.	Instalación de la micro estación WatchDog serie 1000	27
4.7.3.3.	Instalación del lisímetro de pesada	27
4.8.	Adquisición de datos	30
4.8.1.	Primera repetición del experimento	31
4.8.2.	Segunda repetición del experimento	32
4.8.3.	Tercera repetición del experimento	32
4.9.	Procesamiento de datos	33
4.9.1.	Evapotranspiración	33
4.9.2.	Temperatura foliar	34
4.9.3.	Variables climáticas	34

4.9.4.	Análisis estadístico	35
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
5.1.	Evaporación del sustrato	36
5.2.	Evapotranspiración	37
5.3.	Temperatura foliar	38
5.4.	Radiación solar	43
5.5.	Temperatura ambiente	49
5.6.	Humedad relativa	54
5.7.	Velocidad del viento	59
5.8.	Análisis de varianza y comparación de medias de Tukey	63
5.9.	Discusión de resultados	70
VI.	CONCLUSIONES	73
VII.	LITERATURA CITADA	74

## Índice de cuadros

Cuadro		Página
4.1	Duración de los tratamientos para cada repetición del experimento.	23

## Índice de figuras

Figura		Página
2.1	Los dos tipos de lisímetros, a la izquierda un lisímetro de drenaje, a la derecha un lisímetro de pesada.	14
4.1	Invernadero experimental de 108m <sup>2</sup> .	20
4.2	PLC marca Allen-Bratley modelo 1760-L12AWA.	21
4.3	Trasplante de la plántula.	22
4.4	DCL utilizado.	22
4.5	Estación meteorológica Wireless Vantage Pro2 modelo 6152 marca DAVIS.	24
4.6	Micro estación WatchDog serie 1000.	24
4.7	Sensor de radiación solar marca Spectrum Technologies.	25
4.8	Termómetro Infrarrojo Digital modelo HER-425 marca STEREN.	26
4.9	Báscula marca Avery Weigh-Tronix, modelo 3632B-50.	26
4.10	Micro estación WatchDog serie 1000 y sensor de radiación solar colocados al centro del invernadero.	27
4.11	Zanja excavada para colocar la báscula de precisión Avery Weigh-Tronix modelo 3632B-50.	28
4.12	Aislamiento de los contornos de la zanja.	28
4.13	Instalación y nivelación del lisímetro de pesada.	28
4.14	Drenaje instalado en el lisímetro de pesada.	29
4.15	Instalación de los lisímetros de pesada de acuerdo al diseño experimental.	29
4.16	Duración de los tratamientos en la primera repetición del experimento.	31
4.17	Duración de los tratamientos en la tercera repetición del experimento.	33
5.1	Experimento de la evaporación del sustrato.	36
5.2	Tasas de evapotranspiración a) segunda repetición del experimento y b) tercera repetición del experimento.	38
5.3	Temperatura foliar a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) día 1, d) día 2, e) día 3, e) día 4 de la tercera repetición del experimento.	41
5.4	Temperatura foliar y tasas de evapotranspiración para a) segunda repetición del experimento y b) tercera repetición del experimento.	43
5.5	Correlación estadística entre temperatura foliar y evapotranspiración para a) T4 de la segunda repetición del experimento y b) T3 de la tercera repetición del experimento.	43

5.6	Radiación solar al interior y exterior del invernadero durante a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) tercera repetición del experimento.	45
5.7	Radiación solar y tasas de evapotranspiración para a) segunda repetición del experimento y b) tercera repetición del experimento.	46
5.8	Correlación estadística entre evapotranspiración y radiación solar para a) T1 de la segunda repetición del experimento y b) T2 de la tercera repetición del experimento.	46
5.9	Radiación solar y temperatura foliar para a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) tercera repetición del experimento.	48
5.10	Correlación estadística entre temperatura foliar y radiación solar para a) T4 de la primera repetición del experimento, b) T2 de la segunda repetición del experimento y c) T1 de la tercera repetición del experimento.	49
5.11	Temperatura ambiente al interior y exterior del invernadero durante a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) tercera repetición del experimento.	50
5.12	Temperatura ambiente y tasas de evapotranspiración para a) segunda repetición del experimento y b) tercera repetición del experimento.	51
5.13	Correlación estadística entre evapotranspiración y temperatura ambiente para a) T4 de la segunda repetición del experimento y b) T3 de la tercera repetición del experimento.	51
5.14	Temperatura ambiente y temperatura foliar para a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) tercera repetición del experimento.	53
5.15	Correlación estadística entre temperatura foliar y temperatura ambiente para a) T4 de la primera repetición del experimento, b) T1 de la segunda repetición del experimento, c) T3 y d) T2 de la tercera repetición del experimento.	54
5.16	Humedad relativa al interior y exterior del invernadero durante a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) tercera repetición del experimento.	55
5.17	Humedad relativa y tasas de evapotranspiración para a) segunda repetición del experimento y b) tercera repetición del	56

	experimento.	
5.18	Correlación estadística entre evapotranspiración y humedad relativa para a) T3 de la segunda repetición del experimento y b) T4 de la tercera repetición del experimento.	56
5.19	Humedad relativa y temperatura foliar para a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) tercera repetición del experimento.	58
5.20	Correlación estadística entre temperatura foliar y humedad relativa para a) T4 de la primera repetición del experimento, b) T4 de la segunda repetición del experimento y c) T2 de la tercera repetición del experimento.	58
5.21	Velocidad del viento al interior y exterior del invernadero durante a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) tercera repetición del experimento.	59
5.22	Velocidad del viento y tasas de evapotranspiración para a) segunda repetición del experimento y b) tercera repetición del experimento.	60
5.23	Correlación estadística entre evapotranspiración y velocidad del viento para a) T3 de la segunda repetición del experimento y b) T2 de la tercera repetición del experimento.	61
5.24	Velocidad del viento y temperatura foliar para a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) tercera repetición del experimento.	62
5.25	Correlación estadística entre temperatura foliar y velocidad del viento para a) T4 de la primera repetición del experimento, b) T2 de la segunda repetición del experimento y c) T de la tercera repetición del experimento.	63
5.26	Análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al iniciar el experimento para a) primera repetición, b) segunda repetición y c) tercera repetición del experimento.	64
5.27	Análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al iniciar los tratamientos para a) primera repetición, b) segunda repetición y c) tercera repetición del experimento.	65
5.28	Análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al terminar el T2 para a) primera repetición, b) segunda repetición y c) tercera repetición del experimento.	66
5.29	Análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al terminar el T3 para a) primera repetición, b) segunda repetición y c) tercera repetición del experimento.	67

5.30	Análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al terminar el T4 para a) primera repetición, b) segunda repetición y c) tercera repetición del experimento.	68
5.31	Análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al finalizar a) primera repetición, b) segunda repetición y c) tercera repetición del experimento.	69

## I. INTRODUCCIÓN

Los cultivos agrícolas, en su periodo de desarrollo, necesitan continuamente agua, pero la magnitud de sus necesidades varía con la clase y edad del cultivo, la temperatura y las condiciones atmosféricas. Si el agua no es aplicada oportunamente, se corre el riesgo de que la planta sufra de estrés hídrico, cuyas consecuencias pueden reflejarse en el rendimiento y la calidad del fruto. Una vez conocida la cantidad de agua que se debe aplicar al cultivo, es necesario saber cuándo regar, y para esto se recurre a la determinación del contenido de humedad del suelo o del sustrato en el caso de los cultivos hidropónicos (Rojas, 2009).

La evapotranspiración es primordial en la programación de los riegos, tanto en lo que se refiere a la frecuencia de la aplicación, como la cantidad de agua a aplicar, además de que las estimaciones adecuadas de la evapotranspiración del cultivo permiten cuantificar la disponibilidad del recurso (Ortega-Farías *et al.*, 2000).

La programación del riego en términos de tiempo y la cantidad de agua aplicada a un cultivo, puede basarse en métodos de balance hídrico del suelo, los modelos meteorológicos que estiman la evapotranspiración de los cultivos o las mediciones de los parámetros del cultivo (Cremona *et al.*, 2004). Este último enfoque parece ser de particular importancia, el cómo la planta integra el suelo y las variables meteorológicas en su respuesta al déficit de agua (Jackson, 1981). El déficit de agua es uno de los factores más importantes que limitan el crecimiento de las plantas, el metabolismo, el rendimiento y la evapotranspiración. La precisa determinación del efecto de déficit hídrico en la reducción del rendimiento es de gran importancia (Ünlü *et al.*, 2011).

Las condiciones y prácticas que se realizan bajo invernadero son elementos que disminuyen la pérdida de agua por evaporación o transpiración. La reducción de la transmisión de la radiación solar por blanquear en temporadas primavera o verano dan por resultado una evaporación menor en el interior, además de que origina una menor demanda hídrica, ésta es una de las principales razones de conocer las características de este fenómeno, optimizar las prácticas de riego (Orgaz *et al.*, 2005).

## **1.1. Descripción del problema**

La optimización del suministro de agua para los cultivos es cada vez más importante, debido a que la cantidad de agua que se requiere para la agricultura va en aumento y su disponibilidad es cada vez menor. Tomando en cuenta que la evapotranspiración es el proceso por el cual la planta pierde la mayor cantidad de agua que se le suministra, es necesario saber la cantidad de agua que realmente se está aprovechando. Si la planta se encuentra sometida a un estrés hídrico la evapotranspiración se reduce y la temperatura foliar aumenta debido al cierre de los estomas, su ciclo biológico se reduce y se vuelve más senescente, afectando directamente en la producción ya que ésta se ve reducida. La evapotranspiración no es un indicador directo del estado hídrico de las plantas y la temperatura foliar sí lo es, por lo que es importante conocer la relación entre éstas variables y su relación con las del ambiente. De esta forma se está buscando tener una estimación más completa del estado hídrico de las plantas. En el presente trabajo se utilizó a *Physalis Ixocarpa* para determinar la correlación entre la temperatura foliar y la evapotranspiración, con el fin de implementar a futuro un controlador de riego eficiente con base en las condiciones de estrés hídrico del cultivo.

## **1.2. Justificación**

El principal factor limitante en la expansión del riego agrícola en todo el mundo es la falta de agua. La demanda de agua está aumentando debido al rápido crecimiento de la tasa de población, la mejora del nivel de vida, la mejora en la industria, y el calentamiento global. Sin embargo, por diversas razones, el agua disponible para fines de riego ha disminuido drásticamente, mientras que la demanda está incrementando. En estas condiciones de escasez, el uso eficiente del agua es fundamental para mejorar los beneficios del riego (Hussain, 2010). Como consecuencia al aumento de la presión sobre los recursos hídricos, la necesidad de datos fiables y consistentes sobre el estado de los recursos hídricos y agrícolas, el uso del agua es ampliamente reconocido por los gobiernos, así como las instituciones nacionales, regionales e internacionales (Eliasson, 2003). Debido a la gran importancia que tiene el agua para la agricultura, en los últimos

años se ha buscado optimizar el uso de éste recurso. De acuerdo con la FAO la extracción de agua en todo el mundo se realiza en tres sectores y se distribuye de la siguiente forma: 9% es para el uso doméstico, 20% se utiliza en la industria y el 71% es utilizada en la agricultura (riego y abastecimiento de ganado). El agua seguirá siendo la entrada principal para la producción de alimentos. Actualmente el riego cubre el 20% de las tierras cultivadas del mundo y contribuye a un 40% de la producción total de alimentos. De éste modo el investigar de lo general a lo particular nos permitirá tener mejores bases para la toma de decisiones en el gasto de agua para los cultivos, el conocer realmente cuánta agua necesita y en qué momento, puede servir para la optimización de recursos. Es por eso que se buscan las relaciones básicas (como la evapotranspiración y la temperatura foliar), ya que se ha demostrado que la temperatura foliar es un indicador directo del estado hídrico de la planta, de manera que se pueden utilizar para optimizar el suministro del agua, proporcionando a la planta sólo la cantidad que necesita y en el momento que lo necesita para lograr un desarrollo normal.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Cultivo

*Physalis* (Solanaceae) es un género americano que se distribuye en Estados Unidos de América, México, Centroamérica, Sudamérica y las Antillas, con algunas especies presentes en el viejo mundo. El género agrupa cerca de 90 especies, setenta de ellas son endémicas del territorio mexicano, considerado su centro de origen y diversidad. El tomate domesticado, tomate de cascara, tomate verde o tomatillo, ha sido conocido por los botánicos por casi 400 años y su aprovechamiento se remonta a épocas prehispánicas (Santiaguillo *et al.*, 2010). Es una fuente importante de fósforo (F), calcio (C), hierro (Fe), sales minerales, así como diversas vitaminas (Valtierra y Ramos, 2003).

Se cultiva comercialmente en todas las entidades del territorio mexicano, cuya producción se destina al mercado nacional y de exportación. En las últimas dos décadas esta especie se ha consolidado como una de las principales hortalizas en México y como un cultivo potencial en diferentes países de América y Europa. A pesar de la importancia de esta hortaliza, su cultivo se realiza con base en variedades nativas o criollas, por lo que es necesario generar variedades mejoradas cada vez de mayor rendimiento para abastecer la demanda de su fruto. Para lograr tal empresa es conveniente conocer y conservar la variabilidad del taxón para su uso sostenible (Santiaguillo *et al.*, 2010).

Es una de las principales hortalizas en México junto con el chile, papa, jitomate y cebolla. Actúa como un producto sustituto del jitomate y en un lapso de 10 años, a partir de 1990, prácticamente se ha duplicado su superficie cultivada. En 2008 se sembraron 46,888.68 hectáreas de las cuales 45,562.18 se cosecharon, y se tuvo una producción de 609,468.75 toneladas con un rendimiento de 13.38 toneladas por hectárea, obteniendo un valor de producción de 2,288,637.10 miles de pesos (Santiaguillo *et al.*, 2010). En 2009 se reportaron 47,473 hectáreas sembradas y un rendimiento promedio de 14.2 toneladas por hectárea. Dentro de los cultivos hortícolas, esta especie ocupó el cuarto lugar por superficie sembrada, el sexto

lugar por valor en la producción y el séptimo lugar en volumen de producción (SIAP, 2012).

### **2.1.1. Clasificación taxonómica**

La clasificación taxonómica del género *Physalis* es el siguiente (Santiaguillo *et al.*, 2010):

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Dicotyledoneae (Magnoliopsida)

Subclase: Asteridae

Orden: Solanales

Familia: Solanaceae

Subfamilia: Solanoideae

Tribu: Solaneae

Género: *Physalis*

### **2.1.2. Descripción botánica**

El Tomate de cascara (*Physalis ixocarpa* Brot.) es una especie anual, con tallo erecto y ramificado, de 0.9 a 1.2 m de altura. Su tallo es glabro o casi glabro, herbáceo o ligeramente leñoso en la base. Las hojas son delgadas, ovaladas o lanceoladas, entre 5 y 7.5 cm de largo, dentadas y con peciolo largo de textura suave. Las flores son grandes y abiertas, de 1.8 cm de diámetro, con bordes amarillos brillantes, monopétalas con corola, presentan cinco manchas de color pardo negruzco, las anteras son púrpuras; por lo general las flores están sobre pedicelos axilares o extraxilares. El cáliz es un pentadentado, tiene cinco estambres; el estilo es delgado; el estigma casi bilobulado. El fruto es una baya amarilla o verdosa algo viscosa, mide de 1 a 5 cm de diámetro, globoso, liso, pegajoso, algo ácido, cubierto por el cáliz avejigado (Taboada y Oliver, 2004).

### **2.1.3. Fenología y desarrollo del cultivo**

La expresión fenotípica de las poblaciones de tomate de cascara se modifican significativamente como resultado del cambio de hábitat o de siembra (trasplante o siembra directa). La fenología del tomate de cascara es la siguiente (Cartujano, 1984):

- Nacencia. Se da una semana después de la siembra.
- Prolongación del eje principal. Se presenta de la cero a la cuarta semana después de la emergencia.
- Crecimiento vegetativo. Comienza desde la semana cero hasta la semana catorce.
- Producción de botones florales. Se manifiesta de la semana tres a la semana catorce.
- Floración. Desde la semana cuatro hasta la semana catorce.
- Fructificación. Comienza de la semana cinco a la semana catorce.
- Senescencia. Se inicia de la semana doce a la semana catorce.

Las etapas fenológicas de acuerdo a López *et al.*, (2010) son: Vegetativa-Floración, Floración-Fructificación, Maduración-Senescencia, y su duración es de 45, 35 y 20 días después del trasplante (ddt) respectivamente.

### **2.1.4. Condiciones edafoclimáticas**

#### **2.1.4.1. Temperatura**

Las temperaturas óptimas para el tomate de cascara es de 20 a 22 °C. El nivel adecuado de temperatura para la germinación es de 20 a 30 °C. Para el crecimiento vegetativo de 22 a 25 °C, ya que con temperaturas de 30 °C el crecimiento disminuye y a los 40 °C o más éste puede detenerse. Cuando la planta está en floración y polinización, requiere de temperaturas entre 30 a 32 °C. Con temperaturas por arriba de estos valores, durante la floración, se puede provocar deshidratación del tubo polínico, dando lugar a una polinización incompleta y una malformación de frutos (Saray y Loya, 1977; Moreno y Torres 1996). La humedad relativa debe estar entre el 50 y 60 %.

#### **2.1.4.2. Luz**

En general es una planta moderadamente exigente en intensidad luminosa, se estima que la especie se desarrolla óptimamente con 2,500 bujías pie<sup>-1</sup>. Se puede decir que de la emergencia hasta el inicio de la maduración comercial del fruto constituye el periodo de mayor exigencia. A partir de esta fase, sus necesidades se reducen significativamente, con valores mayores a 2,500 bujías pie<sup>-1</sup>, la planta responde acortando su ciclo, envejecimiento prematuro, reducción del tamaño de fruto, sabor insípido del fruto (Aguilar y Aguilar, 2000). Las variedades comerciales requieren de 7,000 luxes aproximadamente y alrededor de 10 horas luz (Moreno y Torres, 1996).

#### **2.1.4.3. Suelo**

Las características del suelo para un buen desarrollo del tomate de cáscara son un pH de 5.0 a 7.0, con una textura arcillo-arenoso, preferentemente con una profundidad útil mayor a 30 cm y con una cantidad de materia orgánica entre 1.5 a 2 % (Garzón y Garay, 1978, citado por Arroyo 1999).

En el caso de la humedad, las etapas críticas corresponden a la germinación, emergencia y trasplante. El resto del ciclo, incluyendo floración, necesita de un 60% de la humedad a capacidad de campo. En condiciones de sequía la planta rápidamente emite flores acelerando la maduración, los frutos son pequeños, en menor cantidad, de sabor ácido y algunos deformes (Saray y Loya, 1997; Moreno y Torres, 1996).

### **2.2. Factores que intervienen en el crecimiento de los cultivos**

Los principales factores que intervienen en el crecimiento de los cultivos, mismos que se pretenden controlar mediante el uso y manejo de los invernaderos, son: la radiación solar, la temperatura ambiente, la humedad relativa, el viento y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Gil *et al.*, 2010; Golberg, 2010). Estos elementos son interdependientes entre sí, y cuando se modifica uno de ellos los otros también son afectados.

### 2.2.1. Radiación solar

La importancia de la luz en la producción hortícola está fuera de duda. Los invernaderos deben coleccionar el máximo de radiación solar durante todo el día en invierno y durante el resto del año deben aprovechar la radiación por la mañana y por la tarde, para lograr un balance térmico favorable y activar la fotosíntesis al transmitir parte del espectro visible (FAO, 2002). De la radiación incidente sobre la cubierta vegetal las hojas reflejan un poco más del 10 %, transmiten un 10 % y absorben el 80 % restante de la radiación fotosintéticamente activa (PAR). La radiación absorbida, a su vez, sigue tres caminos diferentes: de la incidente, el 20 % es emitida en forma de radiación infrarroja; el 60 % calentará las hojas y será disipada (por transpiración o por convección, dependiendo del contenido hídrico); y sólo el 1 % se utiliza en la fotosíntesis (Sánchez, 2007).

La radiación solar es el factor ambiental que mayor influencia ejerce sobre el crecimiento de las plantas. De ella dependen la mayoría de los procesos biológicos, incluyendo la fotosíntesis, los procesos de movimiento y formación de las plantas, por ejemplo, los tropismos, la orientación, el alargamiento del tallo y la formación de pigmentos y clorofila. Al transformarse de energía luminosa a energía calorífica, la radiación solar, interviene en todos los procesos bioquímicos de las plantas. La radiación solar actúa sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas como fuente energética para la asimilación fotosintética de CO<sub>2</sub>, así como fuente primaria de calor y estímulo para la regulación del desarrollo de todos los tejidos vegetales. La PAR que es capaz de inducir la fotosíntesis se encuentra entre 400 y 700 nanómetros (Gil *et al.*, 2010). El polvo en la cubierta plástica del invernadero puede disminuir la penetración de luz de un 30 a un 50 % y reducir seriamente la fotosíntesis (FAO, 2002).

Cada especie vegetal requiere de una cantidad específica de radiación solar para desarrollar la fotosíntesis y expresar su potencial productivo. Si les falta luz, las plantas tienden a alargarse y crecen con tallos y ramas débiles. Por lo contrario, si una planta tiene más iluminación de la requerida, crecerá lentamente, presentará tallos duros y sus flores serán de colores pálidos. Dentro de un invernadero una

cantidad excesiva de radiación solar traerá como consecuencia temperaturas altas y baja humedad relativa, aumentando la transpiración de las plantas y el consumo de agua (Martínez, 1995).

### **2.2.2. Temperatura ambiente**

Es el factor más importante a tener en cuenta en el manejo del ambiente dentro del invernadero, ya que es el que más influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas, la fotosíntesis, respiración, permeabilidad de la membrana celular, absorción de agua y nutrientes, transpiración, actividades enzimáticas, entre otras (FAO, 2002; Gil *et al.*, 2010).

Las reacciones biológicas de importancia no pueden desarrollarse si la temperatura ambiente está por debajo de 0 °C, o por encima de 50 °C. Es por esto que la mayoría de las plantas sólo pueden vivir dentro de este rango de temperatura, aunque algunas especies pueden sobrevivir a temperaturas muy bajas o muy altas. El límite inferior corresponde al punto de congelación del agua y el superior a la desnaturalización de las proteínas. La temperatura óptima varía según las especies, pero casi siempre está comprendida entre los 10 y los 35 °C (Alpi y Tognoni, 1991; FAO, 2002).

La temperatura ambiente varía de forma inversa a la altura y directamente con la cantidad de horas de radiación solar; a mayor altura sobre el mar menor temperatura, y a menor altura sobre el mar mayor temperatura; a mayor número de horas luz, temperaturas más altas. Durante el día la temperatura de las hojas de las plantas, como consecuencia de la absorción de la radiación solar, puede ser unos grados más elevada que la del ambiente, situación que provoca mayor consumo de agua para enfriar las células y como consecuencia se presenta una mayor transpiración (Gil *et al.*, 2010).

El exceso de temperatura ambiente causa daño en la morfología y en los distintos procesos fisiológicos de las plantas, como son la formación floral, la quemadura de hojas, la mala calidad del fruto, el exceso de transpiración, el acortamiento de la

vida del cultivo, la reducción de la fotosíntesis neta debido al exceso de respiración, etc. (FAO, 2002).

### **2.2.3. Humedad relativa**

El vapor de agua es uno de los constituyentes más variables de la atmosfera; de 0 y 4 % en el volumen de la atmosfera, cerca de la superficie del suelo y representa el 3 % del peso de la misma. La mayor o menor capacidad del aire para contener vapor de agua depende de la temperatura ambiente. Así, el aire caliente puede contener mayor cantidad de vapor que el aire frío. La forma de expresar el contenido de vapor de agua en la atmosfera es la humedad relativa, y se expresa en porcentaje de saturación, es decir, tomando un m<sup>3</sup> de aire saturado como aquel que contiene el 100 % de humedad relativa a una temperatura determinada (Gil *et al.*, 2010).

La influencia de la humedad no ha sido investigada con la misma profundidad que la de otros factores ambientales, quizás debido a la dificultad del control y de la medida precisa de esta variable. El aire del invernadero es enriquecido con vapor de agua por evaporación desde el suelo y por transpiración de las plantas. Durante la noche la evapotranspiración tiene poca importancia debido a que la transpiración queda reducida por causa del cierre de estomas y la evaporación del suelo es insignificante porque el déficit de presión de vapor es pequeño (FAO, 2002).

La humedad relativa interviene en el amortiguamiento de los cambios de temperatura, el aumento o la disminución de la transpiración, sobre el potencial hídrico foliar, en la regulación de la conductancia estomática y la temperatura de las hojas, en el crecimiento de los tejidos, en la viabilidad del polen para obtener mayor porcentaje de fecundación del ovario de las flores, en el desarrollo de enfermedades y en el transporte de nutrientes (Alpi y Tognoni, 1991; FAO, 2002; Gil *et al.*, 2010).

Cuando más húmedo esté el ambiente, menos posibilidades existen de aumentar la evapotranspiración, a no ser que aumente la temperatura ambiente. A mayor

temperatura menor humedad relativa. A menor humedad relativa mayor consumo de agua (Gil *et al.*, 2010). Si la humedad ambiental es demasiado alta, el intercambio gaseoso queda limitado, reduciéndose la transpiración y por consiguiente la absorción de nutrientes. Si la humedad ambiental es demasiado baja se cierran los estomas y se reduce la tasa de fotosíntesis (FAO, 2002).

#### **2.2.4. Viento**

El viento tiene una serie de efectos beneficiosos, un viento suave permite la renovación del aire, facilitando la transpiración de las plantas y como agente polinizador por el polen que éste pueda transportar. Altas velocidades de viento pueden ocasionar daños mecánicos a los cultivos, y los problemas comienzan con velocidades desde 10 km/h. Los vientos cálidos pueden ocasionar un golpe de calor y de esta forma incrementar la evapotranspiración (Almorox, 2003).

El viento influye sobre el crecimiento y desarrollo de la planta y el fruto, varían según su duración, velocidad, especie y variedad, o por las interacciones entre la planta y la atmósfera. El viento hace plegar las hojas, con lo cual, al disminuir la superficie foliar, disminuye su capacidad como receptora de luz al mismo tiempo aumentándose la tasa de transpiración, lo cual origina condiciones de estrés hídrico que puede manifestarse en los frutos a través de ciertas fisiopatías (Rodríguez, 2007).

La capa límite entre el viento y las hojas de las plantas, interfiere en los intercambios de calor y gases entre el interior de la hoja y la atmosfera exterior, interviniendo de esta manera en la regulación de la temperatura foliar, la transpiración y la fotosíntesis. El viento contribuye a disminuir la temperatura foliar, produce un déficit de presión de vapor en la capa limite, y reduce la tasa de transpiración. Cuando la radiación solar es alta y la velocidad del viento reducida, la temperatura foliar puede ser substancialmente mayor que la del ambiente (Golberg, 2010).

El intercambio de aire entre el interior y el exterior del invernadero incide de una manera clara en el clima de cultivo. No solamente cambia el balance de energía,

por lo tanto la temperatura del aire, sino que también afecta al contenido de vapor de agua y de CO<sub>2</sub>. El efecto eólico tiene más importancia que el efecto térmico. En los invernaderos de Holanda se ha comprobado que si el salto térmico es de 9 °C, a partir de la velocidad de viento de 1 m/s el efecto térmico tiene menos importancia que el eólico sobre la cantidad de aire renovado (FAO, 2002).

