

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



**EFFECTO DEL SECADO PARCIAL DE LA RAÍZ DEL LIMÓN MEXICANO
(*CITRUS AURANTIFOLIA*) EN LA TASA DE FOTOSÍNTESIS Y LA**

EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA

POR:

Beatriz Alicia Contreras Barragán

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Saltillo, Coahuila, México.

Enero 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

EFFECTO DEL SECADO PARCIAL DE LA RAÍZ DEL LIMÓN MEXICANO

(*CITRUS AURANTIFOLIA*) EN LA TASA DE FOTOSÍNTESIS Y LA

EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA

Realizado por:

Beatriz Alicia Contreras Barragán

TESIS

Que se Somete a Consideración del H. Jurado Examinador

Como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobado

El Presidente del jurado

Dr. Alejandro Zermeño González

Vocal

Dr. Raúl Rodríguez García

Vocal

Dr. Javier de Jesús Cortés Brac

El Coordinador de la División de Ingeniería

MC. Luis Rodríguez Gutiérrez

Universidad Autónoma Agraria
“ANTONIO NARRO”



Saltillo, Coahuila, México. Enero 2013

D^e

edicatorias

A mi Familia:

A ustedes les dedico más que a nadie, ustedes que supieron comprender que mi ausencia era necesaria y que siguen junto a mí sin importar la distancia y todos los momentos que no les puedo dedicar. Gracias por todo el apoyo que me han brindado, por depositar su confianza en mí y por apoyar todos mis sueños, pero sobre todo gracias por haberme dado las bases y formación que requiere saber crecer y poder hacerlo lejos de los seres mas amados, con gusto les entrego lo que he logrado, siempre sabiendo que cada logro mío es de ustedes también.

A ti Papá, que supiste: encaminar mis rebeldías, perdonar mis errores, consolar mis tristezas, compartir mis sueños, saborear mis logros, por todos tus esfuerzos y sacrificios que me han permitido crecer y superarme cada día, porque nunca estuve sola. Para poder llegar se necesita de mucho apoyo, como ése que he recibido de ti día con día, gracias por estar siempre a mi lado papá.

A mis amigos en la narro: Claudia Leticia Borjas Banda, Lili Borjas, Saúl Sotelo, Alicia Buendía, Hugo Bautista, Osvaldo Díaz, Ascensión Hernández (Dr. pelón), Evaristo Campos, Claudio Balbuena, Michel Franco, Martin Tucuch, Pablo, Iván García, Julio Ledesma, Memo Orozco, Vicente Rodríguez, Julián Pérez, Gabriela Romo, Maresa, Pilarica, Juan ma, Frank.

A mis hermanas adoptadas de la casa verde: Isamary Vargas, Noemí Guzmán, Norma Galván, Gabriela Medina, Diana Zenteno, Erika Rodríguez y en Guadalajara: Héctor Vigón, Sofía Ruiz y Celia López a pesar de todo y a la distancia, se los dedico también, muchachos, sin ustedes y sus consejos y todos esos momentos tan variados que compartieron conmigo, no hubiera podido llegar.

Cuca, muchas gracias por compartir conmigo no solo tu amistad, sino también tu familia.

Agradecimientos

Agradezco de todo corazón a Dios; por las bendiciones que me ha dado para llegar felizmente a este día, y le pido que con su luz me guíe y me acompañe a lo largo de mi vida.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por haberme dado la oportunidad de vivir la experiencia de ser parte de ella y de llevarme una parte de toda la Universidad conmigo.

Al Dr. Alejandro Zermeño Gonzales por su gran apoyo en la realización de este trabajo de investigación y por ser un excelente maestro.

Al Dr., Juan Melgar y Ayako Kusakabe por impulsarme a realizar este proyecto y a todo el personal que colaboro conmigo en el Citrus Center.

A mis asesores que invirtieron y dedicaron parte de su tiempo en la revisión de este trabajo:

Dr., Alejandro Zermeño González

Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho

Dr. Raúl Rodríguez García

Mis más sinceros agradecimientos a todos.

INDICE DE CONTENIDO

	Página
DEDICATORIAS	I
AGRADECIMIENTOS	III
INDICE DE CONTENIDO	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE CUADROS	VI
I. INTRODUCCIÓN	1
Objetivo	2
Hipótesis	2
II. REVISION DE LITERATURA	3
2.1 Origen del limón (Citrus Aurantifolia) y su clasificación taxonómica	4
2.2 Descripción Botánica.....	4
2.3 Propiedades.....	6
2.4 Establecimiento del limón a nivel mundial	7
2.5 Establecimiento y producción del limón en México....	9
2.6 Importancia del Agua en la Agricultura	10
2.2.1 Eficiencia del uso del agua en la Agricultura.....	12
2.2.2 Importancia del uso eficiente del Agua	14
2.7 Secado Parcial de la Raíz y su relación con la Eficiencia del Uso del Agua en la Agricultura	16
2.3.1 Implicaciones fisiológicas del Secado Parcial de la Raíz	18
2.3.2 Efecto del Ácido Abscísico	18
2.3.3 Estudios previos del efecto del Secado Parcial de la Raíz en otros cultivos	20
2.3.4 Estudios previos del efecto del Secado Parcial de la Raíz en limón	20
III. MATERIALES Y METODOS	21
3.1 Lugar del estudio y ubicación geográfica.....	22
3.2 Material vegetal utilizado.....	22
3.3 Descripción de los tratamientos evaluados.....	24
3.4 Diseño estadístico utilizado	25
3.5 Determinación de lámina de agua evapotranspirada..	26
3.6 Mediciones de Intercambio gaseoso.....	26
3.8 Transpiración.....	27
3.7 Evapotranspiración de los árboles en el período del experimento en los diferentes tratamientos.....	27
3.8 Desarrollo de área foliar.....	28
3.7 Contenido de humedad en hojas, raíz y materia seca total.....	28
3.8 Eficiencia del uso del agua.....	28
3.10 Mediciones del Ácido Abscísico.....	29

IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
4.1	Tasa de fotosíntesis	31
4.2	Conductancia estomática.....	32
4.3	Transpiración.....	34
4.4	Evapotranspiración de los árboles en el período del experimento.....	35
4.5	Desarrollo de área foliar.....	37
4.6	Materia seca total.....	38
4.7	Contenido de agua en hojas y raíz.....	39
4.7	Eficiencia del uso del agua.....	41
4.8	Contenido de Ácido Abscísico en las hojas.....	43
V.	CONCLUSIONES.....	44
VI.	LITERATURA CITADA.....	46

Palabras Clave: Metodos de Riego, Secado Parcial de la Raíz, Eficiencia del Uso del Agua, Tasa de Fotosíntesis, Citrus Aurantifolia, Limón Mexicano, Ácido Abscísico.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Pagina
1.1	Valores medios anuales de la distribución de los componentes del ciclo hidrológico en México.....	12
1.2	Proyecciones del agua renovable per cápita en México.....	14
2.1	División de la raíz de los árboles de limón mexicano.....	23
2.2	Trasplante de árboles de limón con la raíz dividida.....	23
2.3	Representación esquemática de los tratamientos evaluados...	25
3.1	Tasa de asimilación de CO ₂ para los diferentes tratamientos en las diferentes fechas.....	31
3.2	Conductancia estomática para los diferentes tratamientos en las diferentes fechas.....	33
3.3	Transpiración foliar instantánea (Li-COR 6400) para las diferentes fechas de mediciones.....	35
3.4	Comparación de medias por tratamiento de agua total aplicada durante el experimento. Los datos corresponden a las medias de ocho repeticiones.....	36
3.5	Desarrollo de área Foliar.....	38
3.6	Materia seca total en los diferentes tratamientos evaluados....	39
3.7	Contenido de humedad en Hojas.....	40
3.8	Contenido de agua en la raíz del lado A para todos los tratamientos al termino del estudio.....	40
3.9	Contenido de agua en raíz del lado B para todos los tratamientos al termino del estudio.....	41
3.10	Eficiencia del uso del agua por los árboles en los diferentes tratamientos.....	42
3.11	Contenido promedio de ácido abscísico (siete repeticiones) en las hojas de los árboles de los diferentes tratamientos.....	43

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Pagina
2.1	Descripción de los tratamientos evaluados.....	24

I. INTRODUCCIÓN

La citricultura en México representa una actividad de gran importancia dentro de la fruticultura nacional. La superficie establecida supera las 526 mil hectáreas, que producen un promedio anual de 6.7 millones de toneladas de cítricos, con un valor estimado de 8,050 millones de pesos, lo que sitúa a nuestro país en el quinto lugar mundial en producción de cítricos. De la superficie establecida, 68.5%, son de naranja, 20.5% de limón Mexicano, 5.2% de limón Persa y el resto son toronjas, mandarinas, limas y tangerinas (INEGI 2011)

El principal estado productor de limón en México es Veracruz con una superficie de 35,730 ha y una producción de 542,245 toneladas, seguido por Michoacán, Colima, Oaxaca y Yucatán (INEGI 2011)

El agua es el recurso más importante en la agricultura. Para muchas regiones agrícolas el agua es el recurso mas limitante para incrementar el rendimiento de los cultivos o para aumentar las zonas de riego. En las regiones agrícolas, donde el agua es el factor limitante para la producción, es necesario implementar y aplicar metodologías para mejorar la eficiencia del uso del agua que permitan obtener mayor producción con menor uso de agua.

El secado parcial de la raíz es un procedimiento que consiste en aplicar riego deficitario al sistema radicular de los árboles, con el propósito de utilizar menos agua, sin afectar considerablemente la producción (Hutton y Loveys., 2004). De esta forma se podría incrementar la eficiencia del uso del agua. El secado parcial de la raíz ha sido evaluado en cultivos como vid (Loveys *et al.*, 2000), manzana (Zegbe y Serna-Pérez, 2011), canola (Mousavi *et al.*, 2010), maíz (Kaman *et al.* 2011), tomate (Dodd *et al.*, 2006, López-Ordaz *et al.*, 2008), papa (Xu *et al.*, 2011), almendro (Egea *et al.*, 2011) y mandarina (Kirda *et al.*, 2007). Aun cuando se busca el aumento de la eficiencia del uso del agua, es necesario examinar los efectos en el crecimiento y producción de los diferentes cultivos (Zegbe-Dominguez, 2003).

OBJETIVO

El objetivo de la investigación fue evaluar el efecto del secado parcial de la raíz del limón Mexicano en la tasa de fotosíntesis y la eficiencia del uso del agua

HIPÓTESIS

El secado parcial de la raíz permite mejorar la eficiencia del uso del agua sin afectar considerablemente el rendimiento.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Origen del limón y clasificación taxonómica.

Dentro de los cítricos el limón mexicano forma parte del grupo de las limas, que a su vez engloba limas ácidas y carentes de acidez. Las limas ácidas son importantes a nivel comercial se subdividen en: Tahití (Persa, Bears) y Key (Mexicano, West Indian) (Davies y Albrigo, 1999).

De los dos tipos de limas ácidas en el mundo, el más conocido y cultivado es *Citrus aurantifolia*, conocido por una amplia variedad de nombres, siendo los más comunes limón mexicano (a pesar de ser realmente una lima), West Indian y Key lime. En español se le conoce como, lima acida, lima boba, limón chiquito, limón criollo, limón agrio, en Francés es limette o limettier acide, en alemán limett, en italiano limetta, en holandés lemmetje en el este de África es ndimu, en las Filipinas dalayap o dayap, en Malasia limau asam, en la India, nimbu limbu, nebu lebu o, en Brasil galego limao en Marruecos doc. y una variedad de diferentes nombres alrededor de todo el mundo.

