



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
FISIOLOGÍA VEGETAL**

**RESPUESTAS FISIOLÓGICAS Y EFICIENCIA DE
USO DE AGUA EN *Capsicum annuum* L. EN UN
SISTEMA HIDROPÓNICO CON DÉFICIT DE
RIEGO Y DRENAJE CERO**

JOSE BERNARDO HERNANDEZ PALOMO

T E S I S

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

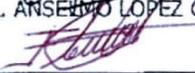
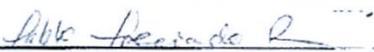
MAESTRO EN CIENCIAS

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO
2014**

La presente tesis titulada: **RESPUESTAS FISIOLÓGICAS Y EFICIENCIA DE USO DE AGUA EN *Capsicum annum* L. EN UN SISTEMA HIDROPÓNICO CON DÉFICIT DE RIEGO Y DRENAJE CERO**, realizada por el alumno: JOSE BERNARDO HERNANDEZ PALOMO bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
FISIOLOGÍA VEGETAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO	 DR. CARLOS TREJO LÓPEZ
ASESOR	 DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA
ASESOR	 DR. ANSELMO LÓPEZ ORDAZ
ASESOR	 DR. EBANDRO USCANGA MORTERA
ASESOR	 DR. PABLO PRECIADO RANGEL

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Septiembre de 2014

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo nacional de ciencia y tecnología, por apoyarme con una beca para poder sostener mi estancia durante la maestría.

Al Colegio de Postgraduados.

Al Dr. Carlos Trejo López por su apoyo académico, tiempo y dedicación en mi proyecto de investigación, por su paciencia y consejos para superarme cada día profesionalmente el cual quiero corresponder dándole crédito de este logro. Aunque sin duda, siempre estaré en deuda, por el apoyo y consejos personales que me brindo, durante mi estancia en el COLPOS. Gracias por su amistad.

DEDICATORIAS

A Dios, por haberme dado todo lo que tengo y a pesar de haberme alejado de él, siempre estuvo conmigo.

Con mi corazón, a mi abuelo Santos Hernández Rodarte y mi tío Santos Hernández del Toro, donde estén les dedico este logro.

A mis padres María del Carmen Palomo Amaya y José Bernardo Hernández del Toro, si alguna vez llego a ser una persona de bien será gracias a ellos.

A mis hermanos Alonso y Karina, esperando que esto les sirva de ejemplo de que cualquier persona puede lograr lo que se propone.

A mi hermano del alma, amigo , compañero gracias por tu apoyo Enrique.

Y en especial a mi hijo Mateo por haberme mostrado el verdadero amor, gracias por llegar a mi vida, y mi amada esposa Anita.

INDICE

	PÁGINA
ÍNDICE DE CUADROS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
I INTRODUCCIÓN	1
II REVISION DE LITERATURA	3
2.1 Importancia mundial del agua	3
2.1.1 Problemática del agua en México	4
2.1.2 El agua en la agricultura	5
2.1.3 El agua en las plantas	6
2.2 Importancia económica y social del chile	8
2.2.1 Demanda de agua en el cultivo de <i>Capsicum annuum</i> L.	11
2.3 Respuestas de las plantas a condiciones de estrés hídrico	13
2.3.1 Señales químicas e hidráulicas	13
2.3.2 Ácido abscísico	16
2.3.3 Acumulación de prolina	16
2.3.4 Conductancia estomática	17
2.3.5 Citoquininas y enzimas antioxidantes	19
2.4 Técnicas de riego para ahorrar agua	20

2.4.1 Eficiencia del uso del agua	20
2.4.2 Déficit de irrigación como sistema de riego	22
2.4.3 Secado parcial de la raíz	23
2.4.4 Riego mediante sondas de capacitancia, FDR	24
2.4.5 Sistema recirculante	25
2.5 Sistema cero drenaje	25
2.5.1 Riesgos potenciales que se pueden generar en el sistema cero drenaje	26
2.5.1.1 Calidad del agua	26
2.5.1.2 Conductividad eléctrica, CE	27
2.5.1.3 Elección de sustrato	28
III OBJETIVOS E HIPÓTESIS	29
3.1 Objetivo general	29
3.2 Objetivos particulares	29
3.3 Hipótesis	29
IV MATERIALES Y METODOS	30
4.1 Ubicación	30
4.2 Material Vegetal y Germinación	30
4.3 Trasplante	30
4.4 Labores culturales	31
4.5 Riego y fertilización	32
4.6 Factores ambientales	34
4.7 Tratamientos y diseño experimental	34

4.8 Variables de estudio	36
4.8.1 Potencial de agua	36
4.8.2 Conductancia estomática	37
4.8.3 Contenido de prolina en hojas	37
4.8.4 Área foliar	37
4.8.5 Biomasa (fruto, hoja, tallo y raíz)	37
4.8.6 Eficiencia de uso de agua	38
V RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
5.1 Potencial de agua	39
5.2 Conductancia estomática	41
5.3 Contenido de prolina en hojas	42
5.4 Área foliar	45
5.5 Biomasa fresca (fruto, hoja, tallo y raíz)	47
5.6 Eficiencia de uso de agua	52
5.7 Conductividad eléctrica	55
VI CONCLUSIONES	58
VII LITERATURA CITADA	60

INDICE DE CUADROS

PÁG

Cuadro 1. Agroquímicos utilizados para el control de plagas, enfermedades, y para la fertilización foliar durante el desarrollo de chile ancho (<i>Capsicum annuum</i> L.) híbrido Capulín F1.	31
Cuadro 2. Cantidad de los fertilizantes usados para preparar la solución nutritiva Steiner en las dos concentraciones.	33

INDICE DE FIGURAS	PÁG
Figura 1. Distribución del uso del agua en México 2011.	5
Figura 2. Superficie sembrada por estado en México de <i>Capsicum annumm</i> L.	9
Figura 3. Producción por variedad de chiles frescos en México.	10
Figura 4. Sistema usado para registrar la pérdida de agua por evapotranspiración en <i>Capsicum annumm</i> L.	35
Figura 5. Diseño experimental utilizado en la investigación.	36
Figura 6. Potencial de agua (MPa) en hojas de chile ancho (<i>Capsicum annumm</i> L.) en cuatro muestreos y tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Cada punto es el promedio de seis repeticiones \pm error estándar (A) . Las barras indican el promedio de los cuatro muestreos \pm error estándar y significancia de tratamientos (Tukey $P>0.05$) (B) .	40
Figura 7. Conductancia estomática ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en hojas de chile ancho (<i>Capsicum annumm</i> L.) en tres muestreos y tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Cada punto es el promedio de seis repeticiones \pm error estándar (A) . Las barras indican el promedio de los tres muestreos \pm error estándar y significancia de tratamientos (Tukey $P>0.05$) (B) .	41
Figura 8. Contenido de prolina en hojas de chile ancho (<i>Capsicum annumm</i> L.) en cuatro muestreos y tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Cada punto es el promedio de seis repeticiones \pm error estándar (A) . Las barras indican el promedio de los cuatro muestreos \pm error estándar y significancia de tratamientos (Tukey $P>0.05$) (B) .	43
Figura 9. Área foliar (m^2) de plantas de chile ancho (<i>Capsicum annumm</i> L.) en cinco muestreos y tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Cada punto es el promedio de seis repeticiones \pm error estándar (A) . Las barras indican el promedio de los cinco muestreos \pm error estándar y significancia de tratamientos (Tukey $P>0.05$) (B) .	46

Figura 10. Biomasa fresca (fruto, hojas, tallo y raíz) de plantas chile ancho **47** (*Capsicum annuum* L.) en cinco muestreos y tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Cada punto es el promedio de seis repeticiones \pm error estándar

Figuran 11. Biomasa seca (fruto, hojas, tallo y raíz) de plantas chile ancho **48** (*Capsicum annuum* L.) en cinco muestreos y tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Cada punto es el promedio de seis repeticiones \pm error estándar

Figura 12. Biomasa fresca (fruto, hojas, tallo y raíz) de plantas chile ancho **49** (*Capsicum annuum* L.) en tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Las barras indican el promedio de general de cinco muestreos \pm error estándar y significancia de tratamientos (Tukey $P > 0.05$).

Figura 13. Biomasa seca (fruto, hojas, tallo y raíz) de plantas chile ancho (*Capsicum annuum* L.) en tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Las barras indican el promedio de general de cinco muestreos \pm error estándar y significancia de tratamientos (Tukey $P > 0.05$)

Figura 14. Gasto de agua por planta ($L \text{ planta}^{-1}$) en 134 d de experimento **(A)**, **54** biomasa fresca del fruto **(B)**, y biomasa seca de fruto **(C)** en el cultivo de chile ancho (*Capsicum annuum* L) y en tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Las barras indican el promedio de general de cinco muestreos \pm error estándar y significancia de tratamientos (Tukey $P > 0.05$) **(B) (C)**.

Figura 15. Conductividad eléctrica (CE) en 134 d de experimento en el cultivo de chile ancho (*Capsicum annuum* L) y en tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Las flechas indican la lectura de la CE ($dS \text{ m}^{-1}$), después de 2 d de aplicación de agua acidulada. Cada punto es el promedio de seis repeticiones \pm el error estándar.

RESUMEN

Más del 70% de agua es destinado para usos agrícolas, con base en la escasez de este recurso hídrico a nivel mundial es necesario el desarrollo de técnicas que ayuden a mejorar el uso eficiente del agua. El objetivo de esta investigación fue determinar la respuesta fisiológica y la eficiencia de uso de agua en *Capsicum annuum* L. desarrollado en condiciones de déficit de riego en un sistema protegido e hidropónico con drenaje cero, para lo cual se plantearon tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): el TI o Testigo, sistema con drenaje del 40%, el cual se regó al evapotranspirar un 20% de la humedad total; Tratamiento II (90-70%, HAR) se permitió evapotranspirar el 30% de la humedad total en el sustrato y en ese momento se regó, hasta el 90% (las bolsas no tuvieron drenaje). Tratamiento III (80-60%, HAR): se permitió que se evapotranspirara el 40% de la humedad total en el sustrato y en ese momento se regó hasta el 80% (las bolsas no tuvieron drenaje). Las variables estudiadas fueron potencial de agua, conductancia estomática, contenido de prolina en hojas, biomasa fresca y seca de (fruto, hoja, tallo y raíz), área foliar y eficiencia de uso de agua (EUA). El potencial de agua y la conductancia estomática, biomasa fresca (hoja, tallo y raíz) y área foliar en los tratamientos I y TII presentaron diferencias significativas en comparación con el TIII. En general esta investigación tuvo como resultado una mayor eficiencia (43, 41 %) en los tratamientos con déficit de irrigación TII y TIII respectivamente, comparados con el sistema de riego convencional TI , con una eficiencia en el uso del agua de 11.52 kg m^{-3} (TI) , 17.17 kg m^{-3} (TII) , 16.05 kg m^{-3} (TIII)).

Palabras clave: déficit de riego, potencial hídrico, prolina, chile ancho, sistema cerrado

ABSTRACT

More than 70% of fresh water resource of the planet is used for agricultural purposes therefore, it is urgent to develop techniques to increase the efficiency of this resource. The objective of this research was to determine the physiological response and the water use efficiency of *Capsicum annuum* L. grown in hydroponic conditions with deficit of irrigation and zero drain under greenhouse conditions. Three treatments of residual substrate moisture availability (RMA) were studied. Treatment I or control, system with 40% of drain which was watered when it evapotranspired 20% of the total substrate water availability; Treatment II (90-70%, RMA) it was allowed to evapotranspired 30% of the total substrate water availability and then it was watered just at 90% and Treatment III (80-60%, RMA), it was allowed to evapotranspired 40% of the total substrate water availability and then it was watered just at 80%. It was determined leaf water potential, stomatal conductance, proline leaf concentration, fresh and dry matter of fruit, leaves, stem and root, leaf area and at the end of the experiment water productivity was calculated. Leaf water potential, stomatal conductance, fresh matter of leaves, stem, root and leaf area in treatments I and II had significant differences compared to TIII. Fresh fruit yield was similar in the three treatments studied however TII had the higher water productivity.

Key words: deficit of irrigation, water potential, zero drain, peeper, prolin.

I. INTRODUCCIÓN

En el mundo, el uso del agua y su gestión es un factor esencial para elevar la productividad en la agricultura y asegurar una producción sustentable. El agua es esencial para aprovechar el potencial de la tierra y permitir que las variedades mejoradas tanto de plantas como de animales utilicen plenamente los demás factores de producción y eleven su rendimiento. Al incrementar la productividad, la gestión sostenible del agua (especialmente si va unida a una gestión adecuada del suelo) contribuye a asegurar una producción mejor, tanto para el autoconsumo como para la exportación, favoreciendo así la producción de los excedentes económicos necesarios para elevar la economía de las zonas rurales (FAO, 2002).

Desde los años sesenta, la producción de alimentos ha mantenido el paso del crecimiento demográfico, suministrando más alimentos *per capita* a precios cada vez más altos, pero a costa de los recursos hídricos. Al final del siglo XX, la agricultura utilizaba en promedio el 70% de toda el agua utilizada en el mundo y la FAO estima que el agua destinada al riego aumentará un 14% para 2030.

En la actualidad, la agricultura exige nuevas alternativas y tecnologías las cuales nos ayuden al uso y manejo eficiente del agua. Algunas de ellas son agricultura de conservación, acolchados, rotación de cultivos, cultivos intercalados, riego localizado, agricultura protegida, etc. Esta última, consiste en confinar el ambiente físico del cultivo usando vidrio, plástico o mallas (invernaderos, túneles altos y bajos, casas sombras, etc.) y es usada extensivamente en muchas partes del mundo con el objetivo de incrementar el rendimiento y el uso eficiente del agua, especialmente en cultivos con valor económico alto. Actualmente, México cuenta con una

infraestructura aproximada de 1500 ha (Juárez-López *et al.*, 2011). Aunado a lo anterior, el manejo del agua en estos sistemas es de gran importancia para incrementar lo que ahora se llama “productividad del agua o eficiencia de uso de agua”; además, el entendimiento de procesos fisiológicos básicos de las plantas durante los últimos 30 años (señalización raíz-tallo) y su uso en estos sistemas de producción intensivos, es una variante más que ha ayudado a incrementar la eficiencia de estos (Davies y Zhan, 1991). Dos técnicas han sido usadas ampliamente, una es el déficit de irrigación (Fereres y Soriano, 2007; Chaves *et al.*, 2007) y la segunda es la técnica del secado parcial de la raíz (SPR) (Stoll *et al.*, 2000; López-Ordaz *et al.*, 2011). Ambas son usadas básicamente para estimular de una forma moderada y controlada la “señalización negativa raíz-tallo” y provocar una reducción del vigor vegetativo, mantener el rendimiento e incrementar la calidad del producto, usando un volumen de agua menor.

Dentro el contexto anterior el objetivo de esta investigación fue estudiar el efecto de niveles de déficit de riego incluyendo el concepto de cero drenaje en la fisiología, rendimiento y uso eficiente del agua en *Capsicum annuum* L. en un sistema de producción protegido e hidropónico.

II REVISION DE LITERATURA

2.1 Importancia mundial del agua

La escasez del agua es un tema ampliamente discutido en todo el mundo, debido a que en los últimos años el recurso se ha agotado a ritmos acelerados y se estima que para el 2050, sesenta y seis países se verán severamente afectados por la escasez de agua (UNESCO, 2005).

El agua dulce del mundo constituye un recurso limitado, amenazado y en peligro. De acuerdo con los estudios sobre el balance hídrico del planeta, solamente 0.007% de agua dulce se encuentran realmente disponibles para uso humano directo (L'vovich *et al.*, 1995; Simonovic, 2000).

En el mundo, más del 70% de esta agua es utilizada en la agricultura, la cual sirve para regar aproximadamente 240 millones de hectáreas de plantas cultivadas (Zhang y Yang, 2004), por lo que la agricultura necesita de nuevas técnicas que ayuden a aprovechar de manera eficiente el agua destinada para estos fines.

El uso del agua constituye uno de los principales desafíos del siglo XXI al que se están enfrentando ya numerosas sociedades de todo el mundo. A lo largo del último siglo, el uso y consumo de agua creció a un ritmo dos veces superior al de la tasa de crecimiento de la población y, aunque no se puede hablar de escasez hídrica a nivel global, va en aumento el número de regiones con niveles crónicos de carencia de agua (ONU-AGUA, 2012).

2.1.1 Problemática del agua en México

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas (ONU), un país con escasez de agua es aquel que cuenta con menos de 1000 m³ disponibles por habitante por año, lo que no es suficiente para proporcionar adecuada alimentación o para respaldar el progreso económico, y es además una causa potencial de severos daños ambientales. Los países con 1000 a 1700 m³ de agua por persona por año, se dice que tienen dificultades hídricas, entre estos países se encuentra México (Brooks, 2004).

En el país existen enormes diferencias regionales en la disponibilidad de agua, en tanto que un gran aumento de la población y de las actividades agrícolas ha determinado su disminución. Así, debido a la geografía y al clima destacan dos grandes zonas de disponibilidad natural de agua, la primera de ellas que comprende el sur y sureste y la segunda el norte, centro y noroeste del país. La disponibilidad natural en la primera de ellas es 7 veces mayor que en el resto del territorio nacional (CNA-SEMARNAT, 2005). Sin embargo, el crecimiento poblacional y económico mayor se ha generado en las zonas con disponibilidad de agua menor, el centro y norte, donde se tiene el 77% de la población y una disponibilidad de agua del 31%, a diferencia de la zona sureste, donde el 23% de la población cuenta con el 69% del recurso disponible. Es importante mencionar que en la zona norte donde la disponibilidad de agua es menor es donde se concentra la mayor extensión territorial dedicada a la agricultura, la cual agrava el problema de escasez de agua (CNA, 2007).

En México llueve en promedio un volumen de 1489 km³ al año, de los cuales se evapotranspira el 73.1%, el 22.1% escurre por ríos y arroyos, y el 4.8% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta las

exportaciones e importaciones de agua con países vecinos, así como la recarga incidental (consecuencia de la actividad humana, sin estructura específica para recarga artificial), anualmente el país cuenta con 460 mil millones de metros cúbicos de agua dulce, un valor de agua renovable *per capita* bajo (SINA, 2011).

2.1.2 El agua en la agricultura

En México, 77% del agua se utiliza en la agricultura; 14%, en el abastecimiento público; 5%, en las termoeléctricas y 4%, en la industria (Figura 1)

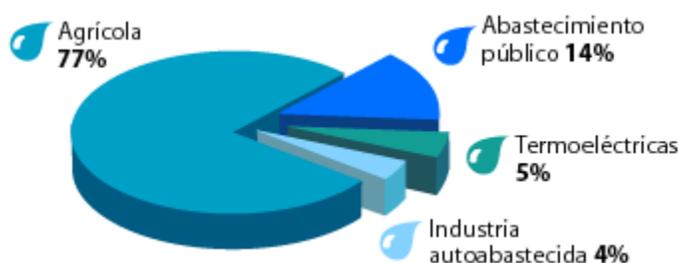


Figura 1. Distribución del uso del agua en México (SEMANAR, 2011).