### **2.3. Evapotranspiración**

Se conoce como evapotranspiración (ET) a la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde, evaporación y transpiración. Se expresa normalmente en milímetros por unidad de tiempo (Allen *et al.*, 2006). Es una de las variables meteorológicas más importantes para evaluar las necesidades de agua en los cultivos y las necesidades de riego (Silva *et al.*, 2010). Actualmente se conoce que el fenómeno de la evapotranspiración es el mecanismo por el cual los cultivos pierden la mayor cantidad de agua.

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua. Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía, y ésta es proporcionada por la radiación solar, y en menor grado, la temperatura ambiente. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende grandemente de la velocidad del viento (Allen *et al.*, 2006).

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas. El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales. La transpiración,

igual que la evaporación, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura ambiente, la humedad atmosférica y el viento deben ser considerados en la determinación de la evaporación y la transpiración (Allen *et al.*, 2006).

La evapotranspiración constituye un importante elemento que enlaza el ciclo hidrológico y el balance de energía superficial, permitiendo a partir de la transferencia de masa y energía mantener unos niveles energéticos e hídricos adecuados en el sistema tierra-atmósfera (Sánchez y Chuvieco, 2000).

### **2.3.1. Medición de la evapotranspiración**

Para determinarla experimentalmente se requieren aparatos específicos y mediciones precisas de varios parámetros físicos o el balance del agua del suelo en lisímetros. Los métodos experimentales de campo, son en general caros, exigiendo precisión en las mediciones. A pesar de que estos procedimientos no son apropiados para mediciones de rutina, siguen siendo importantes para la evaluación de las estimaciones de la evapotranspiración obtenidas con otros métodos indirectos (Allen *et al.*, 2006).

Un lisímetro es un gran recipiente que encierra una determinada porción de suelo con superficie desnuda o con cubierta vegetal, ubicado en campo para representar condiciones naturales y que se utiliza para determinar la evapotranspiración de un cultivo en crecimiento, de una cubierta vegetal de referencia, o la evaporación de un suelo desnudo (Aboukhaled *et al.*, 1986).

Estos dispositivos determinan la pérdida de agua del cultivo por diferencias de peso. Es decir, la derivada de las mediciones de peso con respecto al tiempo es la evapotranspiración y se representa matemáticamente como:

$$ET = \frac{dW}{dt} = \lim_{t_1 \rightarrow t_0} \frac{W_1 - W_0}{t_1 - t_0} \quad (1)$$

Donde  $W_0$  y  $W_1$  son los pesos medidos en el tiempo  $t_0$  y  $t_1$  respectivamente (van Meurs and Stanghellini, 1992).

Los lisímetros son el método más utilizado para tener una información que sirve de base para el desarrollo, calibrado y corroboración de los métodos empíricos de evapotranspiración, y son ampliamente utilizados en zonas agrícolas y forestales para la planificación de riegos. Los lisímetros se pueden dividir en dos grandes grupos, los lisímetros de pesada y los de drenaje (Figura 2.1) (Tuñón, 2000),

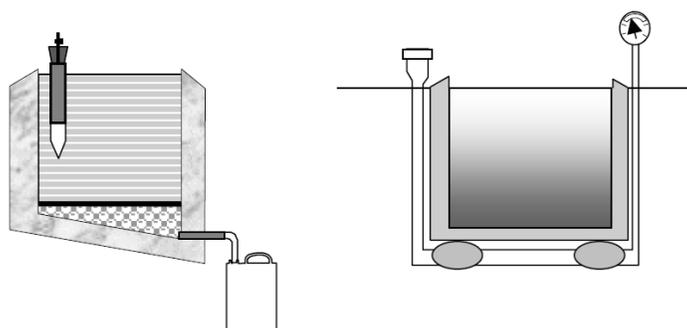


Figura 2.1. Los dos tipos de lisímetros, a la izquierda un lisímetro de drenaje, a la derecha un lisímetro de pesada.

Los lisímetros de drenaje fueron diseñados para recoger el agua de infiltración, y los lisímetros de pesada (mucho más costosos que los de drenaje), fueron concebidos para el cálculo de la evapotranspiración. El lisímetro de pesada se apoya sobre un sistema hidráulico o una balanza de precisión. Los lisímetros de drenaje tienen una salida en el fondo, de manera que el agua que se infiltra es recogida en un recipiente que se puede aforar (Tuñón, 2000). La principal diferencia entre ambos tipos de lisímetros es que los de drenaje miden la evapotranspiración de forma indirecta, resolviendo la ecuación de balance del suelo, mientras que en los lisímetros de pesada la evapotranspiración se mide directamente, y según la exactitud de la balanza se pueden dar precisiones de hasta 0.1 mm (Gee y Hillel, 1998, citado por Tuñón, 2000).

Un requerimiento de los lisímetros es que la vegetación dentro e inmediatamente fuera del lisímetro sea idéntica (la misma altura e índice de área foliar). Este requisito no se ha respetado normalmente en muchos estudios de lisimetría y ha dado lugar a datos seriamente desviados y poco representativos de evapotranspiración y coeficiente de cultivo. Como los lisímetros son difíciles de

manejar y caros de construir y además su operación y mantenimiento requieren de especial cuidado, su uso se restringe normalmente a trabajos de investigación (Allen *et al.*, 2006).

#### **2.4. Temperatura foliar**

La importancia de la relación entre la temperatura de la hoja y el contenido de agua del suelo es particularmente importante, ya que determina un índice de estrés hídrico. De manera que se puede usar la temperatura de la hoja como un indicador del estado hídrico de la planta, el cual es factible de ser utilizado para la programación de riegos (Kamp y Timmerman, 1996; Ramírez, 2005; Ünlü *et al.*, 2011).

La temperatura foliar es un factor importante en el clima del invernadero debido a los efectos significativos de calor, agua e intercambios de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, esta es muy difícil de medir porque las hojas están distribuidas en diferentes orientaciones (Wang y Deltour, 2004; citado por Olivera, 2005). Debido a que la temperatura de las hojas depende de la orientación, exposición a la radiación solar directa, edad, entre otras consideraciones, las situaciones son diferentes para todas las hojas, por lo cual es difícil determinar un valor único para todo el cultivo (Wang y Deltour, 2004, citado por Olivera, 2005).

La orientación de la hoja puede afectar al coeficiente de transpiración, porque las hojas que forman ángulos rectos con los rayos del sol están más calientes que las paralelas a la radiación incidente. Las hojas de la mayoría de las plantas tienden a orientarse más o menos perpendicularmente a la radiación incidente promedio, pero sólo en algunas están orientadas en dirección casi paralela a la radiación incidente promedio (Kramer, 1969, citado por Olivera, 2005).

La superficie total de la hoja y la orientación de esta en las plantas, tienen efectos significativos sobre la pérdida de agua en las plantas y hojas individuales. La reducción en la superficie foliar por poda suele tener como resultado en las hojas restantes un aumento en el coeficiente de pérdida de agua por unidad de superficie. El aumento es el resultado de una mayor exposición de las hojas

restantes a la radiación solar, lo cual facilita el movimiento del aire a su alrededor. Otra razón del aumento de la transpiración está en que la proporción mayor de las raíces y vástagos puede tener por resultado un abastecimiento mejor en agua para las hojas individuales (Olivera 2005).

La transpiración depende de la diferencia de presión del vapor de agua entre la planta y la masa de aire del invernadero. La presión de vapor de agua depende a su vez, de la diferencia entre la temperatura del aire y de la planta. Para ésta última, se pueden presentar tres situaciones (Kamp y Timmerman, 1996):

1. La temperatura de la planta sea igual a la del aire;
2. La temperatura de la planta sea menor a la del aire;
3. La temperatura de la planta sea mayor a la del aire.

Altas temperaturas en el cultivo incrementan la transpiración del mismo, pero algunas veces las plantas no son capaces de remover el exceso de calor mediante la transpiración y consecuentemente la temperatura de la planta puede alcanzar hasta 10 °C por encima de la temperatura ambiente, es entonces cuando la planta empieza a deshidratarse (Kamp y Timmerman, 1996).

#### **2.4.1. Medición de la temperatura foliar**

La temperatura del cultivo se puede medir con termopares o con sensores remotos de radiación infrarroja (Villalobos *et al.*, 2002, citado por Olivera, 2005). El único método para la medición de la temperatura que no requiere contacto con el objeto es mediante el termómetro infrarrojo, que se basa en el principio de que todas las superficies emiten energía. El flujo de radiación sigue la ley de Stefan Boltzmann, es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del objeto. Como la temperatura de la vegetación es de alrededor de 290 °K, emite radiación de onda larga con un pico de emisión en alrededor de 10 micro mohs ( $\mu\text{m}$ ). Típicamente, los termómetros infrarrojos están provistos de filtros que dejan pasar al detector sólo radiación en la gama de 8 a 13  $\mu\text{m}$ . Son costosos, son difíciles de calibrar y expuestos a error si se detecta radiación de onda larga reflejada. Cuando se usan correctamente, los errores están entre 0.1 y 0.5 °C. Son

preferibles a los métodos de contacto porque estos últimos pueden alterar la temperatura de la superficie durante la medición por conducción simultánea entre el termómetro, la superficie y el aire, lo que genera posiblemente errores más grandes (Coombs *et al.*, 1988, citado por Olivera, 2005).

Ley de Stefan Boltzmann:

$$E = \sigma * T_e^4 \quad (2)$$

Donde  $T_e$  es la temperatura absoluta de la superficie y  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann:  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

Tanner (1963) fue el primero en evaluar la temperatura de las hojas en los cultivos, y encontró que la temperatura de la hoja era generalmente más baja que la temperatura del aire. La suposición básica fue que la transpiración enfriaba las hojas y tal como se disminuía la humedad del suelo, la transpiración era reducida y por lo tanto, la temperatura de las hojas aumentaba.

## 2.5. Contenido de humedad en un sustrato

La planta necesita vencer la retención que ejerce el suelo sobre el agua, para absorberla, lo que implica un gasto de energía (trabajo). Mientras más seco está el suelo, mayor será el trabajo que deberá ejercer la planta para absorber agua. Por esto es tan importante saber a qué rangos de humedad del suelo están sometidos los cultivos. De aquí nacen los conceptos (Lagos *et al.*, 2004):

- Humedad Aprovechable (HA): Es una característica propia de cada suelo. Es la diferencia existente entre CC y PMP, siendo la cantidad de agua aprovechable por las plantas.
- Punto de Marchitez Permanente (PMP): Es el contenido de agua del suelo al cual la energía para extraerla es de aproximadamente 15 bar. Es el límite mínimo contenido de agua en el suelo al cual las plantas pueden extraerla. Si la humedad del suelo es menor la planta es incapaz de absorberla.

- Capacidad de Campo (CC): Es el contenido de agua del suelo en el cual la energía para extraerla es de aproximadamente 1/3 bar. Es el límite máximo contenido de agua en el suelo al cual las plantas pueden extraerla.

El criterio de riego (CR) señala el porcentaje tolerable de disminución del HA del suelo. En general, se sugiere un valor de cincuenta por ciento (CR = 0.5) asignándose valores de CR del treinta por ciento (CR = 0.3) para cultivos sensibles a un déficit de agua y valores de CR = 0.6 para cultivos que soportan de mejor manera un estrés hídrico (Jara y Valenzuela, 1998). Inmediatamente después de terminado un riego el suelo queda en un nivel de humedad sobre CC, pero a medida que transcurren los días, el agua libre drena hacia capas más profundas del suelo y el cultivo va consumiendo agua, de manera que la humedad va disminuyendo. Cuando se ha agotado el 50 % de la HA se debe regar nuevamente (Uribe y Maldonado, 2000).

### **III. OBJETIVO E HIPÓTESIS**

#### **3.1. Objetivo**

Determinar la correlación estadística de las variables evapotranspiración y temperatura foliar, en un cultivo de Tomate de Cáscara (*Physalis ixocarpa*) variedad *Gran Esmeralda*, con las variables del microclima del invernadero.

#### **3.2. Hipótesis**

La relación entre evapotranspiración y temperatura foliar representa una respuesta fisiológica de la planta a las condiciones ambientales y a la disponibilidad de agua.

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Descripción del sitio de estudio

La investigación se desarrolló en el Campus Amazcala de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, el cual se encuentra en la comunidad de Amazcala en el municipio de El Marqués, Querétaro. La temperatura media es de 21 °C, con un clima predominante templado-semiseco.

Se utilizó un invernadero experimental tipo capilla, con un área de 108 m<sup>2</sup>. Está constituido por una nave cuyas dimensiones son 9 m de ancho por 12 m de largo, tiene una altura a la canaleta de 4.2 m y una altura cenital de 6.2 m. Cuenta con dos ventanas laterales de 7.5 m de ancho y 2.2 m de alto, y una cenital de 12 m de ancho y 0.5 m de alto, las cuales abren y cierran manualmente. Además están cubiertas con malla antiáfidos de 250 hilos/pulg<sup>2</sup> para evitar la entrada de insectos. Dicho invernadero está cubierto por plástico de un espesor de 800 galgas difuso, el cual está sujeto a la estructura del invernadero con clip zigzag de acero. El suelo cuenta con acolchado de color blanco para evitar que crezca maleza y aislar el suelo evitando posible presencia de algún patógeno (Figura 4.1).



Figura 4.1. Invernadero experimental de 108 m<sup>2</sup>.

El invernadero también cuenta con un sistema automatizado de riego por goteo, y para la programación de los riegos se utilizó un Controlador Lógico Programable (PLC) marca Allen-Bradley modelo 1760-L12AWA (Figura 4.2). Se utilizaron goteros autocompensantes y antidrenantes con un gasto de 4 litros/hora, manguera de 16 mm y se dejó un gotero por planta.



Figura 4.2. PLC marca Allen-Bradley modelo 1760-L12AWA.

#### 4.2. Material biológico

Se utilizó semilla de Tomate de Cáscara (*Physalis Ixocarpa*) variedad *Gran Esmeralda*, que presenta un porcentaje de germinación del 85%. La siembra se realizó el día 25 de Enero de 2012, utilizando como sustratos peat moss (en el fondo del alveolo y perlita (para cubrir la semilla). Estos se colocaron en charolas de poliestireno expandido de alta resistencia (Unicel), las cuales cuentan con 200 alveolos y cada uno de ellos con un orificio de salida de 0.45 cm para drenar los excesos del riego sin perdidas de sustrato. Antes de la siembra se realizó la desinfección de charolas, utilizando FULL-GRO, con una concentración 2.5-3.5 ml/L de agua. Se colocó una semilla por alveolo.

#### 4.3. Trasplante

El trasplante se realizó el día 15 de marzo de 2012, permaneciendo 50 días en almácigo, esto debido a las condiciones adversas en el ambiente para la germinación de las semillas. La plántula permanece en almácigo para lograr un buen desarrollo del cepellón y evitar la pérdida de plántulas al momento del trasplante.

Como sustrato para el trasplante se utilizó piedra pómez, el cual fue introducido en bolsas negras de polietileno y en cada una de ellas se trasplantó una plántula (Figura 4.3).



Figura 4.3. Trasplante de la plántula.

#### 4.4. Solución nutritiva

Para la obtención de plántulas de calidad se irrigan con la solución nutritiva universal de Steiner al 50 % (Magdaleno-Villar *et al.*, 2006), y se mantuvo esta solución nutritiva hasta los 35 ddt. Posteriormente se cambió a la solución nutritiva universal de Steiner al 100%, y así se mantuvo hasta el final del experimento.

#### 4.5. Diseño experimental

Se implementó el Diseño Cuadrado Latino (DCL) (Figura 4.4), utilizando cuatro tratamientos los cuales consistieron en someter a la planta a un estrés hídrico. Esto se logró dejando a la planta sin agua por cierto tiempo y los tratamientos consistieron en manejar estos diferentes tiempos. Se utilizaron ocho plantas por tratamiento y se realizaron cuatro repeticiones, lo que indica un total de 128 plantas utilizadas.

T <sub>3</sub> R <sub>1</sub>	T <sub>1</sub> R <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> R <sub>3</sub>	T <sub>4</sub> R <sub>4</sub>
T <sub>4</sub> R <sub>1</sub>	T <sub>2</sub> R <sub>2</sub>	T <sub>3</sub> R <sub>3</sub>	T <sub>1</sub> R <sub>4</sub>
T <sub>1</sub> R <sub>1</sub>	T <sub>3</sub> R <sub>2</sub>	T <sub>4</sub> R <sub>3</sub>	T <sub>2</sub> R <sub>4</sub>
T <sub>2</sub> R <sub>1</sub>	T <sub>4</sub> R <sub>2</sub>	T <sub>1</sub> R <sub>3</sub>	T <sub>3</sub> R <sub>4</sub>

Figura 4.4. DCL utilizado.

Se realizaron tres repeticiones del experimento y los tratamientos para cada una de las repeticiones se muestran en el cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Duración de los tratamientos para cada repetición del experimento.

Tratamientos	Repeticiones del experimento		
	1	2	3
T1	Control	Control	Control
T2	16 horas sin riego	16 horas sin riego	24 horas sin riego
T3	32 horas sin riego	32 horas sin riego	48 horas sin riego
T4	48 horas sin riego	48 horas sin riego	72 horas sin riego

1 Realizada los días 10, 11, 12 y 13 de Abril de 2012 (26, 27, 28, 29 ddt).

2 Realizada los días 16, 17, 18 y 19 de Mayo de 2012 (62, 63, 64, 65 ddt).

3 Realizada los días 30, 31 de Mayo de 2012 y 1, 2 de Junio de 2012 (76, 77, 78, 79 ddt).

En la última repetición se manejaron tiempos más prolongados de ausencia de riego, esto para observar cómo era el comportamiento de las plantas bajo condiciones de ausencia de riego más prolongadas que en las repeticiones anteriores.

#### **4.6. Evaporación del sustrato**

Antes de establecer cómo serían los tratamientos, se realizó un experimento con el fin de observar cómo era la evaporación del sustrato (piedra pómez) al interior del invernadero, y con base en los resultados establecer la duración de cada tratamiento. La prueba se realizó del 3 al 9 de abril de 2012 y consistió en tomar 4 kg de sustrato seco, y se le añadió 1 L de agua, y se mezcló hasta que el sustrato quedó humedeciendo homogéneamente. Después se colocó en una bolsa negra de polietileno, y esta se puso sobre una de las básculas al interior del invernadero. Se monitoreo durante los días ya mencionados, tomando lecturas cada hora con el fin de observar cómo se evaporaba el agua contenida en el sustrato. Una vez analizados los resultados se establecieron los tratamientos como se menciona en el diseño experimental.

#### **4.7. Medición de las variables**

##### **4.7.1. Exterior del invernadero**

Para la medición de la temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento al exterior del invernadero se utilizó una estación meteorológica Wireless Vantage Pro2 modelo 6152 marca DAVIS (Figura 4.5).



Figura 4.5. Estación meteorológica Wireless Vantage Pro2 modelo 6152 marca DAVIS.

La consola exhibe y registra los datos meteorológicos, proporciona gráficos y funciones de alarma, se interconecta a la computadora utilizando el software WeatherLink. La estación inalámbrica transmite los datos de los sensores exteriores desde el Conjunto Integrado de Sensores (CIS) a la consola mediante un sistema de radiofrecuencia de baja potencia. El CIS está alojado en un refugio resistente a la intemperie. El rango inalámbrico es de hasta 300 m al aire libre, línea de visión. El rango típico a través de paredes bajo la mayoría de las condiciones es de 60 a 120 m.

#### **4.7.2. Interior del invernadero**

##### **4.7.2.1. Temperatura y Humedad relativa**

Se utilizó una micro estación WatchDog serie 1000, ya que éste modelo tiene integrados sensores de temperatura y humedad relativa (Figura 4.6).

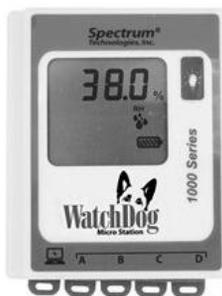


Figura 4.6. Micro estación WatchDog serie 1000.

La micro estación WatchDog serie 1000 cuenta con una pantalla LCD que confirma la operación de la misma y proporciona las lecturas actuales de los

sensores sin necesidad de descargarlas a una computadora. Incluye sensores internos de temperatura y la humedad, además cuenta con 4 puertos para sensores externos. En la LCD también se muestra el nivel de la batería, la cual dura aproximadamente 12 meses. Los datos se almacenan de forma segura en una memoria no volátil y la transferencia de datos es con una conexión directa por cable. Se requiere el software SpecWare 9 Basic para la programación de la micro estación WatchDog serie 1000.

Especificaciones:

- Temperatura de funcionamiento: de 20 a 60 °C.
- Rango de temperatura: de - 40 a 85 °C.
  - o Precisión:  $\pm 0.6$  °C de - 20 a 50 °C, de lo contrario  $\pm 1.2$  °C.
- Rango de humedad relativa: 0 – 100 %.
  - o Precisión:  $\pm 3$  % (25 °C, 10 – 90 %), de lo contrario  $\pm 5$  %.

#### **4.7.2.2. Radiación solar**

Se utilizó un sensor de radiación solar marca Spectrum Technologies. Mide la radiación solar entre 300 y 1100 nanómetros. Funciona con las estaciones meteorológicas y micro estaciones WatchDog. Tiene un rango de 0 a 1500 W/m<sup>2</sup>, y una precisión de  $\pm 5$  % (Figura 4.7).



Figura 4.7. Sensor de radiación solar marca Spectrum Technologies.

#### **4.7.2.3. Temperatura foliar**

Se utilizó un sensor infrarrojo modelo HER-425, marca STEREN, el cual es un termómetro digital en forma de pistola, con apuntador láser, pantalla LCD de doble línea iluminada y sensor infrarrojo que mide a distancia la temperatura, gracias a

su tecnología basada en la detección de radiación térmica electromagnética. Tiene un rango de temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $350^{\circ}\text{C}$  y una precisión de  $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$  (Figura 4.8).



Figura 4.8. Termómetro Infrarrojo Digital modelo HER-425 marca STEREN.

#### **4.7.2.4. Evapotranspiración**

La evapotranspiración se midió con básculas marca Avery Weigh-Tronix, modelo 3632B-50 (Figura 4.9), con dimensiones de 30.48x35.56 cm, capacidad de 50 kg y una precisión de 0.5 g. Funciona correctamente en un rango de temperatura de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $40^{\circ}\text{C}$ .



Figura 4.9. Báscula marca Avery Weigh-Tronix, modelo 3632B-50.

#### **4.7.3. Instalación de los sensores**

##### **4.7.3.1. Instalación de la estación meteorológica Wireless Vantage Pro2 modelo 6152 marca DAVIS**

La estación meteorológica Wireless Vantage Pro2 modelo 6152 marca DAVIS se encuentra instalada a la intemperie a una altura de 8 m, y a una distancia de 50 m del invernadero aproximadamente.

#### **4.7.3.2. Instalación de la micro estación WatchDog serie 1000**

La micro estación WatchDog serie 1000 y el sensor de radiación solar se colocaron en el centro del invernadero, a la altura del cultivo. Como se realizaron tres repeticiones del experimento a diferente etapa fenológica del cultivo, estos sensores se colocaron siempre a la altura del ápice del cultivo, como se muestra en la figura 4.10:



Figura 4.10. Micro estación WatchDog serie 1000 y sensor de radiación solar colocados al centro del invernadero.

#### **4.7.3.3. Instalación del lisímetro de pesada**

Se excavaron cuatro zanjas de 50x50 cm y 20 cm de profundidad (Figura 4.11), y se niveló cuidadosamente el fondo. Posteriormente se cubrieron los contornos con bolsas de polietileno negro para aislar a las básculas del suelo (Figura 4.12). Se colocó la báscula de precisión Avery Weigh-Tronix modelo 3632B-50. Después se niveló con los tornillos con los que cuenta la báscula, y se pudo verificar que había quedado nivelada correctamente al observar el nivel de burbuja que se encuentra en la parte superior de la báscula (Figura 4.13). La nivelación de la báscula se realizó de manera que el plato de pesada quedara a nivel del suelo. Esto para conservar, en lo posible, la homogeneidad del entorno con el propósito de obtener mediciones lo más cercano posible a la realidad. Finalmente se colocó el plato de pesada.



Figura 4.11.- Zanja excavada para colocar la báscula de precisión Avery Weigh-Tronix modelo 3632B-50.



Figura 4.12. Aislamiento de los contornos de la zanja.

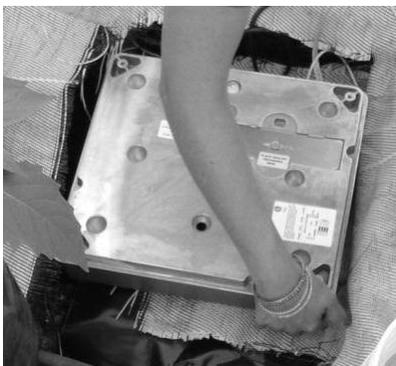


Figura 4.13. Instalación y nivelación del lisímetro de pesada.

Se instaló un sistema de drenaje, esto para coleccionar el agua que se filtra a través del sustrato (Figura 4.14). No se tomó en cuenta para la estimación de la evapotranspiración del cultivo.



Figura 4.14.- Drenaje instalado en el lisímetro de pesada.

Debido a que sólo se contaba con cuatro básculas de precisión Avery Weigh-Tronix modelo 3632B-50, sólo se pudieron medir cuatro unidades experimentales. La distribución de la instalación de los lisímetros se muestra en la figura 4.15. Los cuadros sombreados indican el lugar donde se instalaron los lisímetros de pesada. Como se observa en la figura se midieron los cuatro tratamientos.

T <sub>3</sub> R <sub>1</sub>	T <sub>1</sub> R <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> R <sub>3</sub>	T <sub>4</sub> R <sub>4</sub>
T <sub>4</sub> R <sub>1</sub>	T <sub>2</sub> R <sub>2</sub>	T <sub>3</sub> R <sub>3</sub>	T <sub>1</sub> R <sub>4</sub>
T <sub>1</sub> R <sub>1</sub>	T <sub>3</sub> R <sub>2</sub>	T <sub>4</sub> R <sub>3</sub>	T <sub>2</sub> R <sub>4</sub>
T <sub>2</sub> R <sub>1</sub>	T <sub>4</sub> R <sub>2</sub>	T <sub>1</sub> R <sub>3</sub>	T <sub>3</sub> R <sub>4</sub>

Figura 4.15. Instalación de los lisímetros de pesada de acuerdo al diseño experimental.

Debido a las dimensiones de la báscula, sólo se pudo medir una planta por báscula. Los pesos se registraron en dos computadoras; la primera una DELL modelo E773S con procesador Pentium 4 a 1.8 Ghz, 256 Mb de memoria RAM y 40 Gb de disco duro, y la segunda una COMPAQ modelo MV540 con procesador Pentium 4 a 1.5 Ghz, 754 Mb de memoria RAM y 80 Gb de disco duro. Y para registrar los pesos se utilizó el programa Evapotranspiración elaborado en Dev-C++ por la Ing. Maribel Villegas Villegas, estudiante de maestría de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. La interfaz entre la báscula y la computadora se hizo por puerto serial (RS-232). Se utilizaron adaptadores que emulan en la computadora un puerto serial mediante un puerto Universal Serial Bus (USB), y se instalaron dos básculas por computadora.

#### **4.8. Adquisición de datos**

La estación meteorológica Wireless Vantage Pro2 modelo 6152 marca DAVIS está programada para tomar lecturas cada 15 minutos, y los datos son almacenados en una computadora DELL modelo E773S con procesador Pentium 4 a 1.8 Ghz, 256 Mb de memoria RAM y 40 Gb de disco duro. Como la estación meteorológica está en funcionamiento todos los días, se crea una base de datos con la información que se está obteniendo. De manera que si se requiere información meteorológica, fácilmente puede extraerse de esta base de datos.