El limón mexicano es nativo de la región Indo.Malaya. Se supone fue llevado al norte de África por los árabes y después llevado por los cruzados de palestina hasta Europa Mediterránea. Se introdujo a México y el Caribe por los Españoles (Morton, 1987).

Clasificación taxonómica

Reino: Vegetal

División: Tracheophyta

Clase: Angiospermas

Subclase: Dicotiledóneas

Orden: Geraniales

Familia: Rutaceae

Subfamilia: Aurancioidea

Tribu: Citreae

Subtribu: Citrus

Género: Citrus

Especie: Aurantifolia Swingle

Descripción botánica.

El limero es sumamente vigoroso, con hábitos de crecimiento esparcidos, suele tener muchas espinas (Davies y Albrigo, 1999)

Tallo.- En un principio es herbáceo y de color *verde*, efectuando por ello la función fotosintética, al igual que las horas que porta. Posteriormente al desarrollar pierde esa característica haciéndose leñoso y constituyendo el tronco. Las ramas del limonero tienden a extenderse hacia afuera, más manifiestamente que el resto de las especies de cítricos. (Calderón, 1983)

Flor.- Son axilares o terminales, solitarias o en corimbos, proporcionados por un pedúnculo liso corto y articulado, hermafroditas casi siempre de color blanco, a veces con tonalidad violeta en el dorso. Cada flor se compone de cáliz

gamosépalo acompañado, corola compuesta de 3 a 5 pétalos insertados internamente con los sépalos; estambres de 20 a 60 cm insertados más alto que los pétalos. (Martínez, 1977). La floración, ocurre por lo general dos veces al año de manera intensa, pero puede presentarse también de manera continua floreciendo en varias ocasiones con menor intensidad a lo largo del año (Davies y Albrigo, 1999).

Hojas.- Son perennes unifoliadas, el limbo se encuentra claramente aserrado en el ápice, tiene glándulas de aceites esenciales que se manifiestan en sus puntos translucidos; pecíolo es muy reducido (Praloran, 1977, Davies y Albrigo, 1999).

Fruto.- Tamaro (1979), menciona que los frutos son más bien pequeños, ovales y globosos, con un ápice ligeramente deprimido, coronados por una cicatriz estilar corta en forma de pezón tersa con numerosos glándulas hundidas, al principio de color verde oscuro pero cuando están maduros son de color amarillo, verde-amarillento o verde de 3.5 a 5 cm de diámetro o más; la cascara es delgada se rompe con facilidad y tiene sabor amargo, la pulpa es de color verde amarillento, jugosa, muy acida y fragante.

Semilla.- Se encuentran de 1 a 8 en cada gajo, de forma oblonga, de 6.3 a 18.8 mm de largo. Cotiledones carnosos y gruesos, generalmente con varios embriones que se forman a semejanza de yemas originales del tejido nuclear de la planta (Sánchez, 1942).

Propiedades.

El limón contiene vitamina C y en menor proporción, vitaminas B1, B2, B3, B5, B6 y Biotina. Del complejo de los minerales contiene Calcio, Cloro, Magnesio, Fósforo, Potasio, Sodio, Azufre, Hierro y Cobre; 100gramos de limón contiene 32 calorías.

Es un excelente refrescante; ayuda a eliminar las toxinas del organismo; produce la estimulación de la sudoración; combate y reduce la fiebre; es antiácido; provoca la contracción de los tejidos; estimula el flujo de la bilis; es antirreumático y adelgazante. Esto se debe a que contiene ácidos cítrico y ascórbico (vitamina C). Además, es apto para diabéticos e hipertensos. En medicina, se le considera un antiescorbútico de primer orden (Martínez, 1977)

El uso y consumo del limón a nivel internacional, es diferente según las costumbres y tradiciones de cada país, destaca su aprovechamiento como limón fresco o industrializado para condimento de sopas, carnes, mariscos, ensaladas y botanas.

Se utiliza en la preparación de limonadas frías en los países con clima cálido y en limonadas calientes o té negro con limón en los países europeos de fríos inviernos.

Muchas bebidas y cócteles con alcohol estarían incompletos sin limón. El sabor de las mayonesas no sería igual sin el jugo de limón. Asimismo, el aceite

de limón sirve a la industria alimenticia para la producción de refrescos, gelatinas, dulces y bebidas refrescantes caseras.

Recientemente el uso del limón se ha extendido a la industria cosmética para la elaboración de shampoo y detergentes, aprovechando sus cualidades para disolver las grasas (SIAP, 2012).

Establecimiento y producción del limón a nivel mundial.

La distribución de este cítrico se limita a los trópicos cálidos y a las regiones subtropicales húmedas, donde las temperaturas mínimas permanecen por encima de -2 a -3°C (Davies y Albrigo., 1999).

Las plantaciones cítricas se encuentran concentradas en áreas donde la escasez de agua limita la producción agrícola. Por lo tanto desarrollar estrategias que permitan a los productores aumentar la eficiencia del uso del agua es una prioridad (Ballester, 2012)

La producción y el consumo mundiales de cítricos han registrado un fuerte crecimiento desde mediados de los años 1980. La producción de naranjas, tangerinas, limones y limas ha aumentado rápidamente, y aún más los productos cítricos elaborados, gracias a las mejoras introducidas en el transporte y en el empaquetado que han reducido los costos y mejorado la calidad.

Los limones y las limas son frutos cítricos ácidos que se diferencian de otras variedades de cítricos por el hecho de que se consumen normalmente con otros alimentos. Los limones y las limas se producen principalmente para el mercado de productos frescos, y el zumo de limones y limas se utiliza primordialmente para dar sabor a las bebidas y a los alimentos (FAO 2004).

Las importaciones de limones y limas representan aproximadamente el 27 por ciento del consumo mundial. Fuera de los países desarrollados de América del Norte y Europa, el consumo de limones y limas se encuentra también en los países de Europa oriental, así como en los países en desarrollo, como la India, el Irán, México, Brasil, Argentina, Bolivia, Perú y Jamaica. También los países del Cercano Oriente, incluidos Jordania, Chipre, Líbano y Egipto, registran niveles relativamente altos de consumo por habitante (FAO, 2004).

En México se comercializa principalmente como fruta fresca, se exporta el jugo de limón y el aceite. A nivel mundial, las nuevas plantaciones se están estableciendo para obtener aceite (Morton, 1987).

Establecimiento y producción del limón en México.

El limón Mexicano fue introducido a México por los españoles alrededor del año 1520. La primera huerta comercial se estableció en Michoacán en 1920

pero no fue sino hasta 1972 que surgió el auge del cultivo y se le fueron incorporando técnicas de manejo y tecnología. (COVECA, 2011)

Los climas calurosos son favorables para el cultivo del limón con temperaturas que oscilan entre los 23°C y 34°C. El máximo se encuentra entre los 39°C y el mínimo sobre los 13 °C.

Temperaturas inferiores a 4°C durante más de dos horas pueden causar daños crecientes a medida que se prolonga esta condición y el limonero es de baja resistencia al frío.

Los cítricos requieren grandes cantidades de agua. Para formar un kilogramo de materia seca se necesita como mínimo 300 litros de agua. Si a esta cantidad se le suman pérdidas por diferentes conceptos como: percolación, evaporación en el suelo, consumo de las hierbas etc., claramente se comprende que el agua disponible en el suelo debe ser elevada, variando de un terreno a otro en función de su naturaleza y del clima, así como también de un año a otro, según los factores climatológicos (Soler y Soler, 2006).

Importancia del Agua en la Agricultura.

Se estima que en el mundo existen unos 1 400 millones de km³ de agua, de los cuales 35 millones (2.5 por ciento) son de agua dulce.

Dentro del agua dulce existente, la mayor parte se encuentra en los glaciares, capas polares y acuíferos profundos, haciéndola no utilizable.

Los organismos vivos contienen entre el 60 y el 90% de agua y toda la vida depende de las propiedades de este líquido. (Audesirk *et al.*, 2003) Las

plantas son los organismos productores primarios, que transforman la energía de la radiación solar en azúcares para después ser consumidos por otros seres vivos, siendo así, la base de la cadena alimenticia, donde el agua, es vital para este proceso.

Las plantas requieren del agua para dos procesos vitales, el agua es el único recurso no reemplazable para las plantas, sin ella la fotosíntesis y la transpiración no serían posibles. A lo largo de la vida de la planta, un 95% del agua que absorbe solamente pasa a través de la planta como parte del proceso de transpiración (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

La energía absorbida por una planta u hoja en particular tiene que ser liberada de vuelta y así mantener el equilibrio energético. La carga energética de las hojas se disipa por medio de re-radiación, convección del calor sensible y propagación del calor latente por transpiración (Kramer *et al.*, 1983).

La transpiración es la liberación de agua en la planta en forma de vapor, la mayor parte de esta se lleva a cabo en las hojas. El proceso de transpiración desempeña los siguientes papeles: Movimiento del agua a todas las partes de la planta, movimiento de sustancias minerales y disipación de la energía radiante (Miller, 1981).

Existen muchos factores responsables de la apertura estomática, entre otros, la concentración de dióxido de carbono, luz, temperatura, ritmos endógenos, déficit de presión de vapor en la atmósfera y las condiciones hídricas del suelo (Kirkham, 2004). Si existe un recurso indispensable para la producción de alimentos, es el agua. Diferentes tipos de agricultura alrededor

del mundo, son los encargados de alimentar a la población, y no solo alimento sino también fibras para los textiles (Dasch, 2003).

Para producir la comida requerida para satisfacer la demanda de la dieta de una persona diariamente, se requieren alrededor de 3,000 L de agua (FAO, 2007).

Los cultivos agrícolas son dependientes totalmente del agua, por lo tanto, en muchas regiones del mundo la práctica del riego se está intensificando para no depender únicamente de la lluvia, que aun cuando sigue siendo la principal vía de suministro de agua para los cultivos, no es la más eficiente ni la que refleja mas rendimientos.

El principal uso del agua en México, (Figura 1.1) es agrícola, es decir, el agua utilizada para el riego de cultivos, con la siguiente distribución, 76% para el sector agrícola, 14% para el sector publico, 5.1% para las termoeléctricas, 4.1% Industria (CONAGUA, 2008).

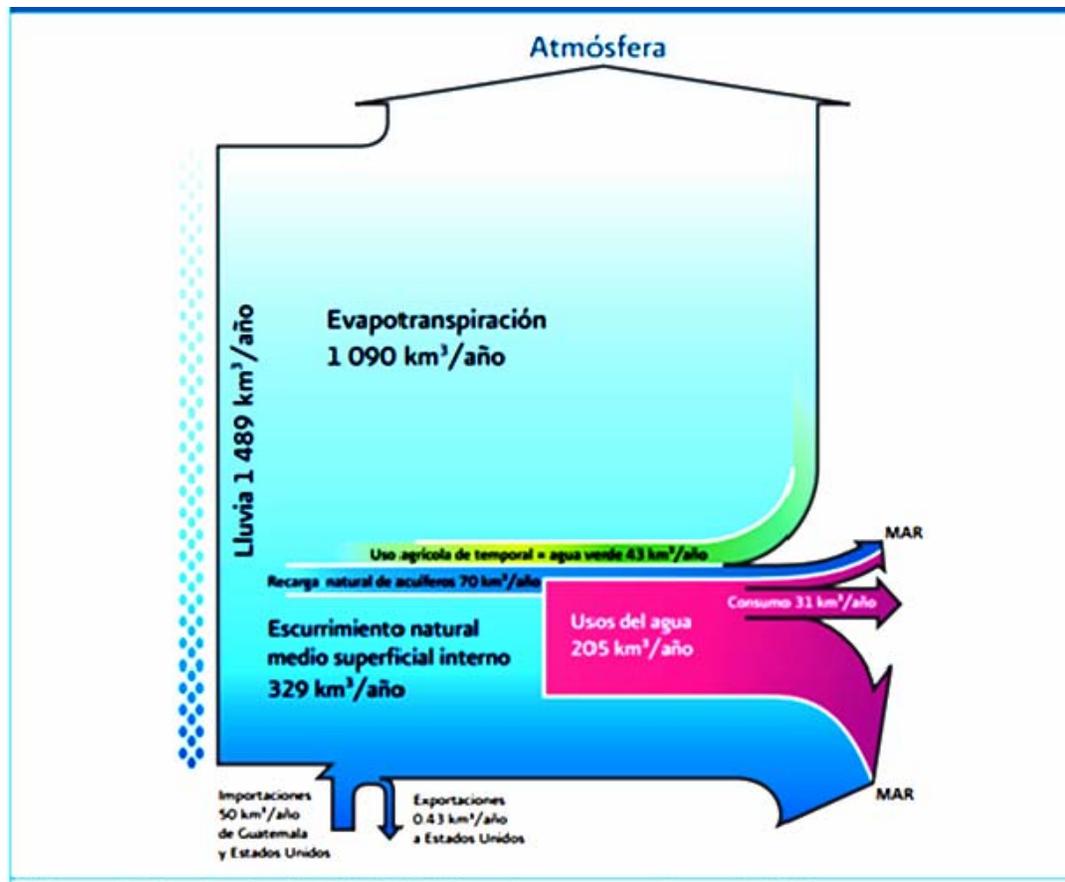


Figura 1.1 Valores medios anuales de la distribución de los componentes del ciclo hidrológico en México.