De acuerdo con INEGI (2007), la superficie agrícola fue de 30.22 millones de hectáreas, de las cuales 18% fue de riego y el resto de temporal. Aun siendo menor en superficie, la agricultura de riego genera más de la mitad de la producción agrícola del país. Con base en el censo, la superficie sembrada anualmente oscila entre 20 y 23 millones de hectáreas, y el rendimiento en toneladas por hectárea bajo riego es de 2.2 a 3.6 veces mayor que en la superficie de temporal. México posee una infraestructura importante de riego, la sexta a nivel mundial en términos de superficie, con 6.46 millones de hectáreas; 70% de las exportaciones agrícolas es producido por la agricultura bajo riego y concentra 80% de la mano de obra agrícola.

La agricultura utiliza 77% del consumo de agua en el país, y se pierde entre 40-50% del recurso por sistemas de conducción ineficientes y por falta de incorporación de tecnología de riego por parte de los productores (IMTA, 2002), de aquí se desprende la necesidad de establecer un mecanismo de adopción de tecnología que permita realizar un manejo adecuado del agua (Ortiz, 1997).

El riego tiene una importancia primordial en el sistema productivo y alimentario de México, ya que aproximadamente 66% del territorio se caracteriza por pertenecer a zonas áridas y semiáridas, donde los sistemas de riego deficientes no han sido capaz de aprovechar completamente este recurso hídrico (CNA, 2009).

Hoy en día la gestión en el uso eficiente del agua de riego agrícola ha ido en aumento, pero recientemente se está prestando mayor atención en producir mayor cantidad de alimentos con menor cantidad de agua, productividad de agua (Kassam *et al.*, 2007).

2.1.3 El agua en las plantas

El agua juega un papel fundamental en la producción vegetal, en los ecosistemas naturales determina el tipo de vegetación con base en el gradiente de precipitación de cada zona. La razón por la cual es limitante, se debe a la gran cantidad que las plantas usan durante su desarrollo (Taiz y Zeiger, 2010). En su mayoría el agua absorbida por las raíces, es transportada a la parte aérea y posteriormente evaporada a la atmósfera por las hojas (aproximadamente 97%), a este proceso se le conoce como transpiración. Sin embargo, una pequeña cantidad del agua absorbida por las raíces es aprovechada en procesos de crecimiento (2%) o en procesos bioquímicos (1%) como fotosíntesis u otras reacciones metabólicas (Taiz y Zeiger, 2010). El agua es de vital importancia en

la fotosíntesis, ya que de ella es desprendido el átomo de hidrogeno que posteriormente es asimilado en dicho proceso. Es por ello, que es necesario sea considerado como un elemento esencial para las plantas, de la misma manera que el CO_2 o NO_3^- , a pesar que solo se requiere para el proceso fotosintético el 0.01% del total de agua utilizada por la planta (Azcon y Talon, 1993).

Las moléculas de agua se adsorben en la superficie de las partículas formando capas de hidratación, que influyen en las reacciones físicas y químicas. Aunado a esto, es fundamental para el transporte, distribución de nutrimentos y metabolitos en toda la planta, ya que en su forma líquida, permite la difusión y el flujo masivo de solutos. Es un disolvente universal de sustancias como sales inorgánicas, azúcares, aniones orgánicos y constituye un medio en el cual se llevan a cabo las reacciones bioquímicas (Azcon y Talon, 1993).

La pérdida de agua a la atmósfera (traspiración) es una consecuencia inevitable, la absorción de CO_2 está unida a la pérdida de agua mediante un proceso de difusión, debido a que cuando el CO_2 se difunde al interior de las hojas, el vapor de agua se difunde hacia la atmósfera. Este gradiente de difusión que conduce a la pérdida de agua es mucho mayor que el del CO_2 fijado. Por lo tanto, por cada molécula de CO_2 absorbida se pierden aproximadamente 400 moléculas de agua, este intercambio desbalanceado ha tenido una influencia importante en la evolución de la forma y la función de las plantas y explica el porqué de la importancia del agua en la fisiología de éstas (Taiz y Zeiger, 2010).

2.2 Importancia económica y social del chile

El cultivo de chile ocupa una superficie de 1, 696,891 ha a nivel mundial. Los principales países productores son China, Indonesia, México, Nigeria, y Turquía que en conjunto cultivan cerca de 1, 244,310 ha, lo cual representa el 73% de la superficie total sembrada (FAOSTAT, 2006).

FAOSTAT (2006) señaló que el cultivo de las especies de chile en México es de gran relevancia económica, puesto que su producción corresponde al 80% de lo que se produce en América Latina y al 7% de la producción mundial, razón por la cual ocupa el tercer lugar mundial por la superficie cultivada y el segundo lugar por su volumen de producción y por el volumen exportado.

Este cultivo es tradicional en nuestro país y se compara con lo que representa el maíz y frijol en nuestra alimentación. Se produce en los dos ciclos agrícolas y aunque es uno de los principales productos que se exportan, el 80% de la producción se consume internamente como condimento (ASERCA, 1998).

En México se cultivan 147.6 mil ha de chiles y se producen cerca de 2.24 millones de toneladas de producto fresco entre los que podemos destacar el cayena, mulato, jalapeño, poblano, serrano, habanero entre otros, los cuales se consumen de diversas formas. Durante el 2007 el cultivo de chile figuro entre los principales cultivos hortícolas de exportación con una participación del 8.6% del total de las exportaciones superado únicamente por cultivos como el tomate, melón y pepino. De la superficie sembrada total para la producción de chile nacional, 62.5% corresponde al chile fresco, donde las variedades como jalapeño, pimienta, serrano y poblano o ancho integran el 78% de la producción nacional equivalente a 1537.9 miles ton (SAGARPA, 2008).

El cultivo de chile ancho se ha posicionado como uno de los más sobresalientes por la superficie sembrada y por el valor de la producción (Vázquez *et al.*, 2003). Se cultiva en los 32 estados del país, y se localiza desde el nivel del mar hasta los 2500 msnm. SIACON (2008), señaló que el estado con mayor superficie sembrada fue Zacatecas, convirtiéndose en el principal estado productor de *Capsicum annuum* L. seguido por San Luis Potosí, Sinaloa, Guanajuato, Durango, Baja California Sur, Aguascalientes y Jalisco (Figura 2).

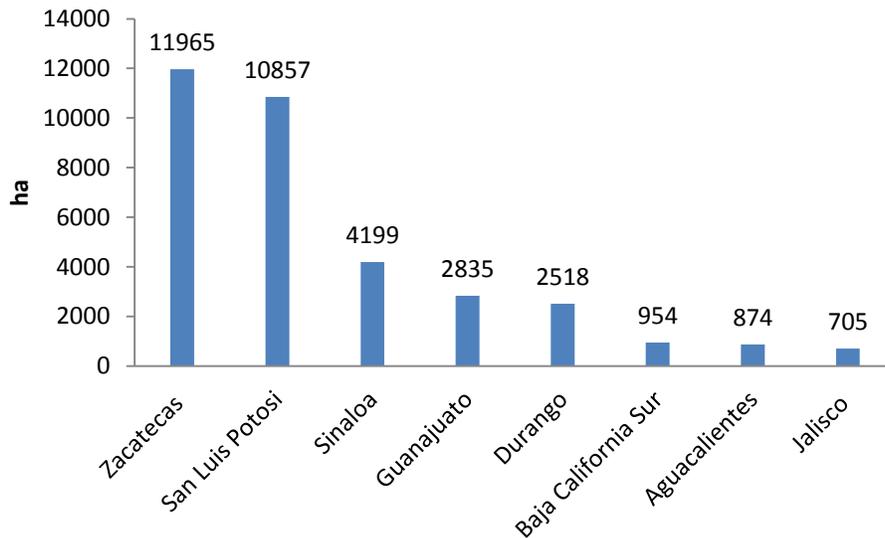


Figura 2. Superficie sembrada por estado en México de *Capsicum annuum* L. (SIACON, 2008).

La diversidad de regiones, variedades, sistemas de producción hacen difícil contar con estadísticas precisas sobre las superficies cultivadas de cada tipo de chile.

SIAP-SAGARPA (2007) mencionó que los principales tipos de chile fresco sembrados en México son el jalapeño, serrano, pimiento, y chile ancho o poblano (Figura 3)

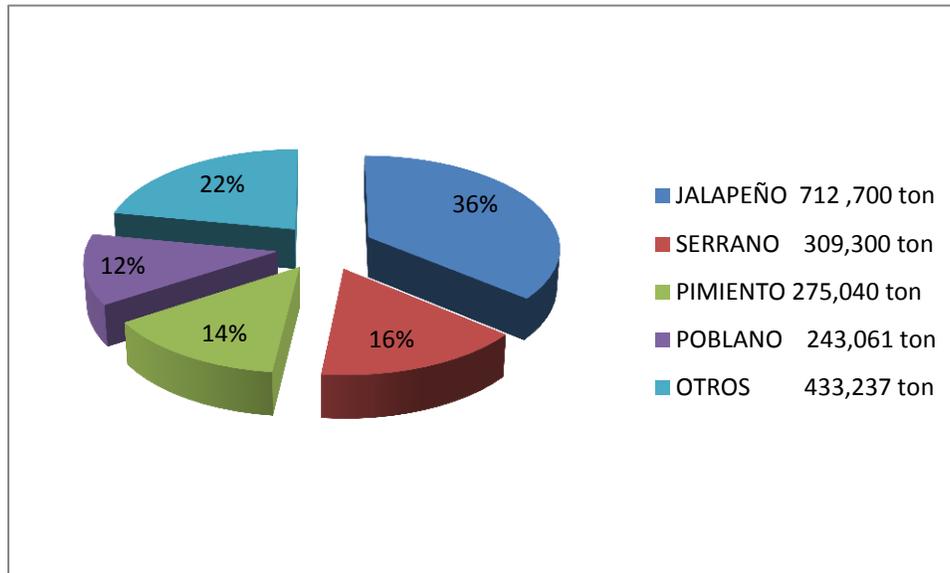


Figura 3. Producción por variedad de chiles frescos en México (SIAP-SAGARPA, 2007).

El cultivo del chile ancho también tiene importancia social, ya que requiere de 30 a 40 jornales por hectárea para su producción, pero su productividad baja y costo alto de producción limitan su rentabilidad y competitividad. El marco económico actual, debido a los acuerdos de libre comercio con otros países, exige la producción de alimentos en mayor cantidad y calidad para competir en el exigente y concurrido mercado internacional, esto sólo podrá lograrse mediante el empleo de tecnologías agrícolas que permitan incrementar la producción por unidad de superficie, mejorar la calidad comercial de los productos y reducir sus costos de producción (Zúñiga, 2003).

Es necesario optimizar los recursos e insumos involucrados en la producción de chile e implementar sistemas de producción modernos que incluyan variedades mejoradas,

sistemas de riego presurizados, aplicación de fertilizantes en el agua de riego, etc. La fertirrigación no se ha desarrollado por completo para este cultivo, ya que aún no se han determinado los requerimientos hídricos y nutrimentales para los diversos tipos de chile cultivados (Mata, 2001; Tun-Dzul, 2001).

El chile ancho también es cultivado en Puebla y el valle del centro de México; en una superficie de 35,000 ha anuales. A pesar de ello se ha realizado poca investigación enfocada a hacer más eficiente su producción con técnicas y que mejoren la eficiencia en el uso del agua (EUA). Este chile se consume fresco y seco, sin embargo el chile seco es el de mayor uso en México (Pozo, 2000; Sakata, 2004).

2.2.1 Demanda de agua en el cultivo de *Capsicum annuum* L.

El chile como la mayoría de los cultivos hortícolas requiere de grandes cantidades de agua y nutrimentos, aunado a esto, en las zonas áridas donde el agua es uno de los factores que limitan su rendimiento y rentabilidad, es necesario sistemas de riego eficientes que ayuden a preservar este recurso. Tijerina, (1999) consignó que los sistemas de riego localizado mediante la estimación de los requerimientos hídricos y de fertilización son una buena alternativa para aumentar la rentabilidad y disminuir el gasto de agua en los cultivos.

El sistema de riego por gravedad es el más utilizado en las regiones agrícolas de México, sin embargo su eficiencia es muy baja, menor al 40%, debido a las grandes pérdidas de agua por infiltración, evaporación durante la conducción y aplicación, entre otras; que resultan en rendimientos bajos (Morales, 1999).

Capsicum annuum L. en condiciones de invernadero con un sistema hidropónico requirió en promedio 2.1 L de agua, de los cuales 0.8 L fue evapotranspirado y 1.3 L fue drenado; la eficiencia en el uso de agua fluctuó entre el 37 y 72 % según la etapa fenológica el cultivo (Castellanos, 2001).

A cielo abierto el agua utilizada para cultivar chile ancho es excesivo, debido a la pérdida por evaporación e infiltración, estudios realizados en una de las principales zonas productoras de este cultivo en México, reportaron que en un sistema de producción de riego por cintilla y acolchado son necesarios 4,349 m³ de agua mientras que en el sistema sin acolchado y riego por gravedad se necesitan 8, 560.8 m³ de este recurso hídrico, lo que concluye con un ahorro del 50% en el sistema con acolchado y cintilla comparado con el sistema convencional (Ramos *et al.*, 2007).

La eficiencia en el uso del agua en dos de las parcelas con el sistema de riego por cintilla fue de 8.6 kg de fruto/m³ de agua, (parcela Cosio) estos resultados fueron derivados de una parcela experimental de 10,000 m² la cual obtuvo un rendimiento de 37,686 kg con un gasto de agua de 4349 m³ en la segunda parcela la eficiencia fue de 7.9 kg de fruto /m³ de agua, (parcela 2 Jesús María), en la cual la parcela experimental tenía una superficie de 10,000 m² y obtuvo un rendimiento de 24,279.6 kg ha con un gasto de agua de 3079 m³ (Ramos *et al.*, 2007).

2.3 Respuestas de las plantas a condiciones de estrés hídrico

El agua constituye el principal factor limitante del crecimiento de las plantas, siendo clave para la evolución y distribución de las especies vegetales (Hanson y Hitz, 1982; Taiz y Zeiger, 2010).

Algunos de los procesos que son regulados por la condición hídrica de la planta a nivel celular son: el crecimiento, división y cambios en la forma celular, señalización hormonal, el metabolismo, absorción de nutrientes, cierre estomático, peroxidación de lípidos, cambios de la permeabilidad de las membranas, degradación de proteínas, síntesis de ácido abscísico (ABA) y cambios en la expresión de genes (Bray, 1993).

Las plantas cuentan con mecanismos de aclimatación en respuesta al estrés hídrico, como la producción de proteínas funcionales y regulatorias, desarrollando adaptaciones a nivel fisiológico, bioquímico y molecular que les permiten vivir bajo constante estrés por falta de agua (Yamaguchi y Shinosaki, 2006). De esta manera, la caracterización de las respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares de las plantas proporciona la base para entender el comportamiento de las plantas en estrés hídrico.

2.3.1 Señales químicas e hidráulicas

La inhibición del crecimiento foliar y el cierre estomático son las primeras respuestas de las plantas al estrés hídrico y pueden presentarse como resultado a una disminución en el contenido de agua del sustrato o suelo, inclusive cuando el contenido de humedad del suelo se encuentra dentro del intervalo de humedad aprovechable que permita un suministro libre de agua (Wilkinson, 2004).

El concepto de potencial de agua (Ψ_A) se ha usado durante muchos años para definir el estado hídrico de una planta, órgano, tejido, atmosfera o suelo (Kramer, 1974; Jones, 1992). Nos indica el movimiento del agua que se genera en una relación de mayor energía libre a otra de menor energía libre. Comostock (2002) menciona que cambios en el potencial de agua del vástago, tienen efecto en la conductancia estomática, lo que proporciona a la planta un mecanismo de respuesta de los estomas. Esto es conocido señal hidráulica.

También se ha demostrado que la raíz es capaz de percibir cambios en el contenido de humedad en el suelo lo cual genera la producción de compuestos químicos inhibidores que se transportan en el sistema vascular y regulan crecimiento e intercambio de gases en el vástago. Esto es conocido como señales químicas. (Gowing *et al.*, 1993; Davies *et al.*, 2002).

Esta señalización química donde las plantas responden a un reducción en la humedad del suelo sin experimentar cambios en las relaciones hídricas de las hojas, están siendo comprendidas mejor debido a estudios realizados en compuestos que son transportados en el xilema como: ABA, nutrimentos, pH de la savia del xilema y otros reguladores del crecimientos de las plantas (Mingo *et al.*, 2003).

Dos sistemas experimentales fueron usados para demostrar la existencia de la señalización química en plantas. Uno de ellos fue diseñado por el grupo del profesor J. Passioura en Australia, el cual consiste en cultivar una planta que posteriormente es expuesta a condiciones de sequía en una cámara de presión la cual permite aplicar una presión de equilibrio a la raíz para mantener el vástago turgente (Passioura, 1998; Stikic *et al.*, 2003). Este sistema basado en la presurización del suelo alrededor de la

raíz, ha demostrado que las señales químicas actúan independientes de las hidráulicas, presentándose un cierre estomático y una reducción en el crecimiento.

El segundo sistema que ayudó a comprender la señalización química fue diseñado en la Universidad de Lancaster, por el grupo del profesor W.J. Davies, es un sistema de raíz dividida, en el cual la raíz es dividida en dos contenedores y una parte de la raíz se somete a condiciones de sequía para estimular la señalización por estrés mientras que la otra parte de la raíz es expuesta a condiciones óptimas de humedad en el suelo para abastecer las necesidades de agua en la planta (Davies y Zhang, 1991; Stikic *et al.*, 2003).

Usando este sistema Gowing *et al.* (1990) confirmaron la existencia de señales químicas, al demostrar que las raíces bajo estrés generaban señales químicas para economizar agua en el vástago; mientras el abastecimiento de agua por la raíz que no se encuentra en estrés permite continuar con el crecimiento.

Diversos y numerosos procesos de la planta pueden ser alterados por el estrés hídrico. Un ejemplo de ello es lo reportado por Bray (2002) donde indica que la expresión genética es modificada por el déficit hídrico en *Arabidopsis thaliana*. El estrés hídrico puede considerarse complejo debido a la gran cantidad de procesos que son afectados en la planta (Chaves *et al.*, 2002). Por lo tanto, es necesario conocer las respuestas hidráulicas y químicas que genera la planta en condiciones de estrés hídrico, con la finalidad de poder hacer uso de ellas para generar técnicas que nos ayuden a economizar el uso del agua en las plantas.

2.3.2 Ácido abscísico (ABA)

El ácido abscísico (ABA) modula el crecimiento y desarrollo de las plantas particularmente en condiciones de estrés hídrico. Por lo tanto, su papel como hormona ha sido objeto de investigaciones para comprender su síntesis, localización y mecanismos de acción a nivel celular (Chandler y Robertson, 1994).

El ácido abscísico se encuentra en todas las plantas superiores y es una hormona indispensable en la regulación del desarrollo de las semillas y en la respuesta al estrés ambiental (deseccación del suelo, salinidad y frío) ya que puede ser determinante frente a estas condiciones de estrés (Busk y Pagés, 1998). Es importante mencionar que una parte de la respuesta fisiológica es regulada a través de la expresión génica.