El sensor de radiación se conectó a la micro estación WatchDog serie 1000, y esta se programó para tomar lecturas cada 15 minutos. Esto se realizó con ayuda de una computadora DELL modelo E773S con procesador Pentium 4 a 1.8 Ghz, 256 Mb de memoria RAM y 40 Gb de disco duro, y utilizando el software SpecWare 9 Basic. De esta forma se estuvo censando la temperatura, humedad relativa y radiación solar al interior del invernadero. Santos (2006) dice que la velocidad del viento dentro del invernadero puede estimarse como el 40% de la exterior. De esta manera se estimó la velocidad del viento al interior del invernadero.

Como se ya se mencionó en la báscula Avery Weigh-Tronix modelo 3632B-50 sólo se colocó una planta y se tomaron mediciones cada minuto, y con ayuda del programa Evapotranspiración los datos obtenidos fueron almacenados en una hoja de Excel para su posterior análisis.

La temperatura foliar se midió cada hora, el apuntador láser con el que cuenta el sensor infrarrojo modelo HER-425 ayuda a visualizar de qué lugar de la planta se está tomando la medición. Se realizó una medición por planta, y se sólo se tomaban las mediciones de las hojas que estuvieran en posición horizontal y las más cercanas a la zona apical de la planta, esto para tratar de disminuir en lo posible el error de medición.

En las tres repeticiones que se realizaron del experimento se midió antes, durante y después de aplicar los tratamientos. Esto para obtener información que nos permitiera observar cómo se encontraban las plantas antes de aplicar los

tratamientos, la influencia que estos causaban en las plantas al aplicarlos y la etapa de recuperación en las plantas al finalizar los tratamientos.

#### 4.8.1. Primera repetición del experimento

Realizada los días 10, 11, 12 y 13 de Abril de 2012 (26, 27, 28, 29 ddt), y se estuvo aplicando aproximadamente 666 ml de agua por planta. Las mediciones se realizaron desde las 9 am hasta las 6 pm en los cuatro días que duró el experimento, realizando las mediciones como ya se menciona anteriormente.

La figura 4.16 representa cómo fue la duración de los tratamientos. Los segmentos de la izquierda representan el tiempo que se estuvo midiendo antes de aplicar los tratamientos, los del centro representan la duración de cada tratamiento y los de la derecha el tiempo de recuperación de las plantas hasta el final del experimento.

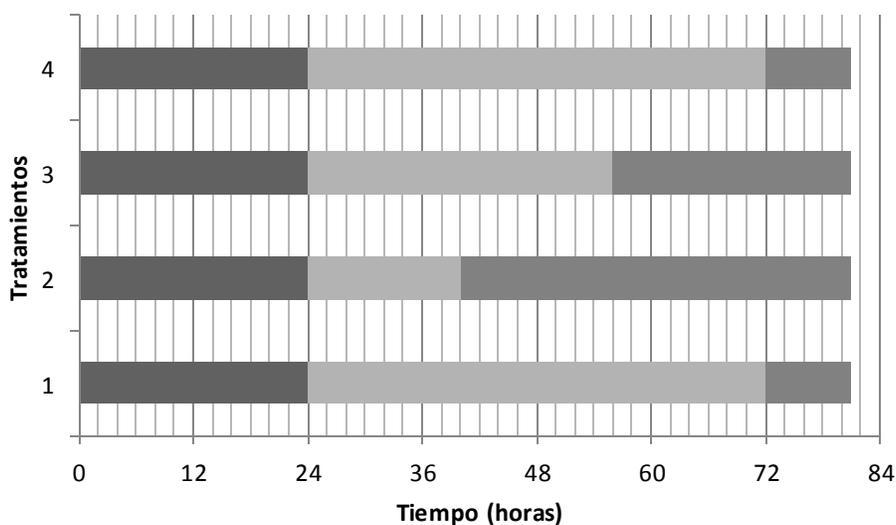


Figura 4.16. Duración de los tratamientos en la primera repetición del experimento.

En la figura 4.16 las 0 horas corresponden a las 9 am del día 26 ddt. Todos los tratamientos comenzaron a las 24 horas (9 am del día 27 ddt), el T2 terminó a las 40 horas (1 am del día 28 ddt), el T3 terminó a las 56 horas (5 pm del día 28 ddt) y el T4 terminó a las 72 horas (9 am del día 29 ddt). El reanudar el riego daba por terminado cada tratamiento. En el caso del T1 al ser el testigo siempre contó con riego.

#### **4.8.2. Segunda repetición del experimento**

Realizada los días 16, 17, 18 y 19 de Mayo de 2012 (62, 63, 64, 65 ddt), y se estuvo aplicando aproximadamente 1.8 litros de agua por planta. En esta repetición todo se hizo igual que en la primera, con la excepción que la primera medición del día 62 ddt se realizó a las 10 am, esto debido a problemas con los sensores.

Una particularidad que es importante mencionar para esta repetición del experimento es que en el día 62 ddt se realizó una poda a las plantas, manejando un sólo tallo. Esto se hizo para poder desplazarse entre los pasillos al interior del invernadero y así facilitar las mediciones de temperatura foliar.

#### **4.8.3. Tercera repetición del experimento**

Realizada los días 30, 31 de Mayo de 2012 y 1, 2 de Junio de 2012 (76, 77, 78, 79 ddt), y se estuvo aplicando aproximadamente 1.5 litros de agua por planta. Las mediciones se realizaron desde las 10 am hasta las 6 pm en los días 76 y 77 ddt, y desde las 10 am hasta las 5 pm en los días 78 y 79 ddt. Esto debido a que en estos dos últimos días estuvo lloviendo después de las 5 pm, lo que ocasionó que la temperatura del ambiente disminuyera siendo muy cercana a la temperatura foliar.

La figura 4.17 representa como fue la duración de los tratamientos. Los segmentos de la izquierda representan el tiempo que se estuvo midiendo antes de aplicar los tratamientos, los del centro representan la duracion de cada tratamiento y los de la derecha el tiempo de recuperacion de las plantas hasta el final de esta repetición del experimento.

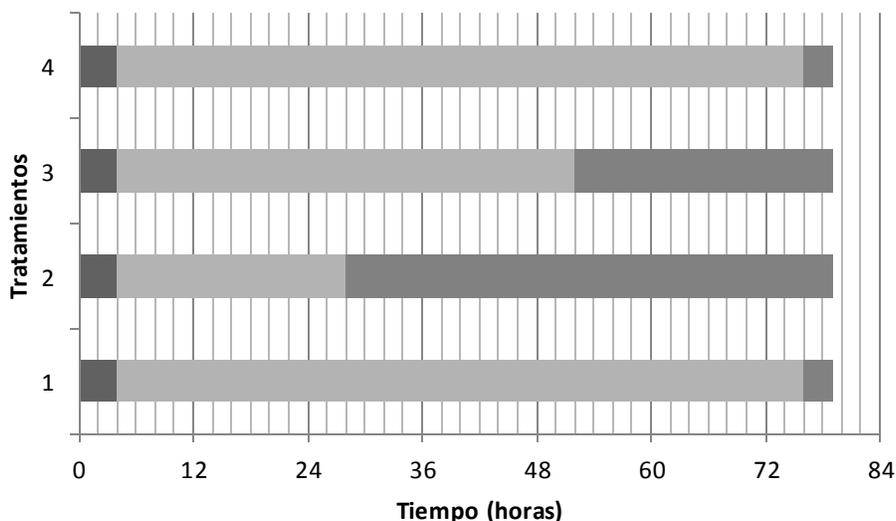


Figura 4.17. Duración de los tratamientos en la tercera repetición del experimento.

En la figura 4.17 las 0 horas corresponden a las 10 am del día 76 ddt. Todos los tratamientos comenzaron a las 4 horas (2 pm del día 76 ddt), el T2 terminó a las 28 horas (2 pm del día 77 ddt), el T3 terminó a las 52 horas (2 pm del día 78 ddt) y el T4 termino a las 76 horas (2 pm del 79 ddt). El fin de cada tratamiento se daba al reanudar el riego. En el caso del T1 al ser el testigo siempre contaba con riego.

#### 4.9. Procesamiento de datos

Los datos fueron procesados en una computadora GATEWAY NV57H14m con procesador Intel Core i5-2410M, 6 Gb de memoria RAM y 500 Gb de disco duro.

##### 4.9.1. Evapotranspiración

Los valores de los pesos medidos por el lisímetro de pesada no pueden considerarse como la evapotranspiración del cultivo, por lo que es necesario someterlos a un tratamiento de filtrado para una mejor comprensión de los datos.

Primero se toman los valores de los pesos del lisímetro de pesada y en una hoja de Excel se hace una resta de los valores; se compara una medición con la siguiente realizada un minuto después y a la primera se le resta la segunda, y así sucesivamente con el resto de los valores.

Se utilizó la ecuación (1) y se hace una sumatoria de los nuevos valores obtenidos. La sumatoria se hace de los valores correspondientes a una hora y sólo se suman los valores positivos. De esta manera se realiza un filtrado de los datos, desechando los valores negativos que se consideran como “ruido”. Dicho ruido puede ser por efecto de las podas, riegos, drenaje o movimiento de la planta por efecto del viento y se consideran igual a cero. Una vez realizada dicha sumatoria, esta es dividida entre 60, esto por los minutos que tiene una hora, y de ésta manera se obtiene una tasa de evapotranspiración por hora.

Es importante mencionar que se tuvo problemas con el programa Evapotranspiración debido a que se pausaba y dejaba de tomar mediciones, por lo que debía ser revisado constantemente. Esto ocasionó que en algunos periodos de tiempo no se cuente con información, de manera que algunas de las tasas de evapotranspiración por hora han sido estimadas por medio de interpolación lineal.

#### **4.9.2. Temperatura foliar**

Los datos obtenidos con el sensor infrarrojo fueron almacenados en una hoja de Excel para su posterior análisis. Se utilizó este programa para obtener el promedio de temperatura foliar por hora así como su desviación estándar. Esto se realizó para todas las mediciones que se realizaron durante las tres repeticiones del experimento, por lo que para cada hora se tiene el promedio de temperatura foliar por tratamiento y su desviación estándar.

#### **4.9.3. Variables climáticas**

Los datos de la estación meteorológica, así como del micro estación WatchDog serie 1000 son almacenados en una hoja de Excel. Debido a que las mediciones se realizaban cada 15 minutos, sólo se tomaron los datos correspondientes a cada hora.

#### **4.9.4. Análisis estadístico**

Se utilizó el método de regresión lineal simple, así como el coeficiente de determinación para determinar la correlación estadística entre evapotranspiración, temperatura foliar y las variables climáticas (temperatura, humedad, radiación solar y velocidad del viento) al interior del invernadero, realizándolo en el programa de Excel.

Se realizó un análisis de varianza y de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia de 0.05, para determinar si existen diferencias entre los tratamientos establecidos. Esto se realizó al inicio de cada repetición del experimento, cuando iniciaron los tratamientos, al terminar cada uno de ellos y al final de cada repetición del experimento. El paquete estadístico que se utilizó fue el Origin V8.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Evaporación del sustrato

El experimento que se realizó de evaporación de sustrato se observa en la figura 5.1, y como se observa a las 48 horas de que comenzó el experimento se llegó a un CR del 50%, punto en el cual es recomendable regar para no llegar al PMP. Es por esto que los tratamientos se establecieron con base en este experimento. Para la primera y segunda repetición del experimento se tomó esto en cuenta ya que el tratamiento 4 es el que tiene mayor tiempo de ausencia de riego (48 horas) que coincide que el tiempo en el que se alcanzó un  $CR=0.5$ .

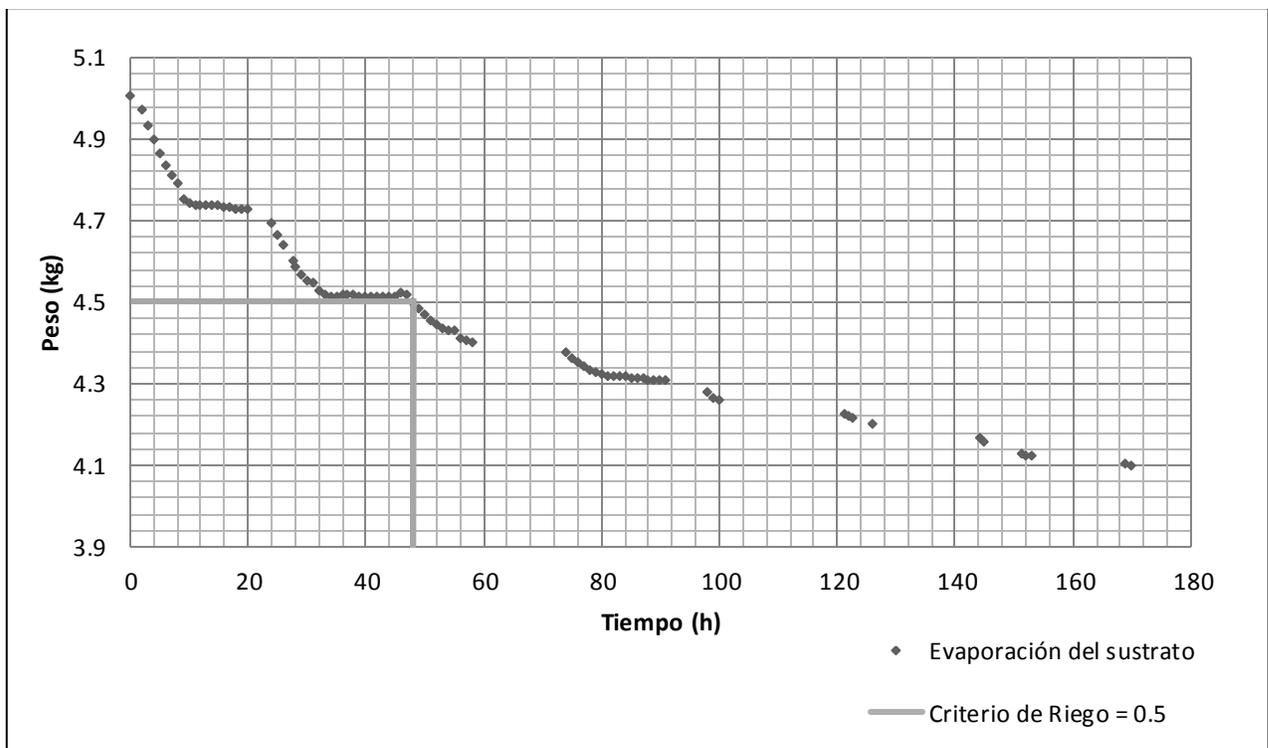


Figura 5.1. Experimento de la evaporación del sustrato.

En el caso de la tercera repetición del experimento no se tomaron en cuenta los resultados anteriores, ya que el objetivo fue observar el comportamiento de las plantas bajo condiciones de estrés hídrico más prolongado.

Como se observa en la figura 5.1 el experimento se suspendió cuando habían transcurrido 169 horas, y en las primeras 48 horas fue cuando se observó la mayor evaporación de agua correspondiente al 50% del contenido de la misma en

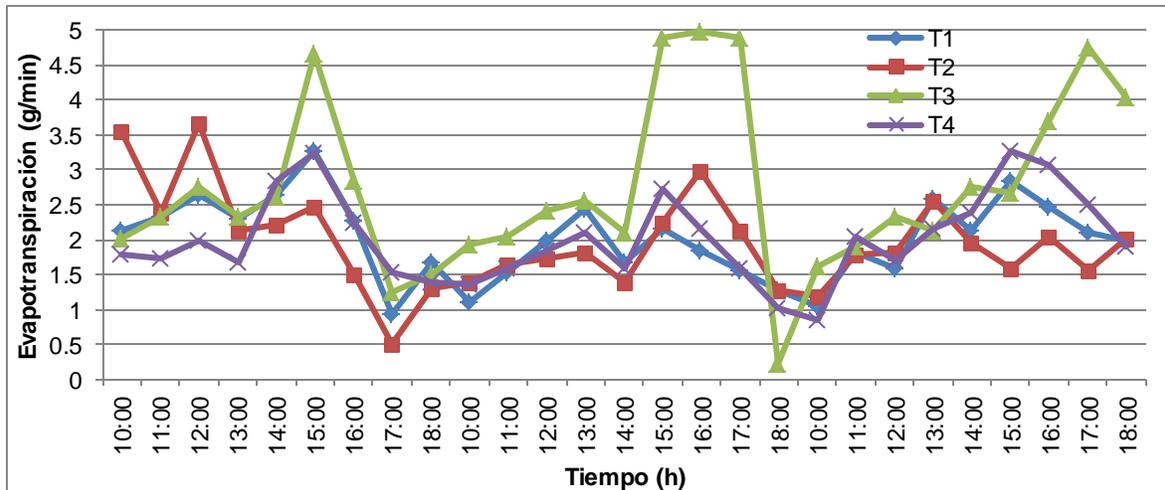
el sustrato. En las siguientes 121 horas sólo se evaporó el 40% del agua. La razón por la que se suspendió es porque las primeras 48 horas son las de interés ya que es cuando el 50% del agua contenida en el sustrato se evaporó.

## **5.2. Evapotranspiración**

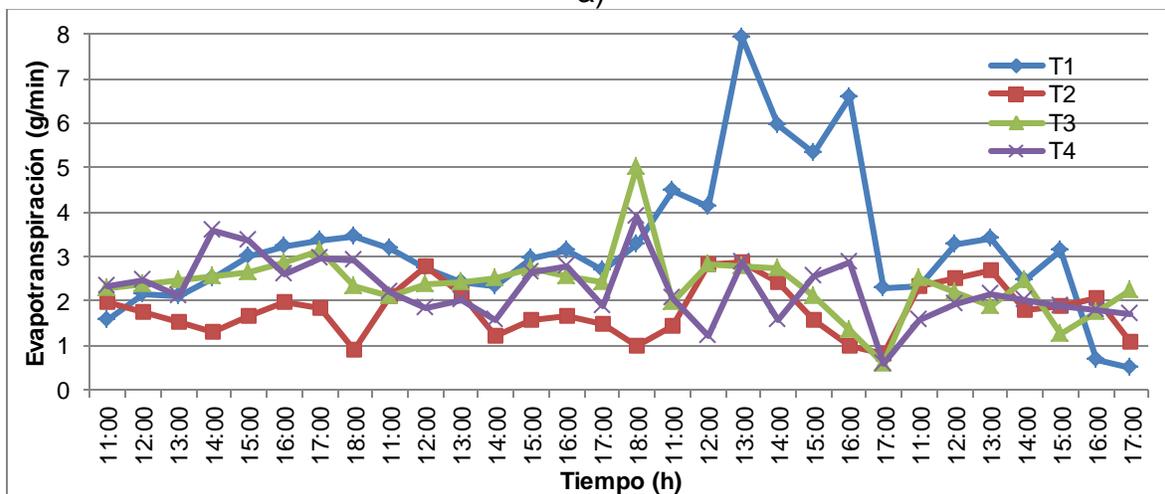
Las tasas de evapotranspiración para la segunda y tercera repetición se presentan en la figura 5.2. Debido a los problemas que se tuvo con el programa Evapotranspiración no se obtuvieron datos suficientes para presentar como fueron las tasas de evapotranspiración durante la primera repetición del experimento, y del primer día de la segunda repetición. Es por esto que en el inciso a) de la figura 5.2 sólo se observa el comportamiento de tres días.

Si observamos ambos incisos de la figura 5.2 podemos darnos cuenta que no existe una diferencia notoria entre los tratamientos conforme va transcurriendo el experimento.

Es importante mencionar la sensibilidad de la báscula de precisión al medir, ya que si se observan los datos obtenidos de los lisímetros podemos ver que en algunos periodos de tiempo había diferencias de un minuto a otro de hasta treinta gramos. En el caso de un decremento en el peso, es muy poco probable que en un minutos la planta pierda esa cantidad de agua y en el caso de un incremento se puede atribuir al movimiento de las plantas por efecto del viento o al caminar cerca de los lisímetros, ya que estos registraba algunos gramos más de peso. Es importante mencionar que en algunos periodos de tiempo en los datos se presentan incrementos o decrementos de peso en las mediciones de hasta cinco minutos consecutivamente, por lo que podría interpretarse más como un error de medición que como un consumo de agua por la planta. Es por estas razones principalmente por las que en la figura 5.2 no se observan diferencias entre los tratamientos y en algunos tratamientos en cierto periodo, presentan tasas de evapotranspiración muy elevadas en comparación con los demás tratamientos. La tendencia de la evapotranspiración es constante, por lo que podríamos decir que no existen diferencias significativas entre los tratamientos.



a)



b)

Figura 5.2. Tasas de evapotranspiración a) segunda repetición del experimento y b) tercera repetición del experimento.

### 5.3. Temperatura foliar

El comportamiento general de temperatura foliar para cada una de las tres repeticiones del experimento se muestra en la figura 5.3. En el caso de los incisos a) y b), correspondientes a la primera y segunda repetición del experimento respectivamente, podemos observar los cuatro días de cada repetición. Esto es porque no se observan diferencias significativas entre los tratamientos conforme va avanzando el experimento. Caso contrario los incisos c), d), e) y f), que son los cuatro días de la tercera repetición del experimento, donde se observa una diferencia significativa entre tratamientos conforme transcurre el experimento.

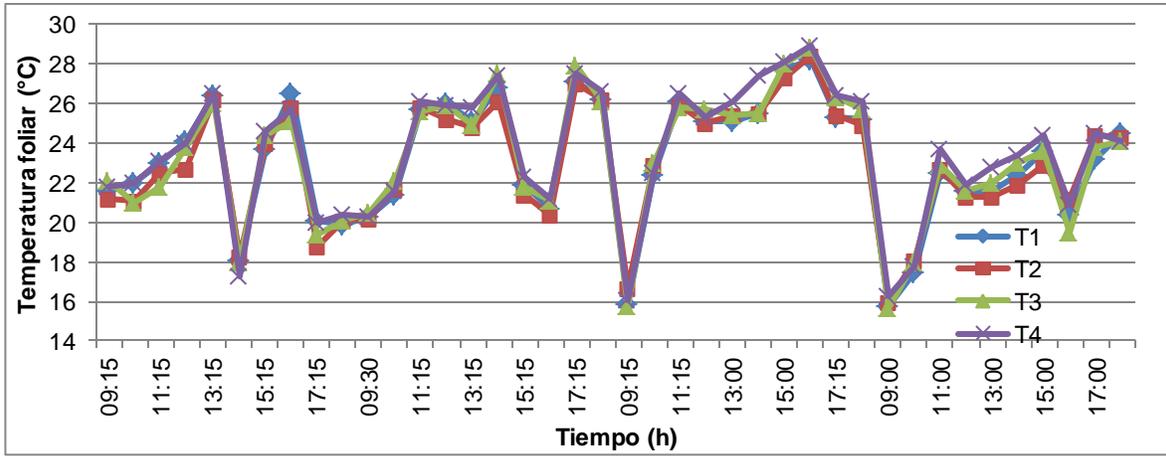
En el inciso c) correspondiente al día uno, podemos observar que no hay aún diferencias entre los tratamientos, esto debido a que los tratamientos tienen algunas horas de haber iniciado.

En el inciso d) correspondiente al día dos, observamos que el T1 está regulando mejor su temperatura que el resto de los tratamientos. En el caso del T2 podemos observar que a partir de las 2:00 pm, tiempo en que termina T2 y se reanuda el riego, comienza a mejorar su regulación de temperatura por lo que al final del día se separa de T3 y T4, y termina aproximadamente 2°C más abajo.

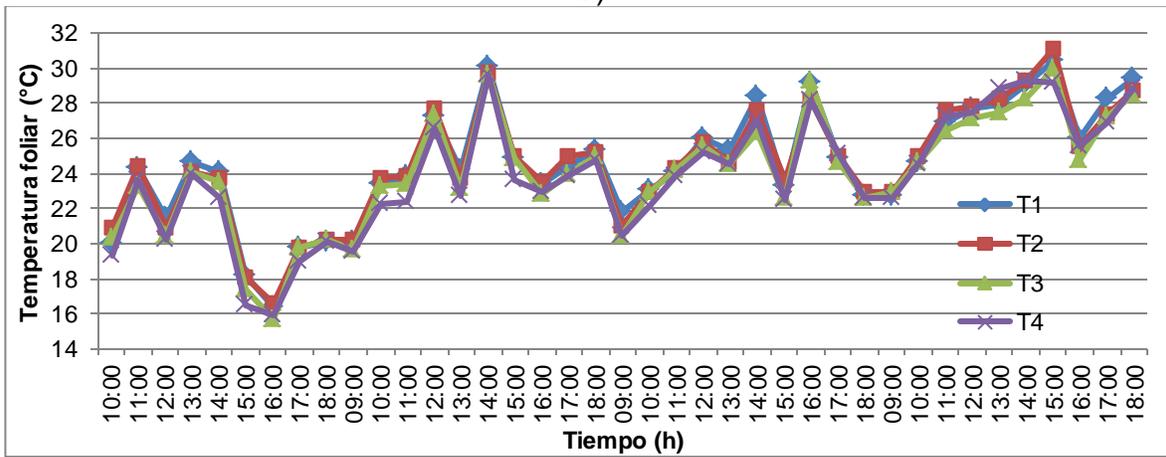
En el inciso e) correspondiente al día tres, podemos observar que T1 y T2 están regulando mejor su temperatura foliar que T3 y T4. A las 2:00 pm termina T3 y se reanuda el riego, por lo que podemos observar que hay una disminución en la temperatura foliar comparada con el T4. Al final del día el T4 termina ligeramente arriba que el resto de los tratamientos.

En el inciso f) correspondiente al día cuatro, podemos observar que hay una clara diferencia entre las plantas que cuentan con riego (T1, T2 y T3) y las que están bajo estrés hídrico (T4). Podemos observar que hay una diferencia de 5°C aproximadamente a las 2:00 pm, tiempo en que termina T4 y se reanuda el riego. Después de esto observamos que comienza a regular mejor su temperatura y al final del día todas las plantas tienen una temperatura foliar muy parecida.

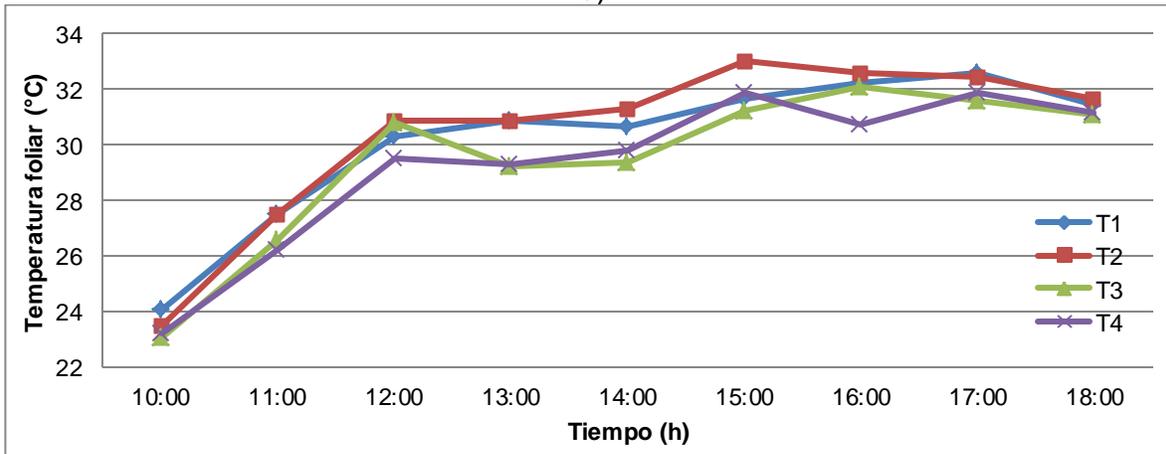
Es importante mencionar que en los días tres y cuatro las mediciones se realizaron sólo hasta las 5:00 pm debido a una disminución de la radiación solar y de temperatura ambiente a causa de la lluvia, lo cual causaba que la temperatura foliar de todas las plantas (incluyendo las que estaban bajo estrés hídrico) fuera muy cercana de la temperatura ambiente, por lo que no se consideró seguir midiendo ya que no se apreciaban diferencias entre los tratamientos. Por esta razón podemos decir que para observar alguna diferencia entre los tratamientos deben hacerse las mediciones cuando hay radiación solar incidente sobre el cultivo.



