

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

Título

**ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA, LA EFICIENCIA
EN EL USO DE LA RADIACIÓN Y PARÁMETRO $kDPV$ EN PLANTAS JÓVENES
DE GRANADO (*punica granatum* L.), HIGUERA (*figus carica* L.) Y TUNA (*opuntia*
figus-indica (L.) miller)**

CARLOS ALBERTO FAÚNDEZ URBINA

SANTIAGO-CHILE

2013

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

Título

ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA, LA EFICIENCIA EN EL USO DE LA RADIACIÓN Y PARÁMETRO kDPV EN PLANTAS JÓVENES DE GRANADO (*punica granatum l.*), HIGUERA (*figus carica l.*) Y TUNA (*opuntia ficus-indica (l.) miller*)

ESTIMATION OF WATER USE EFFICIENCY, RADIATION USE EFFICIENCY AND kDPV PARAMETER OF YOUNG PLANTS OF POMEGRANATE (*punica granatum l.*), FIG (*figus carica l.*) AND PRICKLY PEAR (*opuntia ficus-indica (l.) miller*)

CARLOS ALBERTO FAÚNDEZ URBINA

SANTIAGO-CHILE

2013

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA, LA EFICIENCIA EN EL USO DE LA RADIACIÓN Y PARÁMETRO $kDPV$ EN PLANTAS JÓVENES DE GRANADO (*punica granatum l.*), HIGUERA (*figus carica l.*) Y TUNA (*opuntia ficus-indica (l.) miller*)

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Agrónomo

CARLOS ALBERTO FAÚNDEZ URBINA

PROFESORES GUÍAS

Sr. Nicolás Franck B.
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.

5,5

Sr. Cristian Kremer F.
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.

6,8

PROFESORES EVALUADORES

Sr. Julio Haberland A.
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.

6,8

Sr. Ítalo Chiffelle G.
Bioquímico, Dr.

6,0

COLABORADOR

Sr. Víctor García De Cortázar G. de C.
Ingeniero Agrónomo, Dr. Ing.

SANTIAGO-CHILE

2013

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre Clara Urbina Gavilán por todo el apoyo emocional y sacrificio económico entregado durante mi vida, ya que gracias a ello soy un hombre de esfuerzo y valores. También a mis abuelos Alberto Urbina y Maria Gavilán (Q.P.E.D), mi hermana Lorena Guzmán, mi tía Margarita Urbina, Víctor Soto y los nuevos integrantes Benjamín Navarrete y Matías Navarrete por el apoyo entregado durante mi vida, estudios y aportar en mi desarrollo personal. A mi polola Alejandra Jerez por su paciencia y apoyo durante la realización de mi memoria, estudios y trabajo, junto a su familia por los traslados, comida y apoyo.

Agradezco también a Víctor Muñoz, Don Aldo junto a su pareja, Felipe Parada y Mario Martínez ya que gracias a su compañía y ayuda en la instalación y toma de datos en Las Cardas esta memoria no se hubiera llevado a cabo. A mi profesor Cristian Kremer por darme la oportunidad de participar de esta investigación entregándome consejos y ayuda en la redacción y toma de datos, a Nicolás Franck por la confianza y conocimiento entregado y en especial a Víctor García de Cortázar, que pese a ser colaborador de esta memoria tuvo una gran participación en todo el proceso.

A mis amigos de la Universidad: Mario Martínez, Ñaño (Pablo Cortez), Jp, Yeso, Ailli, Corradini, Gato Flojo, Mono y su pareja Edith, Julián, La Nico, Sandra, Yeri, Pame, Doni y todo aquel que compartí una conversación o algún momento en la universidad, les agradezco la buena compañía, apoyo y carretes. Y por supuesto le agradezco a Guatón Vio (Chicho) que gracias a él elegí esta carrera, nada más, bueno tal vez la buena compañía y risas desde que nos conocemos.