Eficiencia del uso del agua en la agricultura.

La eficiencia del uso del agua es el rendimiento que tiene un ecosistema vegetal por unidad de agua evapo transpirada. (Hurber, 2004) La definición para la eficiencia del uso del agua, esta interrelacionada con una amplia gama y variedad de definiciones que atienden distintos propósitos.

La productividad física del agua relaciona el total de producción de masa agrícola con el uso del agua, cantidad de producción relacionada con la cantidad de agua utilizada por los cultivos (Molden, 2007).

En muchas regiones agrícolas, la producción sería mayor si no existiera la limitante mas critica de todas, la disponibilidad de agua. El término “eficiencia intrínseca del uso del agua” se define como la relación de los flujos instantáneos de asimilación de CO₂ y la evaporación de agua a través de los estomas.

La conductancia estomática influye en el flujo de CO₂ al interior de la hoja, de tal forma que la capacidad fotosintética determina la demanda de CO₂. (Condon *et al.*, 2002)

Producir más comida, significa destinar más agua al sector agrícola y retirarla de otros usos. La mayor parte de las estrategias del uso del agua de las cuencas hidrológicas hoy en día, se establecen basadas en factores políticos, económicos y sociales, sin tener muy en cuenta la productividad del agua. La productividad de una cuenca se puede ver mejorada con el aumento de la productividad del agua para los cultivos, riego, ganado, etc. por unidad de agua; reduciendo la evaporación no productiva y los flujos a los sumideros (Molden, 2007).

Importancia del uso eficiente del agua.

A medida que la competencia por el recurso hídrico se agudiza, la agricultura de regadío está sujeta a una presión creciente para aumentar la productividad y rentabilidad respecto al agua que consume (Klohn y Appelgren, 1999; Molden, 2007)).

El desarrollo y la supervivencia de la agricultura en las zonas áridas dependen del continuo abasto de agua para riego. A pesar de esto, la disponibilidad de agua de calidad adecuada es muy baja y la competencia por este recurso continuara aumentando (Leib y Horst, 2005).

El porcentaje que representa el agua utilizada para usos consuntivos respecto al agua renovable es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico en un país, cuenca o región. Se considera que si el porcentaje es mayor al 40% se ejerce una fuerte presión sobre el recurso.

Nuestro país en su conjunto experimenta un grado de presión del 17.4%, lo cual se considera de nivel moderado; sin embargo, la zona centro, norte y noroeste del país experimenta un grado de presión fuerte sobre el recurso.

Al año 2030 (Fig. 1.2) en algunas de las Regiones Hidrológico Administrativas del país, el agua renovable per cápita alcanzará niveles cercanos o incluso inferiores a los 4 000 m³/hab/año, lo que se califica como una condición de escasez grave (CNA, 2010).

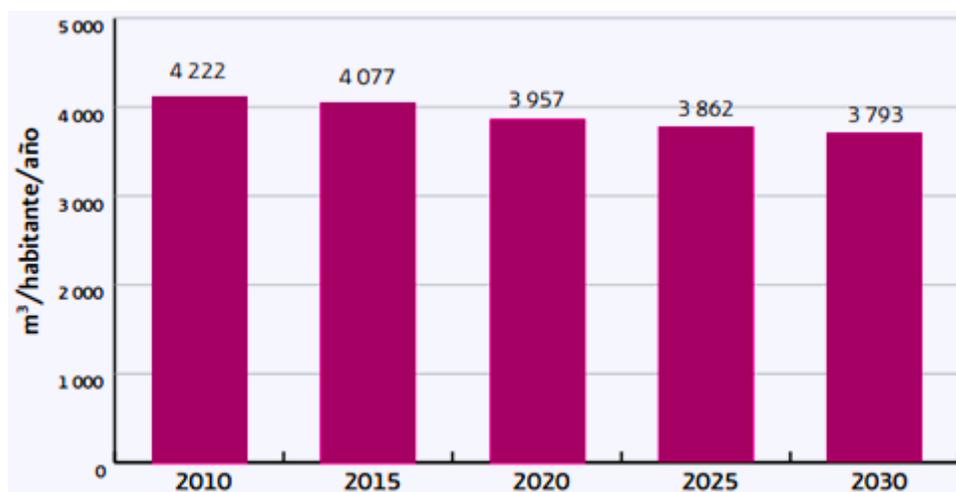


Figura 1.2 Proyecciones del agua renovable per cápita en México.

Con el fin de hacer frente a la disminución de la disponibilidad del agua en los próximos años, será necesario realizar acciones para reducir su demanda, a través del incremento en la eficiencia del uso del agua para el riego de cultivos y en los sistemas de distribución de agua en las ciudades para alimentar a una población mundial de 9100 millones de personas en 2050 sería necesario aumentar la producción de alimentos en un 70 por ciento. Todos los incrementos dependen del agua, y debido a la lenta mejora de la eficacia en el uso del agua, las extracciones de agua para el regadío aumentarían en un 11% en 2050. La presión ejercida sobre los recursos hídricos renovables por el riego seguiría siendo elevada y podría aumentar en varios países (FAO, 2003, FAO, 2009).

Una de las principales prioridades a nivel mundial debe ser aumentar la eficiencia del riego, produciendo más por cada m³ de agua utilizada (FAO, 2002).

La FAO (2007) menciona al aumento de la productividad del agua como una estrategia efectiva para intensificar la producción agrícola y reducir la degradación ambiental. Al mismo tiempo considera que aún existe un amplio espectro de posibilidades para obtener un aumento de la productividad del agua, obtener más producción por unidad de agua, sobre todo en zonas de bajo rendimiento y de secano.

Por lo tanto, realizar inversiones en investigación y tecnología de riego es importante y necesaria. Existen varias acciones realizables, como mejorar el

rendimiento de los sistemas existentes y la adición de nuevos regadíos, que pueden reducir la pobreza mediante el aumento de ingresos de los agricultores, la creación de empleo para las personas sin tierras agrícolas, la reducción de los precios de los alimentos básicos, y contribuir al crecimiento económico general mediante la inducción secundaria beneficios, tales como impulsar la agroindustria (Molden, 2007).

Secado parcial de la raíz y su relación con la eficiencia del uso del agua en la agricultura.

El secado parcial de la raíz (SPR) es una técnica de riego para ahorrar agua relativamente nueva, basada en los mecanismos de señalización química de la raíz a la parte aérea de la planta, donde en cada riego solo una parte de la raíz, aproximadamente la mitad, es regada mientras que el resto se deja secar hasta un nivel predeterminado. La parte seca es regada subsecuentemente y la parte humedecida es dejada secar. SPR trata de ahorrar agua sin afectar la producción. Teóricamente las raíces del lado húmedo mantendrán un estado hídrico de la planta adecuado, mientras que la parte expuesta a la deshidratación genera señales químicas (principalmente ácido abscísico, ABA) de las raíces (experimentando un estrés hídrico) hasta las hojas, conduciendo a una reducción de la conductancia estomática induciendo un cierre parcial estomático (Zegbe-Dominguez, 2003, Dodd, 2006, López-Ordaz *et al*, 2008). Este cierre de los estomas tiene un efecto mayor en la reducción de la tasa de transpiración que en la tasa de asimilación de CO₂, por lo que la eficiencia

intrínseca del uso del agua se mejora (Gowing *et al.*, 1990; Dry and Loveys, 1999; Davies *et al.*, 2002)

Esta técnica fue desarrollada y evaluada de manera exitosa en Australia (Loveys *et al.*, 2000) y ha sido evaluada también en cultivos como maíz (Kaman *et al.*, 2011), papa (Xu *et al.*, 2011), manzana (Zegbe-Dominguez y Serna-Pérez, 2011) y vid (Loveys *et al.*, 2000) entre otros. Comparado con las técnicas comunes de riego, el SPR proporciona posibles ventajas como un control del crecimiento vegetativo, una menor cantidad de agua aplicada sin sacrificar la producción y un aumento en la calidad del fruto (Zegbe-Dominguez, 2003, Dry y Loveys, 1999), todas estas dependen del cultivo que se esté manejando, por lo que es importante realizar evaluaciones en los distintos cultivos para conocer los resultados.

El SPR ha demostrado en muchos estudios claramente aumentar la eficiencia del uso del agua reflejada en unidad de cosecha con respecto a unidad de agua aplicada comparada con métodos convencionales de riego que utilizan cantidades más elevadas de agua (Davies *et al.* 2002, Dry 1997., Kirda *et al.*, 2007, Morison *et al.*, 2008).

El SPR puede representar una contribución importante al desarrollo de la irrigación enfocada a la eficiencia del uso del agua en coordinación con la sustentabilidad y producción de una posible amplia variedad de cultivos (Zegbe-Dominguez, 2003).

Implicaciones fisiológicas del Secado Parcial de la Raíz.

El flujo de agua a través de la planta es esencial para el transporte de nutrientes, fotosíntesis, transpiración, regulación térmica y respiración (Azconbieto y Talón, 2008). El agua es un elemento esencial del protoplasma, es un disolvente en el cual gases, minerales y demás solutos penetran en las células vegetales, es un reactivo en procesos como la fotosíntesis y la hidrólisis del almidón en azúcar y mantiene la turgencia, que es tan importante para la apertura estomática (Kramer, 1974). El crecimiento generalmente está relacionado de manera positiva con la producción y el estrés hídrico, casi siempre resulta en una reducción del crecimiento y la producción (Melgar *et al.*, 2010).

Sin embargo, las plantas pueden soportar diferentes niveles de déficit hídrico y continuar con un desarrollo adecuado, un estrés hídrico no siempre implica efectos negativos, puede derivar en una mejora de la calidad del fruto, aumento del contenido proteico en el caso del trigo, incremento de las propiedades aromáticas en el caso del tabaco. Sin embargo todo esto depende de varios factores y prácticas agronómicas utilizadas. El efecto del estrés hídrico depende en gran medida de la especie y la etapa fenológica (Kramer, 1983).

Efecto del ácido abscísico.