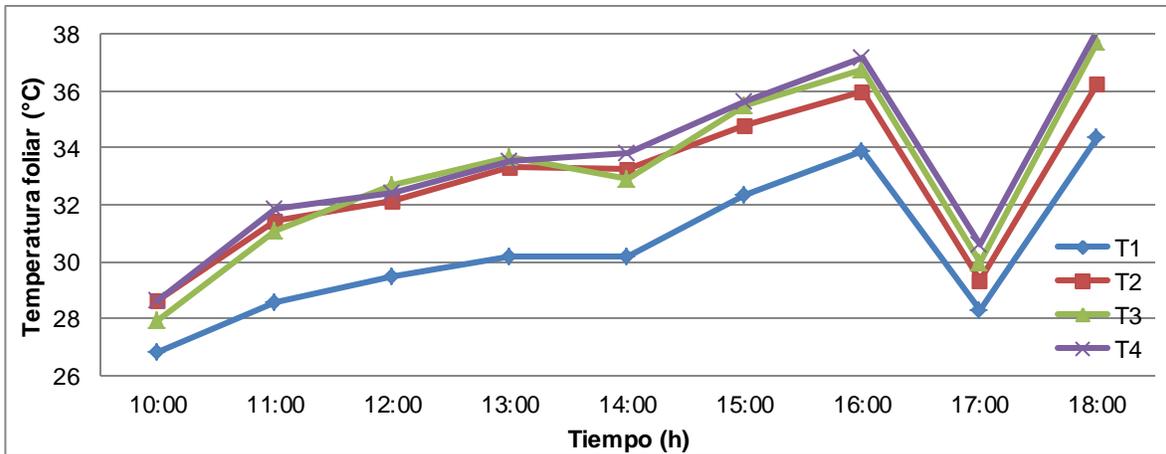
a)



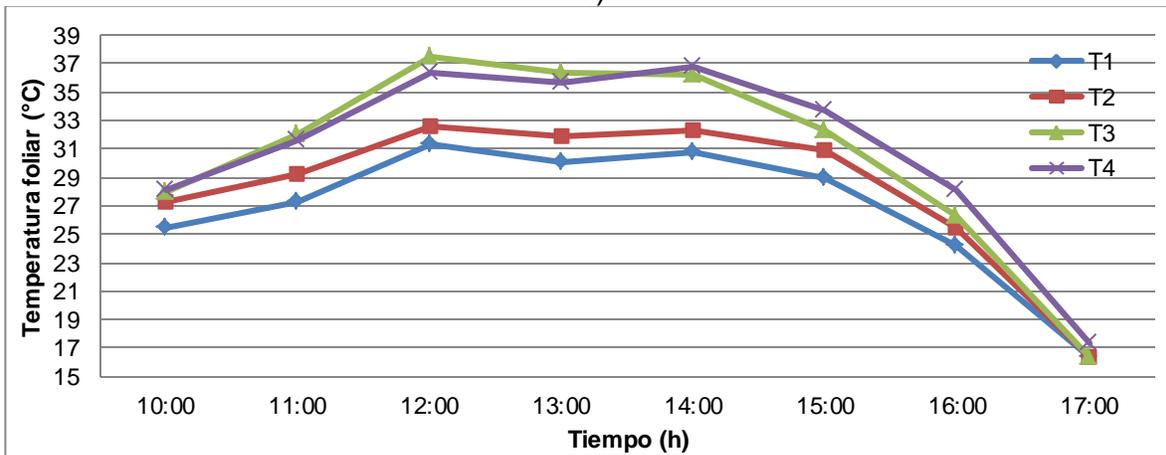
b)



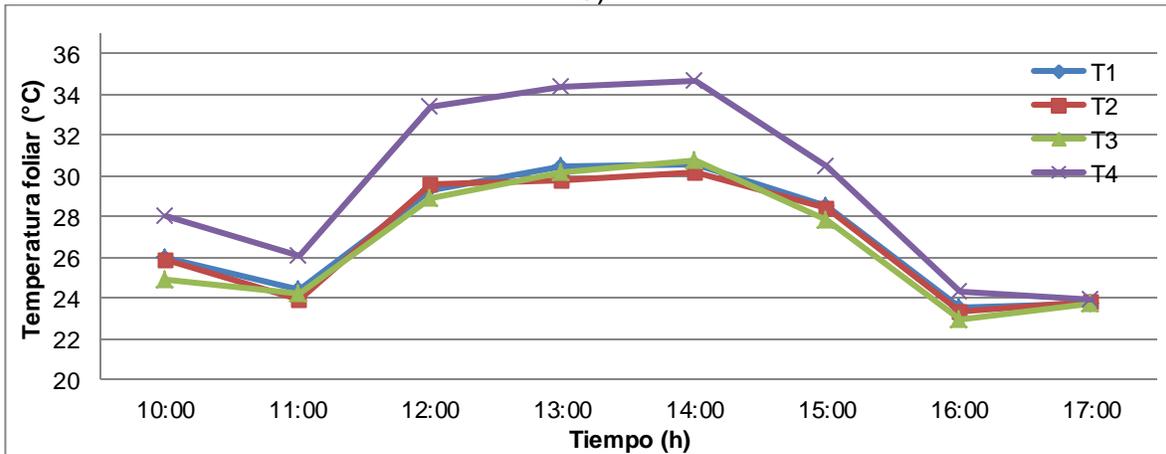
c)



d)



e)



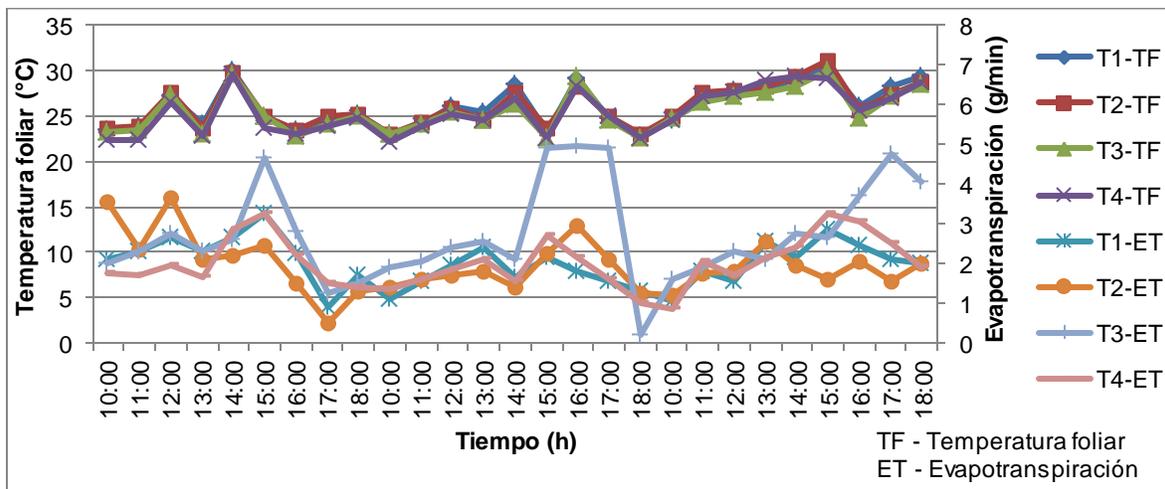
f)

Figura 5.3. Temperatura foliar a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) día 1, d) día 2, e) día 3, e) día 4 de la tercera repetición del experimento.

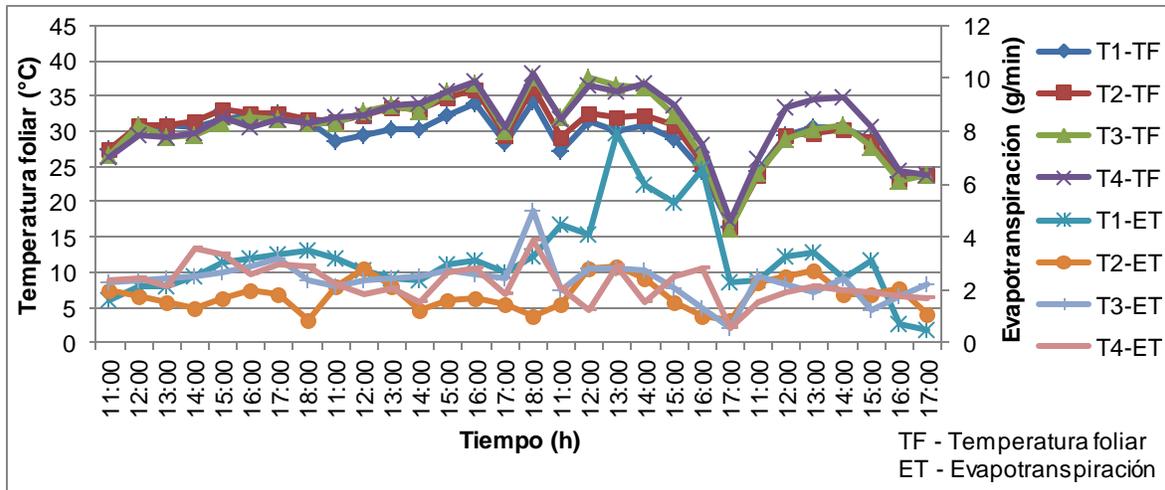
En la figura 5.4 se observa el comportamiento general de la temperatura foliar y las tasas de evapotranspiración de la segunda y tercera repetición del experimento. En el inciso a) se observa que no hay un comportamiento similar entre ambas variables. El T3 presenta tasas de evapotranspiración muy altas, con las cuales no se observa que haya un comportamiento similar con la temperatura foliar del mismo tratamiento.

En el inciso b) podemos ver que el T3 es el que presenta un comportamiento similar en evapotranspiración y temperatura foliar, en general para toda la repetición. El T4 sólo presenta un comportamiento así en el cuarto día y el T1 en el primer día de la repetición del experimento. En este inciso podemos observar mejores resultados que en el inciso a), ya que en más de un tratamiento podemos encontrar comportamientos similares entre ambas variables.

La correlación estadística entre estas dos variables se presenta en la figura 5.5, y se hizo correlacionando la temperatura foliar con la evapotranspiración del mismo tratamiento. Los coeficientes de determinación para la segunda repetición del experimento se encuentran entre 0.0224 y 0.1461, y para la tercera repetición del experimento entre 0.0369 y 0.4771. Este último coeficiente corresponde al T3, y es el coeficiente más alto de las dos repeticiones.

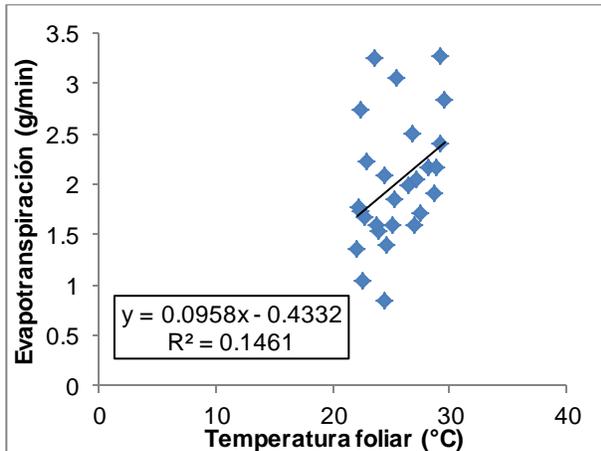


a)

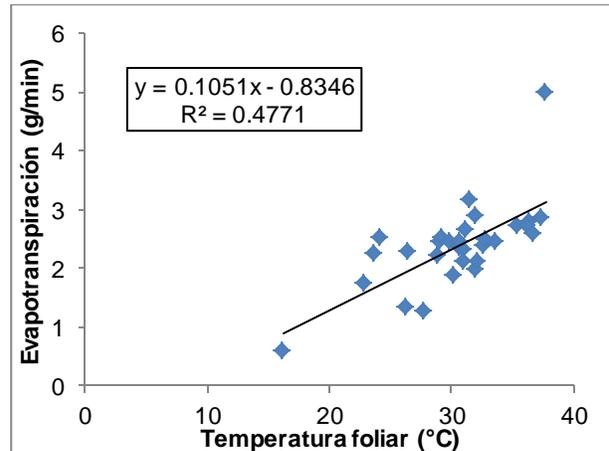


b)

Figura 5.4. Temperatura foliar y tasas de evapotranspiración para a) segunda repetición del experimento y b) tercera repetición del experimento.



a)



b)

Figura 5.5. Correlación estadística entre temperatura foliar y evapotranspiración para a) T4 de la segunda repetición del experimento y b) T3 de la tercera repetición del experimento.

#### 5.4. Radiación solar

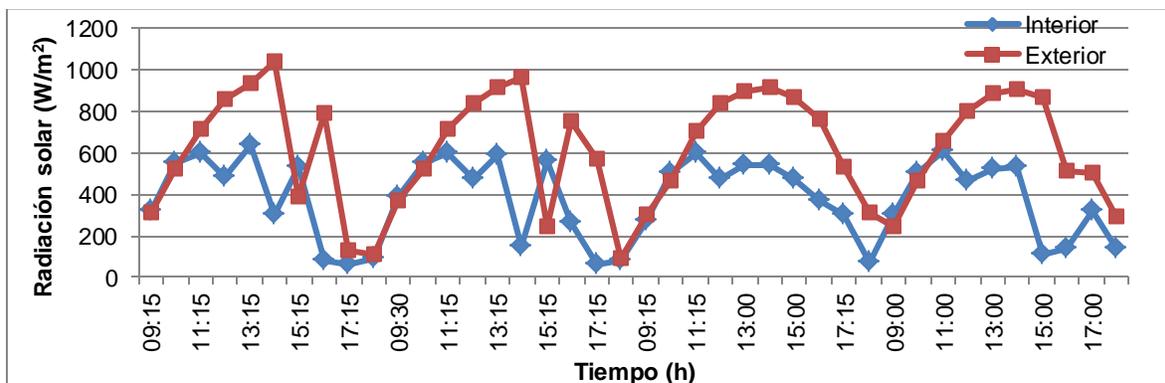
El comportamiento de la radiación solar dentro y fuera del invernadero para cada repetición del experimento se presenta en la figura 5.6. Podemos observar que en general el comportamiento es similar, existen algunas variaciones ya que en algunos puntos la radiación solar al interior del invernadero no corresponde a la del exterior.

El inciso a) representa la primera repetición del experimento, y podemos observar que hay algunos puntos en los que la radiación al interior del invernadero es mayor que al exterior. Si observamos al inicio de cada día podemos ver que aproximadamente a las 10:00 am la radiación solar al interior del invernadero es mayor que la del exterior, lo cual no es posible, tomando en cuenta que el cielo estaba despejado por la mañana esos días.

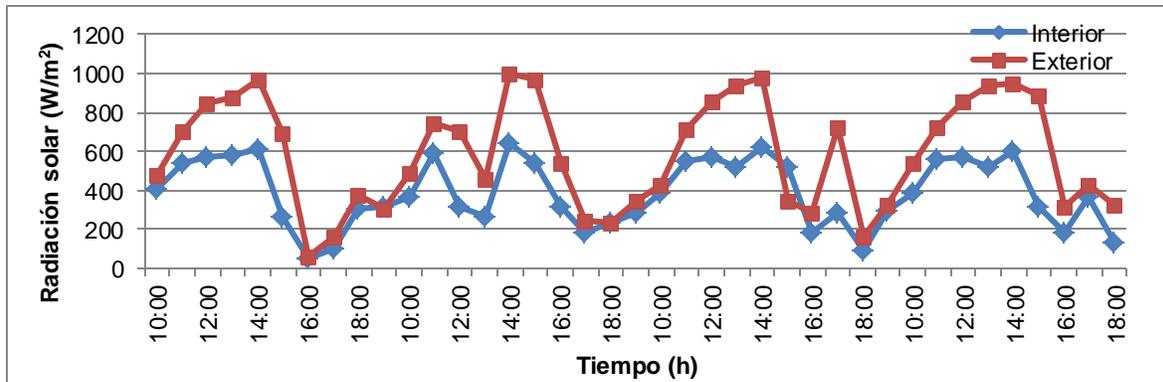
En el inciso b) que representa la segunda repetición del experimento se observan discrepancias entre la radiación solar al interior y al exterior del invernadero, ya que los comportamientos no coinciden del todo.

En el inciso c) correspondiente a la tercera repetición del experimento, donde en los primeros dos días se observa que no hay nubosidad porque no hay cambios bruscos en la radiación solar al exterior del invernadero, y si se compara con la del interior del invernadero se observa que hay pequeñas variaciones.

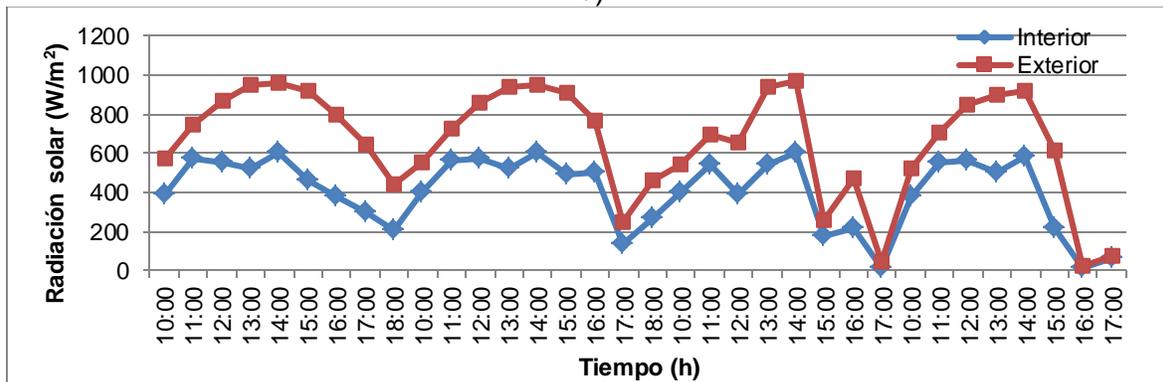
Estas variaciones entre la radiación solar al interior y exterior del invernadero pueden atribuirse a que el sensor de radiación o la micro estación WatchDog serie 1000 no estuvieron trabajando correctamente porque no es posible que la radiación al interior del invernadero sea mayor que al exterior. También se debe considerar la distancia que existe del invernadero a donde se encuentra la estación meteorológica. Si hay nubes se explica el por qué en algunos puntos la radiación solar al interior del invernadero es mayor que la del exterior.



a)



b)

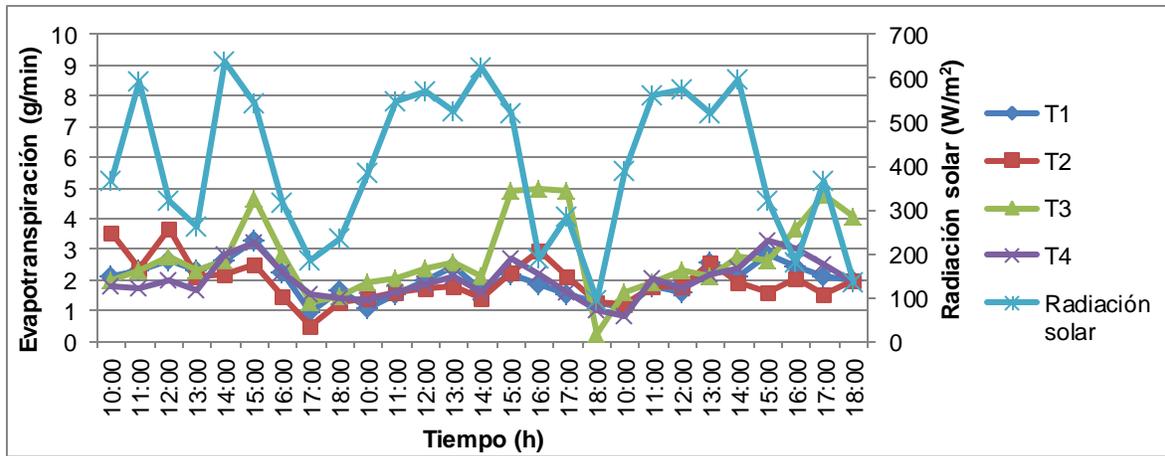


c)

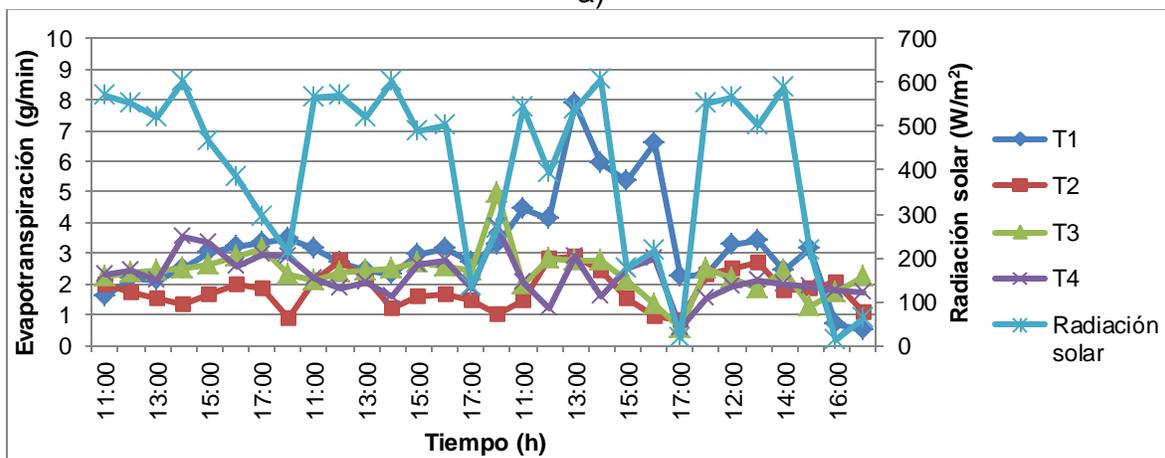
Figura 5.6. Radiación solar al interior y exterior del invernadero durante a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) tercera repetición del experimento.

El comportamiento general de las tasas de evapotranspiración y la radiación solar se presenta en la figura 5.7. El inciso a) representa la segunda repetición del experimento, y no se observa que exista un comportamiento similar entre ambas variables. El mismo caso es para el inciso b) que representa la tercera repetición del experimento, ya que existen discrepancias en los comportamientos de las variables.

La correlación estadística de la radiación solar con la evapotranspiración se observa en la figura 5.8. Para la segunda repetición del experimento los coeficientes de determinación se encuentran entre 0.0005 y 0.0653, y para la tercera repetición del experimento entre 0.0159 y 0.2204. Debido al comportamiento general de las variables descrito en el párrafo anterior, es de esperarse que los coeficientes de determinación sean tan bajos.

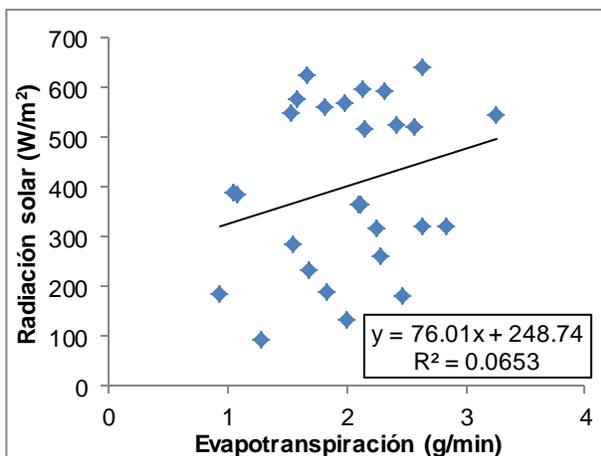


a)

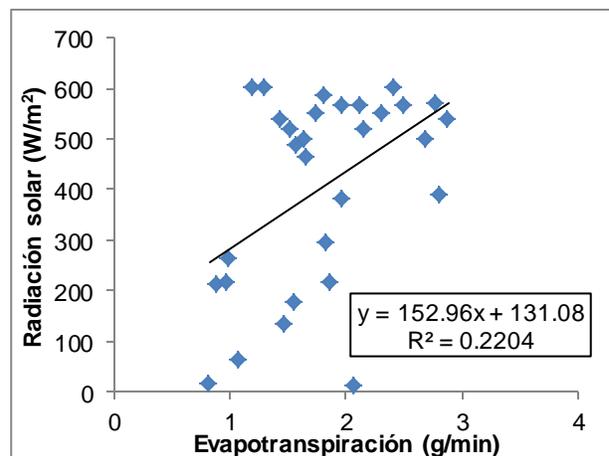


b)

Figura 5.7. Radiación solar y tasas de evapotranspiración para a) segunda repetición del experimento y b) tercera repetición del experimento.



a)

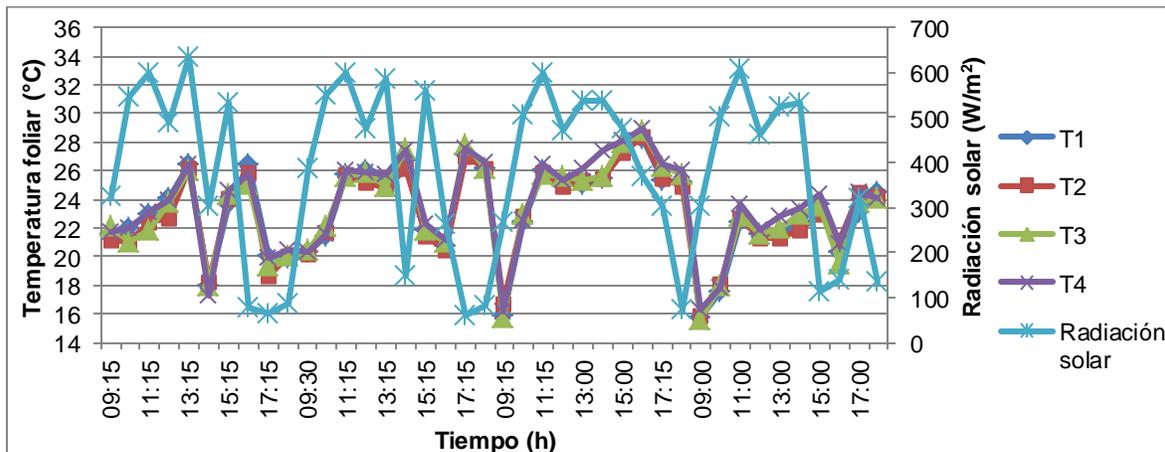


b)

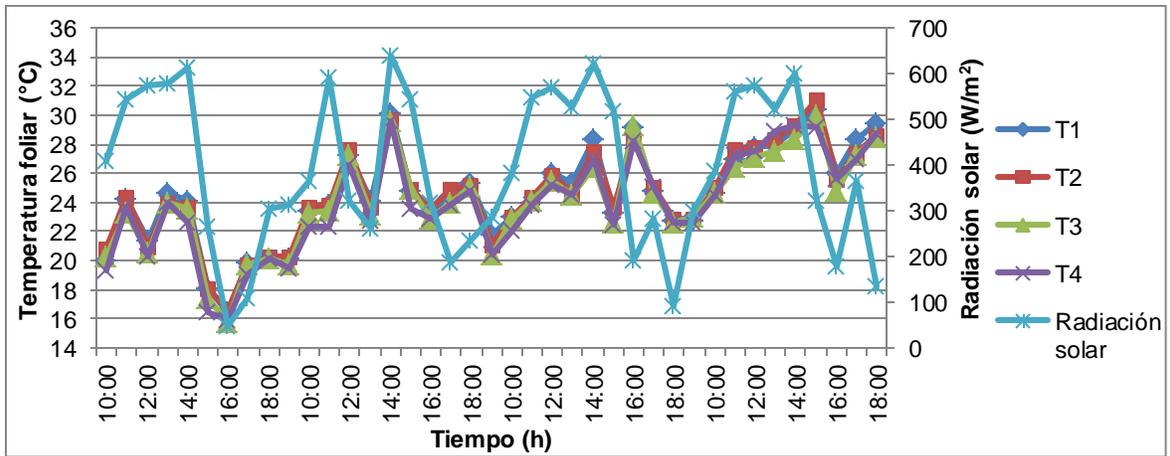
Figura 5.8. Correlación estadística entre evapotranspiración y radiación solar para a) T1 de la segunda repetición del experimento y b) T2 de la tercera repetición del experimento.