Y a ti lector del futuro, te agradezco por haber elegido esta investigación, te cuento que en este momento no hay educación gratis en Chile, el país es cada vez más consumista y Chile quedo en un pésimo grupo para el mundial de Brasil 2014, probablemente podrás ver los partidos en YouTube, si aún existe, y te adelanto que Jara de Chile se mandará un condoro contra Robben de Holanda. Si eres de 2050 en adelante ve a visitarnos a nuestras tumbas, te agradecería ver si ñaño termino casado y con hijos, algo que a todo nuestro grupo tenía preocupados. Espero que los autos vuelen en tu época y que Chicho haya pasado desapercibido en el ámbito agrícola.

Finalmente le agradezco al proyecto FIA PYT-2008-0216 “Prospección y desarrollo de germoplasma varietal de especies frutales de bajo requerimiento hídrico para aumentar la rentabilidad del agua en el Norte Chico” por el financiamiento de esta memoria.

*“Ebria de tantas maravillas
florece fuera de estación...”*
BBS

ÍNDICE

	Página
RESUMEN.....	2
INTRODUCCIÓN	4
OBJETIVOS GENERALES	7
MATERIALES Y METODOS.....	8
Materiales	8
Métodos	8
Eficiencia en el uso del agua estacional (EUA)	11
Eficiencia en el uso del agua normalizada o kDPV	12
Variabilidad a nivel espacial, estacional y horaria de la eficiencia en el uso del agua instantánea (EUAI) a escala foliar en granado e higuera.	12
Eficiencia en el uso de la radiación (EUR) a nivel estacional en granado e higuera... ..	14
Análisis Estadístico	16
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
Eficiencia en el Uso del Agua instantánea (EUAI).....	17
Biomasa	22
Transpiración	27
Eficiencia en el uso del agua a nivel estacional (EUA).....	27
Diferencias de EUA entre CAM, C4 y C3	30
Diferencias de EUA entre Granado e Higuera.....	31
Parámetro KDPV	31
Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR).....	34
CONCLUSIONES.....	36
BIBLIOGRAFIA.....	37

RESUMEN

Debido a la estacionalidad y escasez del recurso hídrico en la región de Coquimbo, se llevó a cabo un estudio en micro-lisímetros con plantas de 1 año de granado, higuera y tuna, cuyos objetivos fueron: determinar la eficiencia en el uso del agua estacional (EUA), la eficiencia en el uso del agua normalizada o “kDPV” y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR), con el fin de demostrar que aquellas especies poseen bajo consumo hídrico y serían una buena alternativa para la producción frutícola en zonas áridas. La EUA y EUR son parámetros muy útiles para ser utilizados en zonificación agrícola, sin embargo, diversas investigaciones demuestran que son parámetros clima-dependientes resultando compleja una comparación directa entre distintos estudios, debido a esto, se han buscado formas de normalizarlas principalmente con el déficit de presión de vapor de la atmosfera (DPV). Los resultados obtenidos de EUA y kDPV para granado, higuera y tuna en esta investigación fueron respectivamente: 4,70; 3,97 y 18,57 ($\text{g}_{[\text{MS}]}\text{kg}^{-1}_{[\text{H}_2\text{O}]}$); 3,3; 2,86 y 6,48 ($\text{g}_{[\text{MS}]}\text{kPa}\text{kg}^{-1}_{[\text{H}_2\text{O}]}$) y la EUR para granado e higuera (no se evaluó en tuna) fue 2,59 y 2,39 ($\text{g}_{[\text{MS}]}\text{MJ}^{-1}$) respectivamente. También se evaluó la variabilidad de la EUA en función de parámetros climáticos, a través de la eficiencia en el uso del agua instantánea (EUAI), por medio de un analizador de gases infrarojo (IRGA) en granado e higuera (no se evaluó en tuna), la cual, disminuye para ambas especies en condiciones de alto DPV, temperatura de la hoja (T_{hj}) y radiación solar. Se concluye que granado, higuera y tuna son una alternativa para zonas áridas y que la EUAI presenta una relación exponencial negativa con parámetros climáticos como DPV, T_{hj} y PAR.