El ácido abscísico es un regulador esencial del crecimiento de las plantas que se encuentra en pequeñas cantidades en todos los tejidos vegetales. También se encuentra en algunos musgos, algas verdes, cianobacterias y

varios hongos fitopatógenos. En 1963, Addicot y cols., aislaron dos compuestos responsables de la abscisión de frutos del algodón, abscisión y abscisión II, siendo el segundo de ellos más activo. En el mismo año otros dos grupos aislaron el compuesto “dormin” causante de dormición en plantas leñosas y “lupine” responsable de la abscisión en las flores, eran iguales, y se les llamo ácido abscísico (Azcon-Bieto y Talón, 2008).

La abscisina, también llamada dormina, es el ácido metil (hidroxi-oxo) trimetil-2-pentanodienoico; denominado ácido abscísico (ABA) pues existen otras abscisinas naturales con acciones específicas.

El ABA provoca diversos efectos. Lo que le dio el nombre fue su acción en la abscisión de las hojas. Otro efecto notable es que induce el letargo invernal de las plantas y semillas de árboles de clima templado.

Las funciones fisiológicas del ABA son muy diversas, presenta implicaciones en respuestas al estrés y procesos del desarrollo.

En las plantas superiores, una de las respuestas características frente al estrés hídrico es el incremento en el contenido de ABA. La Función del ABA en la protección de la planta frente a este estrés es doble: reduce la transpiración e induce la síntesis de proteínas que favorecen la resistencia a la desecación.

El ABA induce el cierre de los estomas inhibiendo una H⁺-ATPasa de la membrana plasmática de las células guarda. Esta enzima transfiere protones fuera de las células guarda y favorece la entrada u acumulación rápida de K⁺, lo que fomenta la entrada de agua y apertura de los estomas. Sin embargo,

cuando el ABA actúa en la superficie exterior de la membrana plasmática de las células guarda este proceso se invierte, de forma que cesa el flujo de K⁺ al interior, se reduce la turgencia y, finalmente, los estomas se cierran (Azcon-Bieto y Talón, 2008).

El ABA formado en las raíces se transporta a través del xilema a las hojas donde ocasiona el cierre de los estomas. Así el aporte de ABA que proviene de las raíces, actúa como una señal cuando las plantas regulan su estado hídrico en los suelos secos para adaptar su funcionamiento antes de que el estrés sea mucho mayor.

La regulación de la abertura estomática parece depender, fundamentalmente, de la disponibilidad hídrica del suelo, que afecta el potencial hídrico de la raíz, al pH y a la síntesis y liberación del ABA al xilema radical (Azcon-Bieto y Talón, 2008).

Estudios previos del efecto del Secado Parcial de la Raíz en otros cultivos.

Los resultados del secado parcial de la raíz (SPR) son variables debido a la diferencia entre las especies y las características de los experimentos; suelo, clima y prácticas agronómicas. (Chaves *et al.*, 2007). En el caso de la manzana Leib y Horst (2005) menciona que el SPR no tuvo un impacto significativo en cosecha, tamaño de fruto y producción y en cambio se aplicó un 25% menos de agua. En mandarina Kirda *et al.* (2007) reporta un aumento en la eficiencia del uso del agua con los tratamientos de SPR y un efecto notable entre el tamaño del fruto y la cantidad de agua aplicada, donde a mayor agua aplicada, mayor tamaño de fruto por lo tanto se debe de hacer un cuidadoso balance entre el

beneficio comercial y el ahorro de agua. Para el caso de la canola (Mousavi y Gerdefaramarzi, 2010) se demostró que el SPR alternado es más eficiente que irrigar siempre un mismo lado de la raíz y mostro que el SPR tuvo efectos en el sistema radicular de la canola y para el tomate Zegbe-Dominguez (2003) reporta la promoción de la maduración temprana.

Estudios previos del efecto del Secado Parcial de la Raíz en limón.

Como ejemplo en cítricos, está el caso de la naranja navel (Hutton y Loveys, 2004) y de la mandarina, para las cuales se reporta una disminución en el uso del agua y el aumento de la eficiencia del uso de la misma, sin efectos en la fructificación y rendimiento del cultivo. Sin embargo en el caso de la naranja el tamaño de fruto y contenido de jugo decreció ligeramente aumentando así la concentración de sólidos totales que se reflejaron en una buena calidad del jugo exponiendo así, los buenos efectos del PRD sobre el cultivo. Para el caso de la mandarina, se demostró que con un SPR que aplicaba 30% menos del agua requerida calculada con un tanque evaporímetro tipo A, la producción de fruto no se vio significativamente reducida.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar del estudio y ubicación geográfica.

El trabajo experimental se realizó en Centro de Investigación Texas A & M University-Kingsville Citrus Center, Weslaco condado de Hidalgo, Texas, USA, ubicado a 10 km de la frontera con México. Las coordenadas geográficas del sitio son 26° 9'59.39"N de latitud y 97°57'24.93"O de longitud Oeste y con una elevación de 20 msnm.

Material vegetal utilizado.

El sitio de estudio corresponde aproximadamente a una superficie de 15 X 8 m de casa sombra. En esta superficie se acondicionó una tarima y se establecieron 48 plantas de limón mexicano con porta injerto C-146 de tres años de edad obtenidas del vivero del Citrus Center.

El porta injerto C146 fue originado a partir de una cruce entre naranja Swingle trifoliata y mandarina Sunki. La naranja Swingle Trifoliata es conocida por su resistencia al Virus de la tristeza (Fang *et al*, 1998), mientras que la mandarina Sunki es altamente tolerante a las sales (Spiegel-Roy y Goldsmith, 1996). Louzada *et al* (2008) menciona que el porta injerto C146 es uno de los más prometedores para la industria de Texas.

Las plantas fueron seleccionadas de un lote y se busco similitud entre todas ellas, se acondicionaron las macetas para el proceso del trasplante que implicó una división de la raíz de los árboles de manera longitudinal con una navaja en dos partes iguales un poco arriba del cuello de la raíz hasta el ápice (figura 2.1), para poder generar diferentes condiciones en cada mitad. Posteriormente se trasplantaron a macetas de plástico de 0.15 x 0.15 x 0.4 m previamente unidas por la parte exterior media y superior con cinta adhesiva (figura 2.2).



Figura 2.1 Separación longitudinal de raíz

Figura 2.2 Raíces separadas en recipientes

El suelo utilizado fue un sustrato llamado metro mix que lleva como ingredientes 45-50% corteza de pino compostada, vermiculita, esfagno canadiense, peat moss, perlita y dolomítica de piedra caliza.

Posterior al trasplante, los árboles se dejaron en reposo por dos semanas para el sanado de las heridas producidas. Durante este tiempo, la humedad se mantuvo a capacidad de campo.

La duración de la aplicación de los tratamientos fue de 66 días en total a partir de la fecha donde se comenzaron a aplicar los tratamientos de riego.

Descripción de los tratamientos evaluados.

Se establecieron seis tratamientos de riego con ocho repeticiones cada uno, un árbol por repetición.

. En el cuadro 2.1 se describen los tratamientos evaluados y en la figura 2.3 se encuentra una ilustración de los tratamientos:

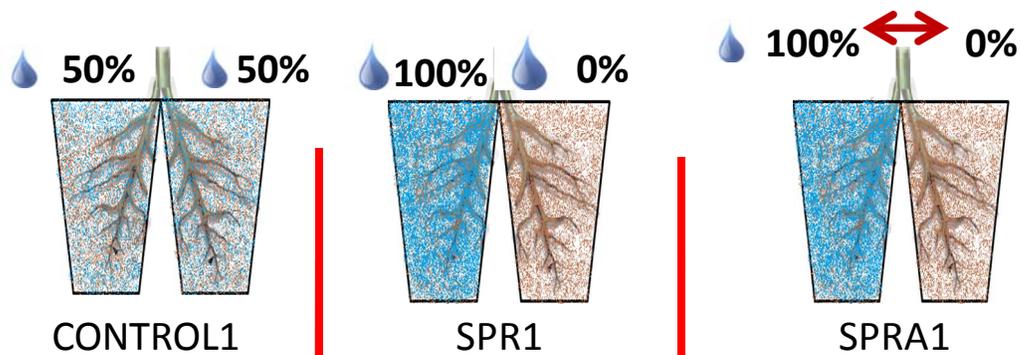
Cuadro 2.1. Descripción de los tratamientos evaluados

Tratamiento	Descripción
1: Control 1	Riego diario, reponiendo el volumen de agua evapotranspirada diaria, en partes iguales (50%) en cada maceta de raíces del árbol.
2: SPR*1	Riego diario, reponiendo el volumen de agua evapotranspirada diaria (100%), solo en una de las dos macetas de raíces.
3: SPRA**1	Riego diario, reponiendo el volumen de agua evapotranspirada diaria, solo en una maceta de raíces y alternando a la otra maceta a intervalo de dos semanas.
4: Control 2	Riego cada 3 días, distribuyendo el volumen total evapotranspirado en partes iguales en cada maceta de raíces.
5: SPR*2	Riego cada 3 días, aplicando el volumen total evapotranspirado solo en una de las macetas de raíces del árbol.

6: SPRA**2	Riego cada 3 días, aplicando el volumen total de agua evapotranspirada solo en una maceta de raíces y alternando a la otra maceta a intervalo de dos semanas.
------------	---

SPR* = secado parcial de las raíces continuo
 SPRA** = secado parcial de las raíces alternado

Riego diario para reponer el 100% de la Evapotranspiración (ET)



Riego cada tercer día para reponer el 100% de la Evapotranspiración (ET)

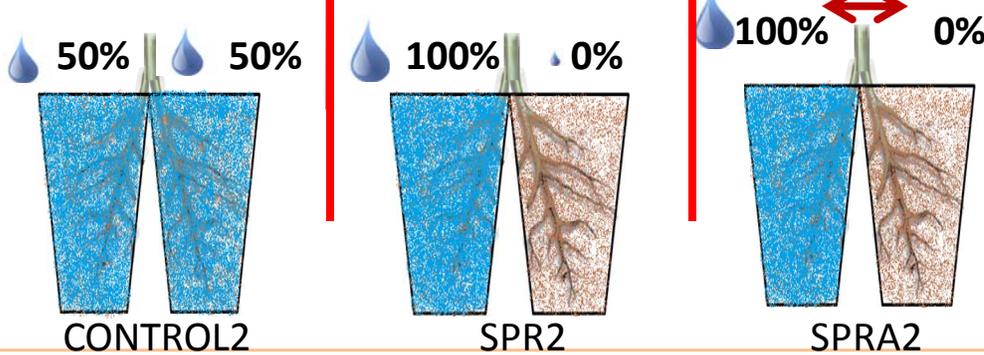


Figura 2.3 Representación esquemática de los tratamientos evaluados.

Diseño estadístico utilizado.

El efecto de los tratamientos en la tasa de fotosíntesis, conductancia estomática, eficiencia intrínseca del uso del agua, agua total aplicada, longitud de raíces y área foliar se evaluó con un diseño estadístico completamente al azar, con seis tratamientos y ocho repeticiones.

Determinación de la lámina de agua Evapotranspirada.

La tasa de evapotranspiración de los árboles se midió con el método del lisímetro de pesada. Al inicio del experimento todos los árboles se regaron a capacidad de campo, con cuidado de que no tuvieran exceso de agua para drenar, se pesaron (peso inicial) y se registró el valor. El volumen de agua evapotranspirada (o por regar) en los tratamientos de riego diario, se obtuvo pesando los árboles diariamente y calculando la diferencia de peso en este intervalo. En los tratamientos de riego cada tres días, los árboles se pesaron a este intervalo y el volumen evapotranspirado se obtuvo de la diferencia de peso en el intervalo. Para monitorear el estado de humedad del suelo y poder determinar el contenido de agua volumétrico en él se utilizó un Time Domain Reflectometry (TDR, model 100 / 200 fieldscout, Spectrum Technologies Inc, Plainfield, Illinois, USA) previamente fue calibrado para las condiciones específicas de suelo de los árboles, una vez por semana se le dio seguimiento al monitoreo.