La figura 5.9 presenta el comportamiento general de la radiación solar y la temperatura foliar durante las tres repeticiones del experimento. En general para los tres incisos podemos observar que hay un comportamiento similar entre ambas variables, y si se observan a detalle cada inciso se puede ver que el inciso c) presenta un mejor comportamiento que los incisos a) y b). Pero como ya se mencionó antes, no se pueden obtener mejores resultados ya que el sensor de radiación o la micro estación WatchDog serie 1000 no estuvieron trabajando correctamente.

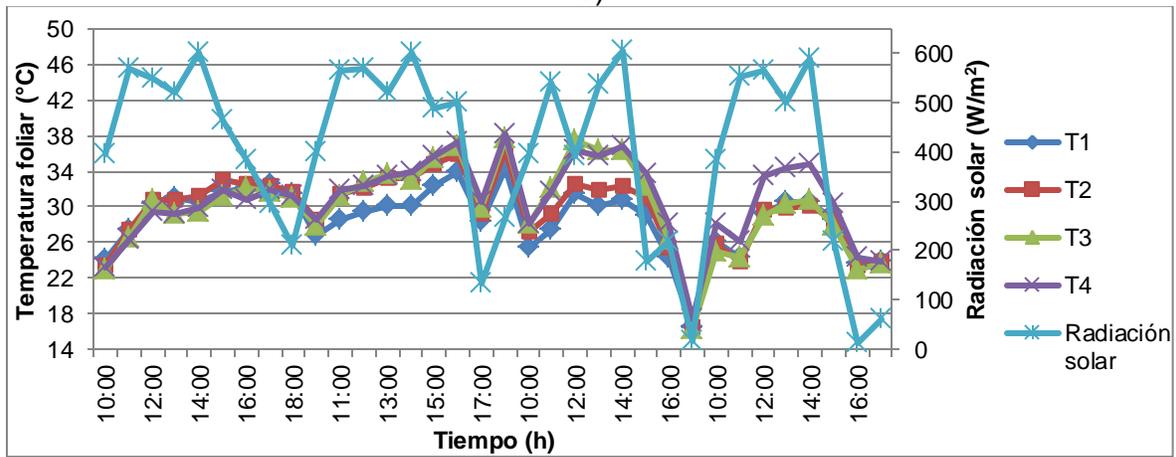
En la figura 5.10 que representa la correlación estadística entre temperatura foliar y radiación solar, se esperaría tener coeficientes de determinación altos debido a que al momento de realizar las mediciones se observó que la temperatura foliar aumentaba conforme aumentaba la radiación solar y viceversa. Sin embargo, debido a los problemas ya mencionados esto no fue así, y para la primera repetición del experimento se tienen coeficientes de determinación que van desde 0.0037 hasta 0.0079, para la segunda repetición de 0.1032 hasta 0.1200 y para la tercera de 0.2124 hasta 0.2444, siendo estos últimos los mejores coeficientes de determinación obtenidos.



a)

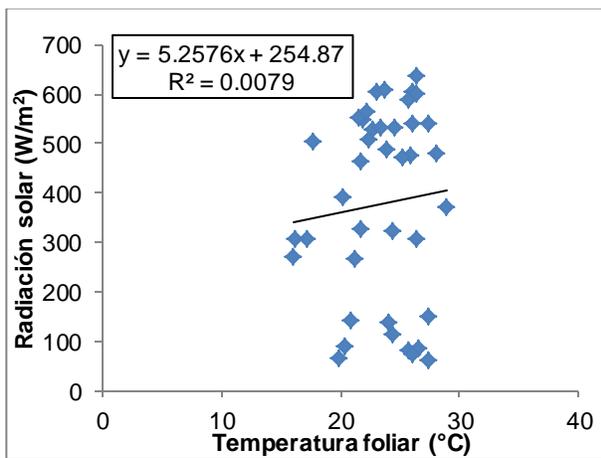


b)

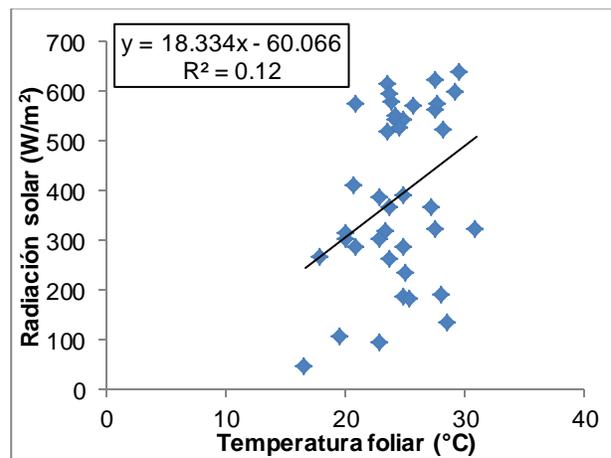


c)

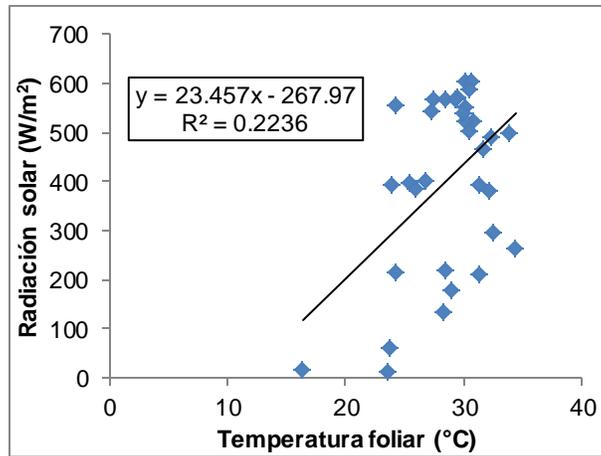
Figura 5.9. Radiación solar y temperatura foliar para a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) tercera repetición del experimento.



a)



b)

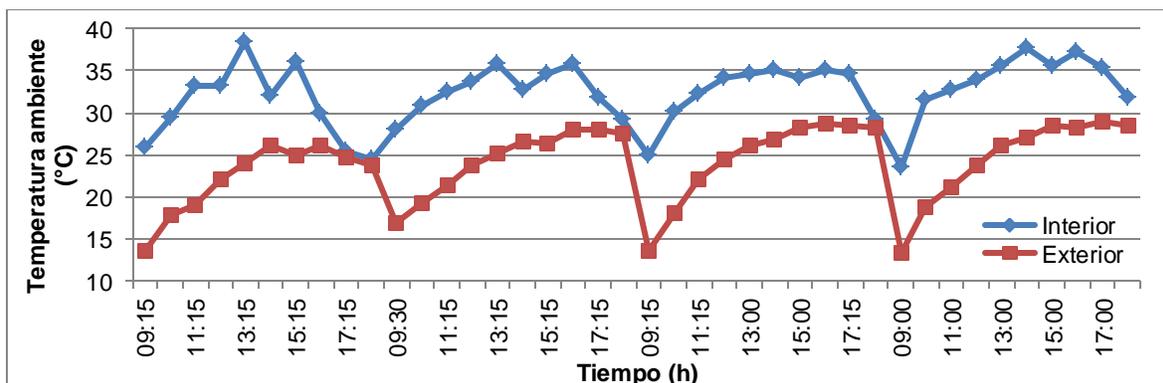


c)

Figura 5.10. Correlación estadística entre temperatura foliar y radiación solar para a) T4 de la primera repetición del experimento, b) T2 de la segunda repetición del experimento y c) T1 de la tercera repetición del experimento.

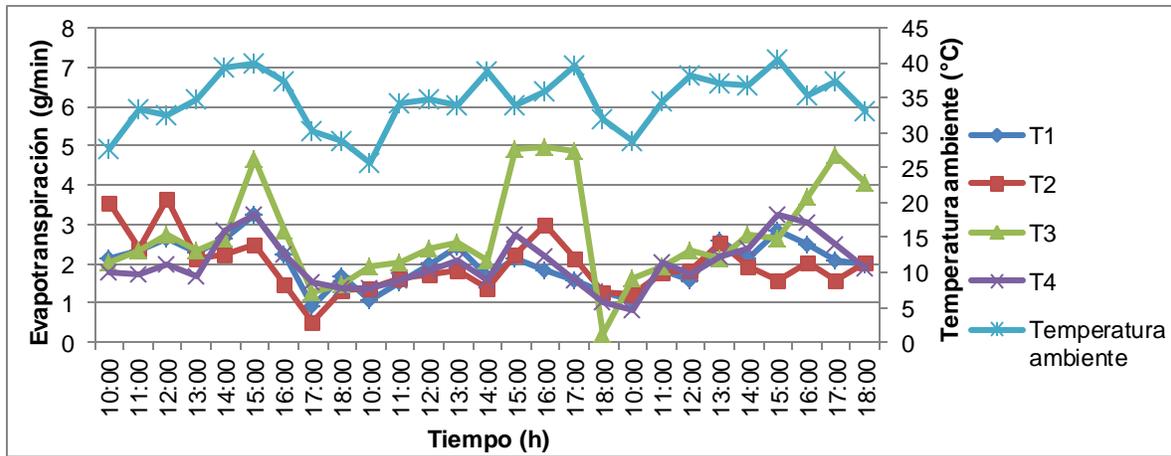
### 5.5. Temperatura ambiente

El comportamiento de la temperatura ambiente al interior y al exterior del invernadero para las tres repeticiones del experimento se puede observar en la figura 5.11. En los tres incisos podemos observar que hay comportamientos similares entre ambas temperaturas. La temperatura ambiente al interior del invernadero no tiene cambios tan bruscos como la del exterior; es decir, la temperatura al interior del invernadero aumenta o decremento en menor cantidad que la temperatura ambiente al exterior del invernadero.

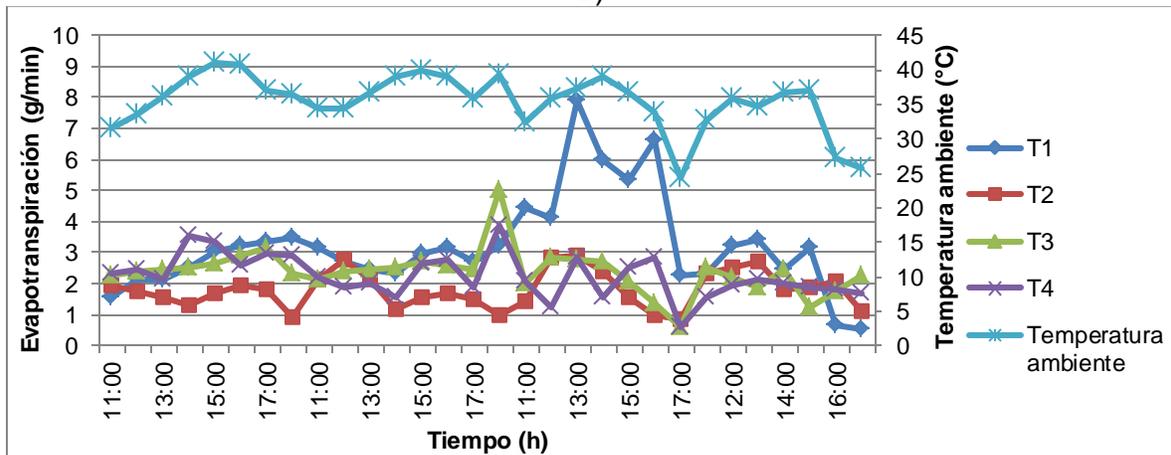


a)



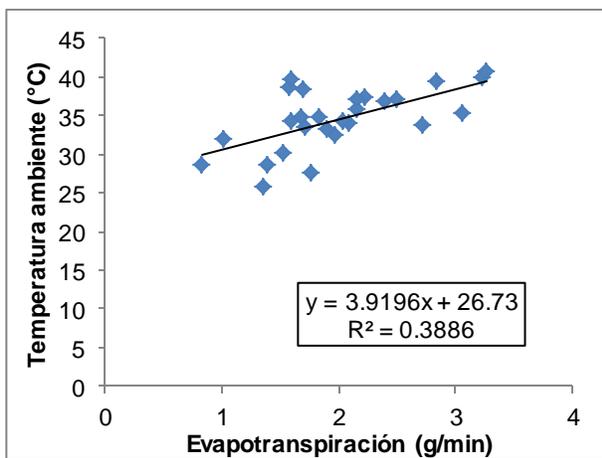


a)

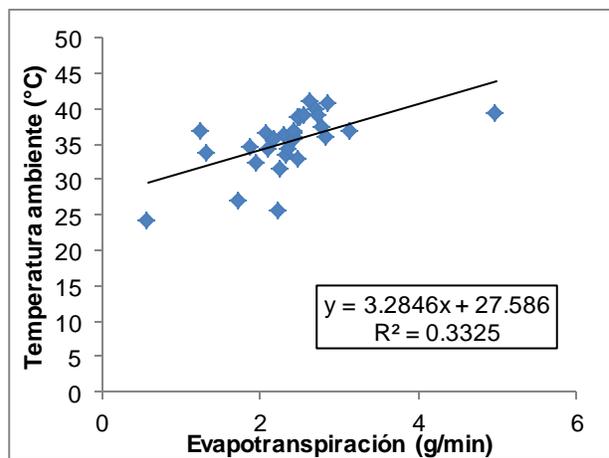


b)

Figura 5.12. Temperatura ambiente y tasas de evapotranspiración para a) segunda repetición del experimento y b) tercera repetición del experimento.



a)



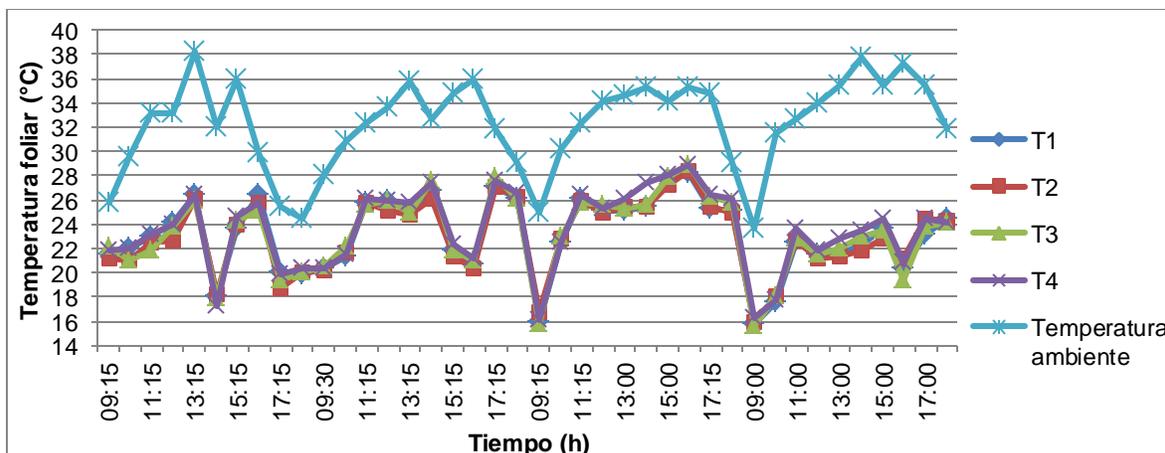
b)

Figura 5.13. Correlación estadística entre evapotranspiración y temperatura ambiente para a) T4 de la segunda repetición del experimento y b) T3 de la tercera repetición del experimento.

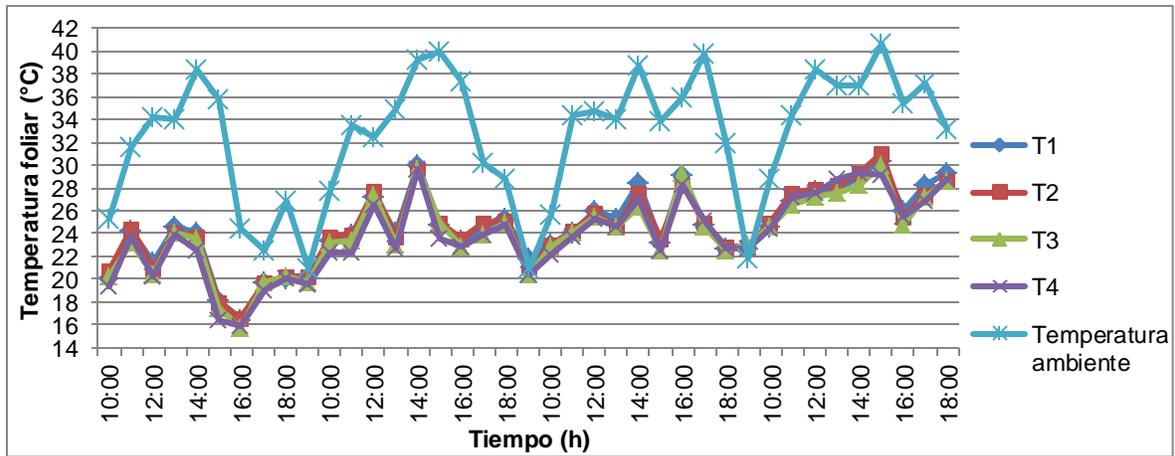
El comportamiento de la temperatura foliar con la temperatura ambiente para las tres repeticiones del experimento se observa en la figura 5.14. Podemos observar en los tres incisos que hay una tendencia similar para ambas temperaturas. En el inciso a) y b) correspondientes a la primera y segunda repetición del experimento respectivamente, se observa que la temperatura ambiente siempre es mayor que la temperatura foliar. Con este tipo de comportamientos al momento de realizar la correlación se esperaba tener coeficientes de determinación altos.

En el inciso c) que representa la tercera repetición del experimento, se observan mejores resultados ya que el comportamiento de ambas variables es más parecido que en las repeticiones anteriores. Se observan puntos en los que la temperatura foliar es mayor a la temperatura ambiente, además el espacio que hay entre ambas temperaturas es mucho menor que en las repeticiones anteriores; es decir, se tienen temperaturas foliares más altas.

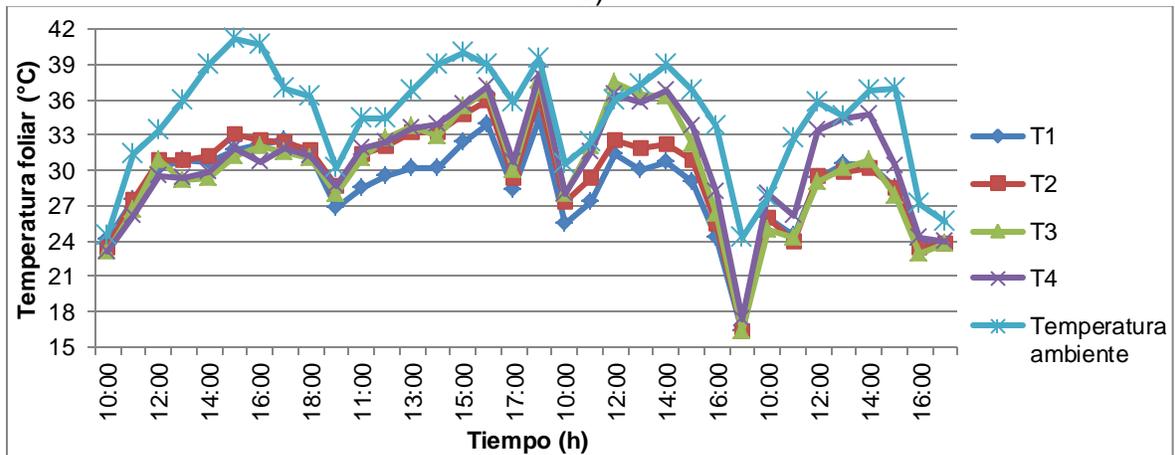
La correlación estadística entre la temperatura foliar y la temperatura ambiente se observa en la figura 5.15. Para la primera repetición del experimento se tienen coeficientes de determinación entre 0.2207 y 0.2612, para la segunda repetición entre 0.3901 y 0.4311, y para la tercera repetición entre 0.6563 y 0.7562. En esta última repetición se obtuvieron los coeficientes de determinación más altos de todas las correlaciones realizadas de las tres repeticiones. Esto debido a que en la tercera repetición se aplicó un tiempo más prolongado de estrés hídrico y se midió en la etapa de recuperación de las plantas.



a)

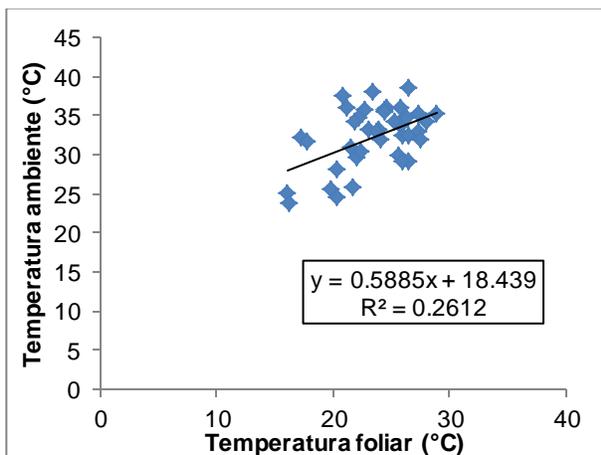


b)

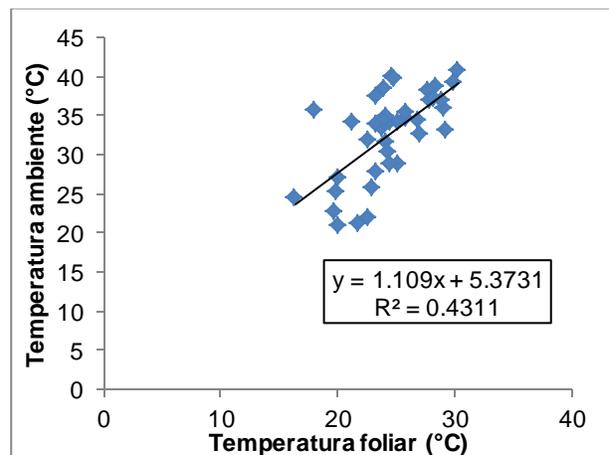


c)

Figura 5.14. Temperatura ambiente y temperatura foliar para a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) tercera repetición del experimento.



a)



b)

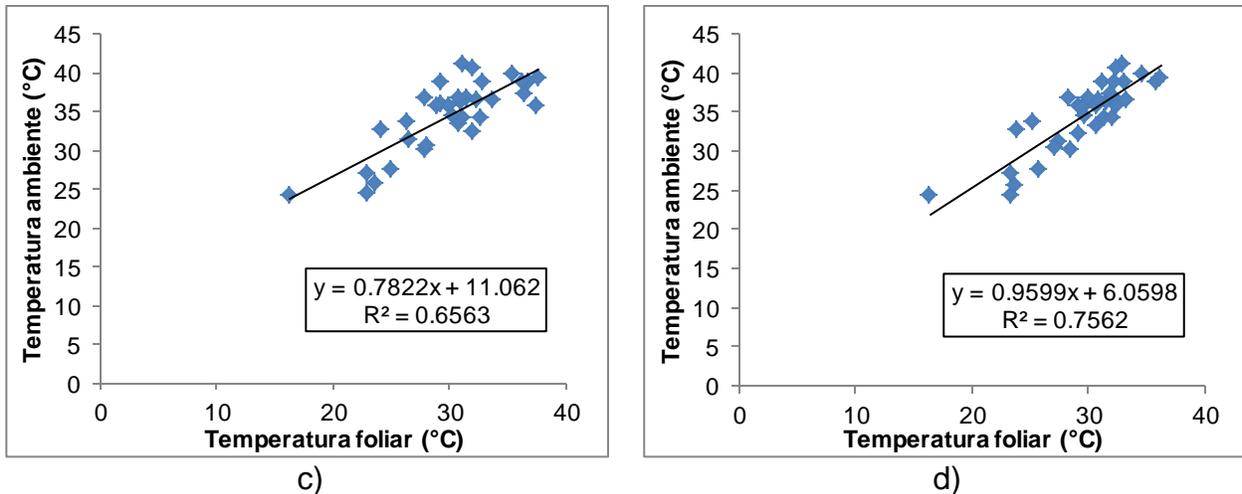
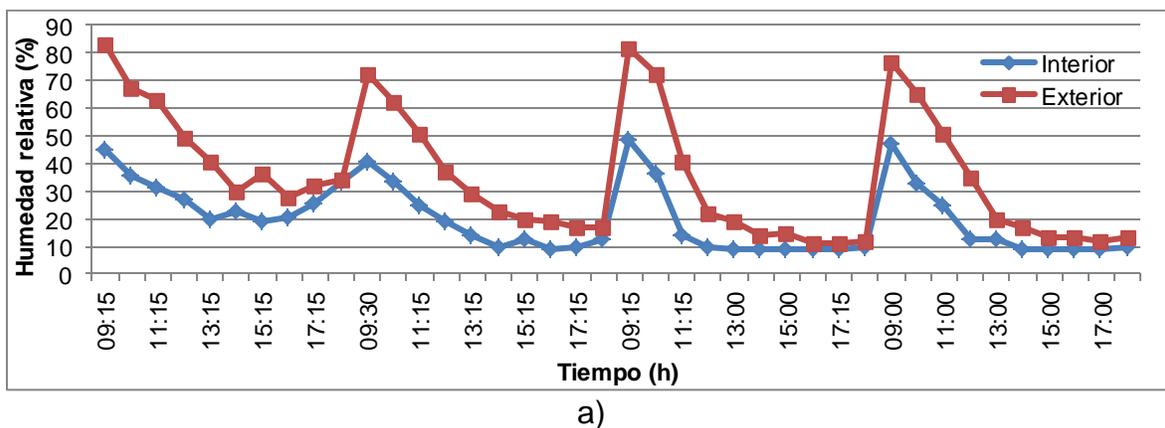
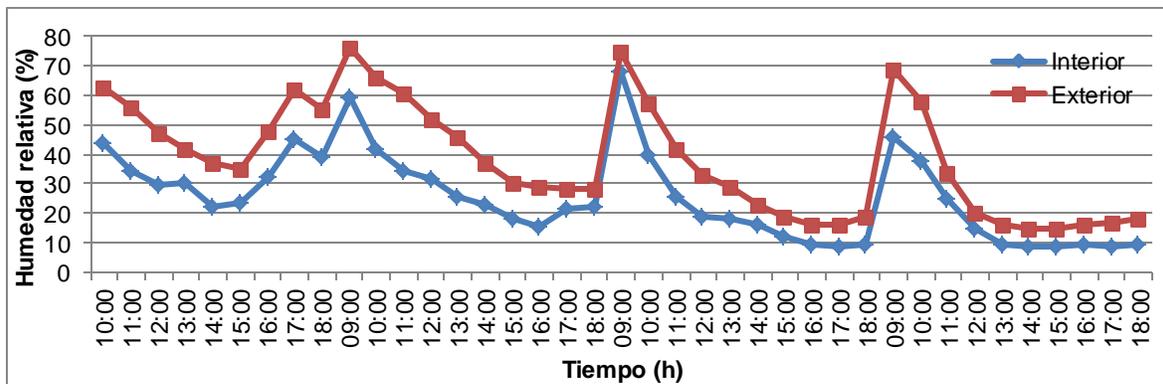


Figura 5.15. Correlación estadística entre temperatura foliar y temperatura ambiente para a) T4 de la primera repetición del experimento, b) T1 de la segunda repetición del experimento, c) T3 y d) T2 de la tercera repetición del experimento.