Es conocido que las raíces expuestas a la disminución de humedad en el suelo, sintetizan más ABA que en condiciones normales, este compuesto es exportado en los folíolos (Ahmadi *et al.*, 2010b), donde la conductancia estomática disminuye con el aumento exponencial del ABA (Liu *et al.*, 2006b)

2.3.3 Acumulación de prolina

La acumulación de solutos y compuestos es una respuesta de la planta, al encontrarse en estrés hídrico durante alguna etapa de su ciclo vegetativo (Attipalli *et al.*, 2004). La prolina es uno de estos compuestos y su función ha sido asociada al mantenimiento de la turgencia de los tejidos y la conservación de la actividad enzimática en la célula (Ramanjulu y Sudhakar, 2000). Es una molécula altamente soluble en agua, se le atribuye también una función protectora de las proteínas y de los organelos celulares (Samaras, 1995).

La acumulación de prolina presente en condiciones de estrés hídrico ha sido estudiada por diversos autores (Aspinall y Paleg, 1981; Delauney y Verna, 1993; Hare y Cress, 1997; López-Ordaz *et al.*, 2011) y podría ser utilizada como criterio para seleccionar variedades con resistencia a la sequía (Singh y Rai, 1982; Verslues y Sharp, 1999).

Investigadores mencionan que el metabolismo y la acumulación de prolina dependen directamente de su degradación, la cual es catalizada por la enzima prolina deshidrogenasa a nivel celular, en la mitocondria (Rayapaty y Stewart, 1991).

Es importante mencionar que la síntesis de prolina depende ampliamente de la disponibilidad y la concentración de las formas de nitrógeno inorgánico en las plantas (Delauney *et al.*, 1993).

2.3.4 Conductancia estomática

El cierre estomático es uno de los efectos del estrés hídrico más conocido. Esta respuesta está vinculada al aumento del ácido abscísico en el xilema, aunque la intensidad de la respuesta puede ser modulada por otros factores tales como el gradiente del déficit de presión de vapor (DPV) (Tardieu y Simonneau, 1998).

Actualmente, las raíces son reconocidas como sensores de estrés hídrico, y el ABA como una señal generada en la raíz que se mueve por la corriente transpiratoria hacia las hojas donde causa el efecto de cierre de estomas (Squeo, 2007).

A nivel celular el cierre de estomas se produce cuando el mesófilo comienza a experimentar deshidratación y se inicia una síntesis y redistribución de ABA entre el apoplasto y simplasto y es transportado vía apoplasto en la corriente de transpiración hacia las células guarda (Moreno, 2009).

La disminución de agua en el suelo influye notablemente en el crecimiento, desarrollo y funcionamiento de las plantas, lo que justifica que se dedique considerable esfuerzo en tratar de explicar cómo el intercambio gaseoso y el crecimiento del vástago son limitados conforme se pierde la humedad en el suelo. El cierre estomático y la inhibición del crecimiento foliar son las primeras respuestas de las plantas a la sequía edáfica (Wilkinson, 2004).

La regulación de ABA implica tanto su transporte y concentración en las células guarda (Wilkinson y Davies, 2002). Por lo tanto, se ha planteado que la presencia de ABA en el xilema es fundamental para modular la conductancia de la hoja en condiciones de estrés, debido principalmente a cambios en el pH de la savia del xilema quien determina diferencias en la compartimentalización de este compuesto y por tanto, su acceso a los sitios de acción en las células guarda (Hartung *et al.*, 2002; Davies *et al.*, 2002).

Investigadores reportaron que las plantas que se marchitan rápidamente, es porque mantienen sus estomas abiertos durante la fase inicial del estrés, mientras que las plantas que se mantienen turgentes es porque cierran sus estomas rápidamente (Agbicodo *et al.*, 2009). Es probable que las plantas que toleran sequía sobreviven debido a que su sensibilidad estomática al cierre es mayor en condiciones de estrés (Pungulani *et al.*, 2013).

Agbicodo *et al.* (2009) señalaron que en etapas tempranas, algunas plantas cierran sus estomas y detienen el crecimiento, mientras que otras además de cerrar parcialmente sus estomas, presentan ajuste osmótico y continúan su crecimiento lentamente; lo que

demuestra que algunas plantas evitan la sequía mientras que otras la toleran, el cual parece ser el mecanismo más efectivo.

La reducción en la transpiración, regulada por el cierre estomático, es una respuesta común de las plantas al estrés por sequía que permite incrementar la eficiencia en el uso del agua (Singh y Reddy, 2011). Es evidente que una EUA mayor, con una tasa fotosintética proporcional, junto a una movilización alta de fotoasimilados hacia los órganos de interés antropogénico, pueden mejorar el rendimiento de los cultivos bajo estrés hídrico (Parry *et al.*, 2005; Singh y Reddy, 2011).

2.3.5 Citoquininas y enzimas antioxidantes

Existen otras moléculas que también pueden ser consideradas señales químicas en respuesta al estrés hídrico, estas son las citoquininas, las cuales en condiciones de estrés hídrico reducen su transporte desde las raíces hacia el vástago, y regulan el comportamiento estomático.

Resultados de algunas Investigaciones han determinado que el efecto negativo del secado parcial de la raíz en la conductancia estomática en vid pueden ser contrarrestadas con aplicaciones exógenas de la citoquinina sintética, benzil adenina (Sttoll *et al.*, 2000). Aunado a esto, Wilkinson (2004) menciona que el anegamiento y desecación del suelo promueven la síntesis de inhibidores de crecimiento foliar como el etileno, por medio de la regulación y transporte (raíz-vástago) del ACC (ácido 1-amino-ciclopropano-1-carboxílico).

Loveys *et al.* (2004) encontraron que el estrés hídrico en la raíz provoca un aumento en la síntesis de ACC, el cual es movilizado a la parte aérea, donde, se sintetiza etileno a partir de él. El etileno a su vez puede estimular la síntesis de ABA.

Existen otras enzimas que desintoxican a las plantas de los radicales libres y son sintetizadas durante condiciones de estrés hídrico. Estos radicales como el superóxido y el peróxido de hidrógeno se generan debido a un aumento en la tasa de fotorreducción del O₂ en los cloroplastos. Apel y Hirt (2004) mencionan que dentro de las principales enzimas están la superóxido dismutasa, la catalasa, el ascorbato peroxidasa, la peroxidasa y la glutatión reductasa.

Se puede resumir que los mecanismos por los cuales se dan estas respuestas no siempre son claros, por lo que las interacciones entre las hormonas pueden tener un papel importante en la fisiología de las plantas que se desarrollan en condiciones de estrés (Grossmann y Hansen, 2001).

2.4 Técnicas de riego para ahorrar agua

La agricultura representa un **70%** del uso del agua en el mundo, por lo que la innovación en tecnología en los sistemas de riego se ha convertido en una prioridad en los tiempos modernos, con el fin de optimizar la producción agrícola y, al mismo tiempo ahorrar el vital líquido.

2.4.1 Eficiencia del uso del agua

La eficiencia del uso del agua (EUA) en las plantas se puede definir como la cantidad de materia seca producida por unidad de agua consumida. Está es dependiente

principalmente de dos factores: 1) de las características de cada especie relacionadas con los procesos de asimilación de CO_2 y evapotranspiración; 2) de las condiciones ambientales en donde se desarrolla (humedad relativa, tipo de suelo, intensidad luminosa entre otros) (Medrano, 2003).

La EUA en cultivos en campo solo puede ser estimada de manera aproximada ya que es difícil conocer el agua que es realmente absorbida por las plantas y su acumulación de biomasa. Sin embargo es posible medir la EUA en cultivos herbáceos, en invernadero mediante el uso de lisímetros, los cuales son básculas que pesan una pequeña parte de la parcela donde se encuentra un cultivo homogéneo, en donde no hay zonas de suelo desnudo, de esta manera se minimiza la evaporación directa del suelo (Medrano, 2007). Por esta razón, los lisímetros actualmente son uno de los métodos más exactos al medir la eficiencia en el uso del agua. Generalmente la EUA es medida en condiciones controladas donde las plantas son cultivadas en macetas o en sistemas en donde el agua puede medirse con exactitud, lo que genera resultados con un valor experimental alto. Sin embargo, aplicar esta metodología a cultivos en campo de producción intensiva convencional, donde no es posible manejar los factores ambientales y el gasto de agua no es medido con exactitud es uno de los principales retos para los investigadores (Medrano, 2007).

El uso eficiente del agua determinado a nivel de hoja, genera un valor experimental altamente significativo, ya que este valor puede ser interpolado a una planta entera, una de las principales metodologías para determinar la EUA en las hojas es mediante la determinación del intercambio de gases, la cual permite obtener valores de la salida de agua y la entrada de CO_2 .

$$EUA = \frac{\text{moles } CO_2}{\text{moles } H_2O}$$

2.4.2 Déficit de irrigación como sistema de riego

Es una técnica en donde el volumen de agua aplicado se reduce por debajo de la evapotranspiración, pero a un nivel donde el rendimiento no se reduzca (Fererer y Soriano, 2007).

Otra definición es la propuesta por Inglés (1990) donde menciona que el déficit de irrigación (DI) es la aplicación de agua en volúmenes menores a los requisitos de la EVT, pero sin que se afecte el rendimiento de las plantas.

Una de las principales desventajas de este sistema de riego (DI) es que al restringir el suministro de agua para la planta disminuye la transpiración, en consecuencia también se reduce la producción de biomasa, además a esto la reducción del agua provoca el aumento de las sales del suelo o sustrato debido a que se reduce la lixiviación (Schoups *et al.*, 2005).

Antes de utilizar esta metodología de riego es necesario definir el uso consuntivo del cultivo con el que se va a trabajar. Penman (1948) desarrolló un método para el cálculo de la EVT, del cual se han desarrollado variantes confiables. Hoy en día la ecuación de Penman-Monteith (Monteith y Unsworth, 1990; Allen *et al.*, 1998) es el método establecido para calcular la EVT de los cultivos herbáceos, sin embargo, no es confiable para determinar la EVT en frutales y vid (Fererer y Goldhamer, 2003; Dragoni *et al.*, 2004; Testi *et al.*, 2006).

A pesar de ser una técnica dirigida a optimizar el agua de uso agrícola y que puede resolver problemas en las zonas donde este recurso es limitado, la reducción en el suministro de agua para el riego de un área impone muchos ajustes en el sistema agrícola, tanto técnicos como sociales, por lo que llevar esta metodología al campo en grandes extensiones es un reto para los investigadores.

2.4.3 Secado parcial de la raíz

Loveys *et al.* (2000) desarrollaron una técnica que llamaron secado parcial de raíz (SPR). El secado parcial de la raíz es una técnica de déficit de riego que, consiste en someter parte del sistema radical a déficit hídrico mientras la otra se mantiene irrigada. La finalidad es inducir la señalización química (compuestos inhibidores o reducción del flujo de compuestos promotores) desde las raíces parcialmente secas con la finalidad de, reducir parcialmente el vigor en el crecimiento del vástago e inhibir parcialmente la apertura estomática y de esta manera disminuir la pérdida de agua. Al mismo tiempo, las raíces bien irrigadas mantienen el follaje con buen estado hídrico (Davies y Zhang, 1991; Jones, 1992; Rojas *et al.*, 2007; López-Ordaz *et al.*, 2011).

Estudios acerca de la técnica SPR y su eficiencia en el uso de agua, mencionan que la tasa de fotosíntesis de las plantas muestra saturación en respuesta a la apertura estomática, mientras que la tasa de transpiración muestra una respuesta lineal. En ese sentido, se puede esperar que la reducción en la apertura estomática pudiera reducir la pérdida de agua sin afectar la tasa de fotosíntesis. Al lograr esto, el uso eficiente del agua que es calculado en función al carbono ganado por molécula de agua perdida, se incrementa (Kang y Zhang, 2004).

2.4.4 Riego mediante sondas de capacitancia, FDR

Un buen manejo del agua de riego se basa en optimizar la distribución espacial y temporal del agua aplicada con el objeto de incrementar la producción y calidad de los cultivos. Las buenas prácticas de irrigación están diseñadas para mantener un adecuado nivel de humedad y minimizar la contaminación, como la lixiviación del agua y nutrimentos por debajo de la zona radical (Fares y Alva, 2000).

Actualmente el principal problema en los sistemas de riego es generalizar acerca de la frecuencia de riego porque hay innumerables factores que deben considerarse entre ellos, cultivo, profundidad y distribución radical, las curvas características de retención de humedad del suelo, patrón de humedad del goteo y grado de automatización, entre otros (Clark *et al.*, 1995). El sistema de riego mediante sondas de capacitancia (FRD, por sus siglas en inglés (Frequency Domain Reflectometry), es una herramienta que nos ayuda a determinar la cantidad y frecuencia de riego, ésta se basa en la medida de la constante dieléctrica del medio suelo-aire-agua, cuya determinación se realiza a través de su capacitancia, la medida de capacitancia nos da la constante dieléctrica y a partir de ésta, el contenido de agua en el suelo. La señal de radiofrecuencia se convierte en porcentaje de humedad volumétrica mediante la ecuación de calibración propuesta por Paltineanu y Starr (1997).

La sonda de capacitancia es un sistema de alta tecnología para monitorear la humedad de los suelos o sustratos. Investigadores demostraron que la programación eficiente del riego a través de sondas de capacitancia, FRD y el monitoreo del clima en tiempo real, es una herramienta indispensable en la gestión sustentable de los ecosistemas agrícolas, permitiendo una eficiencia mayor en el uso del agua (Orozco, 2010).

2.4.5 Sistema recirculante

Actualmente, los sistemas de cultivos sin suelo utilizan técnicas de fertiriego que producen pérdidas de hasta el 50% de agua y fertilizantes por lixiviación (Plaza *et al.*, 2006). El sistema de producción recirculante es una alternativa para ahorrar agua y fertilizantes.

Esta técnica es conocida como NFT (por sus siglas en inglés, Nutrient Film Technique) y fue desarrollada en el “Glasshouse Crop Research Institute”, en Inglaterra por Allen Cooper en el año 1965.

Es muy utilizada en el mundo principalmente para el cultivo de hortalizas de hojas como berros, lechugas, acelgas y especias como albahaca y menta, aunque también se producen frutos como chile dulce, tomate, pepino, entre otros (Soto, 2006).

El sistema NFT es una técnica en donde las plantas son cultivadas con su sistema radical sumergido en una lámina de agua, por la cual circula continuamente la solución nutritiva. Las funciones de la circulación son dos: evitar que la solución nutritiva esté lejos de las raíces y favorecer la aireación (Noguera-García, 1993).

La principal ventaja de este sistema es el ahorro de agua y fertilizantes, no requiere sustrato, además permite producir cultivos que requieren gran cantidad de agua (Sánchez *et al.*, 1988).

2.5 Sistema cero drenaje

El cultivo convencional en hidroponía, ya sea en bancales, en macetas u otro tipo de contenedor, esta adecuado para un manejo a solución perdida, es decir, sistema abierto en el que el exceso de solución se elimina directamente al suelo. Sin embargo,

el gasto de agua excesivo y el incremento en el costo de fertilizantes asociados a esta técnica de cultivo y el efecto ambiental negativo de la lixiviación sobre suelos y acuíferos, hacen necesario el estudio del desarrollo de cultivos en sistemas cerrados (Plaza *et al.*, 2006). Con base en estas necesidades surge el sistema hidropónico cero drenaje, del cual no se dispone amplia información pero ya ha sido investigada por distintos científicos (Bacci, 2008; Pardossi, 2009, López-Ordaz *et al.*, 2011). Esta técnica es una alternativa para minimizar costos de fertilización y mejorar la EUA, la cual consiste en manejar el cultivo en un contenedor cerrado para evitar la lixiviación, donde los principales factores condicionantes son la conductividad eléctrica, la cual se monitorea para evitar que la acumulación de sales llegue a concentraciones que reduzcan el crecimiento del cultivo; y la evapotranspiración que debe ser medida de manera exacta para reponer el gasto de agua de la planta y así evitar sobresaturación dentro del sistema cerrado.

2.5.1 Riesgos potenciales que se pueden generar en el sistema cero drenaje

2.5.1.1 Calidad del agua

El tipo de suelo y sus características físico-químicas es fundamental para el éxito de los cultivos a campo abierto, de igual forma en los sistemas hidropónicos abiertos o cerrados es esencial la calidad del agua desde el punto de vista microbiológico y química. Respecto a la calidad química es necesario usar agua con contenido bajo en sales, las cuales pueden generar desbalance en la solución nutritiva por ejemplo, el contenido de calcio o magnesio (mayor a 30 ppm) obligan a realizar correcciones de la solución nutritiva por tratarse de elementos esenciales. Por otra parte, elementos como

el sodio o cloro en forma excesiva pueden ser tóxicos para la planta. En todos los casos es indispensable realizar un análisis químico del agua, para conocer la cantidad de sales totales y evitar problemas de toxicidades, deficiencias o acumulación de sales (Gilsanz, 2007).

2.5.1.2 Conductividad eléctrica, CE

En los sistemas cerrados, el manejo de la solución nutritiva es muy importante para la obtención de rendimientos altos y de calidad, pues es la vía a través de la cual se proporcionan los nutrimentos necesarios para el desarrollo de la planta (Carrasco *et al.*, 2004). La conductividad eléctrica es un estimador indirecto del potencial osmótico, y determina el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos (Bugarín *et al.*, 1998). Por lo tanto, es muy importante mantener valores que no afecten negativamente el desarrollo del cultivo. Valores altos de la CE (debido al aumento de las sales solubles) disminuye la energía libre del agua, afectando la absorción principalmente de los macronutrientes (Bautista, 2010).

En los sistemas cerrados es de suma importancia el monitoreo de la CE, ya que ésta se acumula en los estratos inferiores del contenedor y cuando rebasa las concentraciones de tolerancia del cultivo puede causar daños por salinidad, deficiencias de elementos o toxicidades y reducción del rendimiento (Carrasco y Izquierdo, 1996).

Niveles altos de CE afectan los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas, disminuyen el porcentaje de germinación y la longitud de la raíz, los tallos desarrollan menor altura, las hojas presentan quemaduras en los bordes, y como consecuencia

menor producción de fotoasimilados, además se favorecen las deficiencias de calcio en los frutos (Goykovic y Saavedra, 2007).

2.5.1.3 Elección del sustrato

Un sustrato es un material sólido distinto del suelo, puede ser natural, sintético, mineral u orgánico, que permita el anclaje del sistema radical de la planta, además puede o no proveer nutrimentos (Urrestarazu, 2000).

Las características principales para elegir un sustrato son:

Propiedades físicas, que son determinadas por la estructura interna de las partículas, las principales son la granulometría, la densidad, la capacidad de retención de agua y la estructura (Pastor, 1998; Ansorena, 1994; Urrestarazu, 2000; Terrés *et al.*, 2001).

La reacción química de un sustrato se define como la transferencia de materia desde el sustrato y solución nutritiva a la planta a través de la raíz. Esta transferencia es bilateral entre el sustrato y la solución nutritiva y puede ser debida a reacciones de diferente naturaleza. Las propiedades químicas están representadas por reacciones que producen biodegradación de los componentes del sustrato, como el pH y CE; es por ello, que son más usados los sustratos inertes en comparación con los químicamente activos (Urrestarazu, 2000).

III OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1 OBJETIVO GENERAL:

- Determinar las respuestas fisiológicas y la eficiencia de uso de agua en *Capsicum annuum* L. en un sistema protegido e hidropónico con déficit de riego y drenaje cero.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la conductancia estomática, acumulación de prolina y rendimiento en *Capsicum annuum* L. en un sistema hidropónico con déficit de riego y drenaje cero.
- Determinar la eficiencia de uso del agua de *Capsicum annuum* L. en un sistema hidropónico con déficit de riego y drenaje cero.

3.3 HIPÓTESIS

La conductancia estomática, acumulación de prolina y el rendimiento en *Capsicum annuum* L. no son afectados por el estrés hídrico generado por el déficit de riego en un sistema hidropónico con drenaje cero.

La eficiencia de uso del agua en *Capsicum annuum* L. se incrementa por el estrés hídrico generado por el déficit de riego en un sistema hidropónico con drenaje cero.

IV MATERIALES Y METODOS

4.1 Ubicación del experimento

El experimento se llevó a cabo en el Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo México (2250 msnm, 19° 21' latitud norte y 98° 54' latitud oeste) en el ciclo de primavera–verano 2013, en condiciones de invernadero e hidroponía, el invernadero es de tipo cenital, sin control de temperatura y humedad relativa.

4.2 Material Vegetal, siembra y manejo de plántulas

Se utilizaron semillas de chile ancho (*Capsicum annuum* L.) híbrido Capulín F1 de la empresa Harris Moran, las cuales se pusieron a germinar en charolas de polietileno de 200 cavidades (una semilla por cavidad), previamente llenas con “peat moss tourbe”, que fue saturado de agua. La siembra se llevó a cabo el 16 de Abril. Las charolas fueron cubiertas con papel periódico que se humedeció diariamente durante 14 d para evitar la deshidratación de la superficie del sustrato y favorecer la germinación. Cuando inició la emergencia (12 de Marzo 2013) el periódico fue retirado y el riego se aplicó por subirrigación alternando agua y solución nutritiva.

4.3 Trasplante

El trasplante se realizó a los 41 d después de la siembra (DDS) (6 de junio), cuando las plantas presentaban la quinta hoja verdadera. Se seleccionaron las plantas más vigorosas y uniformes, y se trasplantaron en bolsas de polietileno de 40 x 40 cm, las cuales se llenaron con 9 kg de roca volcánica porosa (tezontle), con una granulometría de: mayor de 2 mm, 97.35%; 0.84 mm, 2.10%; 0.059 mm, 0.07%; 0.420 mm, 0.01 %,

0.250 mm y menor 0.025, 0.35%. La retención de humedad fue de 1.5 L que corresponde al 16.6 % de la porosidad total.

4.4 Labores culturales

Durante el crecimiento de las plantas su arquitectura se manejó a dos tallos, lo cual se obtuvo con podas continuas de los brotes apicales y yemas vegetativas axilares. Se mantuvieron erectas con tutores de rafia, los cuales fueron colocados previamente en la estructura del invernadero a lo largo de la línea de plantas. Durante la etapa reproductiva, las plantas se movieron constantemente para promover una buena polinización. Durante el desarrollo del cultivo se monitoreó la presencia de enfermedades y plagas, además de que se hicieron aplicaciones preventivas de fungicidas, insecticidas, bactericidas para prevenir y corregir (mosquita blanca, trips, cenicilla y pudriciones radicales) (Cuadro 1). Se complementó la nutrición vegetal con micronutrientes y macronutrientes foliares como calcio, boro, zinc, fierro en las diferentes etapas fenológicas.

Cuadro 1. Agroquímicos utilizados para el control de plagas, enfermedades y para la fertilización foliar durante el desarrollo de chile ancho (*Capsicum annuum* L.) híbrido Capulín F1.

Producto	Etapa Fenológica o función	Dosis	Aplicación
Previcur-Bayer Fungicida agrícola solución acuosa	Preemergencia	1 mL L ⁻¹	
Promess-Helm Fungicida solución concentrada	Al aparecer las primeras hojas verdaderas	1.5 mL L ⁻¹	Foliar
Alleato-Helm Fungicida gránulos dispersables	Control de cenilla de la hoja (<i>Leveillulla taurica</i> – <i>oidiopsis spp.</i>)	5 g L ⁻¹	Foliar
Pointer 250-Cheminova	Control de cenilla de	1 mL L ⁻¹	Foliar

Fungicida Suspensión Concentrada	la hoja (<i>Leveillulla taurica –oidiopsis spp.</i>)		
Applaud 40-Sojitz Insecticida suspensión concentrada	Control mosquita blanca (<i>Bemisia tabaci</i>)	1.51 mL L ⁻¹	Foliar
Warton-Arysta ARYSTA Insecticida suspensión acuosa	Control mosquita blanca (<i>Bemisia tabaci</i>)	1.5 mL L ⁻¹	Foliar
Stick-Bug ALTERNA Pegamento para control de plagas	Control mosquita blanca (<i>Bemisia tabaci</i>)		
Nutri plant Plus Fertilizante Foliar liquido	Desarrollo , floración y maduración	2 mL L ⁻¹	Foliar
Sagaquel Triple 33 Fertilizante Foliar liquido(Fe, Z, Mn)	Corrección de deficiencias	2 mL L ⁻¹	Foliar

Se monitoreo cada cinco días la conductividad eléctrica (CE, $dS m^{-1}$) para evitar una concentración en el sustrato, esta lectura fue tomada en 3 estratos de la maceta en los diferentes tratamientos, con un reflectómetro de dominio de tiempo TDR (HH2 Moisture Meter, Wet Sensor type Wet-2, Divices Ltd., Cambridge), el cual cuantifica la humedad del suelo, basado en la medida del retraso (eco) de una señal eléctrica enviada a través de un material con agua, en el cual una onda emitida sufrirá una reflexión cada vez que se encuentre ante un cambio de medio. Estas lecturas iniciaron a los 40 d después del trasplante, al iniciar los tratamientos (18-julio 2013).

4.5 Riego y fertilización

Se utilizó un sistema de riego en líneas con goteros antidrenaje, se colocaron dos por maceta, de los cuales se obtuvo el gasto promedio por minuto en cada línea de riego. Los goteros se encintaron de su base a la punta con cinta de aislar, con la finalidad de

evitar el contacto del agua con las capas de tezontle en la superficie y así asegurar que el agua irrigada estuviera presente en el sistema radical de la planta.

Como solvente para los fertilizantes se utilizó agua de la llave con una conductividad de 0.43 dS m^{-1} , la cual contiene las siguientes sales en meq L^{-1} , aniones ($\text{HCO}_3 = 2.28$, $\text{Cl} = 2.30$, $\text{SO}_4 = 0.38$) y cationes ($\text{Ca} = 1.9$, $\text{Mg} = 1.7$, $\text{Na} = 1.0$, $\text{K} = 0.05$).

Se utilizó la solución nutritiva Steiner (1984) en dos concentraciones y en dos etapas del cultivo. La primera etapa comprendió 30 d (8 Agosto 2013) y se utilizó la solución con un potencial osmótico (Ψ_o) de -0.036 MPa equivalente a una CE de 1.0 dS m^{-1} . La segunda etapa comprendió 104 d, donde se incrementó la concentración de las sales a un Ψ_o de -0.072 MPa equivalente a CE de 2.0 dS m^{-1} hasta el final del ciclo (27 octubre). Los fertilizantes (g L^{-1}) usados para preparar la solución nutritiva Steiner (1984) se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Cantidad de los fertilizantes usados para preparar la solución nutritiva Steiner en las dos concentraciones.

Fertilizantes simples	CE 1.0 dS m^{-1} g L^{-1}	CE 2.0 dS m^{-1} g L^{-1}
H_2SO_4 (98%)	0.0255 ml L^{-1}	0.051 ml L^{-1}
H_3PO_4	0.0335 ml L^{-1}	0.067 ml L^{-1}
K_2SO_4	0.123	0.246
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.167	0.335
KNO_3	0.202	0.404
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.472	0.944
$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.006	0.006
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.002	0.002
H_3BO_3	0.002	0.002
$\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.001	0.001
H_3BO_3	0.009	0.009
QUELATO-Fe	0.021	0.021

4.6 Factores ambientales

Se registró humedad relativa (HR), radiación fotosintéticamente activa (PAR) y temperatura ambiental cada hora durante todo el tiempo que duro el experimento con un “data logger”, (watchdog 400 serie data logger, Spectrum Technologies, Inc. U.S.A).

4.7 Tratamientos y diseño experimental

Se establecieron tres tratamientos los cuales consistieron en diferentes niveles de humedad aprovechable residual en el sustrato.

Tratamiento I o Testigo (T1): sistema con drenaje del 40%, el cual se regó al evapotranspirar un 20% del total de la humedad aprovechable del sustrato.

Tratamiento II (TII): se permitió que se evapotranspirara el 30% de la humedad aprovechable en el sustrato (cuando llego al 70%) y en ese momento se rego, pero se llevó solo hasta el 90% de humedad aprovechable (90-70%). Las bolsas no tuvieron drenaje, se manejaron como un sistema cerrado.

Tratamiento III (TIII): se permitió que se evapotranspirara el 40% de la humedad aprovechable en el sustrato (cuando llego al 60%) y en ese momento se regó pero se llevó solo hasta el 80% de humedad aprovechable (80-60%). Las bolsas no tuvieron drenaje, se manejó como un sistema cerrado.

Los tratamientos se iniciaron llevando a saturación el sustrato, después se realizó una perforación en cada maceta con un sacabocado de 1 cm de diámetro, se esperó 24 h para que se drenara el exceso de agua. Una vez que alcanzó la capacidad de campo se taparon las perforaciones con segmentos previamente cortados (2 cm²) de cinta adhesiva de los cuales se aseguró que estuvieran adheridos completamente a los

orificios de la maceta. De esta manera todos los tratamientos partieron del mismo contenido de humedad. En ese momento se colocó una maceta al azar por tratamiento sobre una báscula con capacidad para 40 kg y una precisión de 5 g (marca Torrey, modelo PCR), la cual registró el peso de la maceta, peso de la planta y peso de una estructura de acero que se usó como sostén para la planta (Fig. 4). Esta suma de pesos se taró para posteriormente regar y alcanzar la humedad planteada en los tratamientos. Cuando la humedad se perdió por evapotranspiración, se repitió el mismo procedimiento durante todo el ciclo del cultivo, de esta forma la biomasa generada por el crecimiento de la planta no influyó en las lecturas de la báscula.

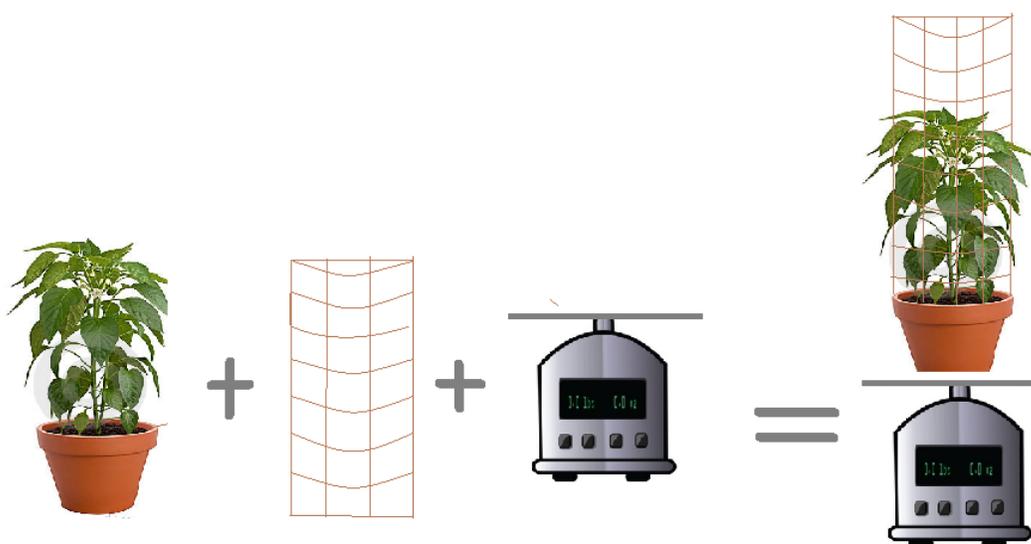


Figura 4. Sistema usado para registrar la pérdida de agua por evapotranspiración en *Capsicum annuum* L.

Los tratamientos se distribuyeron en un diseño experimental completamente al azar y se aplicaron a grupos de 96 plantas con dos repeticiones, con un total de 580 unidades experimentales, el diseño fue adecuado con base en el sistema de riego del invernadero (Figura 5).

Los datos fueron analizados con el paquete estadístico SAS y la representación gráfica de los datos se realizó con el programa SigmaPlot de Jandel Scientific (2001, versión 7.1).

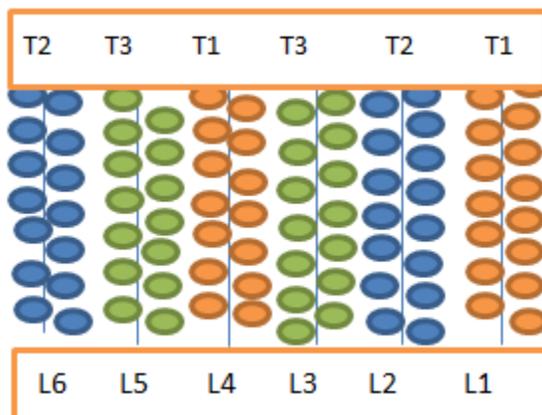


Figura 5. Distribución de los grupos de plantas y los tratamientos.

4.8 Variables de estudio

4.8.1 Potencial de agua

El potencial de agua (Ψ_A) de la hoja se determinó en hojas jóvenes completamente desarrolladas, usando una bomba de presión tipo Scholander (Soil moisture, Santa Bárbara, California, USA). Se cortó una hoja desde la base del peciolo en forma tangencial utilizando una navaja de un filo, ésta se colocó dentro de la cámara y se selló herméticamente, posteriormente se presurizó lentamente la cámara con gas nitrógeno. A medida que la presión incrementó, llegó un punto en el que se observó exudación de la savia de los haces vasculares del xilema en el extremo cortado del peciolo. La presión positiva requerida para lograr lo anterior, es igual pero con signo opuesto al potencial hídrico de la planta (balance de presión).

4.8.2 Conductancia estomática

Se evaluó la conductancia estomática en hojas jóvenes bien desarrolladas con un porómetro de difusión (Leaf Porometer SC-1 Decagon devices, Inc. U.S.A), las lecturas se hicieron a los 70, 90, 104 d después del trasplante, en condiciones de cielo despejado a las 13:00 h.

4.8.3 Contenido de Prolina en hojas

El contenido de prolina se determinó con el método colorímetro descrito por Bates *et al.* (1973), en 50 mg de muestras liofilizadas (Labconco Freeze Dry System/Freezone 4.5) de un foliolo joven completamente desarrollado. La concentración de prolina se calculó mediante una curva de calibración de este aminoácido, en la cual se prepararon diferentes concentraciones de prolina en un intervalo de 20-800 nmoles mL⁻¹. Las determinaciones se realizaron en un espectrofotómetro (SPECTRONIC 21D, MILTON ROY.) a una longitud de onda de 520 nm.

4.8.4 Área foliar

Previo al secado de las hojas se determinó el área foliar (m² por planta) con un integrador de área foliar (modelo LI-3100, LI-COR, Inc. Lincoln, Nebraska USA,).

4.8.5 Biomasa (fruto, hojas, tallo y raíz)

Se hicieron cinco muestreos destructivos a los 75, 90, 104, 120, 134 d después del trasplante, en los cuales se separaron los órganos de la planta (fruto, hoja, tallo y raíz), a éstos se les determinó el peso de la materia fresca en una balanza con una precisión de 0.1 g (modelo Adventurer Pro, marca Ohaus). Posteriormente fueron

secados en una estufa de aire forzado a 70 °C hasta peso constante, y se pesaron en una balanza electrónica.

4.8.6 Eficiencia de uso de agua

Se contabilizó el gasto total de agua por planta en cada uno de los tratamientos, y se comparó con el peso de frutos por planta en las distintas cosechas (95, 110 y 140 d después del trasplante), en los diferentes tratamientos de humedad aprovechable residual en el sustrato.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Potencial de agua

El potencial de agua en las hojas en los tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR), fluctuó entre tratamientos y los cuatro muestreos. En general, los potenciales de agua mayores se observaron en los tratamientos TI (drenaje) y TII (90-70%, HAR) en comparación al tratamiento TIII (80-60%, HAR). En el TI y los muestreos 1 y 4, los potenciales de agua fueron superiores estadísticamente a los de TII y TIII; mientras que en el TII y los muestreos 1, 2 y 4, los potenciales de agua fueron mayores estadísticamente con respecto a los del TIII (Figura 6A). Al calcular el promedio de los cuatro muestreos, se observó que los potenciales de agua en los TI y TII fueron superiores estadísticamente a los de TIII (Figura 6B).

López-Ordaz *et al.* (2011) obtuvieron resultados similares al evaluar diferentes niveles de estrés hídrico para estimular el mecanismo de señalización en la raíz e incrementar la eficiencia en el uso del agua en jitomate (*Lycopersicon esculentum*), los valores del potencial de agua a los 79 y 118 d después del trasplante (ddt) fueron similares en los tratamientos con respecto al testigo. Wakrim *et al.* (2005) al evaluar déficit de irrigación, secado parcial de la raíz y plantas sin déficit de riego, encontraron que las plantas sin déficit presentaron una ligera tendencia de valores mayores de potencial de hídrico, sin embargo, el análisis estadístico no mostró diferencias significativas. Por su parte Stikic *et al.* (2003) al evaluar el potencial de agua en tratamientos con distintos niveles de humedad en un sistema de secado parcial de la raíz (SPR) tampoco encontraron diferencias significativas para el potencial de agua. Desde los primeros informes hechos por Daring *et al.* (1997), Gowing *et al.* (1990) y Loveys *et al.* (2000), se ha

observado la inhibición del intercambio de gases y crecimiento sin presentarse cambios en el potencial hídrico del vástago. Es muy probable que en el tratamiento TII de esta investigación, la señalización entre raíz y tallo sea la responsable de mantener los valores de variables fisiológicas muy similares al tratamiento testigo. En el caso del TIII, es probable que la combinación de ambas señalizaciones (química e hidráulica), regularan la respuesta de este tratamiento.