Palabras claves: Agua, Déficit de Presión de la Atmosfera, Eco-fisiología, Parámetros climáticos, Radiación, Zonificación agrícola.

ABSTRACT

Because of seasonal and water scarcity in the Region of Coquimbo, a study was conducted on one year old plants of pomegranate, prickly pear and fig grown in micro-lysimeters with the goal of estimating their seasonal water use efficiency (WUE), normalized water use efficiency or “kDPV”, and their radiation use efficiency (RUE). The purpose was to demonstrate that such species have low water consumption and would be an alternative to fruit productions in semi-arid zone. Parameters as WUE and RUE, are very useful for agricultural zoning, however, several studies have shown that they are climate-dependent, which makes it difficult to perform direct comparisons between different studies. Therefore, ways to normalized these parameters have been sought, mainly using the vapor pressure deficit (VPD) of the atmosphere. In this research, WUE results for pomegranate, prickly pear, and fig were 4,70; 18,57 and 3,97 (g [MS] kg⁻¹ [H₂O]), respectively; for kDPV results were 3,3; 6,48 and 2,86 (g [MS] kPa kg⁻¹ [H₂O]), respectively; and for RUE they were 2,59 and 2,39 (g [MS] MJ⁻¹), for pomegranate and fig, respectively (not evaluated in prickly pear). The variability of WUE as affected by climatic parameters was assessed via the instant water use efficiency (WUE_i) obtained with an infrared gas analyzer (IRGA) in pomegranate and fig (not evaluated in prickly pear); the WUE_i decreased in both species under high VPD, leaf temperature (Th_j) and solar radiation conditions. It was concluded that pomegranate, prickly pear and fig are an alternative for the semi-arid zones and WUE_i presents a negative exponential relationship with climatic parameters as VPD, Th_j and solar radiation.

Keywords: Agricultural zoning, climate parameters, Eco-physiology, Radiation, vapor pressure deficit of the atmosphere, Water.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el recurso hídrico se ha transformado en tema obligado de todas las grandes potencias del mundo. La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2003) señala que estamos viviendo una grave crisis del agua y que todas las señales indican que la situación empeorará. UNESCO (2006), agrega que la cantidad de agua disponible para la agricultura es cada vez más reducida a causa de la degradación de las tierras y recursos hídricos y que si bien, el riego representa una parte marginal del agua destinada a la agricultura (10% aproximadamente), este es el mayor consumidor de agua dulce del planeta. La crisis de agua en Chile se ha presentado principalmente en la zona centro-norte, en que la relación demanda/disponibilidad se ve afectada por la escasa precipitación y la alta competencia por este recurso de los distintos actores económicos y sociales (Matus *et al.*, 2004). Los científicos advierten que, debido al cambio climático global a raíz de la acumulación de gases de efecto invernadero, se generaría una disminución en la oferta de agua principalmente en la zona comprendida entre Copiapó y Santiago, zonas en que el uso consuntivo del recurso es principalmente el riego (Pizarro *et al.*, 2005). Por lo anterior, en la Región de Coquimbo, el recurso hídrico es un tema prioritario donde la estacionalidad y escasez del recurso han motivado un desarrollo eficiente en un amplio espectro que ha ido desde la construcción de grandes obras de acumulación, hasta la introducción de sistemas de riego más eficientes. Hoy, sin embargo, el tema se vuelve más complejo ya que nuevas variables político-económicas están definiendo la disponibilidad del recurso, haciendo necesaria la búsqueda de alternativas agronómicas más eficientes en el uso del agua.

En la Región de Coquimbo existe una escasa diversificación de frutales para exportación, entre los cuales se destacan: paltos y uva de mesa, todos con requerimientos hídricos medios a altos y siendo su riego principalmente presurizado, aumentando el costo de producción por consumo energético asociado al bombeo del agua, lo que sumado al aumento del precio de los combustibles, podría afectar los ingresos de los proyectos frutícolas. Por esto, se requiere ampliar la oferta con frutales de bajos requerimientos hídricos y buena rentabilidad tales como granado, higuera y tuna. Prat y Botti (2002), indican que el granado es una planta esencialmente de desierto, adaptada para soportar largos periodos de sequía; mientras que Botti (2001) destaca a la higuera como una especie muy tolerante a la sequía, con requerimientos hídricos menores a la mayoría de otros cultivos frutales, por su parte, Sudzuki *et al.* (1993), mencionan que la tuna es una especie con un amplio grado de adaptación ecológica, resistente a la sequía y adaptada a zonas áridas.