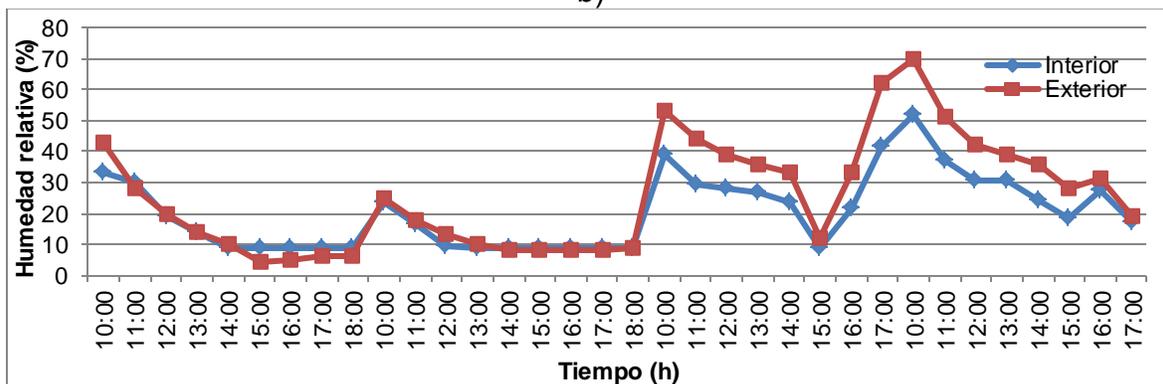
### 5.6. Humedad relativa

En la figura 5.16 se muestra el comportamiento de la humedad relativa al interior y al exterior del invernadero para las tres repeticiones del experimento. En los tres incisos que se presentan se observa que el comportamiento de la humedad relativa tanto al interior como al exterior del invernadero es muy similar. En el inciso c) se observa que en el primer y segundo día, la humedad relativa al interior del invernadero fue mayor que la del exterior.





b)

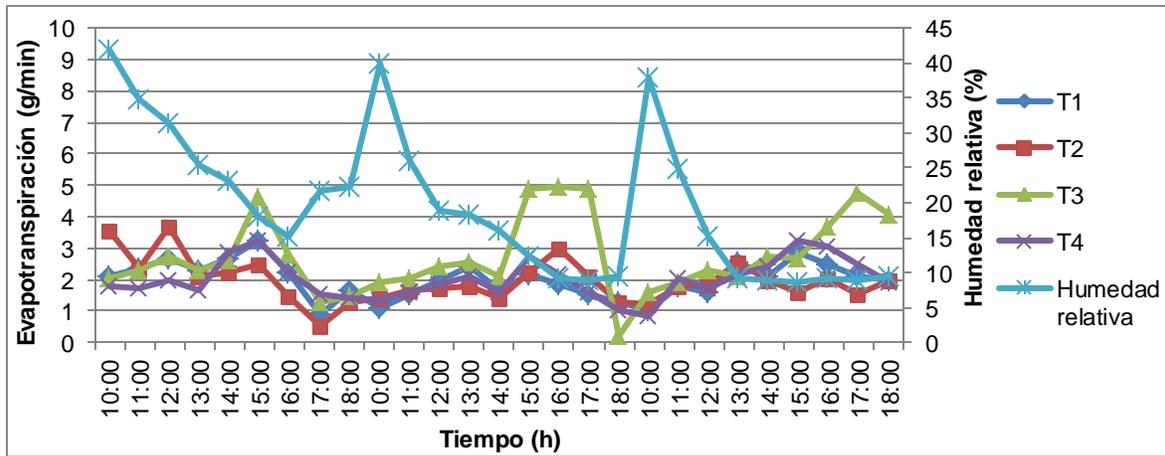


c)

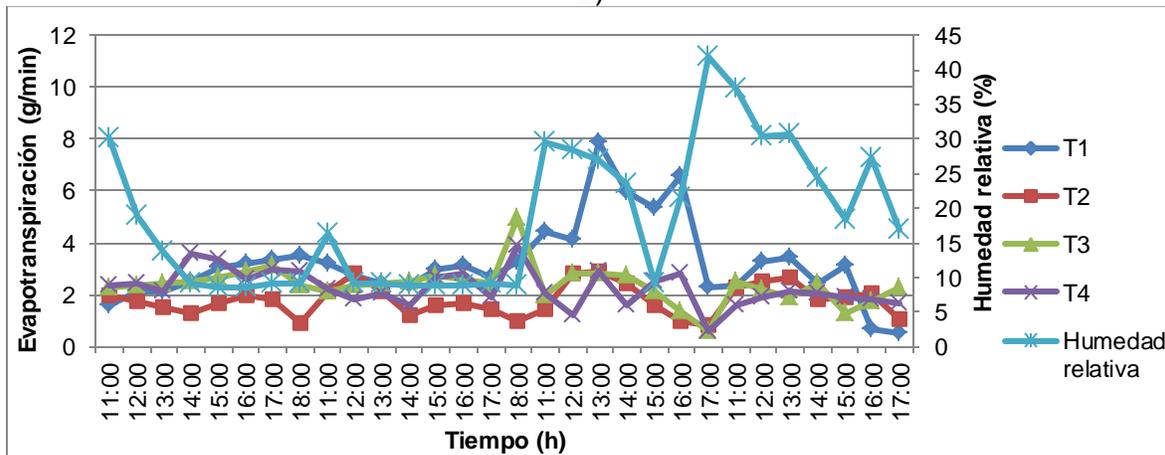
Figura 5.16. Humedad relativa al interior y exterior del invernadero durante a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) tercera repetición del experimento.

La evapotranspiración y la humedad relativa para la segunda y tercera repetición del experimento se muestran en la figura 5.17. En el inciso a) podemos observar que no hay un comportamiento similar para ambas variables, por lo que al momento de realizar la correlación no se esperaría tener coeficientes de determinación altos. En el inciso b) podemos observar que el comportamiento de ambas variables es mucho mejor que en el inciso a), pero no lo suficiente para obtener una buena correlación.

La correlación estadística entre la humedad relativa y las tasas de evapotranspiración se muestra en la figura 5.18. Para la segunda repetición del experimento los coeficientes de determinación se encuentran entre 0.0225 y 0.1998, y para la tercera repetición del experimento entre 0.0033 y 0.3297.

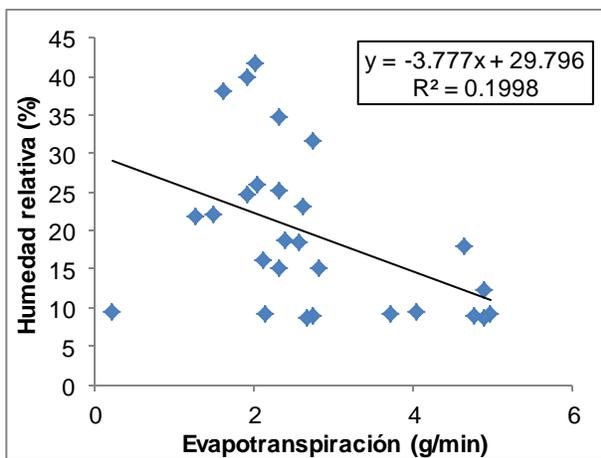


a)

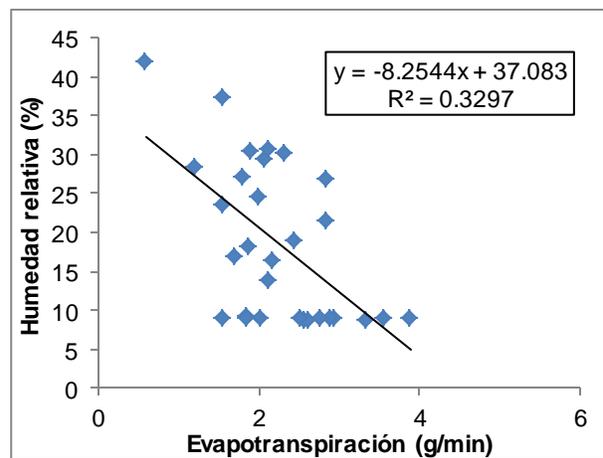


b)

Figura 5.17. Humedad relativa y tasas de evapotranspiración para a) segunda repetición del experimento y b) tercera repetición del experimento.



a)

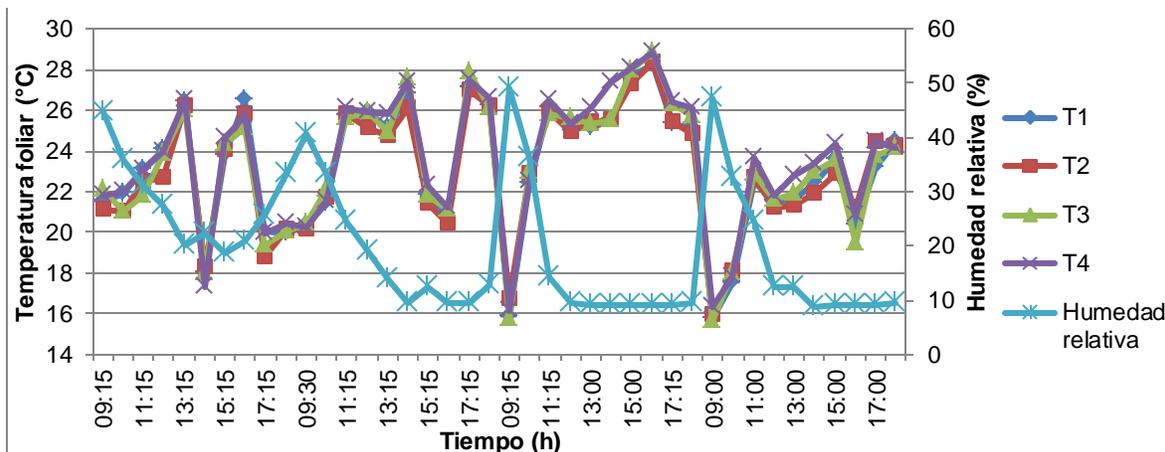


b)

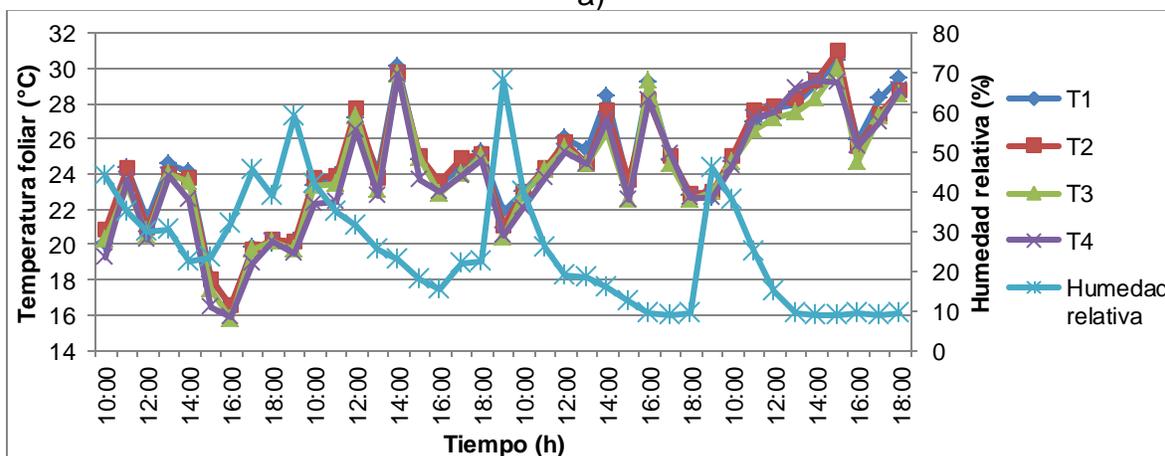
Figura 5.18. Correlación estadística entre evapotranspiración y humedad relativa para a) T3 de la segunda repetición del experimento y b) T4 de la tercera repetición del experimento.

En la figura 5.19 se muestra como fue el comportamiento de la temperatura foliar y la humedad relativa para las tres repeticiones del experimento. En los tres incisos que se presentan se puede observar que existe una relación entre estas dos variables ya que cuando la temperatura foliar aumenta la humedad relativa disminuye y viceversa.

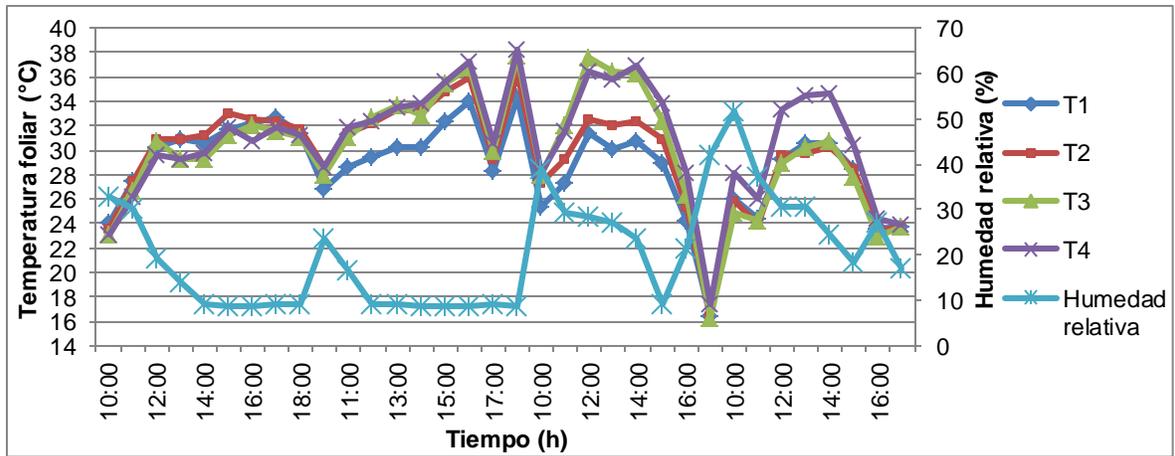
La correlación entre temperatura foliar y humedad relativa se presenta en la figura 5.20. Para la primera repetición los coeficientes de determinación se encuentran entre 0.4070 y 0.4601, para la segunda repetición entre 0.3500 y 0.3805, y para la tercera repetición del experimento entre 0.22 y 0.4769.



a)

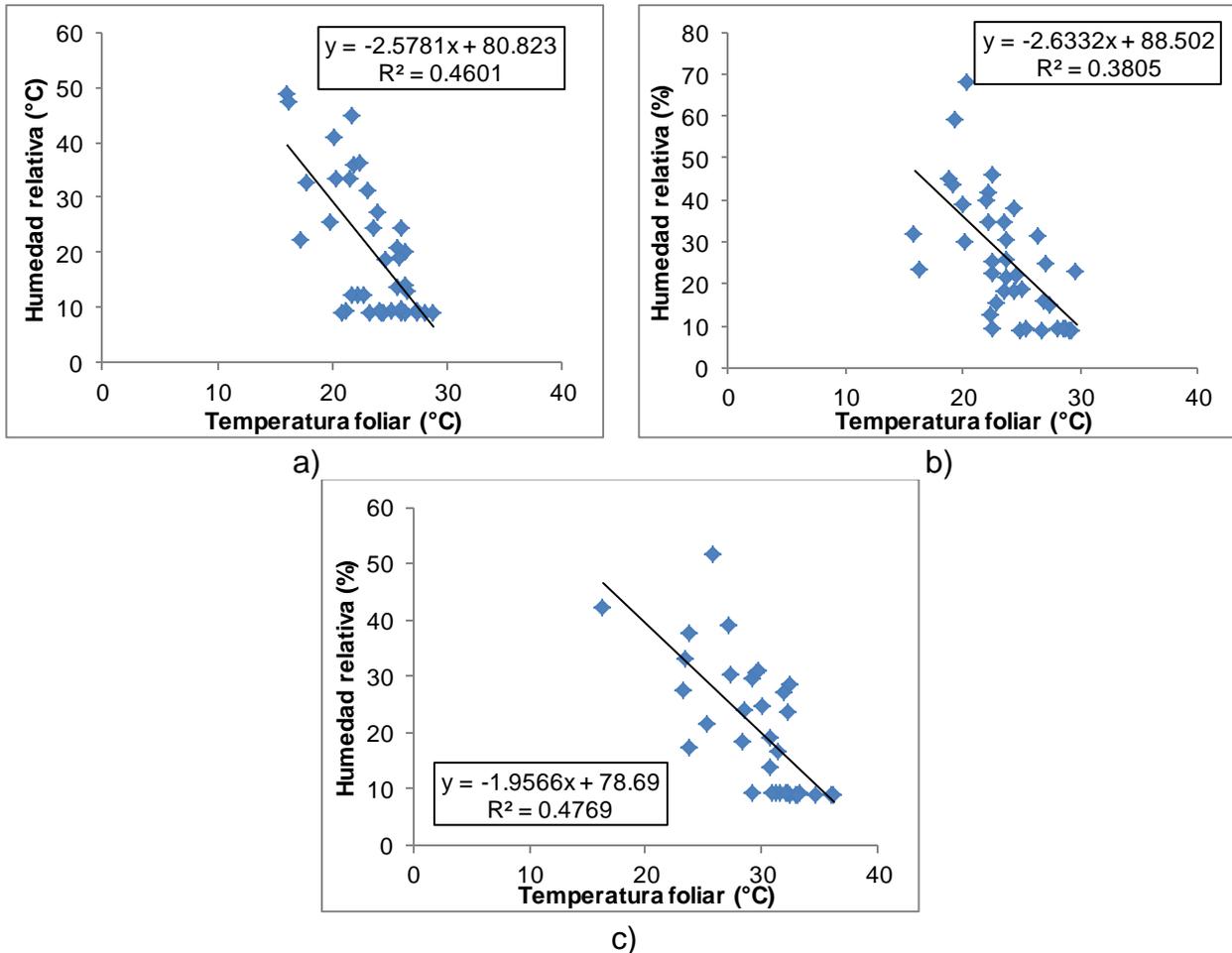


b)



c)

Figura 5.19. Humedad relativa y temperatura foliar para a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) tercera repetición del experimento.



a)

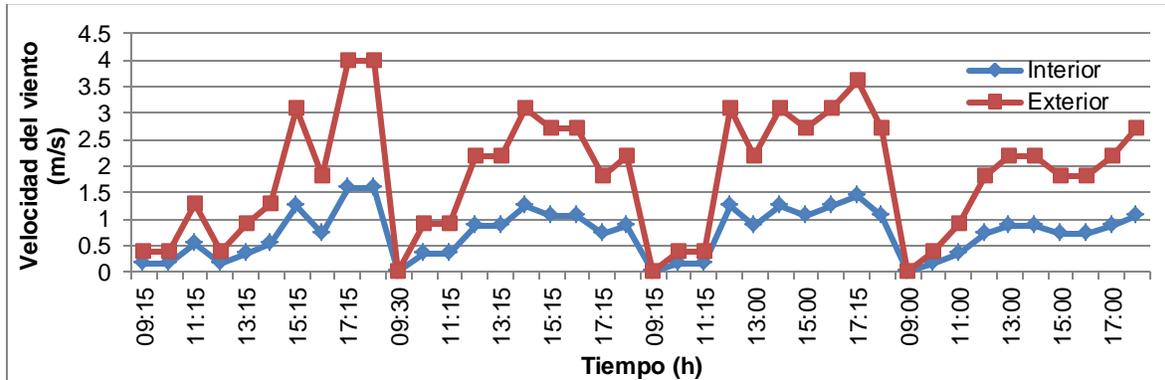
b)

c)

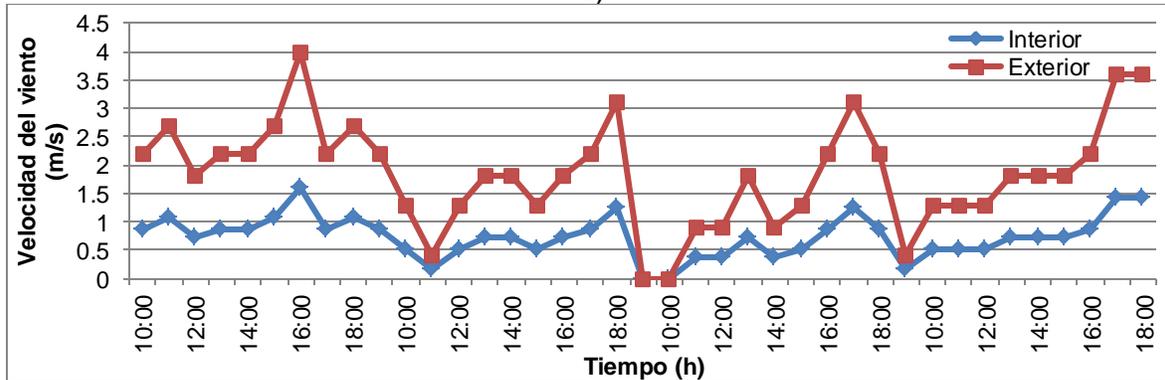
Figura 5.20. Correlación estadística entre temperatura foliar y humedad relativa para a) T4 de la primera repetición del experimento, b) T4 de la segunda repetición del experimento y c) T2 de la tercera repetición del experimento.

## 5.7. Velocidad del viento

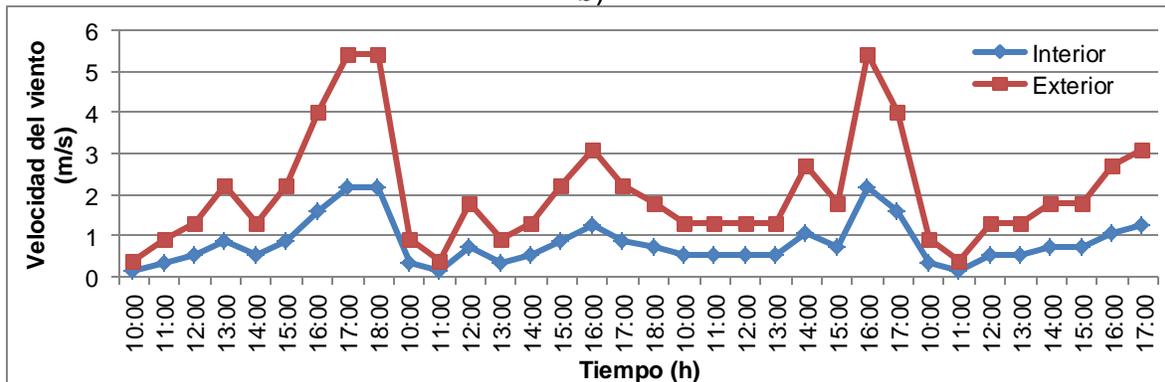
La figura 5.21 muestra el comportamiento de la velocidad del viento al interior y exterior del invernadero para las tres repeticiones del experimento. Debido a que la velocidad del viento al interior del invernadero se estimó como el 40% de la velocidad del viento al exterior, el comportamiento de ambas velocidades es igual.



a)



b)

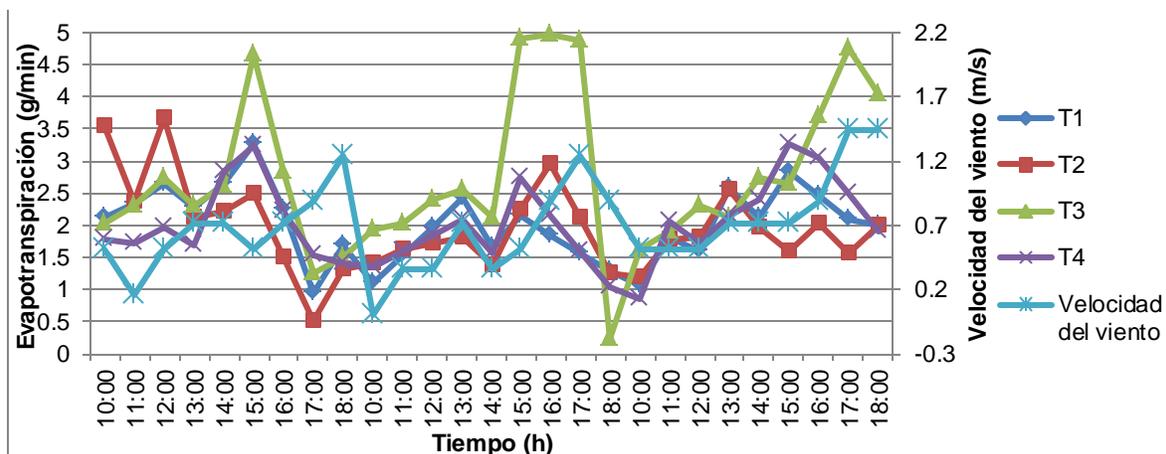


c)

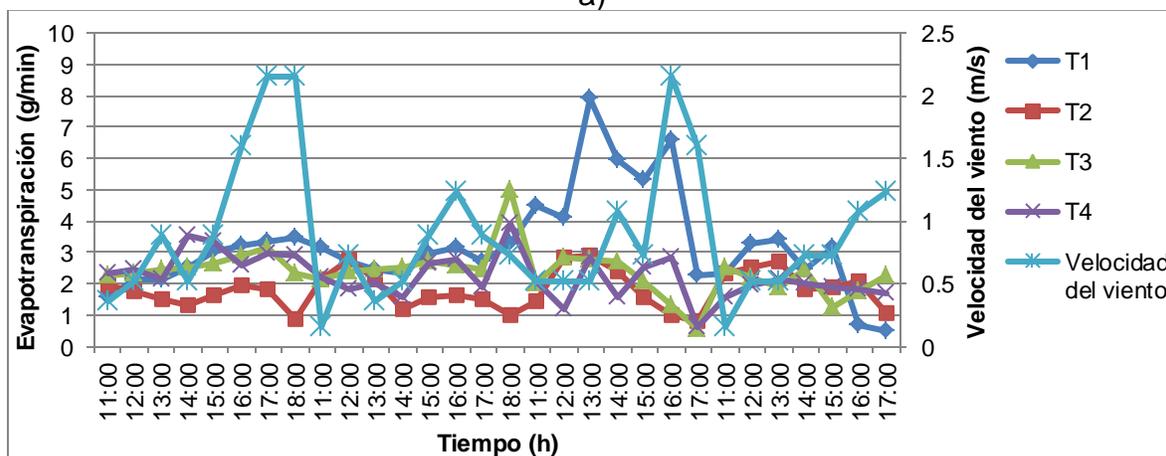
Figura 5.21. Velocidad del viento al interior y exterior del invernadero durante a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) tercera repetición del experimento.

El comportamiento de la velocidad del viento con la evapotranspiración para la segunda y tercera repetición del experimento se muestra en la figura 5.22. En ambos incisos se observa que no hay una relación tan fuerte entre ambas variables, por lo que al momento de hacer la correlación no se esperarían coeficientes de determinación altos.