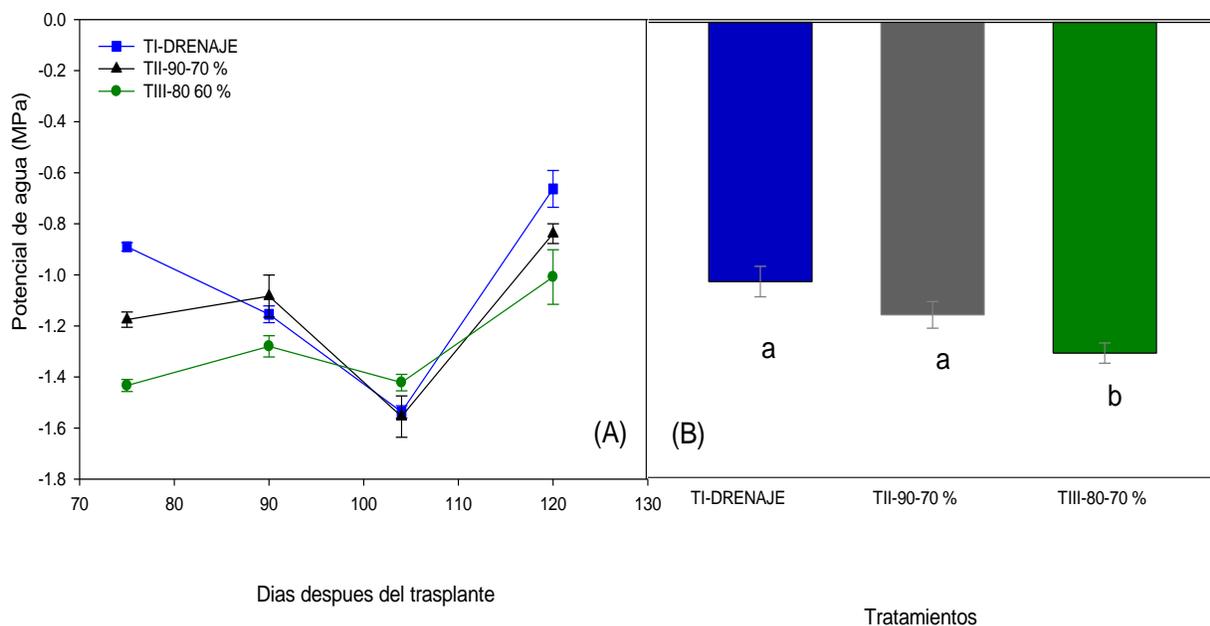


Figura 6. Potencial de agua (MPa) en hojas de chile ancho (*Capsicum annum* L.) en cuatro muestreos y tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII 80-60% de HAR. Cada punto es el promedio de seis repeticiones \pm error estándar **(A)**. Las barras indican el promedio de los cuatro muestreos \pm error estándar y significancia de tratamientos (Tukey $P > 0.05$) **(B)**.

5.2 Conductancia estomática

En los valores de la conductancia estomática se observó una reducción gradual en los muestreos y en los tres tratamientos estudiados. El tratamiento TI y TII en los tres muestreos presentaron valores significativamente mayores de conductancia estomática en comparación con los del tratamiento TIII (Figura 7A). El análisis estadístico realizado con el promedio de los tres muestreos confirmó esta diferencia (Tukey $P > 0.05$) (Figura 7B).

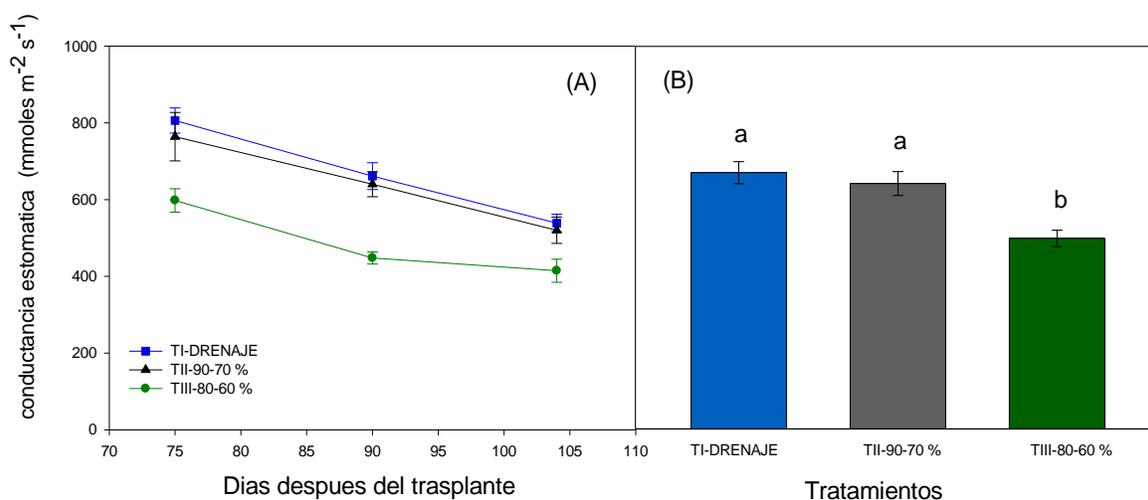


Figura 7. Conductancia estomática ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en hojas de chile ancho (*Capsicum annuum* L.) en tres muestreos y tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Cada punto es el promedio de seis repeticiones \pm error estándar (A). Las barras indican el promedio de los tres muestreos \pm error estándar y significancia de tratamientos (Tukey $P > 0.05$) (B).

Estos resultados indican que el nivel de humedad residual utilizado en el TII no afectó la conductancia estomática. Por el contrario en el TIII existió una reducción del 25.65% en comparación al tratamiento testigo. Es probable que esta reducción en la conductancia estomática sea el resultado de la disminución del potencial de agua de las hojas, que dependiendo de la magnitud, podría afectar negativamente el

rendimiento. El cierre parcial de los estomas en sistemas de raíz dividida sin efecto en el potencial de agua del vástago, ha sido documentado ampliamente y se ha demostrado que es debido a la generación de compuestos químicos en la raíz que experimenta déficit hídrico y son transportados a través del sistema vascular para regular apertura estomática y crecimiento (During *et al.*, 1997; Loveys *et al.*, 2000; Davies *et al.*, 2002). Resultados semejantes fueron encontrados en papa por Ahmadi *et al.* (2010a), al evaluar déficit de irrigación (DI), secado parcial de la raíz (SPR) y plantas bien regadas como testigo, consignaron que la conductancia estomática en hojas de plantas en DI y SPR, fue menor que en las plantas bien regadas.

Por su parte, Liu *et al.* (2006b) al evaluar respuestas fisiológicas en el secado parcial de la raíz en invernadero en papa y Kirda *et al.* (2005) en estudios de rendimiento en maíz bajo déficit de irrigación en campo, reportaron diferencias significativas en la conductancia estomática.

Los resultados de esta investigación indican que el TII no afectó la inhibición de la apertura estomática. El TIII tuvo un efecto significativo en esta variable pero no se puede definir si ésta fue el resultado de la disminución en el potencial de agua del vástago o a la señalización generada en la raíz por efecto de tratamiento.

5.3 Contenido de prolina en hojas

El contenido de prolina en hojas de *Capsicum annum* L. en los tratamientos de humedad aprovechable residual HAR presentó diferencias en los cuatro muestreos realizados (Figura 8A). El TIII, presentó el mayor contenido de prolina ($\text{nmol g}^{-1} \text{ m.s}$) que los TI y TII. El análisis estadístico realizado al promedio de los cuatros muestreos

hizo evidente estas diferencias (Tukey $P>0.05$) (B). La acumulación de prolina como resultado de un aumento en los niveles de estrés han sido estudiados anteriormente (Yoshiba *et al.*, 1997; Heuer and Nadler, 1998). Resultados similares a los de esta investigación han sido reportados en diferentes cultivos, por ejemplo, Wagner *et al.* (2003) en hojas de naranja valencia, con tratamientos de humedad en el suelo planteados con base en diferentes intervalos de riego (5, 10 y 15 d), encontraron que las plantas desarrolladas en menor humedad aprovechable acumularon mayor contenido de prolina que las plantas bien regadas; por su parte, Sarker *et al.* (2005), en hojas de berenjena cultivada en diferentes niveles de humedad del suelo en macetas en invernadero, concluyeron que existe una estrecha relación entre el contenido volumétrico del agua en el suelo y la síntesis de prolina, al aumentar la concentración de este osmolito conforme disminuye la humedad aprovechable del suelo.

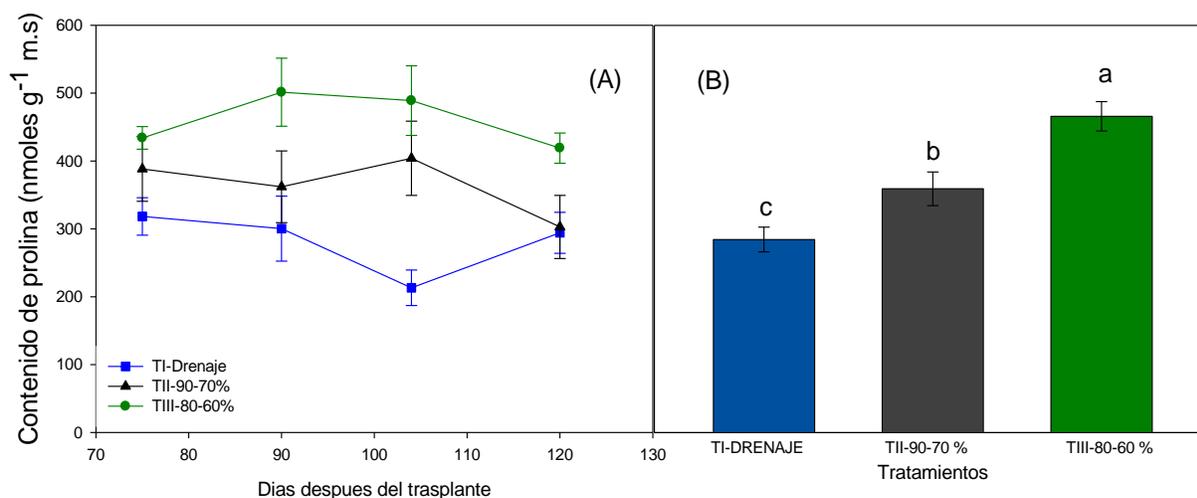


Figura 8. Contenido de prolina en hojas de chile ancho (*Capsicum annuum* L.) en cuatro muestreos y tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Cada punto es el promedio de seis repeticiones \pm error estándar (A). Las barras indican el promedio de los cuatro muestreos \pm error estándar y significancia de tratamientos (Tukey $P>0.05$) (B).

No se conoce con exactitud la función de la prolina, y algunos investigadores que tratan de dar una explicación, entre ellos, Brevedan *et al.* (1973) y Jerez (1987), señalaron que la acumulación de prolina es un síntoma claro de la respuesta de la planta al deterioro por el déficit hídrico y no por su adaptación. Sin embargo, Lutts *et al.* (1999) consideraron que la prolina es un metabolito involucrado en la resistencia al estrés, por lo que se acumula con mayor frecuencia en las plantas que se encuentran en condiciones de estrés de agua y salinidad. Por otro lado, Verslues y Sharp (1999), mencionaron que el aumento en la síntesis de prolina en hojas, es para que ésta actúe como un agente osmoprotector durante el estrés.

Lo interesante de los resultados de esta investigación es que se pone de manifiesto la diferencia en la sensibilidad del potencial hídrico, la conductancia y el contenido de prolina en respuesta a los tres tratamientos. En este caso, los tres tratamientos fueron diferentes y estadísticamente significativos, lo cual indica que el incremento en la concentración de prolina en el TII fue el resultado de algún tipo de señalización generada en la raíz con un efecto en el vástago. Para el caso de TIII podría ser la misma explicación, aunque en este caso se observó una disminución de su potencial de agua el cual podría ser responsable parcial del incremento de la concentración de prolina.

5.4 Área foliar

El área foliar varió en los tres y los cinco muestreos (Figura 9A). El tratamiento TIII presentó menor área foliar en comparación con los tratamientos TI y TII, los cuales obtuvieron promedios similares. Al obtener el promedio en los cinco muestreos esta diferencia fue más clara y estadísticamente significativa (Figura 9B). Estos resultados contrastan a los presentados por Chamú-Baranda *et al.* (2011) que evaluó las respuestas fisiológicas en pimiento morrón en tres tratamientos de humedad aprovechable residual (SPR 80-80%, HAR; SPR 80-30%, HAR; testigo con sistema radical completo $\geq 80\%$, HAR) donde encontró, que los tratamientos de HAR no presentaron diferencias significativas en comparación con el testigo en el área foliar de las plantas. Sin embargo diversos investigadores demostraron que tratamientos con diferente humedad aprovechable residual del suelo se afectó significativamente el área foliar, en amaranto (Liu y Stutzel, 2003), olivo (Guerfela *et al.*, 2009), *S. lycopersicum* (Campos *et al.*, 2009) y *Jatropha curcas* (Finia *et al.*, 2013).

La reducción del área foliar en el TIII pudo haber reducido la pérdida de agua durante el ciclo de cultivo en conjunción con la inhibición de la apertura estomática de este tratamiento, al parecer este efecto es el resultado principalmente de la afectación del potencial de agua del vástago.

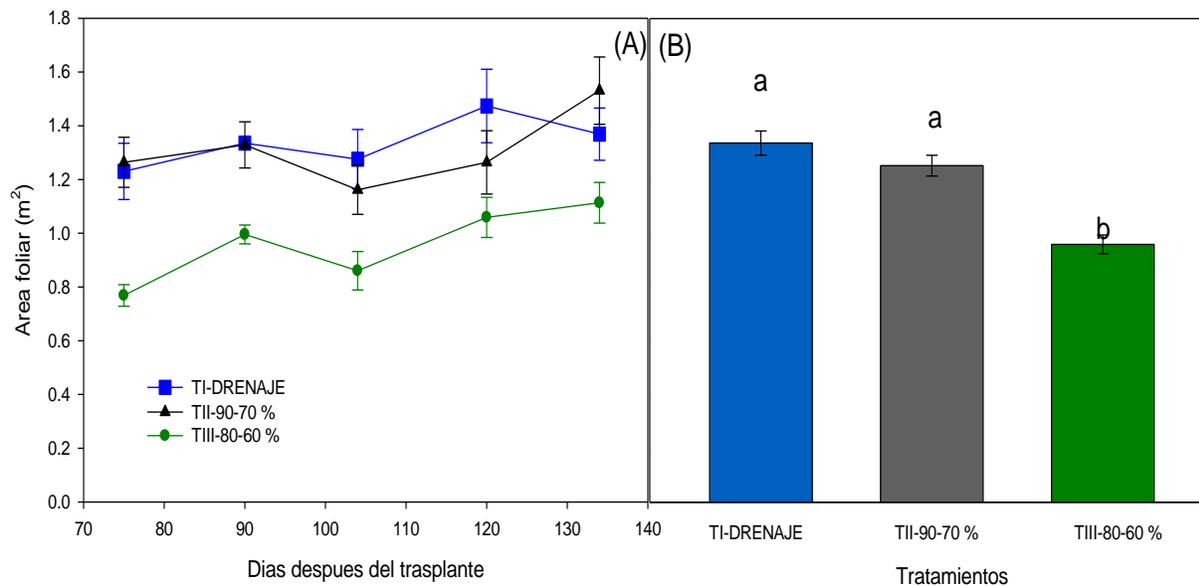


Figura 9. Área foliar (m²) de plantas de chile ancho (*Capsicum annuum* L.) en cinco muestreos y tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Cada punto es el promedio de seis repeticiones \pm error estándar **(A)**. Las barras indican el promedio de los cinco muestreos \pm error estándar y significancia de tratamientos (Tukey $P > 0.05$) **(B)**.

5.5 Biomasa fresca y seca (fruto, hojas, tallo y raíz)

La biomasa fresca y seca (fruto, hojas, tallo y raíz) en los tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR) fluctuó en los cinco muestreos realizados (Figura 10 y11).

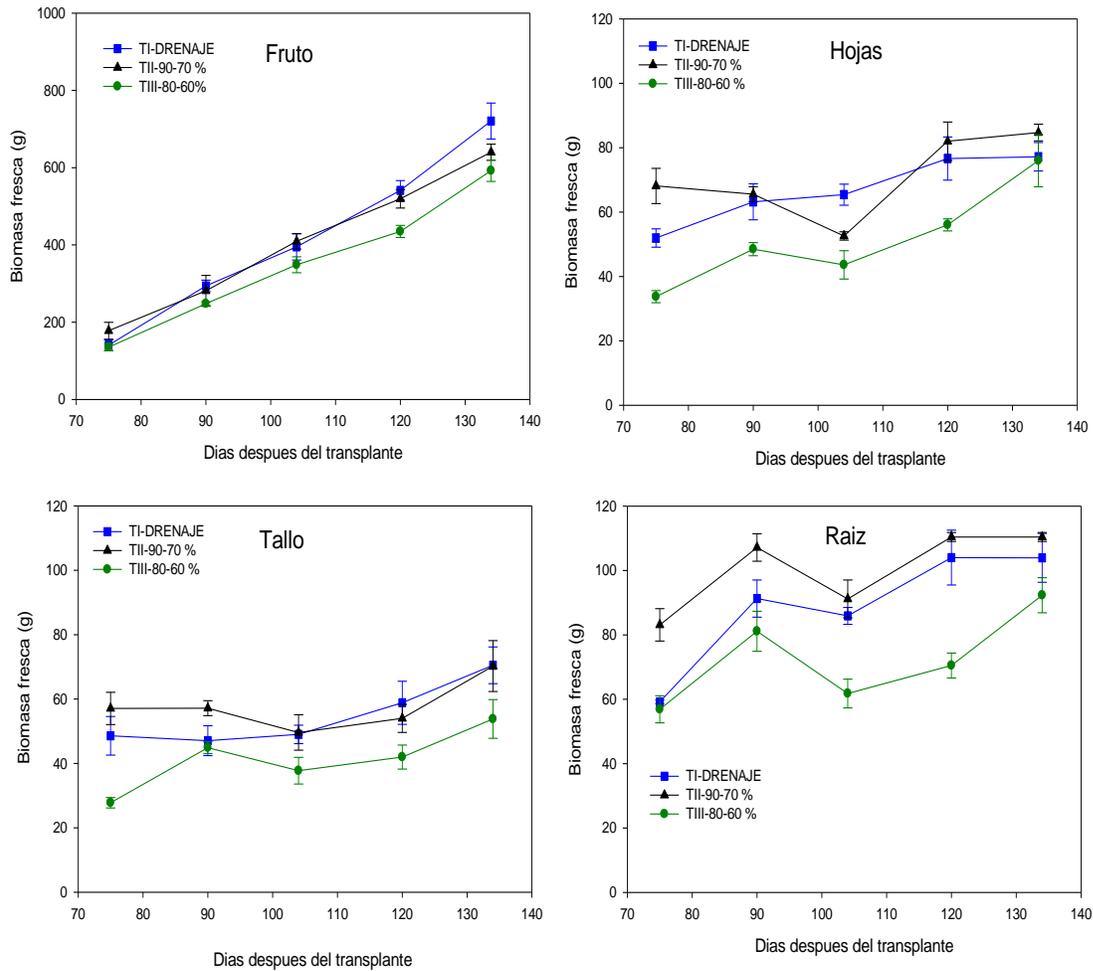
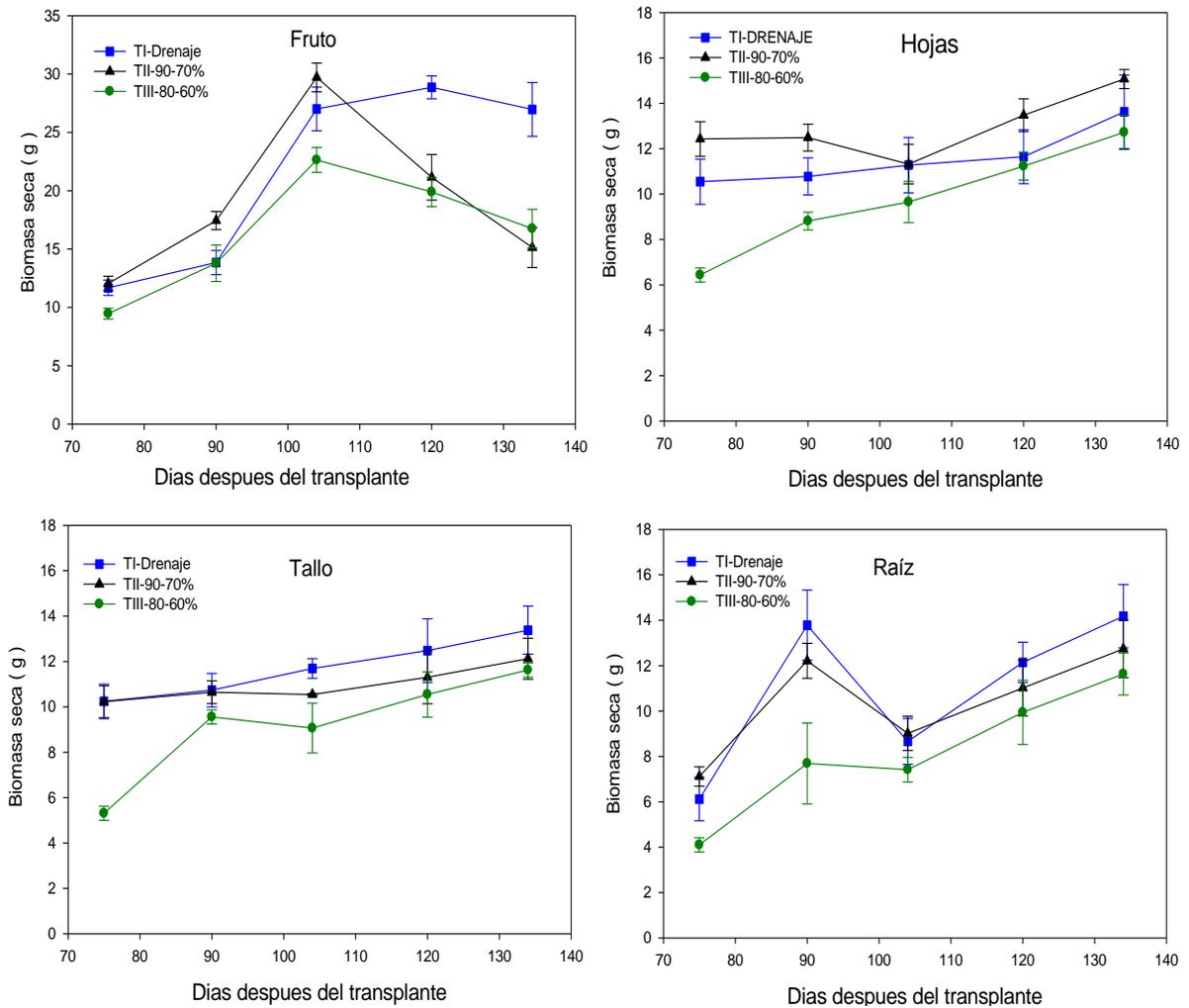