Mediciones de intercambio gaseoso.

Las mediciones del intercambio de gas y las relaciones hídricas en las hojas se realizaron en dos hojas totalmente desarrolladas que fueran muestra representativa del total de hojas observado y que estuvieran distribuidas una opuesta a la otra. Las mediciones se tomaron durante las semanas, 5, 7 y 9 después del inicio de aplicación de los tratamientos. La asimilación neta de CO₂, eficiencia del uso del agua, conductancia estomática y transpiración fueron medidos con un sistema portátil de fotosíntesis (LI 6400, LICOR Inc., Lincoln,

Nebraska, USA) entre las 9:00 y 12:00 hrs, para evitar altas temperaturas y baja humedad relativa que pueden reducir la tasa del intercambio de gases. Durante el ciclo del experimento se realizaron 5 mediciones en días soleados, a intervalos de aproximadamente 15 días. La medición de la asimilación de CO₂ por las plantas, es un método alterativo y directo de cuantificar el intercambio de carbono, no es destructivo y ofrece una medida directa de la tasa neta de asimilación fotosintética de las hojas.

Transpiración.

La medición de la transpiración se realizó de dos maneras diferentes: Se midió la transpiración instantánea a nivel hoja con el LI-6400. Adicionalmente, se realizaron tres mediciones gravimétricas de transpiración al principio, a la mitad y al final del experimento. Para evitar la evaporación del agua del suelo de las macetas y que solo se perdiera agua por la hojas, todos los árboles después de ser regados se embolsaron y se pesaron, 24 horas más tarde se pesaron de nuevo para poder obtener la pérdida de peso y por lo tanto de agua, así se calculó la transpiración por planta.

Evapotranspiración de los árboles en el período del experimento en los diferentes tratamientos.

La evapotranspiración de los árboles en el período del experimento, fue el resultado de la sumatoria de todas las aplicaciones de agua en cada árbol, que se realizaron individualmente en los tratamientos de riego diario o cada tres días.

Desarrollo de área Foliar.

El área foliar, se calculó con un leaf area meter (LI-300, LICOR INC., Lincoln Nebraska, USA). El desarrollo de área foliar (*daf*) se obtuvo con la siguiente relación:

$$daf = aff - (nihp \times ahf)$$

Dónde: *aff* es el área foliar final (cm²), *nihp* es el número inicial de hojas por planta y *ahf* es el área promedio por hoja final (cm²).

Contenido de humedad en hojas y raíz y materia seca total

Al final del experimento, la raíz de cada maceta, hojas y tallos de cada árbol fueron separados, pesados y posteriormente secados en el horno y pesados para determinar la materia seca total y el contenido de humedad en cada uno de ellos.

El contenido de humedad se determinó de la siguiente manera:

$$\text{Contenido de Humedad} = \frac{(\text{Peso Fresco} - \text{Peso Seco})}{\text{Peso Fresco}} * 100$$

Los pesos secos del total de la materia seca por árbol fueron sumados para determinar la materia seca total.

Eficiencia del uso del agua.

Azcon-Bieto y Talón (2003) se refiere a la eficiencia del uso del Agua como un parámetro de producción, se puede tomar en consideración en diferentes niveles:

En lo que se refiere a la hoja, se le denomina también; eficiencia en el uso del agua de la fotosíntesis, se determinó por medio de mediciones hechas con el sistema fotosíntesis LI-6400, que es una medida instantánea a nivel hoja que se refiere a la cantidad de CO₂ absorbido por cantidad de agua transpirada.

$$WUE_{ph} = \frac{\text{Absorción neta de CO}_2 \text{ (}\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}}{\text{Tasa transpiratoria (mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}}$$

En lo que se refiere al cultivo, se le denomina; eficiencia en el uso del agua de la productividad (WUE_{ph}). La WUE_{ph} se determinó para todo el periodo del experimento en cada tratamiento, dividiendo la cantidad de materia seca total, entre la evapotranspiración en el periodo del experimento.

$$WUE_{ph} = \frac{\text{Materia seca o rendimiento del cultivo (kg/árbol)}}{\text{Agua consumida en evapotranspiración (kg/árbol)}}$$

Mediciones del ácido abscísico (ABA)

Al final del experimento se eligió una hoja de aproximadamente 1g de peso fresco (1 g de peso fresco (FW) de cada repetición de cada tratamiento, todas las muestras tomadas durante la misma mañana. Las muestras fueron inmediatamente congeladas en nitrógeno líquido y congeladas hasta ser analizado. Para comenzar el análisis se trituro hasta obtener un polvo fino. Se extrajo el ABA de cada muestra con 20 ml de acetona fría (800mg/g) que contiene 100 mg/l 2·6-di-tet-butyl-methyl phenol (BHT) y 500 mg/l de ácido cítrico por 16 h a

4°C. Los extractos se centrifugaron a 3000g por 5 min y a 12·5 µl alícuota del flotante se diluyó a 0·5ml con solución salina tri-tamponada (TBS; 50 mM Tris, 1mM MgCl₂, 150 mM NaCl, pH 7·8).

Se analizaron dos muestras con el método de ensayo inmunoenzimático indirecto ligado a enzimas (ELISA) usando anticuerpos monoclonados de Phytodetek . El contenido de ABA se calculó por interpolación con la transformación logit de la curva standard de ABA.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tasa de fotosíntesis

Los resultados de las mediciones de la tasa de fotosíntesis en diferentes fechas mostraron no diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$) entre los tratamientos (Figura 3.1). Esto mostró que los métodos de secado parcial de la raíz evaluados, no tuvieron efecto en la tasa de transpiración de las hojas de los árboles.

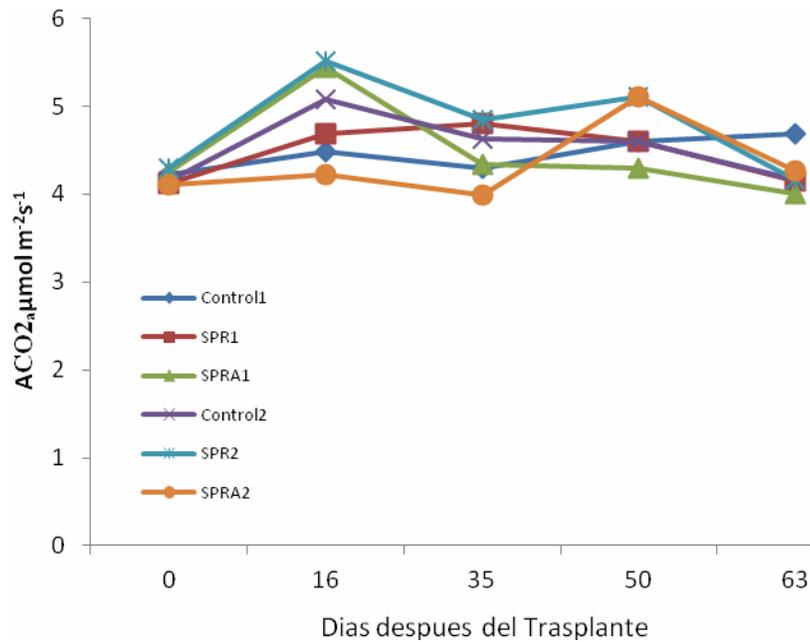


Figura 3.1 Tasa de asimilación de CO₂ para los diferentes tratamientos en las diferentes fechas.

Estos resultados son similares a los reportados en árboles de Mandarina por Kirda *et al.* (2007) que indican que no hubo una disminución en la producción (tomada como indicador de desarrollo) de los tratamientos sometidos a un secado parcial de las raíces comparados con los regados de manera tradicional y con los reportados en citrumelo swingle (resultado de un cruzamiento de pomelo Duncan con *P. Trifoliata*) por Melgar *et al.* (2010) donde el secado parcial de las raíces no afectó el crecimiento ni el intercambio neto de CO₂ y también con lo reportado por Zegbe-Dominguez y Behboudian. (2008) en manzana que menciona que los árboles de manzana no sufrieron cambios en el desarrollo y producción estadísticamente significativos comparadas con las que no estaban sometidas a secado parcial de la raíz.

Conductancia estomática.

El secado parcial de las raíces de los árboles no tuvo efecto ($\alpha \leq 0.05$) en la conductancia estomática de las hojas (Figura 3.2). Este resultado sugiere que los estomas de las hojas mantuvieron el mismo grado de apertura en los diferentes tratamientos. Resultados similares fueron reportados por Marsal *et al.* (2002) en un cultivo de vid y por Zegbe-Dominguez y Behboudian, (2008) en manzana.

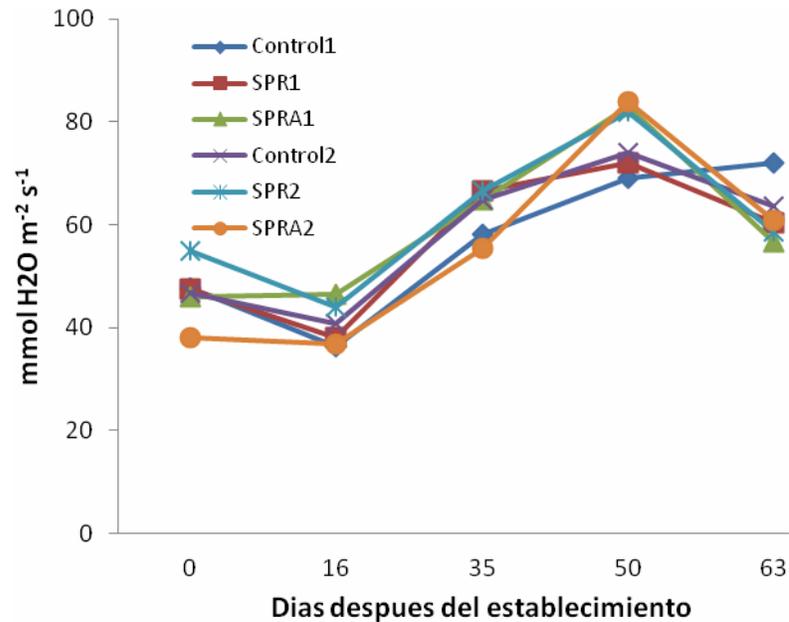


Figura 3.2. Conductancia estomática de las hojas en los diferentes tratamientos en las diferentes fechas de muestreo.

Sin embargo los resultados contrastan con los reportados por Stoll *et al.* (2000) en vid y López-Ordaz *et al.* (2008) en tomate donde mencionan que la conductancia estomática decreció conforme se avanzó en el experimento en la aplicación de tratamientos de SPR, esto pudo deberse a la diferencia de especies manejadas.

Transpiración

El secado parcial de las raíces no tuvo efecto en la tasa de transpiración foliar en las primeras cuatro fechas de muestreo (Figura 3.3). Este resultado indica que los árboles tuvieron una lenta respuesta al efecto del secado parcial de las raíces. En la fecha cinco, la mayor tasa de transpiración foliar se observó en el tratamiento control 1 (Aplicación del riego diario, distribuyendo el volumen total evapotranspirado en partes iguales en cada maceta de raíces.), y fue estadísticamente diferente ($\alpha \leq 0.05$) a los tratamientos SPRA1 y SPR2. Las diferencias registradas en la fecha 5 corresponden con el resultado de contenido de ABA que puede ser el causante de una reducción en la transpiración a nivel foliar, esto concuerda con Azcon-Bieto y Talón (2008) y muestra que el ABA si tuvo efecto aunque solo se reflejó en la fecha 5 justo al final del experimento.