La correlación entre la evapotranspiración y la velocidad del viento se muestra en la figura 5.23. Los coeficientes de determinación para la segunda repetición del experimento se encuentran entre 0.00003 y 0.1248, y para la tercera entre 0.0159 y 0.2263.



a)



b)

Figura 5.22. Velocidad del viento y tasas de evapotranspiración para a) segunda repetición del experimento y b) tercera repetición del experimento.

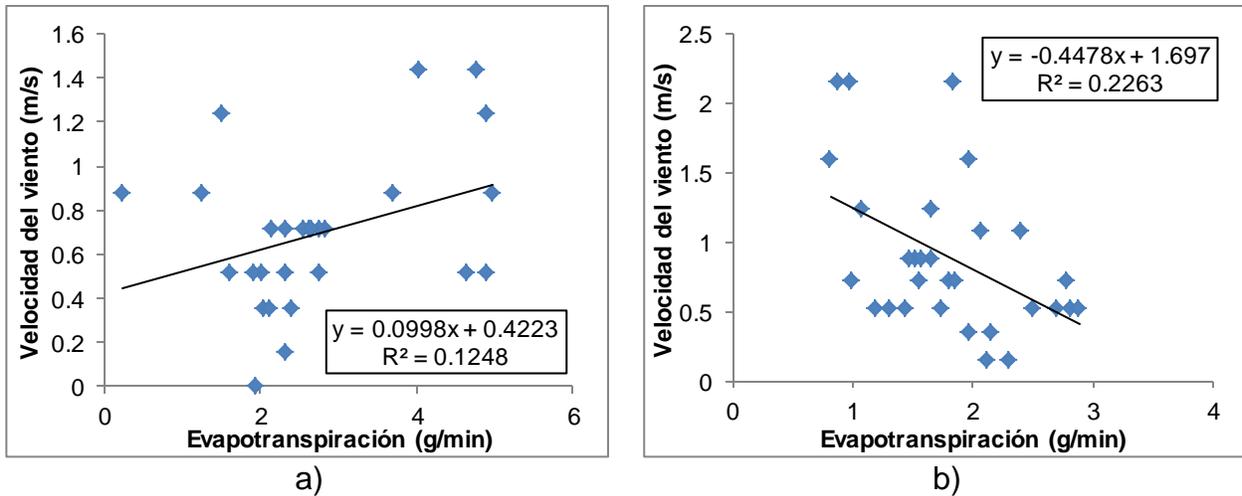
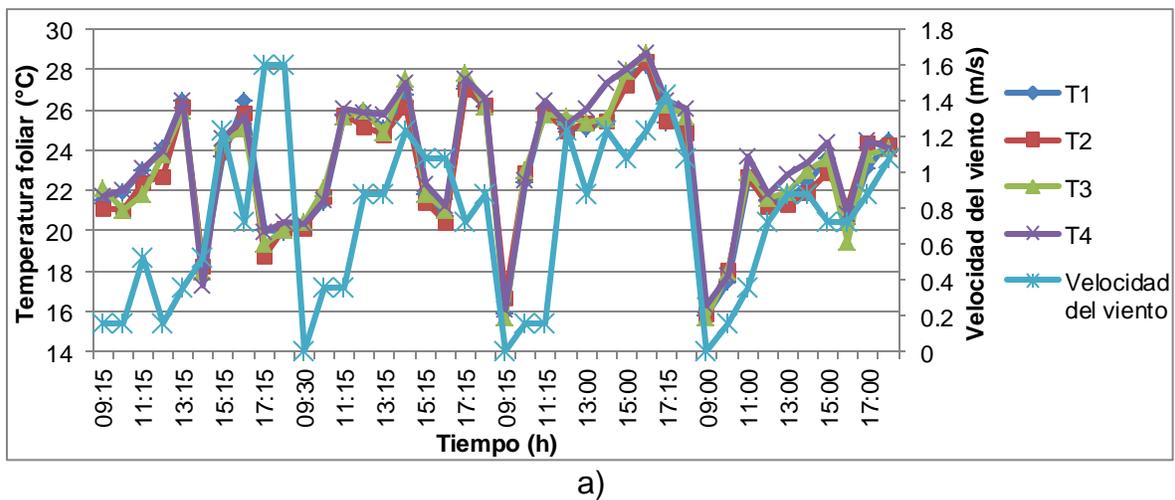
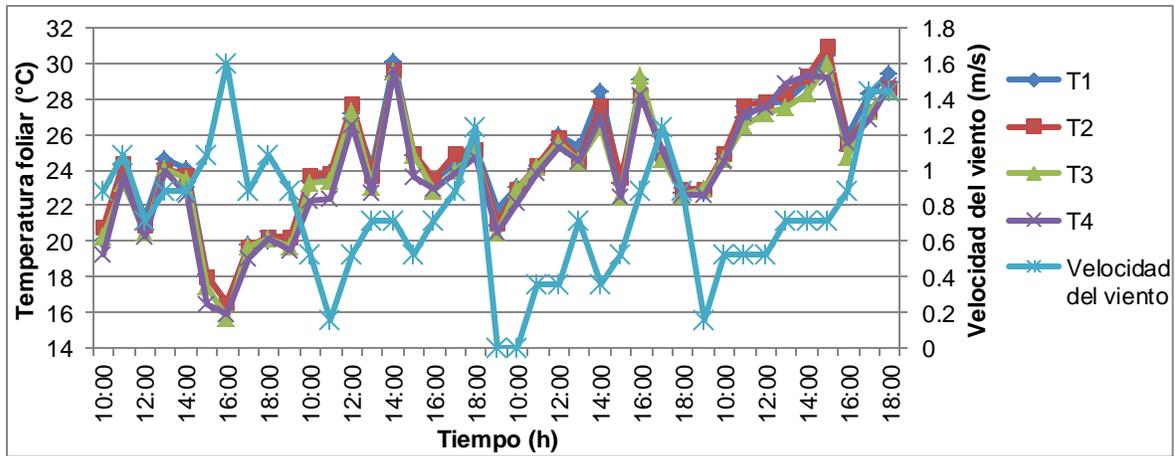


Figura 5.23. Correlación estadística entre evapotranspiración y velocidad del viento para a) T3 de la segunda repetición del experimento y b) T2 de la tercera repetición del experimento.

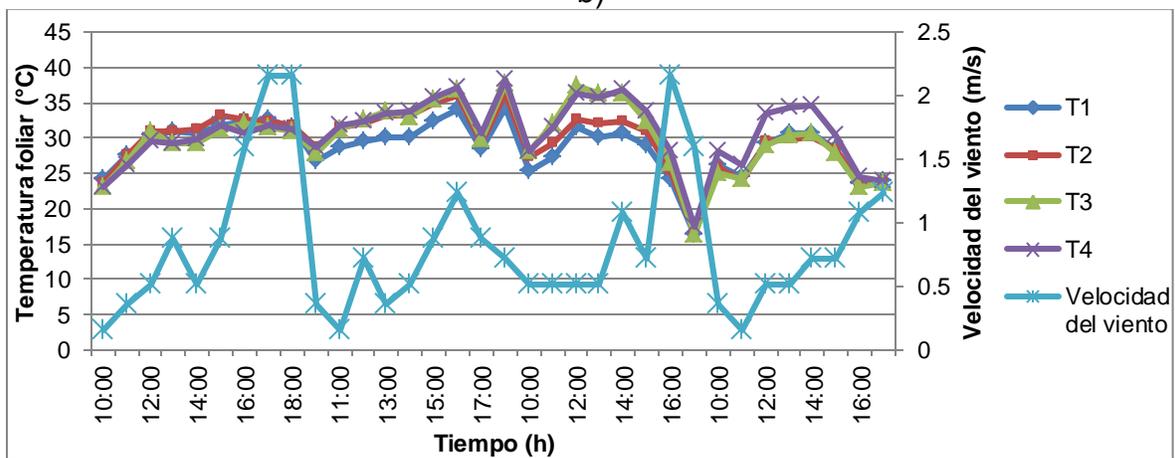
El comportamiento de la temperatura foliar y la velocidad del viento durante las tres repeticiones del experimento se muestra en la figura 5.24. En el inciso a) se observa que existe una mayor relación entre ambas variables que en los incisos b) y c) correspondientes a la segunda y tercera repetición respectivamente.

La correlación entre velocidad del viento y temperatura foliar se muestra en la figura 5.25. Los coeficientes de determinación para la primera repetición se encuentran entre 0.1339 y 0.1722, para la segunda entre 0.0058 y 0.0136, y para la tercera entre 0.0002 y 0.0092.



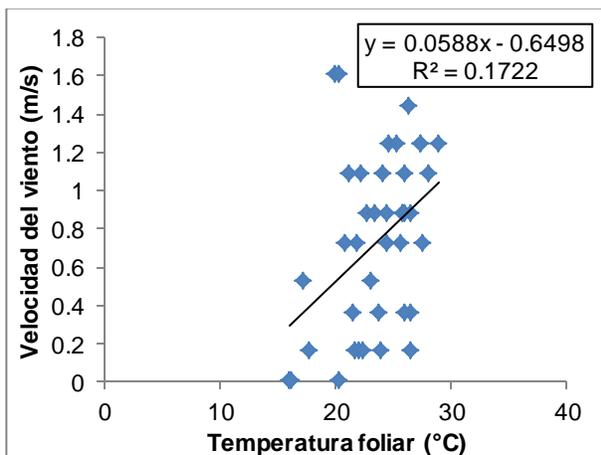


b)

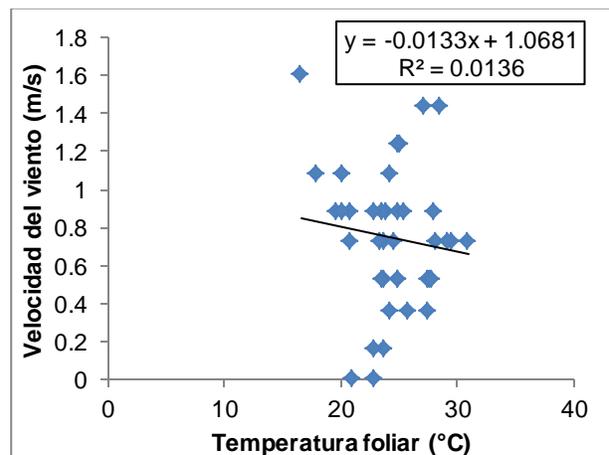


c)

Figura 5.24. Velocidad del viento y temperatura foliar para a) primera repetición del experimento, b) segunda repetición del experimento y c) tercera repetición del experimento.



a)



b)

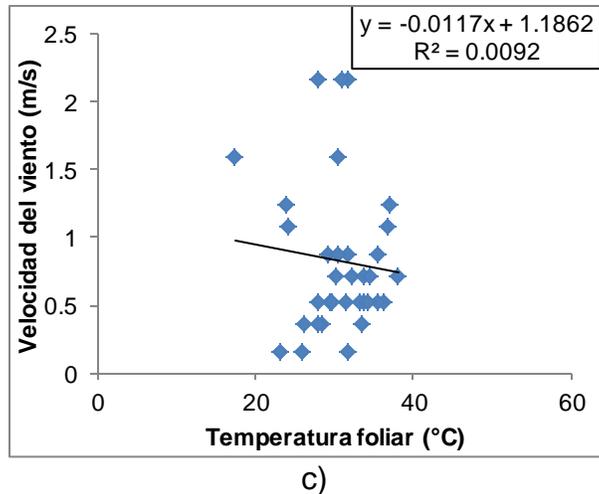


Figura 5.25. Correlación estadística entre temperatura foliar y velocidad del viento para a) T4 de la primera repetición del experimento, b) T2 de la segunda repetición del experimento y c) T de la tercera repetición del experimento.

### 5.8. Análisis de varianza y comparación de medias de Tukey

El análisis de varianza y comparación de medias de Tukey sólo se hizo con los datos de temperatura foliar y con un nivel de significancia de 0.05. Se realizó al iniciar cada repetición del experimento (Figura 5.26), al iniciar los tratamientos (Figura 5.27), al terminar T2 (Figura 5.28), al terminar T3 (Figura 5.29), al terminar T4 (Figura 5.30) y al finalizar cada repetición del experimento (Figura 5.31).

En el caso de la primera y la segunda repetición del experimento el análisis de varianza y comparación de medias de Tukey cuando termina el T2, se realizó con los datos de las 9:00 am del tercer día de la repetición (la siguiente medición después de que termina el T2). Esto debido a que el T2 terminaba a la 1:00 am del tercer día de la repetición del experimento y no se cuentan con datos de esa hora, y se optó por hacer el análisis en el momento antes mencionado.

En el análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al inicio de la repetición del experimento (Figura 5.26) se observa que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos de cada repetición. En la primera repetición (inciso a)) se obtuvo un coeficiente F de 0.21736, en la segunda repetición (inciso b)) un coeficiente F de 0.01085, y en la tercera repetición (inciso c)) un coeficiente de 0.39588.

En el inciso b) de la figura 5.26, aunque se tiene un coeficiente F de 0.01085, al hacer la comparación de medias de Tukey podemos darnos cuenta que no existen diferencias entre los tratamientos. Esto se debe que si se observan las desviaciones estándar de cada tratamiento, podemos darnos cuenta de que todas se encuentran en un mismo rango de temperatura foliar.

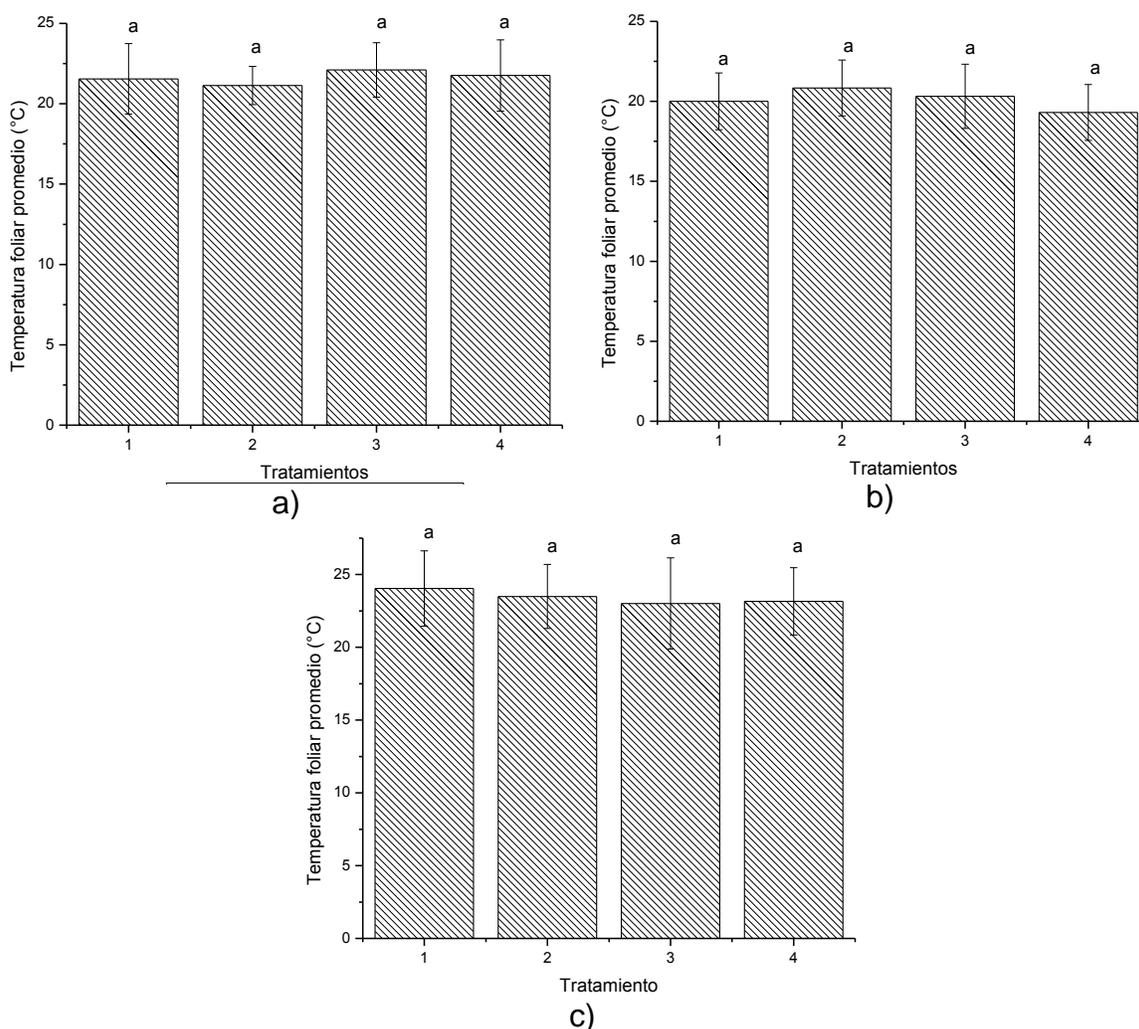


Figura 5.26. Análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al iniciar el experimento para a) primera repetición, b) segunda repetición y c) tercera repetición del experimento.

En el análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al iniciar los tratamientos (Figura 5.27) se observa que no existen diferencias significativas entre los tratamientos de cada repetición. En la primera repetición (inciso a) se obtuvo un coeficiente F de 0.87887, en la segunda repetición (inciso b)) un

coeficiente F de 0.2875, y en la tercera repetición (inciso c)) un coeficiente F de 0.01194. A pesar de tener un coeficiente F de 0.01194, al hacer la comparación de medias de Tukey podemos darnos cuenta de que no existen diferencias significativas entre los tratamientos. Además al analizar la gráfica se observa que las desviaciones estándar de todos los tratamientos tienen en común un rango de temperatura foliar.

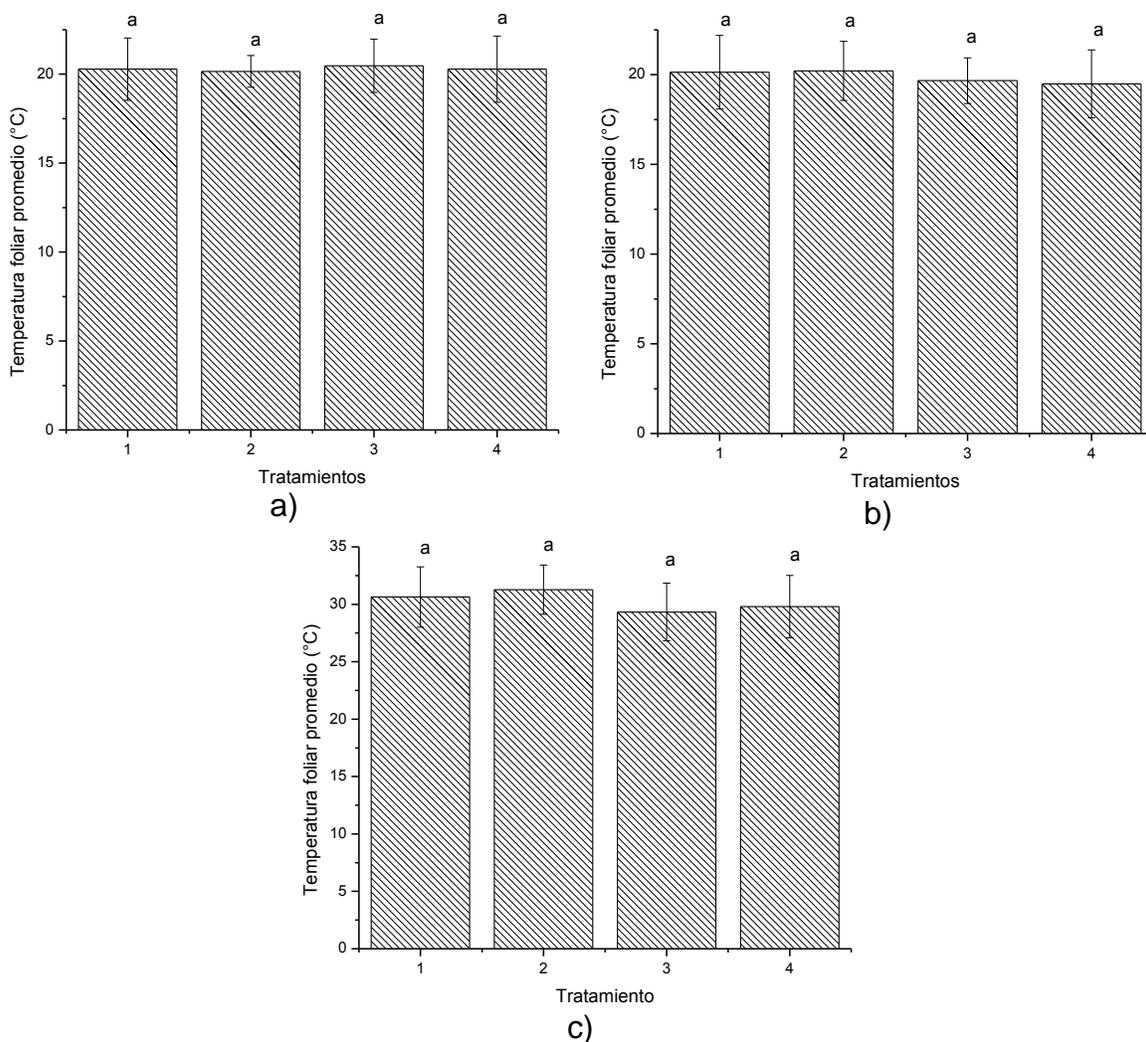


Figura 5.27. Análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al iniciar los tratamientos para a) primera repetición, b) segunda repetición y c) tercera repetición del experimento.

En el análisis de varianza y la comparación de medias de Tukey al finalizar T2 (Figura 5.28) podemos observar que sólo existen diferencias significativas en los tratamientos de la tercera repetición del experimento (inciso c)). En la primera

repetición (inciso a)) se obtuvo un coeficiente F de 0.2877, en la segunda repetición (inciso b)) un coeficiente F de 0.15436, y en la tercera repetición un coeficiente F de 1.16041E-12.

En el inciso c) de la figura 5.28 podemos ver que el T1 es diferente del resto de los tratamientos, y si observamos el inciso d) de la figura 5.3 nos damos cuenta que así es ya que se observa que T1 regula mejor su temperatura que el resto de los tratamientos, y por lo tanto se mantiene unos grados más frío que el resto de los tratamientos.

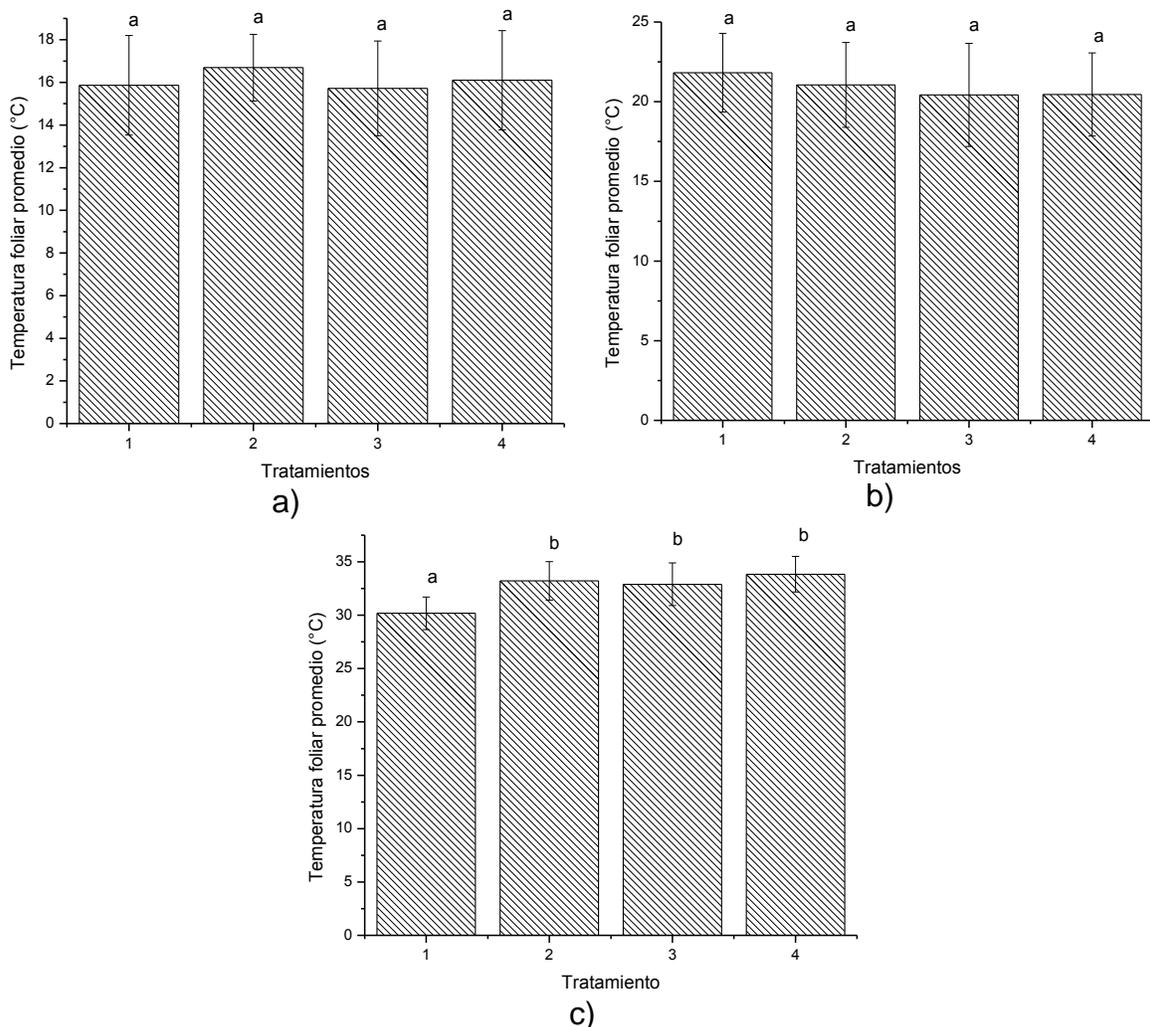


Figura 5.28. Análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al terminar el T2 para a) primera repetición, b) segunda repetición y c) tercera repetición del experimento.

En el análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al finalizar el T3 (Figura 5.29) podemos observar que sólo existen diferencias significativas entre los tratamientos de la tercera repetición (inciso c)). En la primera repetición (inciso a)) se obtuvo un coeficiente F de 0.20188, en la segunda repetición (inciso b)) un coeficiente F de 0.9095, y en la tercera repetición (inciso c)) un coeficiente F de 0.

En el inciso c) de la figura 5.29 se observa que el T1 es diferente al T2, y a su vez estos son diferentes del T3 y T4. Ahora, si observamos el inciso e) de la figura 5.3 podemos ver estas diferencias entre los tratamientos, ya que se observa que el tratamiento que mejor regula su temperatura es el T1, seguido por el T2 que se encuentra 2 °C aproximadamente más caliente y por último el T3 y T4 que en algunos momentos están hasta 6 °C más calientes que el T1.