En Chile, según el último censo agropecuario y forestal realizado el año 2007, la superficie bajo producción de granado, higuera y tuna alcanzaban 23 ha, 119 ha, y 1143 ha, respectivamente, localizándose en la Región de Atacama 0,4 ha de Granado, 3,5 ha de Higuera y 3,1 ha de Tuna y en la Región de Coquimbo 21,9 ha de granado, 111,5 ha de higuera y 447,4 ha de tuna (INE-CHILE, 2007), demostrando que la superficie de estos cultivos respecto del total nacional se concentra en el norte chico (salvo la tuna), y respecto

del total regional su superficie es baja comparado con frutales de alto consumo hídrico, lo que es una oportunidad de recambio.

Por lo anteriormente expuesto, es necesario poner a disposición de los agricultores de esta zona información técnica y científica acerca de estos frutales, especialmente aquella que les permita un uso más eficiente de sus recursos hídricos y determinar indicadores tempranos del rendimiento potencial que tendrían estas especies bajo las condiciones agroclimáticas en la zona de estudio. Esto permitirá facilitar la diversificación de los productos agrícolas del Norte Chico en base a un menor consumo de agua y energía, favoreciendo además, la consolidación de la competitividad de la zona, en el contexto del posicionamiento de Chile como potencia alimentaria.

La EUA se define como la cantidad de biomasa producida por unidad de agua transpirada por un cultivo (Tanner and Sinclair, 1983) y para determinarla, Katerji *et al.*, (2008) señalan que existen dos enfoques: por un lado está el enfoque eco-fisiológico basado en el análisis en un momento determinado de la relación entre la fotosíntesis y la transpiración por unidad de área foliar a la escala de la hoja, la cual, tiene por nombre eficiencia en el uso del agua instantánea (EUA_i). El otro enfoque es el estacional o agronómico que se basa en los conceptos de consumo de agua y rendimiento (EUA). A pesar que la EUA es un parámetro que se investiga hace más de 100 años (Tanner and Sinclair., 1983), aún no posee una forma estandarizada de estimación, para luego poder ser comparada entre investigaciones (Katerji *et al.*, 2008). Por lo tanto, en la actualidad existen grandes diferencias de valores observados en las mismas especies, las cuales ocurren incluso en estudios realizados en el mismo sitio (Katerji *et al.*, 2008). La razón de esta variabilidad, excluyendo errores experimentales y metodológicos son: régimen hídrico, fertilización (Faustino *et al.*, 2011), calidad de agua, clima, contaminación atmosférica, textura de suelo, cambio climático asociado al carbono de referencia (Liu-Kang and Hsiao, 2004) y especie (Nobel, 2003). Tanner y Sinclair (1983), también incluyen en la variabilidad el efecto de plagas y malezas. Debido a esto, es necesario saber el comportamiento de la EUA con respecto a distintos parámetros. Katerji *et al.* (2008), señalan que la EUA_i describe procesos que determinan la EUA a través de enfoques teóricos y ayuda a entender los resultados globales obtenidos por el enfoque estacional, mientras que Medrano *et al.* (2008) indican que la medición de EUA_i tiene un enorme valor experimental. La EUA_i se define como la tasa fotosintética instantánea (A) dividida por la tasa transpiratoria instantánea (E) (Medrano *et al.*, 2008; Katerji *et al.* 2008), y aquella es normalmente más alta que la EUA debido a la variación espacial y temporal de la radiación fotosintéticamente activa, las pérdidas respiratorias de la planta durante la noche y de los tejidos no fotosintéticos durante el día (Silva y Acevedo., 1995).