Figura 10. Biomasa fresca (fruto, hojas, tallo y raíz) de plantas chile ancho (*Capsicum annuum* L.) en cinco muestreos y tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Cada punto es el promedio de seis repeticiones \pm error estándar.



Figuran 11. Biomasa seca (fruto, hojas, tallo y raíz) de plantas chile ancho (*Capsicum annuum* L.) en cinco muestreos y tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Cada punto es el promedio de seis repeticiones \pm error estándar.

En todos los muestreos, la biomasa fresca en los diferentes órganos de la planta del TIII fueron menor que los TI y TII (Figura 10). Al realizar el análisis estadístico esta diferencia fue más clara y significativa (Figura 12).

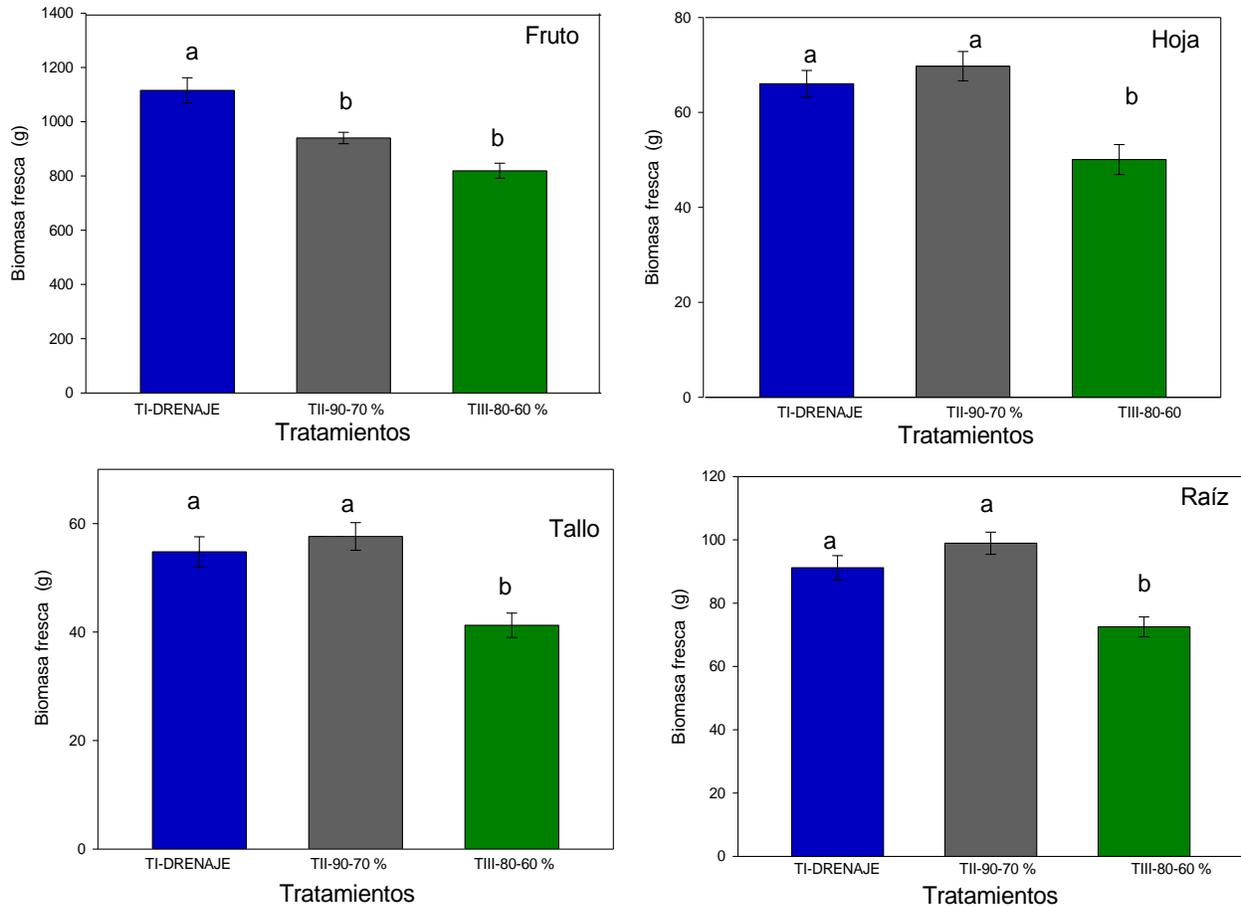


Figura 12. Biomasa fresca (fruto, hojas, tallo y raíz) de plantas chile ancho (*Capsicum annuum* L.) en tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Las barras indican el promedio de cinco muestreos \pm error estándar y significancia de tratamientos (Tukey $P > 0.05$).

La biomasa seca de fruto, no se vio afectada significativamente en los tratamientos, sin embargo, en los demás órganos de la planta (hoja, tallo, raíz) se encontraron diferencias significativas en los tratamientos I y II en comparación con el TIII (Figura 13).

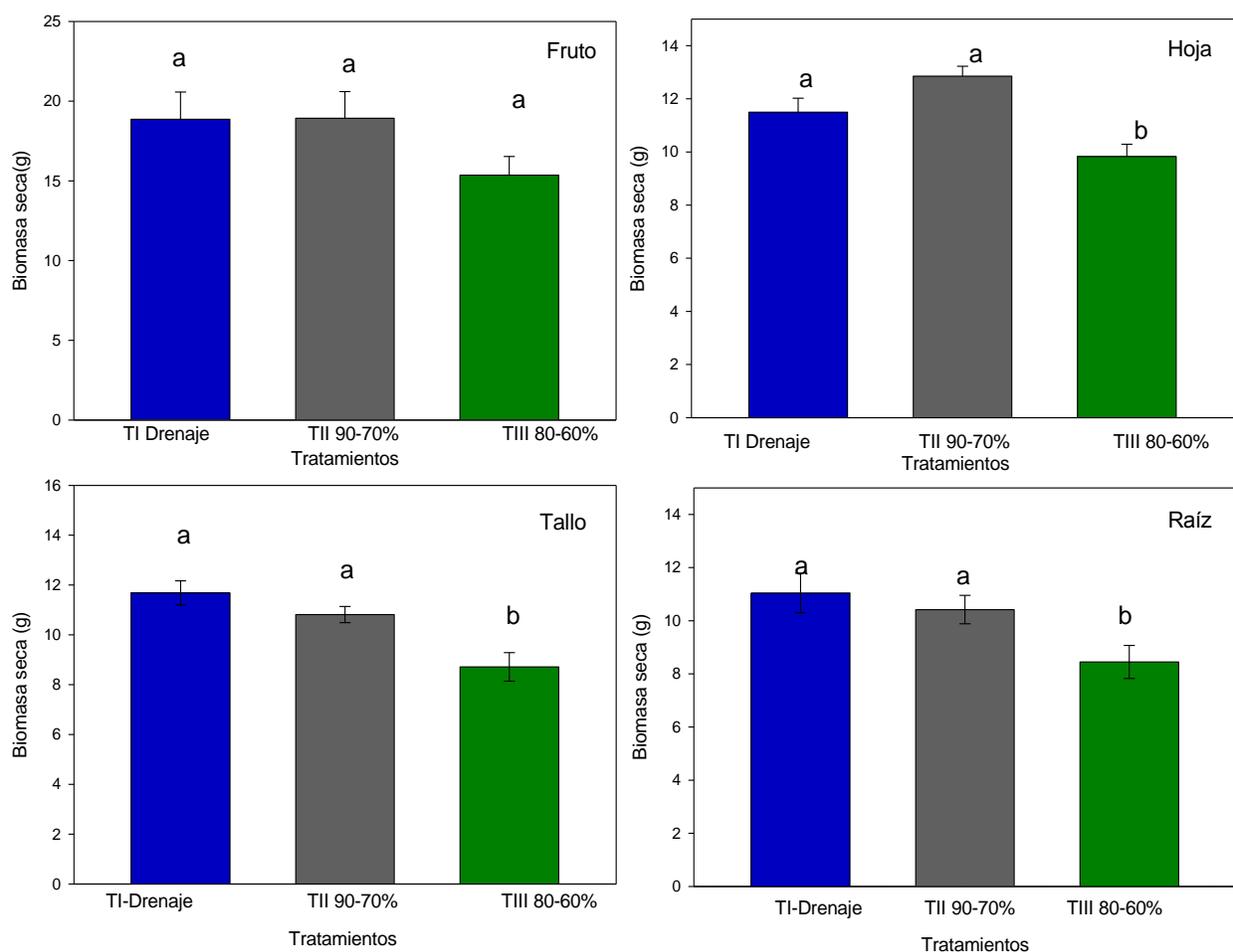


Figura 13. Biomasa seca (fruto, hojas, tallo y raíz) de plantas chile ancho (*Capsicum annum* L.) en tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Las barras indican el promedio de cinco muestreos \pm error estándar y significancia de tratamientos (Tukey $P > 0.05$).

Estos resultados contrastan a los obtenidos por López-Ordaz *et al.* (2011) al evaluar diferentes niveles de humedad aprovechable residual en un sistema de secado parcial de la raíz, donde los valores obtenidos para materia fresca y seca no presentaron diferencias significativas en comparación con el testigo.

La distribución de la materia fresca de fruto fue significativa en el tratamiento I en comparación con los TII y TIII el rendimiento se redujo en 15 y 26.5 % respectivamente.

Sin embargo, en el rendimiento de biomasa de fruto seco el análisis estadístico no presentó diferencias (Figura 13). Esto indica que el movimiento del agua en el fruto, puede haber disminuido con el desarrollo progresivo del déficit hídrico sin afectar la translocación de fotosintatos hacia el fruto (Dorji *et al.*, 2005). La disminución de la materia seca y fresca en diferentes estudios, ha demostrado que el estrés hídrico afecta la producción de biomasa en las plantas, Patane *et al.* (2011) al estudiar el efecto del déficit de irrigación con base en cuatro tratamientos de humedad aprovechable, encontró que la biomasa fue afectada significativamente. Así mismo, en tomate (Topcu *et al.*, 2007), en pimiento (Karam *et al.*, 2009) y en berenjena (Karam *et al.*, 2011) se afectó significativamente el rendimiento del fruto por el estrés hídrico de los tratamientos expuestos al déficit de irrigación.

Con base en lo anterior, es posible que la disminución mayor de materia fresca en los tratamientos II y III se debió a que una de las principales respuestas de las plantas al estrés hídrico es la inhibición del crecimiento, (Wilkinson, 2004) ya que estos tratamientos fueron en los que la planta disponía de humedad aprovechable residual menor.

Por su parte, Montero *et al.* (2001) Mencionaron que una reducción en la biomasa, se debe a que las plantas necesitan explorar el sustrato con el fin de absorber mayor cantidad de agua en condiciones de estrés hídrico, sacrificando la parte aérea, sin embargo, en la presente investigación la biomasa de raíz muestreada en el TII, el cual se encontraba en déficit de riego, no fue afectada en ninguna de las formas evaluadas (biomasa fresca y biomasa seca).

5.6 Eficiencia de uso de agua

El gasto de agua por planta ($L \text{ planta}^{-1}$) en los tratamientos de humedad aprovechable residual presento diferencias. Es claro que el TI requirió mayor cantidad de agua durante el tiempo que se evaluó el experimento, en comparación con los TII y TIII, los cuales presentaron valores similares (Figura 14 A). Así mismo, en la biomasa fresca de fruto son evidentes las diferencias significativas entre los tratamientos y al analizar estadísticamente el promedio de los cinco muestreos estas diferencias fueron significativas (Tukey $P > 0.05$) (Figura 14B). El objetivo principal de las técnicas basadas en la señalización raíz-tallo, es mantener el rendimiento de biomasa por unidad de agua de riego aplicada (eficiencia en el uso del agua) (Sadras, 2009). Con base en lo anterior, esta investigación tuvo como resultado una mayor eficiencia en los tratamientos con déficit de irrigación, 90-70% de HAR y 80-60% de HAR, comparados con el sistema de riego convencional TI (11.52 kg m^{-3}), con una productividad de agua de 17.17 kg m^{-3} (90-70% HAR) y 16.05 kg m^{-3} (80-60% HAR).

Estos resultados coinciden a los obtenidos por diferentes científicos, al evaluar diferentes niveles de humedad aprovechable residual con el sistema de raíz dividida, donde se incrementó el rendimiento por unidad de agua aplicada en comparación con el riego convencional (Davies *et al.*, 2002; Dry *et al.*, 2001; Kirda *et al.*, 2007; Morison *et al.*, 2008).

Aunado a esto, Sadras (2009) al evaluar diferentes tratamientos (déficit de irrigación, secado parcial de la raíz, y riego convencional) encontró que, la eficiencia en el uso del agua aumentó 76% en déficit de irrigación y 80% en secado parcial de la raíz en

comparación con el riego convencional; concluyendo que la mejora sustancial en el uso eficiente del agua, se puede lograr mediante un manejo adecuado del déficit de irrigación, sin tener que recurrir a la complejidad y el costo adicional en técnicas como el secado parcial de la raíz. Sin embargo, el déficit de irrigación necesita mayor precisión y cuidado, ya que si se rebasan los límites de tolerancia de la humedad aprovechable en las diferentes especies estudiadas, el rendimiento se podría afectar substancialmente.

El estrés hídrico impuesto por el déficit de irrigación en los sistemas cerrados, desencadena un señalización entre la raíz y tallo provocando una disminución en el crecimiento y una reducción en la conductancia estomática (Wilkinson, 2004) lo que disminuye su transpiración y exige a la planta a economizar el agua disponible, y por lo tanto, se aumenta la eficiencia en el uso del agua. Aunado a esto, es evidente que el principal ahorro de agua que se obtuvo en esta investigación fue debido principalmente al sistema cerrado (drenaje cero), el cual no permite la pérdida de agua por lixiviación y obliga a un manejo exacto del riego para reponer solo lo que la planta ha evapotraspirado.