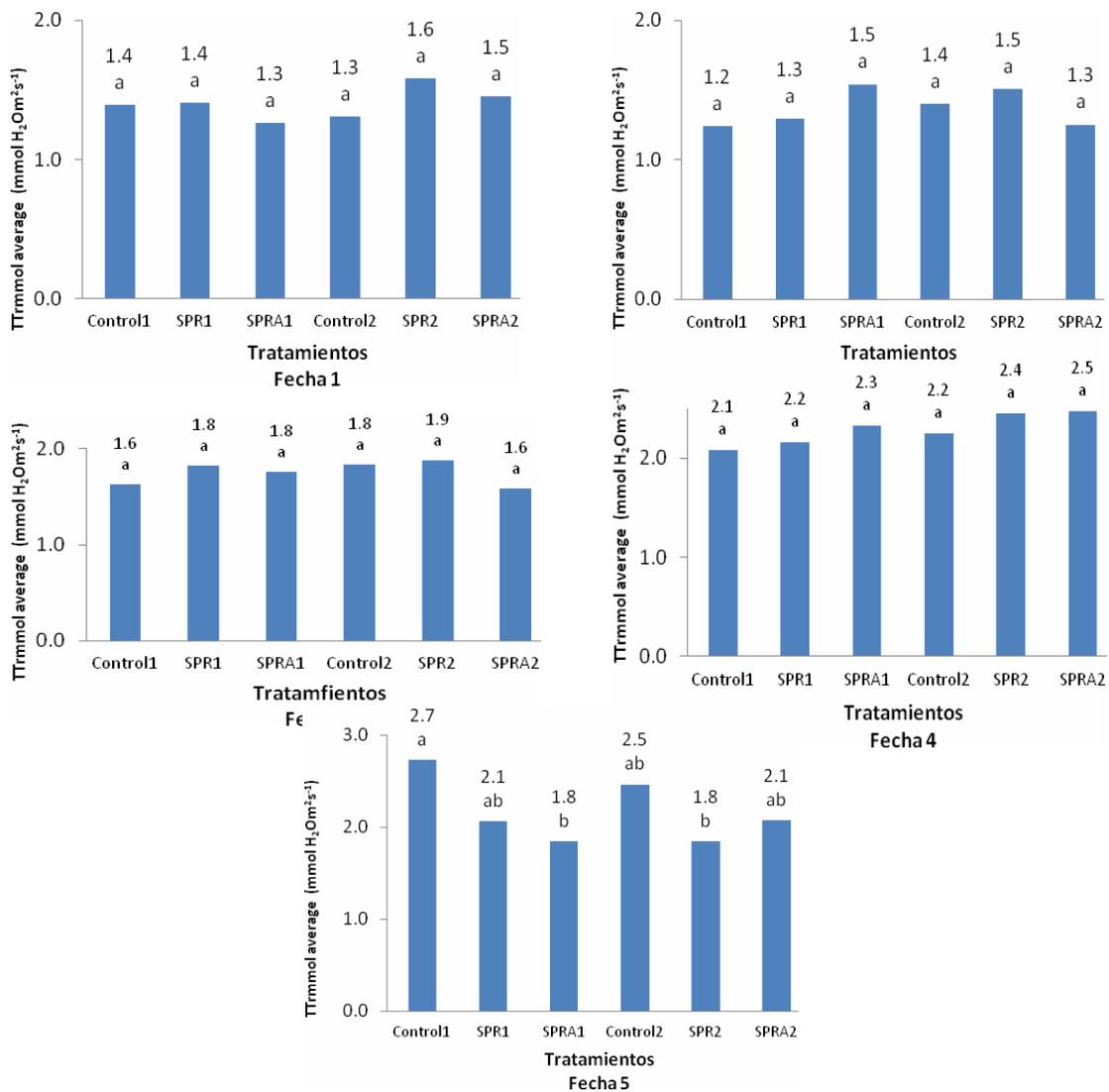


Figura 3.3 Transpiración foliar instantánea, medida con un sistema de medición portátil (Li-COR 6400) para las diferentes fechas de muestreo.

Evapotranspiración de los árboles en el período del experimento

Aplicar el riego para reponer el agua evapotranspirada total cada tercer día, distribuyendo el agua en partes iguales en cada sección de raíces (Control 2) tuvo el mismo efecto ($\alpha \leq 0.05$) en el agua consumida por los árboles, que

aplicar el riego diariamente, distribuyendo también el agua aplicada en partes iguales en cada sección de raíces (Control1) (Figura 3.4).

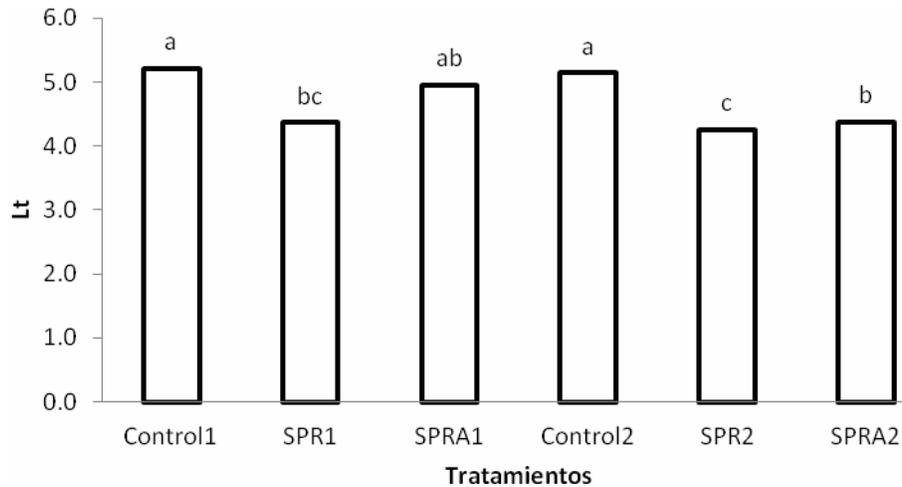


Figura 3.4 Comparación de medias por tratamiento de evapotranspiración en el período del experimento (litros). Los datos corresponden a las medias de ocho repeticiones

Esto se debió a que el medio que se utilizó para el desarrollo de las raíces tuvo una buena capacidad de retención de agua, de tal forma que la aplicación del riego cada tres días, no ocasiono un estrés hídrico en la las plantas ya que el medio mantuvo una buena disponibilidad de agua para las plantas.

El menor consumo de agua por los árboles ocurrió al aplicar el riego cada tres días solo en una sección de raíces del árbol (SPR2) y fue estadísticamente

menor ($\alpha \leq 0.05$) que el tratamiento control uno (Figura 3.5). En este estudio el SPR redujo la cantidad requerida de agua aplicada para SPR1 y SPR2 en un 16.3 y 18.5% respectivamente, con respecto al Control 1 que fue el tratamiento con mayor consumo y aplicación de agua. Estos resultados no tuvieron efecto en el crecimiento total ni en el intercambio de CO_2 , y coinciden con lo reportado por Melgar *et al.*, (2010) donde el tratamiento de SPR combinado con riego deficitario generó una disminución de requerimiento de agua de riego y con lo reportado por Zegbe-Dominguez y Behboudian, (2008) que menciona que el tratamiento de SPR presento un consumo de agua más bajo comparado con el tratamiento testigo. Estos resultados pueden deberse a dos factores, una menor transpiración, registrada en la fecha 5 como por parte de los tratamientos SPR1 y SPR2 y a el hecho de que en los casos de los tratamientos sometidos a SPR el área expuesta a evaporación directa desde la superficie del suelo es menor y por lo tanto se reduce la perdida de agua, reflejado esto último en una menor demanda de agua.

Desarrollo de área foliar.

No se observaron diferencias entre tratamientos para el desarrollo de área foliar (Figura 3.5). Esto significó que no se tuvo efecto del secado parcial de las raíces en el desarrollo de las hojas de los árboles.

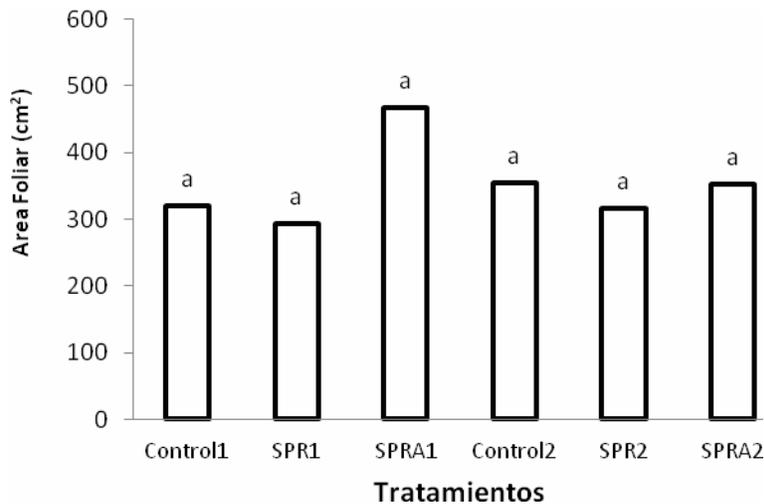


Figura 3.5 Desarrollo de área foliar de las plantas en los diferentes tratamientos.

Esto difiere con los resultados reportados por Loveys *et al.*, (1998) que indican una reducción del área foliar de las plantas sometidas a SPR comparadas con las plantas control en vid, durante 3 años, y con lo reportado por López-Ordaz *et al.* (2008) en tomate sometido a SPR. Esta diferencia probablemente se debió a que este estudio se desarrolló en aproximadamente dos meses y los efectos del SPR en el desarrollo foliar de las plantas se manifiestan en un tiempo mayor.

Materia seca total.

El tratamiento con mayor producción de materia seca total (Figura 3.6), fue el SPRA1 que mostro la mayor producción de materia seca total con diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$) con respecto al tratamiento Control1. Estos

resultados contrastan con los reportados por Dorji *et al.* (2005) en un cultivo de chile ya que ellos no observaron diferencia significativas entre los diferentes tratamientos de secado parcial de las raíces. Esto probablemente se debió a un mayor desarrollo inicial de los árboles del tratamiento SPRA1, con relación a los árboles de los otros tratamientos.

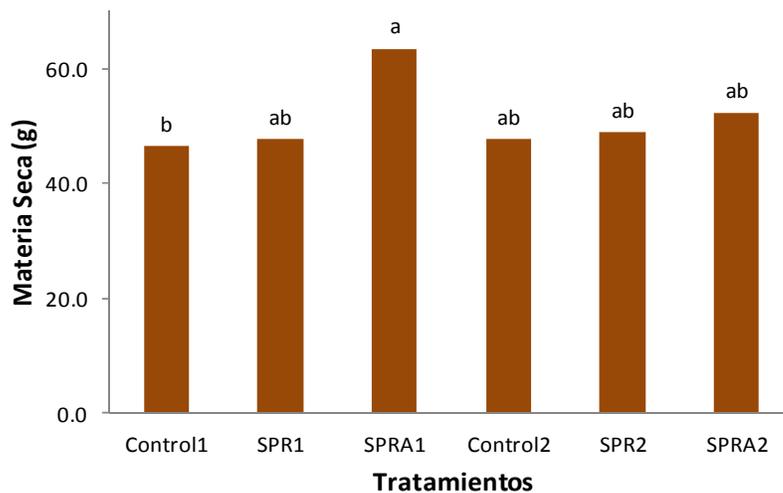


Figura 3.6 Materia seca total en los diferentes tratamientos evaluados.

Contenido de agua en hojas y raíz.

Para el contenido de agua en hojas (Figura 3.7), no hubo diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$) entre tratamientos, estos resultados concuerdan con lo publicado en Chile por Stikic *et al.* (2003), en jitomate por Zegbe-Domínguez, (2003) y en vid por Dorji *et al.* (2005), ya que no encontraron diferencias en las relaciones hídricas en plantas.