Para disminuir la variabilidad de EUA mencionada anteriormente, existen modelos simples para determinarla tal como: $EUA = kDPV DPV^{-1}$, donde DPV corresponde al déficit de presión de vapor de la zona y kDPV es un parámetro dependiente del cultivo, conocido también como eficiencia en el uso del agua normalizada. La normalización por DPV absorbería las variaciones climáticas en EUA, debido a que kDPV permanecería razonablemente constante en diversas zonas climáticas (Kremer *et al.*, 2008; Tanner and Sinclair, 1983). Por lo tanto, la determinación experimental de kDPV permitiría proyectar el

potencial de desarrollo de las diferentes especies propuestas, en zonas climáticas distintas a las cuales se ha realizado la etapa experimental, disminuyendo la variabilidad ambiental asociada a la EUA.

Otro parámetro de interés es la eficiencia en el uso de la radiación (EUR), la cual, está determinada por la radiación global interceptada (R_{Gi}) por las plantas en un periodo determinado y la eficiencia con que esa energía es transformada en materia seca (Grigera *et al.* 2007). Cooper, 1970; Loomis *et al.*, 1971 y Monteith, 1972 (citado por Rosati *et al.*, 2003), mencionan que la producción primaria neta es proporcional a la radiación global interceptada y que representa el límite máximo de la productividad. Así, la producción de biomasa puede ser modelada como una función lineal de R_{Gi}, siempre y cuando el crecimiento no esté limitado por escasez de agua, nutrientes o condiciones climáticas adversas que puedan disminuir los procesos metabólicos que determinan la EUR (Monteith, 1977 y Ruimy, *et al.* 1995 (Citado por Rosati, A. *et al.* 2003)).

OBJETIVOS GENERALES

- ✓ Estimar la eficiencia en el uso del agua (EUA) a nivel estacional para granado, higuera y tuna.
- ✓ Estimar la eficiencia en el uso del agua normalizada o parámetro kDPV para granado, higuera y tuna.
- ✓ Determinar la variabilidad a nivel espacial, estacional y horario de la eficiencia en el uso del agua instantánea (EUAI) a escala foliar en granado e higuera.
- ✓ Estimar la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) a nivel estacional de granado e higuera.

MATERIALES Y METODOS

Materiales

- ✓ Macetas plásticas de 55 L, con 50 cm de alto, diámetro de boca de 47 cm, diámetro de fondo 41,2 cm.
- ✓ Balanza de terreno marca Izetta, modelo PK60 con capacidad de 60 kg y precisión de 0,01 kg.
- ✓ Balanza de laboratorio marca Precisa modelo 3100c con capacidad de 1000 g y precisión de 0,01 g.
- ✓ Horno de secado marca Memmert modelo 800.
- ✓ Analizador portátil de gases infrarojo (IRGA) marca ADC BioScientific Ltd., modelo LC Pro+.
- ✓ Granados variedad Wonderful de 1 año.
- ✓ Higueras variedad Black Mission de 1 año.
- ✓ Tunas ecotipo “blanco” de 1 año.
- ✓ Perlita expandida de 2 mm de diámetro.
- ✓ Estación agroclimática marca Davis Instruments, modelo Vantage Pro.
- ✓ Ceptómetro lineal marca Delta-T Devices modelo SunScan tipo SS1, de 1 m de longitud que integra el registro de 64 sensores sensibles a la radiación fotosintéticamente activa (PAR).
- ✓ Plástico de polietileno negro de 0,1 mm de espesor.

Métodos

Características generales

El experimento se montó en la Estación Experimental “Las Cardas” de la Universidad de Chile, ubicada en la Región de Coquimbo, Provincia de Elqui, entre el 30° 13’ y 30° 19’ latitud sur y el 71° 13’ a 71° 19’ longitud oeste. El clima de la zona es mediterráneo subtropical semiárido con una precipitación de 100 a 150 mm/año, concentrados en los meses más fríos, especialmente Julio, siendo su temperatura media anual de 14,4° C (INIA, 1990).