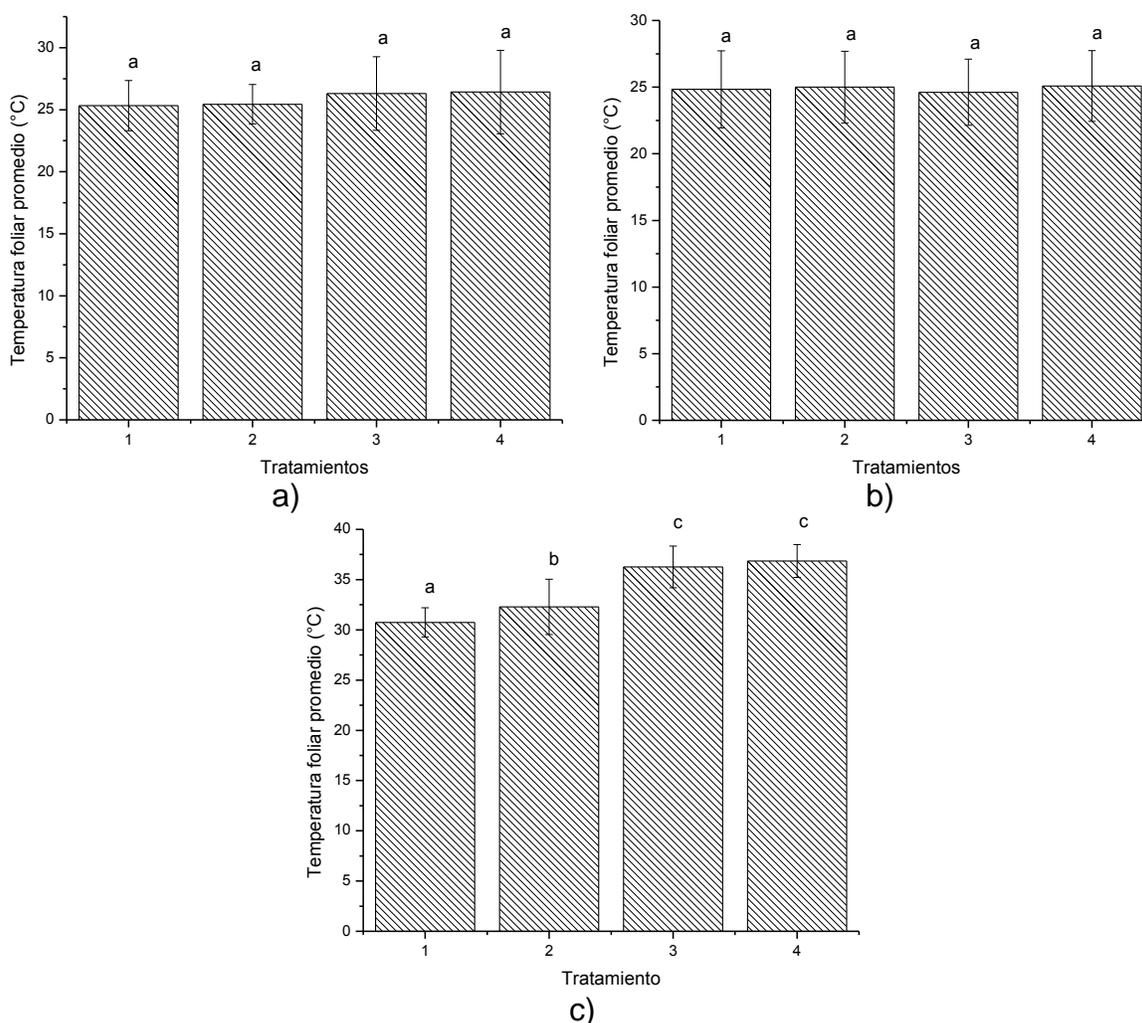


Figura 5.29. Análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al terminar

el T3 para a) primera repetición, b) segunda repetición y c) tercera repetición del experimento.

En el análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al finalizar el T4 (Figura 5.30) se observa que sólo existen diferencias significativas entre los tratamientos de la tercera repetición del experimento (inciso c)). En la primera repetición (inciso a)) se obtuvo un coeficiente F de 0.6438, en la segunda repetición (inciso b)) un coeficiente F de 0.71525, y en la tercera repetición (inciso c)) un coeficiente F de 0. En este último inciso se observa que el T1, T2 y T3 son iguales y el T4 es diferente a estos. Si observamos el inciso f) de la figura 5.3 se ven estas diferencias entre los tratamientos, ya que el T4 se mantiene hasta aproximadamente 5 °C más caliente que el resto de los tratamientos.

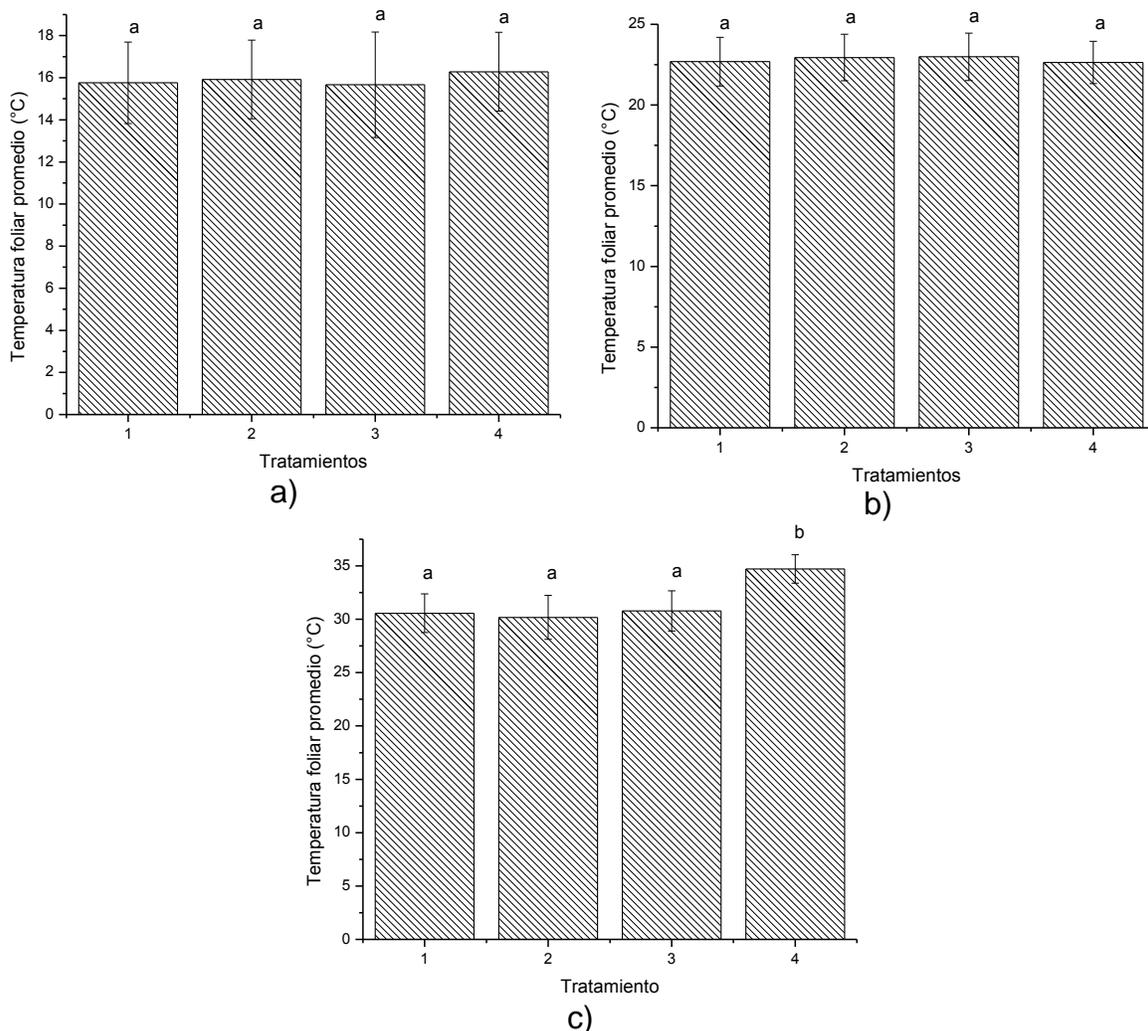


Figura 5.30. Análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al terminar

el T4 para a) primera repetición, b) segunda repetición y c) tercera repetición del experimento.

En el análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al finalizar el experimento (Figura 5.31), se observa que no hay diferencias significativas entre los tratamientos al finalizar cada una de las repeticiones del experimento. En la primera repetición (inciso a)) se obtuvo un coeficiente F de 0.86885, en la segunda repetición (inciso b)) un coeficiente F de 0.23067, y en la tercera repetición (inciso c)) un coeficiente F de 0.85401.

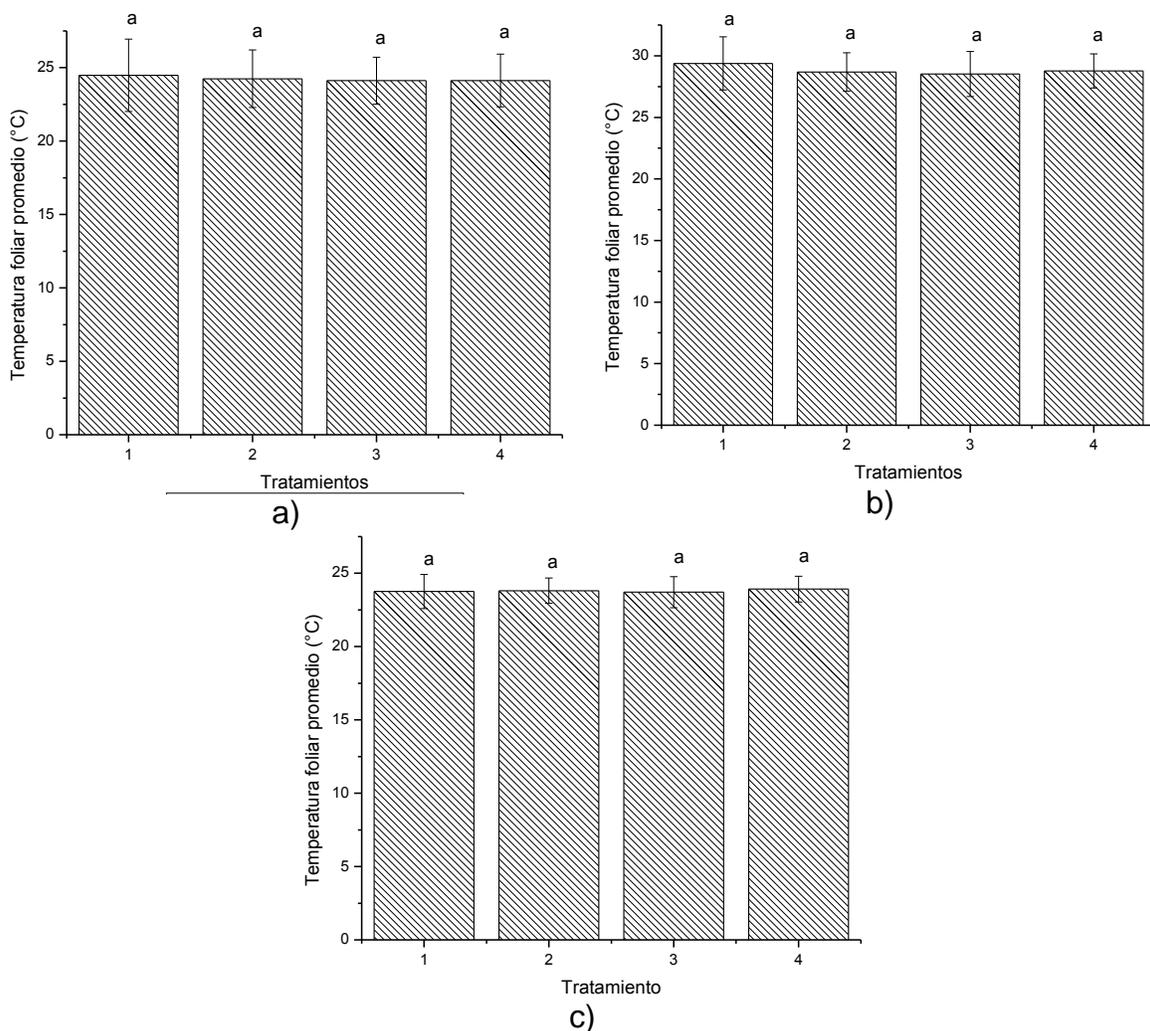


Figura 5.31. Análisis de varianza y comparación de medias de Tukey al finalizar a) primera repetición, b) segunda repetición y c) tercera repetición del experimento.

## 5.9. Discusión de resultados

Al momento de realizar las mediciones de temperatura foliar se pudo observar que la temperatura foliar aumentaba si la radiación solar lo hacía y viceversa. Por lo que se esperaba que al realizar el análisis estadístico se obtuvieran coeficientes de determinación que establecieran que existía una buena correlación estadística, pero esto no pudo apreciarse. Podríamos decir que esto se debió a la precisión del sensor de radiación, de la micro estación WatchDog serie 1000 y/o a la precisión del sensor infrarrojo.

La precisión de la micro estación WatchDog serie 1000 metió ruido en los resultados, así como el sensor de radiación y el sensor infrarrojo. El WatchDog no contó con la precisión suficiente debido a que si se correlaciona temperatura ambiente con humedad relativa, (ambos medidos con la micro estación WatchDog) se obtienen coeficientes de determinación entre 0.6 y 0.7. En cambio si la correlación se hace con los datos de la estación meteorológica los coeficientes de determinación son del cercanos al 0.99. Esto explica que la precisión de los equipos influyó significativamente sobre los resultados.

Debido a la precisión del equipo podrían haberse obtenido mejores coeficientes de determinación, ya que en las gráficas donde se observa el comportamiento general de las variables en algunas se ve que si debe haber una buena correlación entre las variables.

El coeficiente de determinación más alto obtenido entre la evapotranspiración y la temperatura foliar fue de 0.4771, con la radiación solar fue de 0.2204, con la temperatura ambiente fue de 0.3325, con la humedad relativa fue de 0.3297 y con la velocidad del viento fue de 0.2263. Con respecto a la temperatura foliar el coeficiente de determinación más alto obtenido entre ésta y la radiación solar fue de 0.2444, con la temperatura ambiente fue de 0.7562., con la humedad relativa fue de 0.4769 y con la velocidad del viento fue de 0.1722. Como podemos observar el mejor coeficiente de determinación se obtuvo de la correlación entre la temperatura foliar y la temperatura ambiente.

Podemos observar que de las tres repeticiones del experimento, en la tercera se observan mejores resultados. Esto se debe a que se aplicó un tiempo más prolongado de estrés y que se estuvo midiendo en la etapa de recuperación de la plantas; cuando se reanudaba el riego y estas salían del estrés hídrico en el que se encontraban.

Es importante mencionar que para observar mejores resultados el experimento debe realizarse en los días que hay una mayor radiación solar y temperatura ambiente, esto para someter a las plantas a condiciones más extremas y que puedan observarse diferencias entre los tratamientos tanto en temperatura foliar como en evapotranspiración. Lo anterior surgió al observar en la tercera repetición, que cuando la radiación solar y la temperatura ambiente disminuyen no es posible observar diferencias entre los tratamientos. También es sugerente realizar el experimento bajo condiciones controladas, dentro de una cámara climática debido a que se pueden manipular las condiciones ambientales a las que la planta se somete, y de esta forma obtener mejores resultados.

Debido a que la planta estuvo bajo estrés hídrico, al final del experimento pudimos observar que esta aceleró su maduración ya que se veía senescente, tenía una gran cantidad de flores y pocos frutos, los cuales eran muy pequeños y algunos no estaban bien formados. Algunos de los frutos se desprendían fácilmente de la planta.

Como ya se mencionó, Tanner (1963) fue el primero en evaluar la temperatura de las hojas en los cultivos por medio de termómetros infrarrojos, y encontró que la temperatura foliar generalmente es más baja que la temperatura ambiente. Supuso que la transpiración enfriaba las hojas y tal como se disminuía la humedad del suelo, la transpiración era reducida y por lo tanto, la temperatura de las hojas aumentaba.

Rojas (2009) documentó que existen diferencias de temperatura foliar en plantas cuyo sustrato tiene diferente contenido de humedad. También encontró que en un mismo tratamiento de humedad se obtienen diferentes temperaturas foliares

debido a la granulometría del sustrato. Además observó que altas temperaturas foliares indican bajo nivel de humedad en el sustrato, alto déficit hídrico y un bajo rendimiento del cultivo. Concluyó que la temperatura foliar constituye un indicador práctico del estrés hídrico.

Por otro lado, Ünlü (2011) encontró que la temperatura foliar se puede utilizar para la determinación de los valores del índice de estrés hídrico en los cultivos. También encontró que el rendimiento de la planta disminuye conforme aumentan los índices de estrés hídrico.

Como se puede observar existen coincidencias entre la investigación realizada y las tres investigaciones mencionadas anteriormente ya que se coincide en que altas temperaturas foliares indican un déficit hídrico en el sustrato, y que esto provoca una disminución del rendimiento de la planta.

En el caso de la evapotranspiración, Allen *et al.* (2006) menciona que la evapotranspiración de un cultivo se ve reducida cuando se está aplicando estrés hídrico. Esto coincide con lo mencionado por Tanner (1963), que dice que la transpiración disminuye si la humedad del suelo lo hace. El comportamiento antes mencionado no pudo observarse debido a que en los resultados no se observa una diferencia entre los tratamientos.

## VI. CONCLUSIONES

Tomando en cuenta sólo los resultados obtenidos no fue posible determinar la relación entre evapotranspiración y temperatura foliar, esto debido a los coeficientes de determinación obtenidos que indican que no existe una relación entre estas dos variables.

Además de la correlación entre evapotranspiración y temperatura foliar se obtuvieron correlaciones entre evapotranspiración y las variables climáticas (radiación solar, temperatura foliar, humedad relativa y velocidad del viento) y entre estas y la temperatura foliar. De todas las correlaciones realizadas, los coeficientes de determinación más altos que se obtuvieron fue de la correlación entre temperatura foliar y temperatura ambiente.

Individualmente la temperatura foliar sí representa una respuesta fisiológica de la planta a las condiciones ambientales y a la disponibilidad de agua, esto debido a los coeficientes de determinación obtenidos al correlacionarla con la temperatura ambiente y a que se observó que cuando la planta estaba bajo estrés hídrico la temperatura foliar era más cercana a la del ambiente; es decir, que a menor contenido de humedad en el sustrato la temperatura foliar es más alta. Además se observó que al momento de realizar las mediciones, la temperatura foliar aumentaba o disminuía si la radiación solar lo hacía. Por otro lado, en el caso de la evapotranspiración no fue posible observar si existía alguna respuesta fisiológica de la planta a las condiciones ambientales y a la disponibilidad de agua, esto porque no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos.

Si nos basamos sólo en los resultados obtenidos, podemos decir que no hay una relación entre la evapotranspiración y la temperatura foliar que represente una respuesta fisiológica de la planta a las condiciones ambientales y disponibilidad de agua. Sin embargo se debe considerar que los resultados obtenidos tienen que ver mucho con la forma de medición (tiempos), los equipos utilizados (precisión) y que el hecho que no se obtuvo una buena correlación no significa que no la hay.

## VII. LITERATURA CITADA

- Aboukhaled, A.; Alfaro, S.; Smith, M. 1986. Los lisímetros. Roma: FAO Riego y Drenaje N° 39.
- Aguilar, L. Ma. G.; Aguilar, V. A. 2000. Cambios físicos y químicos en frutos de siete variedades de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) en postcosecha. Tesis de licenciatura. Departamento de Fototecnia. UACH. Chapingo. México. 83 p.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Riego y Drenaje, Numero 56. FAO, Roma.
- Almorox, A. J. 2003. Climatología aplicada al medio ambiente y agricultura. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. 201 p.
- Alpi, A.; Tognoni, F. 1991. Cultivo en invernadero. Tercera edición.
- Arroyo, P. J. 1999. Fertilización en el cultivo de tomate de cáscara, en base en el análisis de suelo. Tesis, Universidad Autónoma de Chapingo, pp. 34-48.
- Cartujano, E. F. 1984. Desarrollo y fenología del tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) var. Rendidora. Tesis de Licenciatura. Departamento de Fitotecnia. UACH. Chapingo. México. 79p.
- Cremona, M. V.; Stützel, H.; Kage, H. 2004. Irrigation scheduling of Koklrabi (*Brassica oleracea* var. Gongylodes) using crop water stress index. Hor. Sci. 39(2): 276-279.
- Eliasson, Å.; Faurès, J. M.; Frenken, K.; Hoogeveen, J. 2003. AQUASTAT - Getting to grips with water information for agriculture. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
- FAO, 2002. El cultivo protegido en clima mediterráneo. Estudios FAO. Producción y protección vegetal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, 2002
- Gil, V. I.; Bastida, T. A.; Reyes R. D. S.; Flores, E. G.; Miranda V. I.; Morales P. J.; Ramírez, A. A.; Hernández, O. J.; Navarro, L. E. R. 2010. Manejo de cultivos hidropónicos bajo invernadero. Serie de publicaciones AGRIBOT. Departamento de preparatoria agrícola. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México.
- Golberg, A. D. 2010. El viento y la vida de las plantas. Rev. FCA UNCuyo. Tomo 42. N° 1. Año 2010. 221-243.
- Hussain, K.; Majeed, A.; Nawaz, K.; Afghan, S.; Ali, K.; Lin, F.; Zafar, Z.; Raza, G. 2010. Comparative study of subsurface drip irrigation and flood irrigation

- systems for quality and yield of sugarcane. *African J Biotechnol.*, 5 (22): 3026-3034.
- Jackson, R. D.; Idso, S. B.; Reginato R. J.; Pinter, P. J. 1981. Canopy temperature and crop water stress indicator. *Water resources research*, vol. 17, No. 4, pp 1133-1138.
- Jara, R. J.; Valenzuela, A. A. 1998. Desarrollo de sistemas de riego en el seco interior y costero. Componente nacional: capacitación y difusión de tecnologías de riego. Universidad de Concepción, Campus Chillán, Facultad de Ingeniería Agrícola, Departamento de Riego y Drenaje, Chile.
- Kamp, P. G. H.; Timmerman, G. J. 1996. Computerized Environmental Control In Greenhouses. IPC-Plant, Ede, The Netherlands.
- Lagos, R. O.; Uribe, C. H.; Silva, J. 2004. Riego en frutales y vides En: Frutales: especies con potencial en el seco interior. EL-13 Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias no. 120. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chile.
- López, L. R.; Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A.; López, C. I. L.; Sánchez, C. I. 2010. Evapotranspiración del cultivo de tomate de cascara (*Physalis ixocarpa* Brot.) estimada mediante el potencial mátrico del suelo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, Vol. 3, Núm. 2, 2010, pp. 157-168. Sociedad Mexicana de Fitogenética, A.C. México.
- Magdaleno, V. J. J.; Peña, L. A.; Castro, B. R.; Castillo, G. A. M.; Galvis, S. A.; Ramírez, P. F.; Hernández, H. B. 2006. Efecto de soluciones nutritivas sobre el desarrollo de plántulas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 12(2): 223-229.
- Martínez, M. F. 1995. Manual básico de diseño, construcción y operación de invernaderos y viveros. Juitepec, Morelos.
- Meurs, W.; Stanghellini, C. 1992. Use of an off-the-shelf electronic balance for monitoring crop transpiration in greenhouses. *Acta Hort.* (ISHS) 304:219-226.
- Moreno, T. 1996. Evaluación de fertilizantes orgánicos en tomate de cascara (*Physalis ixocarpa* Brot.) variedad de CH1-Chapingo. Tesis de licenciatura. Departamento de fitotecnia. UACH. Chapingo. México. 86 p.
- Olivera, L. M. 2005. Modelos empíricos para temperatura foliar de tomates cultivados en invernadero. Tesis. Universidad Autónoma de Chapingo. Departamento de irrigación.
- Orgaz, F.; Fernández, M. D.; Bonachela, S.; Gallardo, M.; Fereres, E. 2005. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. *Agricultural Water Management* 72: 81-96.

- Ortega, F. S. O.; Calderón, R.; Acevedo, C.; Fuentes, S. 2000. Estimación de la evapotranspiración real diaria de un cultivo de tomates usando la ecuación de Penman-Monteith. Servicio Integrado de Agroclimatología y Riego (SIAR). Departamento de Producción Agrícola. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad de Talca, Chile. Ciencia e Investigación Agraria. v. 27(2) p. 91-96.
- Ramírez, A. A. 2005. Control Jerárquico Multiobjetivo De Crecimiento De Cultivos Bajo Invernadero. Tesis Doctoral. Universidad de Almería. Almería, España.
- Rodríguez, A. 2007. Factores climáticos. Efectos sobre la calidad de la fruta. Área Agrometeorología. INTA Alto Valle. Productores Argentinos Integrados S. A. Argentina.
- Rodríguez, R.; Pire, R. 2008. Evapotranspiración diaria del tomate determinada mediante un lisímetro de pesada. Agronomía Trop. 58(1): 73-76.
- Rojas, A. M. 2009. Determinación del momento de riego mediante la temperatura de la cobertura foliar en el cultivo de jitomate bajo condiciones de invernadero. Instituto de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas, campus Montecillo, Postgrado de Hidrociencias. Montecillo, Texcoco, Edo. De México.
- Sánchez, M.; Chuvieco, E. 2000. Estimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia, ETo, a partir de imágenes NOAA-AVHRR. Revista de Teledetección, Vol. 14, pp. 11-21.
- Sánchez, de M. P., 2007. Producción y distribución de fotoasimilados en la vid (*Vitis vinifera* L.) durante el periodo de maduración. Cambios en la respuesta fotosintética a la luz de las hojas por factores biológicos, ambientales y culturales. Tesis. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. 467 p.
- Santiaguillo, H. J. F.; Cedillo, P. E.; Cuevas, S. J. A. 2010. Distribución geográfica de *Physalis* spp. en México. Publicaciones de la red de Tomate de cascara. México, 2010.
- Santos, C. B. 2006. Como se hacen las recomendaciones de riego en Tomate. Servicio de Agricultura y Desarrollo Rural. Extensión Agraria. España.
- Saray, M. C. R.; Loya R. J. 1977. El cultivo de tomate en el estado de Morelos. INIA-CIAMEC. Circular Núm. 57. Chapingo, México. 24 p.
- SIAP, 2012. Anuario de la producción agrícola del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). En línea, disponible en <http://www.siap.gob.mx/>. Consultado el 15 de Mayo de 2012.

- Silva, D.; Meza, F. J.; Varas, E. 2010. Estimating reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) using numerical weather forecast data in central Chile. *Journal of Hydrology* 382: 64-71.
- Taboada, S. M.; Oliver, G. R. 2004. Cultivos alternativos en México. Primera edición. Editorial AGT Editor, S.A. México, D.F. 169P.
- Tanner C. B. 1963. Plant temperature. *Agron. J.* 55: 210-211.
- Tuñón, J. 2000. Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas. Departamento de ciencias experimentales. Tesis. Universidad de Jaume I. España.
- Ünlü, M.; Kanber, R.; Kapur, B.; Tekin, S.; Levent, K. D. 2011. The crop water stress index (CWSI) for drip irrigated cotton in a semi-arid region of Turkey. *African Journal of Biotechnology* Vol. 10(12), pp. 2258-2273.
- Uribe, C. H.; Maldonado, I. I. 2000. Programación de riego ni de mas ni de menos. *Tierra Adentro* (Sep-Oct 2000) (no. 34) p. 28-31. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chile.
- Valtierra, P. E.; Ramos, S. A. 2003. Programa estratégico de necesidades de investigación y transferencia de tecnología de la cadena productiva de Tomate verde en el estado de Puebla. Fundación PRODUCE Puebla A.C. Gobierno del Estado de Puebla.
- Villaman, P. R.; Tijerina, C. L.; Quevedo, N. A.; Crespo, P. G. 2001. Comparación de algunos métodos micrometeorológicos para estimar la evapotranspiración, en el área de Montecillo, México. Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.