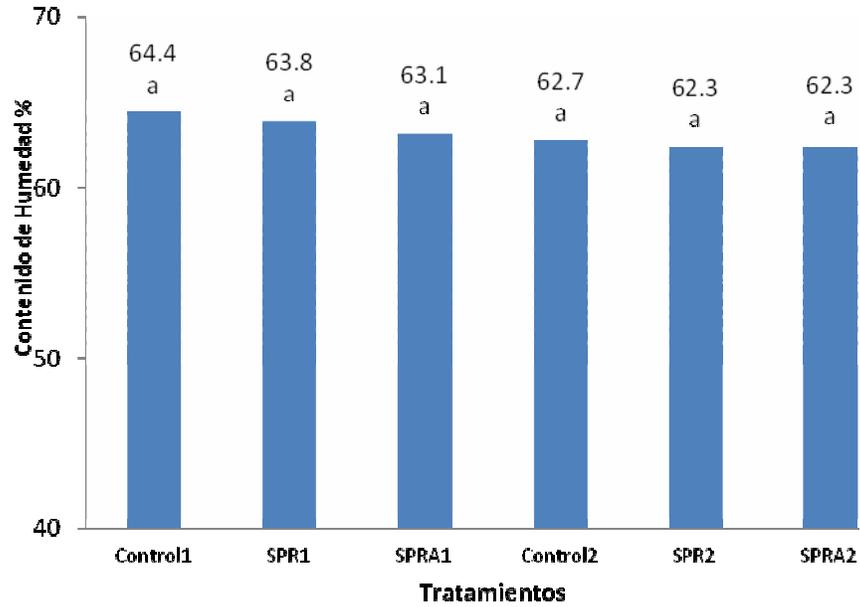


Figura 3.7 Contenido de agua en hojas.

No se observaron diferencias estadísticas significativas (en el contenido de agua de las raíces del lado A (con riego) de los diferentes tratamientos (Figura 3.8).

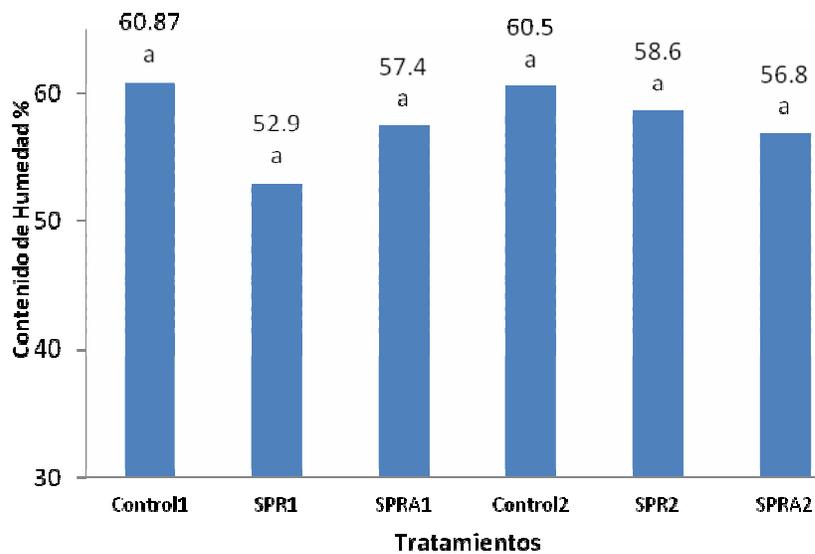


Figura 3.8 Contenido de agua en raíz del lado A para todos los tratamientos al termino del estudio.

Sin embargo, en el lado B (sin riego durante todo el estudio) que corresponde a los tratamientos SPR1 y SPR2 (Figura 3.9), estos tuvieron los valores más bajos del contenido de agua en las raíces y fue menor ($\alpha \leq 0.05$) que el observado en el tratamientos Control1, Control 2 y SPRA2. Los bajos contenidos de agua en la raíz del lado B de los árboles, como era de esperarse, se deben al estrés hídrico al que se sometieron las plantas de estos tratamientos durante todo el tiempo del estudio.

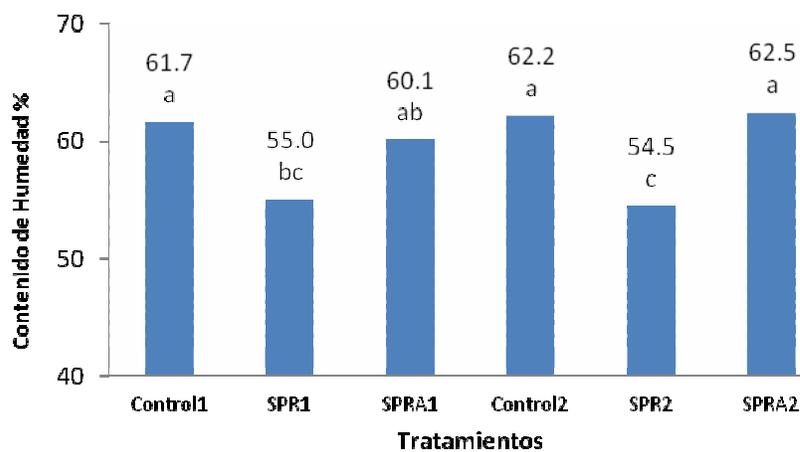


Figura 3.9 Contenido de agua en raíz del lado B para todos los tratamientos al termino del estudio.

Eficiencia del uso del agua.

La eficiencia del uso del agua (WUE) calculada dividiendo la cantidad de materia seca en gramos por la cantidad de agua aplicada en kilogramos,

muestra diferencias significativas entre los tratamientos sometidos a PRD (Figura 3.10). El tratamiento secado parcial alternado de la raíz uno (SPAR1) mostró el valor mayor de WUE y fue estadísticamente mayor que el tratamiento Control 1 y Control 2. Esto demostró que con la técnica del secado parcial de la raíz de los árboles es posible mejorar la eficiencia del uso del agua. Resultados muy similares fueron reportados en mandarina por Kirda *et al.* (2007) donde el tratamiento con riego tradicional registro la WUE mas baja, y con los reportados en maíz por Kaman *et al.* (2011), que también registro una mayor WUE comparado a los tratamientos testigo y sometidos a riego deficitario.

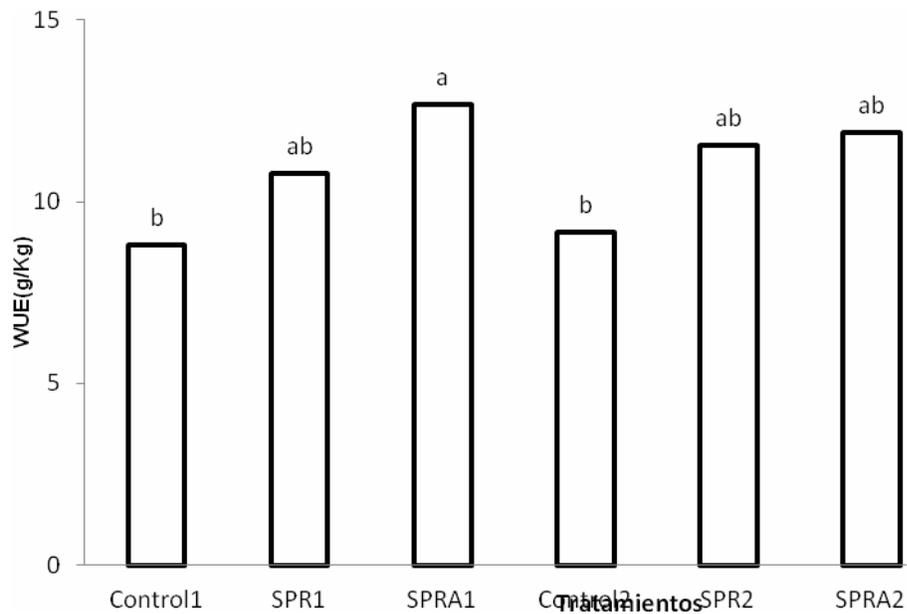


Figura. 3.10 Eficiencia del uso del agua por los árboles en los diferentes tratamientos

Contenido de ácido abscísico (ABA) en las hojas

El contenido de ABA (Figura 3.11) en las hojas mostro que el tratamiento SPR1 (secado parcial de la raíz sin alternancia) y regado diariamente, en la otra mitad de la raíz, fue estadísticamente mayor que el observado en las hojas de los árboles de los tratamientos control 1 y 2 y el SPRA1. Esto demostró que el hecho de dejar de regar el 50% del volumen radicular de los árboles envía una señal de estrés a las hojas, que incrementa la cantidad de ABA.

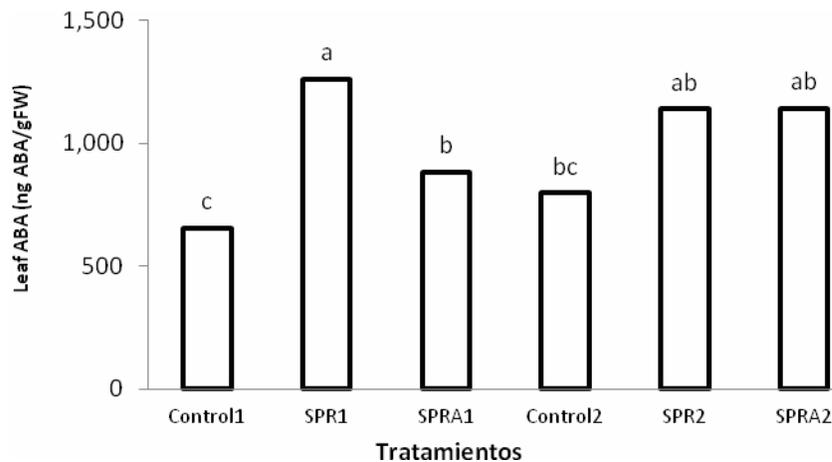


Figura 3.11 Contenido promedio de ácido abscísico (siete repeticiones) en las hojas de los árboles de los diferentes tratamientos.

Estos resultados coinciden con el marco teórico marcado por Azcon-Bieto y Talón (2008) y con los resultados reportados por Dodd *et al.* (2006) en tomate y vid respectivamente. Ellos reportan que a medida que aumenta el déficit de agua en el suelo, se incrementa el contenido de ABA, ocasionando un cierre parcial de los estomas.

V. CONCLUSIONES

El secado parcial de las raíces (SPR) de los árboles durante el experimento corto en árboles de limón mexicano de tres años de edad injertados en C146, demostró ser eficaz en el incremento de la eficiencia del uso del agua, sin causar repercusiones en el crecimiento de la planta, después de ser sometidos a diferentes combinaciones de SPR por 66 días.

El tratamiento SPR2 demostró ser el más recomendable debido a que tuvo un consumo de agua menor y una buena eficiencia del uso del agua y que a su vez no tuvo diferencias en el desarrollo, reflejado todo esto en los diferentes parámetros, comparado con los demás tratamientos.

Partiendo de los resultados de la presente investigación es posible que el limón mexicano tenga una buena respuesta a la aplicación del método de riego del secado parcial de la raíz, sin embargo, es necesario extender la investigación a campo y hacer una comparación de los beneficios con respecto a otros métodos que permiten ahorrar agua y que podrían ser más económicos para determinar cuál es la mejor opción.

Así mismo es necesario evaluar ciclos anuales completos en campo para poder determinar la repercusión en las plantas a largo plazo debido a que los árboles pueden presentar una reacción distinta ya sea favorable y/o desfavorable que toma en ocasiones años para manifestarse.