El periodo de toma de datos tuvo una duración de 503 días, comprendidos entre el 13 de diciembre del 2009 y el 30 de abril de 2011. Para realizarlo, se utilizaron lisímetros de 55 L con una capa de 4,5 kg de grava en su base y llenados con perlita expandida hasta una altura 10 cm inferior de su máxima capacidad. Los lisímetros se ubicaron sobre rieles de madera de una sección de 5 x 2 cm, con una separación de 4 m entre hileras y 0,55 m sobre hilera. Se cubrió su superficie con un plástico de polietileno negro de 0,1 mm de espesor, ajustado con una manguera para evitar evaporación desde el sustrato (Figura 1).

Se utilizaron 144 plantas, 48 de cada frutal, las cuales se establecieron en 3 hileras (1 para cada frutal) en dirección norte-sur, de modo que las plantas recibieran una similar radiación. Las plantas se regaron periódicamente para asegurar un óptimo estado hídrico y se realizaron las fertilizaciones y manejo de plagas y enfermedades necesarias para asegurar el óptimo desarrollo de ellas.



Figura 1: Imagen de la disposición de los lisímetros y las tres especies orientadas norte-sur

El riego fue aplicado utilizando un sistema de riego por goteo, con tres goteros auto-compensados con un gasto de 2 L h^{-1} por planta (Figura 1), usando como criterio de riego un contenido de agua en el sustrato cercano al 70 % de la humedad aprovechable. Para esto, se monitoreó el contenido de agua por medio del pesaje del lisímetro cada 2 días. Las mediciones del contenido de agua antes y después del riego permitieron calcular los montos de agua a reponer, de manera de disminuir la percolación a un mínimo y mantener el sustrato después del riego con valores cercanos al 95 % de la humedad aprovechable.

Biomasa

Se extrajeron cuatro plantas completas por especie cada 40 días hasta el 25/10/2010 y luego, hasta finalizar el ensayo, se extrajeron dos plantas completas por especie (Figura 2). En ambos casos se dividieron las plantas en sus respectivos órganos aéreos y subterráneos. Las plantas se llevaron al laboratorio de la Estación Experimental Las Cardas, donde se determinó el peso fresco (MF) y el peso seco (MS) utilizando una balanza de precisión y un horno de secado a $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$, donde se introdujeron las muestras hasta alcanzar un peso constante. La biomasa obtenida fue utilizada para el cálculo de la EUA, kDPV y EUR.



Figura 2: Imagen donde se muestra la metodología de extracción de las especies, en particular, la tuna

Coefficiente de reparto

Con los datos de biomasa medidos anteriormente, se obtuvieron los coeficientes de reparto de los distintos órganos para las 3 especies, por medio de la sustracción de la materia seca del órgano “i” en dos fechas consecutivas, dividido por la sustracción de la materia seca total en dos fechas consecutivas, tal como indica la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación I: } CR_i = \frac{\Delta MS_i}{\Delta MS_T}$$

Dónde: CR_i es el coeficiente de reparto del órgano “i”, ΔMS_i es la diferencia de materia seca del órgano i en un periodo de tiempo Δt , ΔMS_T es la diferencia de materia seca de toda la planta en un periodo de tiempo Δt . Como se realizan ambas sustracciones en el mismo periodo de tiempo, no se agregó aquel parámetro en la ecuación.

Transpiración

Se estimó a través de lisímetros pesantes (Figura 1), donde la variación de peso ocurrida entre cada periodo de riego se asumió igual al agua transpirada. Dicha variación, se midió con una balanza a todas las plantas por especie, obteniendo el peso previo y posterior a cada riego (el peso posterior se midió una vez finalizada la percolación desde las perforaciones en la base del lisímetro). La variación de peso debido al aumento en peso de la planta en el tiempo, fue

corregido a través de funciones que se ajustaron por medio de ecuaciones exponenciales (peso fresco en función del tiempo) para estimar el peso fresco de cada especie, de manera de adicionar a la transpiración la variación de peso en el lisímetro debido al aumento de biomasa, dichas ecuaciones presentaron valores de R^2 de 0,92, 0,91 y 0,95 para granado, higuera y tuna, respectivamente (datos no presentados). Para evitar las pérdidas de peso por transpiración durante la percolación, se les aplicó agua a las plantas en la tarde, en el caso de las especies C3 (granado e higuera) y en la mañana en la especie CAM (tuna). A su vez, se dispuso de lisímetros en las mismas condiciones que las anteriores, pero sin plantas, para corregir eventuales pérdidas por evaporación. Con estos datos se calculó la EUA para las tres especies.