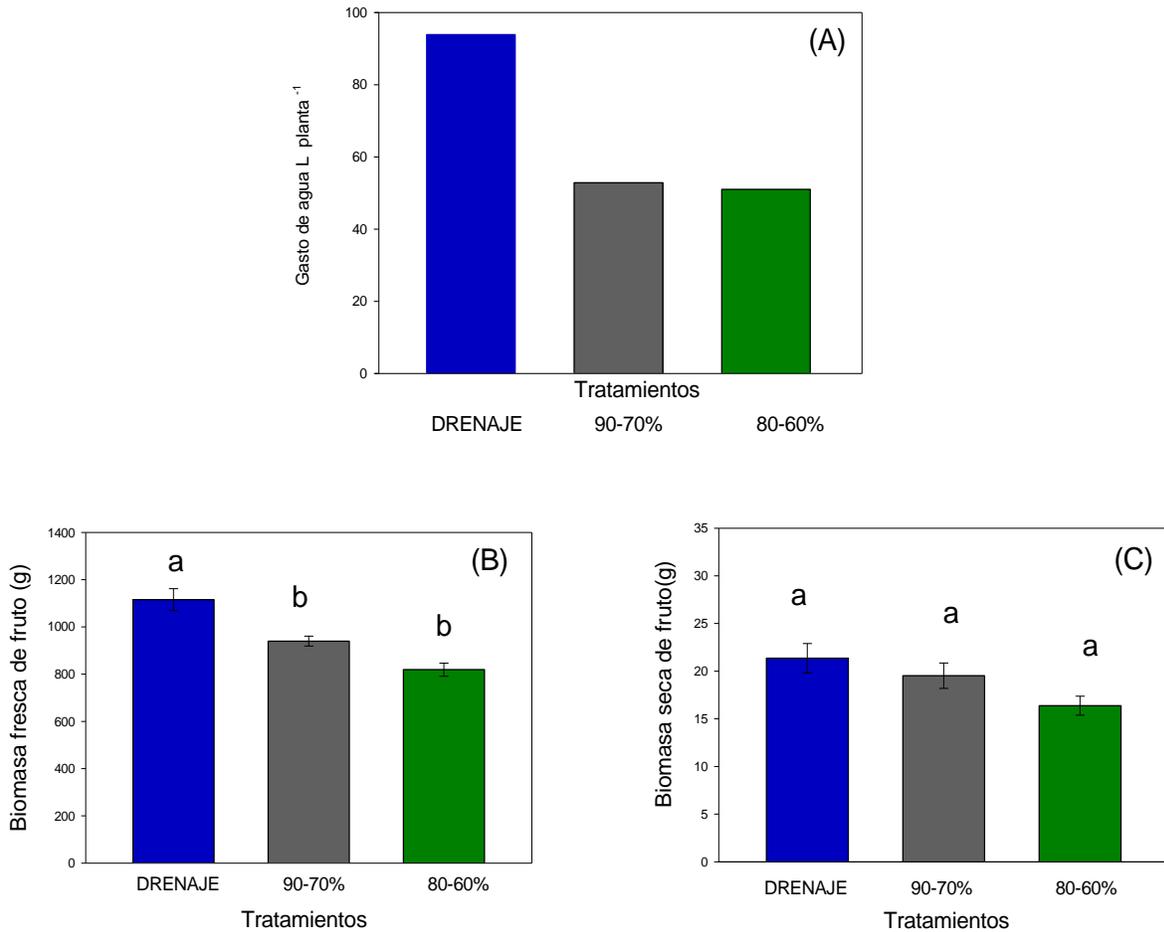


Figura 14. Gasto de agua por planta (L planta⁻¹) en 134 d de experimento **(A)**, biomasa fresca del fruto **(B)**, y biomasa seca de fruto **(C)** en el cultivo de chile ancho (*Capsicum annuum* L) y en tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Las barras indican el promedio de general de cinco muestreos \pm error estándar y significancia de tratamientos (Tukey P>0.05) **(B)** **(C)**.

5.7 Conductividad eléctrica

El monitoreo de la conductividad eléctrica (CE) es fundamental para el manejo del agua de riego y el control efectivo de la salinidad del sustrato. En la presente investigación la acumulación de sales solubles en el sustrato, en los tres tratamientos de humedad aprovechable residual fluctuó en los 134 d que duró el experimento (Figura 13).

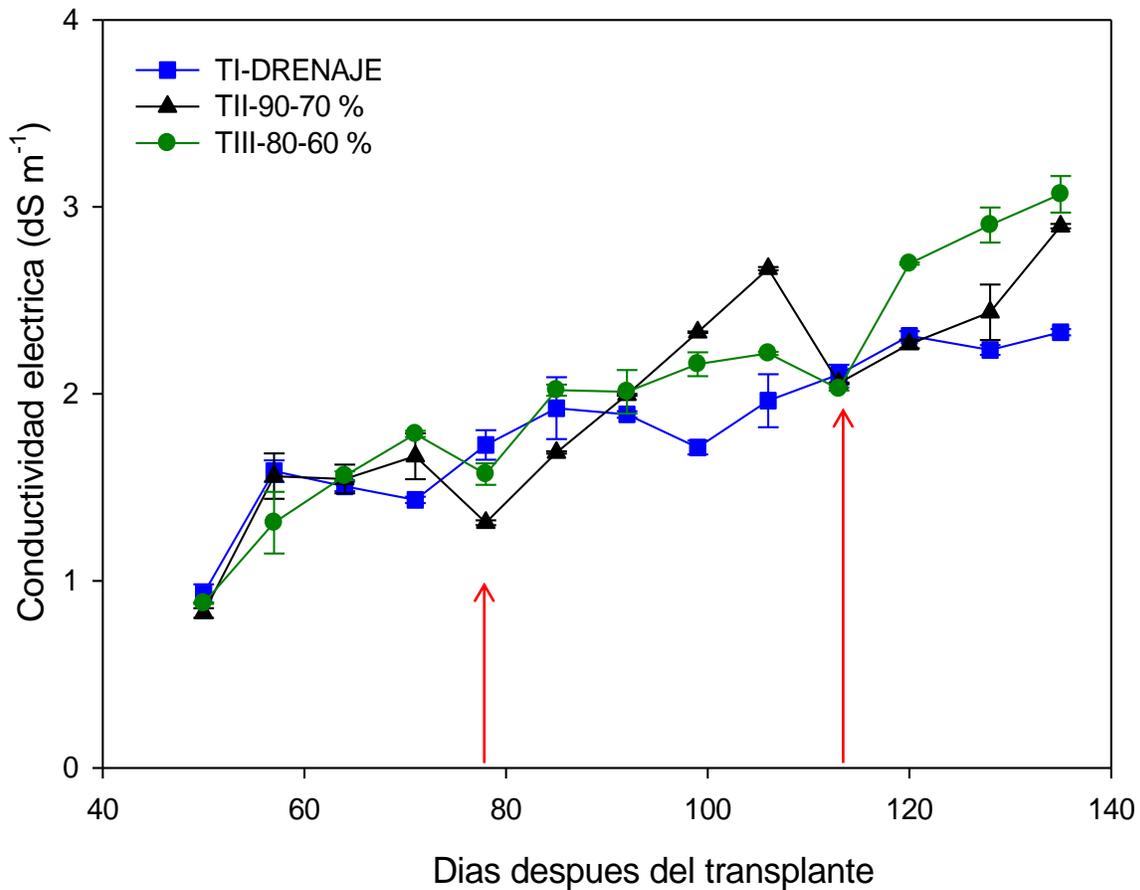


Figura 15. Conductividad eléctrica (CE) en 134 d de experimento en el cultivo de chile ancho (*Capsicum annuum* L) y en tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR): TI, drenaje; TII, 90-70% de HAR y TIII, 80-60% de HAR. Las flechas indican la lectura de la CE ($dS\ m^{-1}$), después de 2 d de aplicación de agua acidulada. Cada punto es el promedio de seis repeticiones \pm el error estándar.

Es claro que la mayor acumulación de sales solubles fue en los tratamientos sin drenaje y con déficit de irrigación (TII 90.70%, HAR y TIII 80-60%, HAR), debido a que no existe lixiviación de sales, tienden a acumularse en los estratos inferiores de la maceta. La conductividad eléctrica es un factor en la reducción del rendimiento en los sistemas cerrados, debido a falta de lixiviación de sales dentro del sustrato, el exceso de fertilizantes en la solución o conductividad alta en el agua de riego (Berríos *et al.*, 2007). Mass (1990), reporta que la salinidad expresada como CE, no produce ningún efecto negativo en el rendimiento cuando se encuentra por debajo del umbral de 1.5 dS m^{-1} , pero por encima de este valor la productividad de biomasa disminuye a una tasa del 14% por unidad dS m^{-1} en pimiento. Por otro lado, científicos del centro de investigación de Gilat en Israel, encontraron un aumento en el rendimiento al aplicar el agua de riego en exceso en sistemas abiertos para reducir al mínimo la acumulación de sales en la raíz, indicando que al haber una mejor lixiviación hay mayor transpiración, y disponibilidad de agua para la planta (Ben-Gal *et al.*, 2008). Sin embargo, no se menciona nada de la contaminación en el suelo, agua y ambiente que produce el exceso de la fertilización a costa de elevar el rendimiento, además la gran cantidad de agua necesaria para maximizar los rendimientos, esto puede hacer que esta práctica sea altamente insostenible en las zonas con mayor escases de este recurso hídrico.

Con base en lo anterior, es posible que la conductividad eléctrica y el estrés hídrico provocado por el déficit de riego (Wilkinson, 2004) sean responsables de una notable disminución en el rendimiento y la producción de biomasa fresca (hoja, tallo, fruto y raíz), en el tratamiento III (80-60%, HAR) en comparación con los tratamientos I y II, aunque estadísticamente no se encontró diferencias significativas en el rendimiento de

fruto seco, se observó una tendencia hacia los valores promedio bajos conforme se redujo la humedad aprovechable residual en los tratamientos.

VI CONCLUSIONES

El potencial de agua y la conductancia estomática en la planta fueron afectados significadamente cuando se alcanzaron valores de humedad aprovechable residual de 60% (TIII, 80-60% de HAR).

El contenido de prolina presento diferencias para cada uno de los tratamientos, resultando los valores promedio más altos en el tratamiento expuesto a mayor déficit de riego (80-60%, HAR).

El área foliar, biomasa fresca (hoja, tallo, raíz) y biomasa seca (tallo, raíz) fue afectada significativamente en el tratamiento III (80-60%, HAR).

El rendimiento del fruto fresco fue estadísticamente diferente en el tratamiento I en comparación con los tratamientos I y II. Sin embargo, el peso seco no presentó diferencia estadística significativa entre los tratamientos. Fue evidente la diferencia en el gasto de agua en los sistemas abierto y cerrado. En el sistema con drenaje cero, el ahorro de agua fue de 43.70 (TII) y 45.66% (TIII) con respecto al tratamiento TI, drenaje. Lo anterior tuvo como resultado una mayor eficiencia en los tratamientos con déficit de irrigación TII (90-70%, HAR) y TIII (80-60%, HAR), comparados con el sistema de riego convencional TI (drenaje), con una productividad de agua de 17.17 kg m⁻³ (TII 90-70%, HAR) ,16.05 kg m⁻³ (TIII 80-60%,HAR) y 11.52 kg m⁻³ (TI drenaje),

En general, los tratamientos de humedad aprovechable residual, modularon las señales químicas-hidráulicas en la planta afectando diferencialmente el potencial de agua, la conductancia estomática y el contenido de prolina en hojas, causando respuestas como

la inhibición del crecimiento en los diferentes órganos. Sin embargo, el ahorro principal de agua fue debido al sistema “drenaje cero”, al no haber pérdidas por lixiviación de nutrimentos y agua.

VII LITERATURA CITADA

- Agbicodo, E. M., C. A. Fatokun, S. Muranaka, R. G. F. Visser, and C. G. Linden-van der. 2009. Breeding drought tolerant cow pea: Constraints, accomplishments, and future prospects. *Euphytica* 167:353–370.
- Ahmadi, S. H., M. N. Andersen, F. Plauborg, R. T. Poulsen, C. R. Jensen, A. R. Sepaskhah, and S. Hansen. 2010a. Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Gas exchange and xylem [ABA]. *Agricultural Water Management* 97: 1486-1494.
- Ahmadi, S. H., M. N. Andersen, F. Plauborg, R. T. Poulsen, C. R. Jensen, A.R. Sepaskhah, and S. Hansen. 2010b. Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Yield and water productivity. *Agricultural Water Management* 97(11):1923-1930.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper* 56: 298 p.
- Ansorena M., J.1994. *Sustrato, Propiedades y caracterización*. Mundi-Prensa. Madrid, España.172 p.
- Apel, K., and H. Hirt. 2004. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology* 55: 373-399.
- ASERCA. 1998. Agencia de servicios a la comercialización y desarrollo de mercados agropecuarios. Chile verde: Una hortaliza de México para el mundo. *Claridades Agropecuarias*. Abril. México. 56: 1-17.
- Aspinall, D., and L. G. Paleg. 1981. Proline accumulation: physiological aspects. *In: Paleg, L. G. and D. Aspinall (eds.). The Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants*. Academic Press, Australia pp 205-241.
- Attipalli, R. R., V. C. Kolluru, V. Munusamy. 2004. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology* 161:1189-1202.
- Azcon-Bieto, J., and Talon, M. 1993 *Fisiología y Bioquímica Vegetal*. Interamericana McGraw-Hill. D. F., México. 546 p.
- Bacci, L., P. Battista, and B. Rapi. 2008. An Integrated method for irrigation scheduling of potted plants. *Scientia Horticulturae* 116: 89-97.
- Bates, L. S., R. P. Waldren, and I. D. Teare. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39: 205-207
- Bautista C., M. 2010. Potencial osmótico en la absorción nutrimental y calidad de fruto en chile manzano (*Capsicum pubescens R, y P.*) .Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de Mexico.64 p.
- Ben-Gal, A., E. Ityel, L. Dudley, S. Cohen, U. Yermiyahu, E. Presnov, L. Zigmund, and U. Shani. 2008. Effect of irrigation water salinity on transpiration and on leaching requirements: A case study for bell peppers. *Agricultural Water Manage* 95:587–597
- Berríos U., M., E., C. Arredondo B. y H. Tjalling H. 2007. Guía de manejo de nutrición vegetal de especialidad: Pimiento. SQM. Mexico, D. F. 103 p.

- Bray, E., A. 2002. Classification of genes differentially expressed during water-deficit stress in *Arabidopsis thaliana*: an analysis using microarray and differential expression data. *Annals of Botany* 89: 803-811.
- Bray, E., A. 1993. Molecular responses to water deficit. *Plant Physiol.* 103: 1035-1040.
- Brevedan, E., and H. Hodges. 1973. Effects of moisture déficit on translocati3n in corn (*Zea mays* L.). *Journal of Plant Physiology* 52:436-439
- Brooks, D. 2004. Agua Manejo a nivel local. Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo-Alfa omega, Ottawa, Canadá, Primera Edici3n.
- Bugarín M., R., G. A. Baca C., J. Martínez H., J. L. Tirado T., y A. Martínez G. 1998. Amonio/nitrato y concentraci3n i3nica total de la soluci3n nutritiva en crisantemo I. Crecimiento y floraci3n. *Terra* 16:113-12.
- Busk, P. K., and M. Pagés. 1998. Regulation of abscisic acid-induced transcription. *Plant Mololecular Biology* 37: 425-435.
- Campos H., C. Trejo., C. B. Peña-Valdivia., C. Ramírez-Ayala., P. Sánchez-García. 2009. Effect of partial rootzone drying on growth, gas exchange, and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientia Horticulturae* 120: 493–499.
- Carrasco G., y J. Izquierdo. 1996. La empresa hidrop3nica de mediana escala: la t3cnica de la soluci3n nutritiva recirculante ("NFT"). Manual t3cnico. Universidad de Talca (ed.), Talca Chile 62 p.
- Carrasco G. 2004. Sistema NFT: requerimientos y usos. In: Manual del cultivo sin suelo. Mundi-prensa. Madrid 541-554.
- Castellanos O., L., A., G. Ar3valo., J. Pack. 2008. Consumo de nutrientes y evaluaci3n del consumo de nutrientes y agua en chile (*Capsicum annum*) variedades: L3rica, Simpathy y Zidenka, bajo condiciones de altura en Mulacagua, Comayagua, Honduras. *Ceiba* 49 (2):188.
- Chamú-Baranda J., A., A. L3pez-Ordaz., C. Ramírez-Ayala., C. Trejo-L3pez., E. Martínez-Villegas. 2011. Respuesta del pimiento morr3n al secado parcial de la raíz en hidroponía e invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:97-110.
- Chandler, M. P., and M. Robertson. 1994. Gene expression regulated by abscisic acid and it's relation to stress tolerance. *Annual. Review of Plant Physiology and Plant Mololecular Biology* 45: 113-141.
- Chaves M. M., J. Pereira S., J. Marocco, M. Rodrigues L., C. Ricardo P., M. Os3rio L., I. Carvalho, T. Faria, and C. Pinheiro. 2002. How plants cope with water stress in the field? photosynthesis and growth. *Annals of Botany* 89(7): 907–916.
- Chaves M., M., T. Santos P., C. Souza R., M. Orduño F., M. Rodriguez L., C. L3pez M., J. Maroco P., and S. Pereira J. 2007. Deficit irrigation in grapevine improves water-use efficiency while controlling vigour and production quality. *Annals of Applied Biology* 150(2): 237-252.
- Clark, G. A., C. D. Stanley, A. G. Smajstra, y S. F. Zazueta. 1995. Consideraciones para el diseño de la microirrigaci3n para la producci3n de hortalizas. El uso de la plasticultura para la producci3n intensiva de cultivos hort3colas. Curso Nacional de Fertirrigaci3n. INIFAP. M3xico
- CNA. 2005. Comisi3n Nacional del Agua. 2005. Estadísticas del Agua en M3xico, SEMARNAT-CNA, M3xico.pp 356

- CNA. 2007. Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del Agua en México. Ed. CONAGUA/SEMARNAT. pp 259.
- CNA. 2009. Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del agua en México, SEMARNAT-CNA, México pp 456.
- Comstock, P. J. 2002. Hydraulic and chemical signaling in the control of stomatal conductance and transpiration. *Journal of Experimental Botany* 53 (367):195-200.
- Davies, W. J., and J. Zhang. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 42:55–76.
- Davies, W. J., S. Wilkinson and B. Loveys. 2002. Stomatal control by chemical signaling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phytologist* 153: 449-460.
- Delauney, A. J., and D. P. S. Verna. 1993. Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *The Plant Journal* 4:215-223.
- Dorji, K., M. H. Behboudian, and J. A. Zegbe-Domínguez. 2005. Water relations, growth, yield and fruit quality of hot pepper under deficit irrigation and partial root zone drying. *Scientia Horticulturae* 104:137-149
- Dragoni, D., A. N. Lakso, and R. M. Piccion. 2004. Transpiration of an apple orchard in a cool humid climate: measurement and modeling. *Acta Horticulturae* 664:175–180.
- Dry, P. R., B. Loveys, M. McCarthy and M. Stoll. 2001. Strategic irrigation management in Australian vineyards. *J Int Des Sci De La Vigne Et Du Vin* 35:129–139.
- During, H., B. R. Loveys, P. R. Dry. 1997. Root signals affect water use efficiency and shoot growth. *Acta Horticulturae* 427: 1–14.
- FAO. 2002. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Cumbre mundial sobre la alimentación.
- FAOSTAT. 2006. FAO statistical data bases. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
- Fares, A., and Alva A. K. 2000. Soil water components based on capacitance probes in Sandy soil. *Soil Science Society American Journal* 64:311-318.
- Fereres, E., and A. Soriano M. 2007. The deficit irrigation for reducing agricultural water Use. *The Journal Experimental of Botany* 58 (2):147-159.
- Fereres, E., D. A. Goldhamer, and L. R. Parsons. 2003. Irrigation water management of horticultural crops. *Horticulturae Science* 38: 1036-1042.
- Finia, A., C. Bellasio, S. Pollastria, M. Tattinic, and F. Ferrini. 2013. Water relations, growth, and leaf gas exchange as affected by water stress in *Jatropha curcas*. *Journal of Arid Enviroments* 89: 21–29.
- Gilsanz, J. 2007. Hidroponia. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. 31 p.
- Gowing, D. J. G., W. J. Davies, C. L. Trejo., and H.G. Jones. 1993. Xylem-transported chemical signals and the regulation of plant growth and physiology. *Philosophical Transactions the Royal Society. London Biological Sciences* 341: 41-47.
- Gowing, D. J. G., W. J. Davies, and H. G. Jones. 1990. A positive root-sourced signal as indicator of soil drying in apple *Malus domestica* Borkh. *Journal of Experimental Botany* 41(12): 1535-1540.