VI.LITERATURA CITADA

- Azcón-Bieto, J., Talón, M. 2008. Fundamentos de Fisiología Vegetal. P Madrid, España. Editorial McGraw- Hill, 350p.
- Audesirk, T., Audesirk, G., Byers, B. 2003 Biología: La vida en la Tierra. Pearson Education. México, 980p.
- Ballester, C., Castel, J., Testi, L. 2012. Can heat-pulse sap flow measurements be used as continuous water stress indicators of citrus trees?. *Irrigation Science* 27(1):386-395.
- Calderon, E. 1983. El Esfuerzo del Hombre, Fruticultura General. México, Df. Editorial Limusa, 418p.
- Chaves, J.J., Santos, C.R., Souza, M.F. *et. al.* 2007. Deficit irrigation in grapevine improves water-use efficiency while controlling vigour and production quality. *Journal compilation 2007 Association of Applied Biologists* 1 Ann Appl Biol 150: 237–252 .
- CNA (Comision Nacional del Agua), 2010. Estadísticas del Agua en México 2010. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, DF, 251 p.
- CONAGUA, 2008. Programa Nacional Hídrico 2007-2012: Introducción y Situación Actual. Mexico, 2008. Editorial SEMARNAT. 163 p.
- Condon, A.G., Richards, R.A., Rebetzke, G.J. 2002, Improving Intrinsic Water Use Efficiency and Crop Yield. *Crop Science* 42: 122-131.
- COVECA, 2011. Monografía del limón. Revisado (10/11/12) en: http://portal.veracruz.gob.mx/pls/portal/docs/PAGE/COVECAINICIO/IMA_GENES/ARCHIVOSPDF/ARCHIVOSDIFUSION/TAB4003236/MONOGR_AFIA%20LIMON2011.PDF
- Dasch, J., 2003. Agriculture and Water: Water: Science and Issues. New York, USA. 21p.
- Davies, F. S., Albrigo, L. G. 1999. Taxonomía, Cultivares y Mejora. P. 13-56 Cítricos. Zaragoza, España. Editorial Acriba. 283p.
- Davies W.J., Wilkinson, S., Loveys, B. 2002 Stomatal control by chemical signaling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phytol* 153:449-460.
- Dorji, K., Behboudian, M.H., Zegbe-Dominguez, J.A. 2005. Water relations, growth, yield, and fruit quality of hot pepper under deficit irrigation and partial rootzone drying. En: *ELSEVIER: Scientia Horticulturae* 104: 137–149.
- Dry, PR, 1997. Response of grapevines to partial drying of the root system. PhD Thesis, University of Adelaide, Adelaide, 273p.
- Dry, P. R., Loveys, B.R. 1999 Grapevine shoot growth and stomatal conductance are reduced when part of the root system is dried. *Vitis* 38, 151-156.
- Dry, P.R., Loveys, B.R. and Düring, H. 2000. Partial drying of the rootzone of the grape. I. Transient changes in shoot and gas exchange. *Vitis* 39:3-7.

- Dodd I.C., Theobald J.C., Bacon M.A., Davies W.J. (2006) Alternation of wet and dry sides during partial rootzone drying irrigation alters root-to-shoot signalling of abscisic acid. *Functional Plant Biology*, 33, 1081–1089.
- EgeaA, G.; Dodd, I.; Gonzales, M. et. al. 2011. Partial root zone drying improves almond tree leaf-level. *Functional Plant Biology* 38(5): 372-385.
- FAO, 2002. Agua y Cultivos: Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. Roma, Italia 2001 28p.
- FAO. 2003. World agriculture: towards 2015/2030. Earthscan Publications Ltd
- FAO .2004. Perspectivas a plazo medio de los productos básicos agrícolas.FAO
FAO Commodities and Trade Technical Paper. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN, 2004.
Revisado 01/11/12 en:
<http://www.fao.org/docrep/007/y5143s/y5143s00.htm>
- FAO 2012.World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision: Global Perspective Studies Team. FAO Agricultural Development Economics Division Roma, Italia 147p.
- FAO. 2007. Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. 2007. Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. London. Editorial: Earthscan, and Colombo: International Water Management Institute. 2007. 40p.
- FAO. 2009. La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050: Secretaría del Foro de Alto Nivel de. Roma, Italia. 2009. Revisado 04/10/2012 en: http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf
- Fang DQ, Federici CT, Roose ML (1998) A high-resolution linkage map of the Citrus tristeza Virus resistance gene region in Poncirus trifoliata(L) Raf. *Genetics* 150:883–890.
- Gowing, D.J.G., Davis, W.J. and Jones, H.G. 1990. A positive root-sourced as an indicator of soil drying in apple. *Malus x domestica* Borkh. *Journal of Experimental Botany* 41: 1535-1540.
- Huber J, A., Trecaman, R. 2004.Eficiencia del uso del agua en plantaciones de *Pinus radiata* en Chile. En:*Bosque (Valdivia)*, 2004, 25(3): 33-43.
- Hutton, R.J.; Loveys. B.R. 2004 A partial root zone drying irrigation strategy for citrus—Effects on water use efficiency and fruit characteristics. En: *ELSEVIER. Agricultural Water Management* Agosto 2004, 73:195–206.
- INEGI, 2011.El sector alimentario en México 2011.INEGI Serie estadísticas Sectoriales. Aguascalientes, México. 68p.
- Kaman, H.; Kirda, C.; Sesveren, S. 2011. Genotypic differences of maize in grain yield response to deficit irrigation En: *ELSEVIER: Agricultural Water Management* 98: 801–807.
- Kirda, C.; Topalolu F., Topçu, S. 2007. Mandarin Yield Response to Partial Root Drying and Conventional Deficit Irrigation. En: *TURKISH JOURNAL OF AGRICULTURE AND FORESTRY* 31: 1-10.

- Kirkham, M.B. 2004 Principles of Soil and Water Relations. Elsevier Academic Press 500p.
- Klohn, W. Appelgren, B., 1999. Agua y Agricultura. En : Afers Internacionals.n 46: 105-126.
- Kramer, S., Achuricht, R., Friedrich, G. 1983. Fruticultura. Editorial Continental, Df, México, 276 p.
- Leib, B.G., Horst, W., et. al. 2005 Partial rootzone drying and deficit irrigation of 'Fuji' apples in a semi-arid climate. Irrigation Science. Issue 2: 85-99. doi: 10.1007/s00271-005-0013-9
- Louzada, E.S., del Rio, H.S, Sètamou, M., et. al. 2008 Evaluation of citrus rootstocks for the high pH, calcareous soils of South Texas. En: Springer Science+Business Media B.V. 2008 Euphytica (164): 13–18London. P.432.
- López–Ordaz, A.; Trejo–López C.; Peña–Valdivia, B., 2008. Secado parcial de la raíz de jitomate: efectos en la fisiología de la planta y calidad de fruto. En: Agricultura técnica en México 34(3).
- Loveys B.R., Stoll, M., Dry P.R. 1998 Partial Rootzone drying stimulates stress responses in grapevine to improve water use efficiency while maintaining crop yield and quality. The Australian Grapegrower and Winemaker (annual Technical Issue), 414, 108-113.
- Loveys, B. R., Dry; P.R., Stoll, M. and McCarthy, M.G. 2000. Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops. Acta Horticulturae 537: 187-197.
- Loveys, B.R., Stoll, M., Davies, W.J. 2004 Physiological approaches to enhance water use efficiency in agriculture: exploring plant signaling in novel irrigation practice. In Water use efficiency in plant Biology (ed. M.A. Bacon) 5:113-141. Oxford, UK: Blackwell, Publishing.
- Martínez, F. J. 1977. Cultivo del Naranja, Limonero y otros Agrios. Barcelona, España. Editorial Sintesis
- Marsal J., Mata, M., Arbones, A, Rufat, J. 2002 Regulated deficit irrigation and rectification of irrigation scheduling in Young pear trees: an evaluation based on vegetative and productive response. European Journal of Agronomy 17: 11-122.
- Melgar, J.C., Dunlop, J.M. and Sylversten, J.P. 2010. Growth and physiological responses of the citrus rootstock Swingle citrumelo seedlings to partial rootzone drying and deficit irrigation. Journal of Agricultural Science.148(5): 593-602.
- Miller, E. 1981. Fisiología Vegetal Unión Tipografía Editorial Hispano-Americana. México 344p.
- Molden,D. 2007.Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture. London: Earthscan; Colombo: International Water Management Institute;2007.
- Morison, JIL., Baker N.R., Mullineaux PM., Davies W.K. 2008 Improving water use in crop production. Philos Trans R Soc Biological Sciences 363: 639-658.

- Morton, J.F. 1987. Mexican Lime. p. 168–172. In: Fruits of warm climates. Julia F. Morton, Miami, FL. Revisado 06/09/2012 en: http://www.hort.purdue.edu/newcrop/morton/mexican_lime.html
- Mousavi, S.F.; Gerdefamarzi, S., 2010, Effects of partial root zone drying on yield, yield components, and irrigation water use efficiency of canola (*Brassica napus* L.). En: Springer. Paddy and Water Environment 8: 157-163.
- Praloran, J.C. 1977. Los Agrios. Barcelona, España. Editorial Blume, 514p.
- SIAP. 2012. El Limón Mexicano . Revisado (10/11/12) en: <http://www.limonmexicano.gob.mx/index.php?portal=limon>
- Sánchez, C. S. 1942. Cultivo del Limonero. Industrialización del Limón en México. 39 p.
- Seckler, D. 1996. The new era of water resources management: From Dry to Wet. Issues of Agriculture, No. 8, 1996, by the Consultative Group on International Agricultural Research, CGIAR Secretariat, Washington, D.C. 20p.
- Soler, A., Soler, G. 2006. Cítricos. Variedades y Técnicas de Cultivo. Madrid, España. Editorial Grupo Mundi-Prensa. 152p.
- Stoll, M., Loveys, B., Dry, P. 2000. Hormonal changes induced by partial Rootzone drying of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 350(51): 1627-1634.
- Stikic, R.; Popovic, S.; Srdic, M.; Savic, D.; Javanovic, Z.; Prokic, L. J. and Zdravkovic, J. 2003. Partial root drying (PRD): a new technique for growing plants that saves water and improves the quality of fruit. *Bulgarian Journal of Plant Physiology, Special Issue*. p. 164–171.
- Spiegel-Roy P, Goldschmidt EE (1996) Breeding aims. In: biology of citrus—biology of horticultural crops. Cambridge University Press, Cambridge, UK, p 201
- Tamaro, D. 1979. “Auranciaceas”. Tratado de Fruticultura (750-752). Editorial Gustavo Gili, Barcelona, España, 939p.
- Vera, J., Abrisqueta, I., Abrisqueta, J.M., et. al. 2012 Effect of deficit irrigation on early-maturing peach tree performance. Irrigation Science water use efficiency and afternoon water status compared with regulated deficit irrigation. *Functional Plant Biology*, 38: 372–385.
- Xu, H.; Qin, F.; Qicong, X. et. Al. 2011. Applications of xerophytophysiology in plant production – The potato crop improved by partial root zone drying of early season but not whole season. *Scientia Horticulturae* 129: 528–534.
- Zegbe-Dominguez, J.A., 2003. Partial Rootzone Drying in apple and in processing tomato. PhD Thesis At Institute of Natural Resources, Massey University Palmerston North, New Zealand. 183p.
- Zegbe-Dominguez, J.A. Behboudian, H. 2008. Plant water status, CO₂ assimilation, yield, and fruit quality of ‘Pacific Rose™’ apple under partial rootzone drying. *Horticultural Science* 22(1): 27-32.

Zegbe-Dominguez, J.A., Serna-Pérez, A., 2011, Partial root zone drying maintains fruit quality of 'Golden Delicious' apples at harvest and postharvest. *Scientia Horticulturae* 127, 455–459.