- Goykovic C. V., y G. Saavedra del R. 2007. Algunos efectos de la salinidad en el cultivo de tomate y prácticas agronómicas de su manejo. *IDESIA Chile* 25:47-58.
- Grossmann, K., and H. Hansen. 2001. Ethylene-triggered abscisic acid: a principle in plant growth regulation ?. *Physiologia Plantarum* 113: 9-14.
- Guerfel, M., O. Baccouri, D. Boujnah, W. Chaibi, and M. Zarrouk. 2009. Impacts of water stress on gas exchange, water relations, chlorophyll content and leaf structure in the two main Tunisian olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *Horticulturae Science* 119: 257-263.
- Hanson, A. D., and W. D. Hitz. 1982. Metabolic responses of mesophytes to plant water deficits. *Annuals Reviews Plant Physiology* 33: 163-203.
- Hare, P. D., and W. A. Cress. 1997. Metabolic implications of stress induced proline Accumulation in plants. *Plant Growth Regulation* 21: 79-102.
- Hartung, W., A. Sauter and E. Hose. 2002. Abscisic acid in the xylem: where does it from, where does it go to?. *Journal of Experimental Botany* 53(366): 27-32.
- Heuer, B., and A. Nadler. 1998. Physiological response of potato plants to soil salinity and water deficit. *Plant Science* 137: 43-51.
- IMTA. 2002. Estadísticas del agua. Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del agua en México, México: SEMANART.
- INEGI. 2007. Instituto Nacional de Estadística. Geografía e Informática Censo agrícola, ganadero y forestal 2007, México: INEGI.
- Inglés, M. 1990. Deficit irrigation. I: Analytical framework. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 116: 399-412.
- Jerez M. 1987. La prolina y su relación con el estrés hídrico. *Revista cultivos Tropicales. Cuba.* 22:15-30
- Jones, H. G. 1992. *Plants and microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology*, Cambridge University Press, Cambridge 428 p.
- Juárez-López P., D. Reed W., M. Kent., L. Cisneros Z., S. King., R. Castro B., P. Ramírez V., M Sandoval V., T. Colinas L.. 2011. Efecto de la concentración de la solución nutritiva en la calidad de frutos de genotipos nativos de jitomate *In: Memorias de Resúmenes del XIV Congreso Nacional de la sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas*. SOMECH, A. C. (ed). 10-14 de abril. Culiacán, Sinaloa. México. pp.160.
- Kang, S., and J. Zhang. 2004. Controlled alternate partial root-zone irrigation: Its physiological consequences and impact on water use efficiency. *Journal of Experimental Botany* 55(407): 2437-2446.
- Karam, F., R. Masaad, R. Bachour, C. Rhayem, and Y. Roupheal. 2009. Use efficiencies in drip-irrigated pepper (*Capsicum annuum* L): Response to full and deficit irrigation regimes. *European Journal of Horticultural Science* 74(2): 79-85.
- Karam, F., R. Saliba, S. Skaf, J. Breidy, Y. Roupheal and J. Balendock. 2011. Yield and water use of eggplants (*Solanum melongena* L.) under full and deficit irrigation regimes. *Agricultural Water Management* 98: 1307-1316.
- Kassam, A. H., D. Molden, E. Fereres, J. Doorenbos. 2007. Water productivity: science and practice-introduction. *Irrigation Science* 25:185-188.
- Kirda, C., S. Topcu, H. Kaman, A. C. Ulger, A. Yazici, M. Cetin, M. R. Deric. 2005. Grain yield response and N-fertiliser recovery of maize under deficit irrigation. *Field Crops Research* 93: 132-141.

- Kirda, C., S. Topcu, M. Cetin, H. Y. Dasgan, H. Kaman, F. Topaloglu, M. R. Deric, and B. Ekici. 2007. Prospects of partial root-zone irrigation for increasing irrigation water use efficiency of major crops in the Mediterranean region. *Annals of Applied Biology* 150:281-291.
- Kramer, P. J. 1969. *Plant and soil water relationships: A modern synthesis*. McGraw-hill, New York.
- L'vovich, M. I., G. F. White, A. V. Belyakev, J. Kindler, N. I. Koronkevic, T. R. Lee, and G. V. Voropaev. 1995. Use transformation of terrestrial Water System. *In*: B. L. Turner II (ed). *The earth As Transformed by Human Action*. Cambridge University Press Cap 14.
- Liu, F., A. Shahnazari, M. N. Andersen, S. E. Jacobsen and C. R. Jensen. 2006b. Effects of deficit irrigation and partial root drying on gas exchange, biomass partitioning, and water use efficiency in potato. *Scientia Horticulturae* 109: 113–117
- Liu, F., A. Shahnazari, M. N. Andersen, S. E. Jacobsen and C. R. Jensen. 2006a. Physiological responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) to partial root-zone drying: ABA signaling, leaf gas exchange, and water use efficiency. *The Journal of Experimental Botany* 57: 3727-3735.
- Liu, F., and H. Stutzel. 2003. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. *Scientia Horticulturae* 102: 15-27.
- López-Ordaz., A., C. Trejo L., C. Ramírez A., C. B. Peña V., L. Chávez T., Y J. A. Carrillo S. 2011. Técnica de riego para incrementar la eficiencia del uso de agua en jitomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2(4): 475-488.
- Loveys, B. R., M. Stoll., and W. J. Davies. 2004. Physiological approaches to enhance water use efficiency in agriculture: Exploiting plant signalling in novel irrigation practice. *En: Water use efficiency in plant biology* (ed. Mark A. Bacon). Blackwell Publishing Ltd., London, UK. pp. 113-141
- Loveys, B. R., P. R. Dry, M. Stoll and M. G. Carthy. 2000. Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops. *Acta Horticulturae* 537:187-197.
- Lutts, S., V. Majerus and J. M. Kinet. 1999. NaCl effects on proline metabolism in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Physiologia Plantarum* 105: 450-458.
- Mass, E., V. 1990. Crop salt tolerance. KK Tanji (Ed.), *Agricultural Salinity Assessment and Management*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices Am. Civil Eng., New York (1990) 71 p.
- Mata V., H. 2001. Requerimientos nutricionales del chile serrano (*Capsicum annuum* L.) con fertirrigación y acolchado plástico. Tesis de Doctor en Ciencias. Especialidad en Edafología. IRENAT. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México.
- Medrano H., J. M Escalona., J. Flexas., J. Bota. 2003. Distribution of leaf photosynthesis and transpiration within grapevine canopies under different drought conditions. *Vitis* 42(2): 57-64.
- Medrano H., J. Bota., J. Cifre., J. Flexas., Ribas-Carbó M., J. Gulías. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geograficas* 43:63-84 p.

- Mingo, D. M., M. A. Bacon, and W. J. Davies. 2003. Non-hydraulic regulation of fruit growth in tomato plants (*Lycopersicon esculentum* cv Solairo) growing in drying soil. *The Journal of Experimental Botany* 54:1205-1202.
- Monteith, J. L. and M. H. Unsworth. 1990. Principles of Environmental Physics, 2nd Ed., Edward Arnold. New York. pp: 53-54.
- Montero J., L., A. Antón., P. Muñoz., y P. Lorenzo. 2001. Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidities in greenhouses. *Agricultural and Forestal Meteorology* 107: 323-332.
- Morales D. 1999 .Nutrición del cultivo de chile (*Capsicum annuum* L.): dinámica nutrimental, fertirrigación nitrogenada y fertilización basal. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 183 p.
- Moreno L., P. 2009. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revision. *Agronomía Colombia* 27(2): 179-191.
- Morison, J. I., N. R. Baker, P. M. Mullineaux, and W. J. Davies. 2008. Improving water use in crop production. *Philosophical Transactions the Royal Society London Biological Sciences* 363:639-658.
- Noguera G., V. 1993. Sistemas de solución perdida y recirculante: descripción, análisis y valoración. *In: Canovas Martínez, Francisco y Diaz Alvarez, José (eds.)*. Curso superior de especialización sobre cultivos sin suelo. Almería (ESP): FIAPA; Instituto de estudios Almerienses. pp 85-126.
- ONU-AGUA. 2012. Organización para las naciones unidas. Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP).
- Orozco-Corral A., L. 2010. Uso eficiente del agua de riego mediante sondas de capacitancia. *Aqua-LAC: UNESCO, Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe*. Montevideo, Uruguay pp 2: 56-66.
- Ortiz G. 1997. "La política del agua en México en el marco del desarrollo sustentable", en *Ingeniería Hidráulica en México*, IMTA (12) 3: 59-70 p.
- Paltineanu, I. C., and J. Starr. 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. *Soil Science Society American Journal* 61:1576: 1595.
- Pardossi, A., L. Incrocci, G. Incrocci, F. Malorgio, P. Battista, L. Bacci, B. Rapi, P. Marzialetti, J. Hemming and J. Balendock. Root Zone Sensors for Irrigation Management in Intensive Agriculture. *Acta Horticulturae (ISHS)* 2009, in press.
- Parry, M. A. J., J. Flexas, and H. Medrano. 2005. Prospects for crop production under drought: research priorities and future directions. *Annals of Applied Biology* 147: 211-226.
- Passioura, J. B., 1988. Root signals control leaf expansion in wheat seedlings growing in drying soil. *Australian journal of Plant Physiology* 15(5): 687-693.
- Pastor S., J., N. 1998. Tecnología Sustratos. Aplicación a la producción viverística Ornamentales, Hortícola y Forestal. Edit. Universtat de Lleida. Lleida España 193 p.
- Patane, C., S. Tringali, and O. Sortino. 2011. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. *Scientia Horticulturae* 129:590-596.

- Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London, Series A 193:120-148.
- Plaza B., M., S. Jiménez., M. Perez., M. T. Lao. 2006. Sistemas recirculantes y su interés en el cultivo de ornamentales. Horticultura: Revista de industria, distribución y socioeconomía hortícola: frutas, hortalizas, flores, plantas, árboles ornamentales y viveros. 34-41 p.
- Pozo C., O. 2000. Programa nacional de chile. SAGARPA. INIFAP. CIR Noreste. s/p.
- Pungulani, L. L. M., J. P Millner, W. M. Williams and M. Banda. 2013. Improvement of leaf wilting scoring in cowpea (*Vigna Sinensis* L.) Walp: From qualitative scale to quantitative index. Australian Journal of Crops Science 7(9): 1262-1269.
- Ramanjulu, S., and C. Sudhakar. 2000. Proline metabolism during dehydration in two mulberry genotypes with contrasting drought tolerance. Journal Plant Physiology 157:81-85.
- Ramos G., F., J. Aguilar R., M. A. López G., O. Vázquez M., J. Fuantos M., D. Hernández., A. Millán S., M. Ramírez G., L. Pérez E. 2007. Módulos de capacitación en cultivo de chile (*Capsicum annuum* L.) con acolchado plástico y riego por goteo en campos de productores. "Investigación y ciencia" Universidad Autónoma de Aguascalientes. pp.21-36.
- Rayapaty, P. J., and C. R. Stewart. 1991. Solubilization of a proline dehydrogenase from maize (*Zea mays* L.) mitochondria. Plant Physiology 95:787:-791.
- Rojas G., A. Posadas., R. Quiroz., M. Holle., M. Malaga. 2007. Secado parcial de raíces: una promisorio técnica de riego en papa (*Solanum tuberosum* L.). *Zonas Áridas* 11: 206-218. ISSN 1814-8921
- Sadras, V. O. 2009. Does partial rootzone drying improve irrigation water productivity in the field? A meta-analysis. Irrigation Science 27: 183-190.
- SAGARPA. 2008. Secretaría de agricultura ganadería recursos naturales y pesca. Estadística del chile fresco y seco en México.
- SAKATA. Seeds. 2004. "Caballero" chile híbrido de tipo poblano. Características y cultivo. Folleto técnico. Sakata Seeds. México.
- Samaras, Y., R. A. Bressan, L. N. Csonka, M. G. García-Ramos, P. D'Urso and D. Rhodes. 1995. Proline accumulation during drought and salinity. In (N Smirnoff ed) "Environment and Plant Metabolism: Flexibility and Acclimation," Bios Scientific Publishers, Oxford, pp 161-187.
- Sánchez C., F., y E. Escalante R. 1988. Un sistema de producción de plantas hidroponía: principios y métodos de cultivo. 3a ed. Chapingo. Universidad Autónoma Chapingo. 194 p.
- Sarker, B. C., M. Hara, and M. Uemura. 2005. Proline synthesis, physiological responses and biomass yield of eggplants during and after repetitive soil moisture stress. Scientia Horticulturae 103: 387-402.
- Schoups, G., J. W. Hopmans, C. A. Young, J. A. Vrugt, W. W. Wallender, K. K. Tanji, S. Panday. 2005. Sustainability of irrigated agriculture in the San Joaquin Valley, California. Proceedings of the National Academy of Sciences USA 102(43):15352–15356.
- SIACON. 2008. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. Estadísticas en México de hortalizas

- SIAP-SAGARPA 2007. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. Estadísticas de chiles frescos en México.
- Simonovic, S., P. 2000. Tools for water management one view of the future. *Water International* 25(1): 76-88.
- SINA. 2011. Sistema Nacional de información Agua. Estadísticas del Agua en México
- Singh, G., and V. K. Rai. 1982. Responses to two differentially sensitive *Cicer arietinum* L. cultivars to water stress: protein content and drought resistance. *Biologia Plantarum* 2(1)4:7-12.
- Singh, S. K., and K. R. Reddy. 2011. Regulation of photosynthesis, fluorescence, stomatal conductance and water-use efficiency of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) Walp.) under drought. *Journal of Photochemistry and Photobiology Biology* 105: 40-50.
- Soto F. 2006. Producción de lechuga con la técnica de lámina de nutrientes modificada (NFT). San José (CR): INA, 38 p.
- Squeo, F. A., J. R. Ehleringer, N. Olivares and G. Arancio. 1994. Variación en los componentes del balance de energía a nivel foliar de *Encelia canescens* a lo largo de un gradiente de precipitación en el norte-centro de Chile. *Chile. Revista Chilena de Historia Natural* 67(2): 143-155.
- Squeo, F. A. 2007. El Agua y el Potencial Hídrico. *In: Fisiología vegetal*. Squeo F.A. y L. Cardemil eds. Ediciones Universidad de La Serena 3: 67-84.
- Steiner, A. 1984. The universal nutrient solution. *Proc. 6th Int. Cong. on Soilless Culture*. ISOSC. Lunteren, Holanda pp. 633-649.
- Stikic, R., S. Popovic, M. Srdic, D. Savic, Z. Jovanovic, Lj. Prokic and J. Zdravkovic. 2003. Partial root drying (PRD): a new technique for growing plants that saves water and improves the quality of fruit. *Bulgarian Journal Plant Physiology Special Issue*, 164-171.
- Sttoll, M., B. Loveys, and P. Dry. 2000. Hormonal changes induced by partial root zone drying of irrigated grapevine. *Journal of Experimental of Botany* 51(350): 1627-1634.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2010. *Plant physiology*. 5th ed. Sinauer Associates, Inc. Redwood City, CA. pp. 644-645.
- Tardieu, F. and T. Simonneau. 1998. Variability of species among stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modeling isohydric and anisohydric behaviours. *Journal of Experimental of Botany* 49: 419-432.
- Terrés, V. L., A. Artexte, A. Beunza, E. Sains and M. Lezaun. 2001. Physical Propierts of the substrates .*Proc.5th 16 procetec.Cult.Mild Winter Clim* (eds) Fernandez, Martinez & Castilla. *Acta Horticulturae* 559: 663.668.
- Testi, L., F. J. Villalobos, F. Orgaz and E. Fereres. 2006. Water requirements of *Olive orchards*. L. Simulation of daily evapotranspiration for scenario analysis. *Irrigation Science*. 24:69-76.
- Tijerina L. 1999. Requerimientos hídricos de cultivos bajo sistemas de fertirrigación. *Terra*. 17: 237:245.
- Topcu, S., C. Kirda, Y. Dasgan, H. Kaman, M. Cetin, A. Yazici, and M. A. Bacon. 2007. Yield and N-fertilizer recovery of tomato grown under deficit irrigation. *European Journal Agronomy* 26: 64-70.

- Tun-Dzul J., C. 2001. Chile habanero. Características y tecnología de producción. Folleto técnico. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias México. 74 p.
- UNESCO. 2005. Organización para la educación, la ciencia y la cultura de las naciones unidas. Wáter conflicts, UNESCO, Paris, Francia.
- Urrestarazu G., M. 2000. Manual de cultivos sin suelo. Coord. M. Urrestarazu. Ed. Mundi-Prensa. Servicio de publicaciones de la Universidad de Almería, España. pp. 647.
- Vázquez R., M. D., M. Arellano G., M. A. Gutiérrez C. 2003. Efecto de la nutrición vegetal en el peso y número de frutos de chile caribe (*Capsicum annuum* L.). En: Resúmenes del X Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas. UACH- Depto. Chapingo, Edo. de México. 14 p.
- Verslues, P. E. and R. E. Sharp. 1999. Proline accumulation in maize (*Zea mays* L.) primary roots at low water potentials. II. Metabolic source of increased proline deposition in the elongation zone. *Plant Physiology* 119(4): 1349-1360.
- Wagner, M., G. Laborem, C. Marin, G. Medina and L. Rangel. 2003. Contenido de prolina en naranja Valencia durante cinco ciclos en función del contenido de humedad en un Fluventic Haplustolls. *Revista de Facultad de Agronomía de la Uiniversidad de Zulia* 20(2):119-130.
- Wakrim, R., S. Wahbi, H. Tahi, B. Aganchich, R. Serraj. 2005. Comparative effects of partial root drying and regulated deficit irrigation on water relations and water use efficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106: 275-287.
- Wilkinson, S. 2004. Water use efficiency and chemical signalling. *In: Water use Efficiency in Plant Biology* (ed. Mark A. Bacon). Blackwell Publishing Ltd., London, UK. pp. 75- 112.
- Wilkinson, S., and W. J. Davies. 2002. ABA-based chemical signalling: the coordination of responses to stress in plants. *Plant, Cell and Environment* 25 195-210
- Yamaguchi-Shinozaki, K. and Shinozaki K. 2006. Transcriptional regulatory networks in cellular responses and tolerance to dehydration and cold stresses. *Annual Review of Plant Biology* 57: 781-803.
- Yoshiba, Y., T. Kiyosue, K. Nakashima, K. Yamaguchi-Shiozaki, and K. Shinozaki. 1997. Regulation of levels of proline as an osmolyte in plants under water stress. *Plant Cell Physiology* 38(10):1095-1102.
- Zegbe, J. A., M. H. Behboudian, B. E. Clothier, and A. Lang. 2008. Postharvest performance of cv. Pacific Rose TM apple grown under partial rootzone drying. *Horticulturae Science* 43(3): 952-954.
- Zhang, J. and J. Yang. 2004. Crop yield and wáter use efficiency: acase study in rice. *In: wáter use efficency in plant biology* (ed. Mark A. Bacon) Blankwell Publishing Ltd., London, UK. pp 198-227.
- Zúñiga E., L. 2003. Producción de chile jalapeño en un suelo vertisol mediante la técnica de fertigación. Tesis de Doctor en Ciencias. Especialidad de Edafología. IRENAT. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Edo. de México. pp 171.