La transpiración diaria se estimó para granado e higuera por medio de la evapotranspiración de referencia (ET_0), obtenida de una estación agroclimática ubicada a 300 metros del ensayo, con el supuesto que la cantidad de agua transpirada por la planta tiene una correlación positiva con la ET_0 . El procedimiento fue integrar o acumular la ET_0 diaria obtenida de la estación agroclimática entre dos mediciones de extracción de biomasa, y luego se procedió a dividir la ET_0 diaria con la ET_0 acumulada o integrada en aquel periodo, obteniendo un porcentaje diario que se multiplicó con la transpiración acumulada entre cada extracción de biomasa, para así obtener la transpiración diaria. Para la tuna, debido a que es una especie con metabolismo CAM y abre sus estomas durante la noche, el valor de ET_0 es cero, por lo tanto, no se puede realizar la metodología explicada para granado e higuera. La solución fue acumular la transpiración de todo el ensayo y dividirla por los días transcurridos. Para las tres especies la transpiración diaria se utilizó para el cálculo del kDPV.

Eficiencia en el uso del agua estacional (EUA)

Con los promedios de los deltas de crecimiento de biomasa seca total acumulada y los promedios de los deltas de transpiración acumulados a 4 plantas por especie y fecha de extracción, se obtuvo la EUA para cada especie al final del ensayo, como la primera derivada de la recta ajustada por regresión lineal a la materia seca producida ($g_{[MS]}$), en función de la transpiración acumulada ($kg_{[H_2O]}$) mediante la Ecuación II. La unidad experimental fue el conjunto lisímetro-frutal:

$$\text{Ecuación II: } EUA = \frac{dB}{dT}$$

Dónde: EUA = Eficiencia en el uso del agua estacional ($g_{[MS]} kg^{-1}_{[H_2O]}$); B = Biomasa (g); T = Transpiración acumulada (kg).

Eficiencia en el uso del agua normalizada o kDPV

Se utilizó la biomasa y la transpiración diaria, cuyo cálculo se mencionó previamente, donde la transpiración diaria se normalizó con el DPV diario obtenido de una estación agroclimática ubicada a 300 metros del ensayo. Luego de la normalización, se utilizaron los promedios de los deltas de crecimiento de la biomasa seca total acumulada y los promedios de los deltas de crecimiento de la transpiración diaria normalizada por DPV acumulada, a 4 plantas por especie y fecha de extracción. El kDPV se estimó al final del ensayo como la primera derivada de la recta ajustada por regresión lineal de la materia seca producida ($g_{[MS]}$) en función de la transpiración acumulada, dividida por el déficit de presión de vapor acumulado ($kg_{[H_2O]} kPa^{-1}$; Ecuación III). La unidad experimental fue el conjunto lisímetro – frutal.

$$\text{Ecuación III: } kDPV = \frac{dB}{d\left(\frac{T}{DPV}\right)}$$

Dónde: B = Biomasa (g); T = transpiración (kg); DPV = déficit de presión de vapor (kPa)

Para el cálculo del DPV diario se utilizaron los datos de humedad relativa máxima y mínima ($HR_{[m\acute{a}x]}$ y $HR_{[m\acute{i}n]}$) y temperatura máxima y mínima ($T_{[m\acute{a}x]}$ y $T_{[m\acute{i}n]}$) diarias entregados por la estación meteorológica, siguiendo la metodología descrita en FAO-56 (2006). Debido a que en el ensayo habían plantas de metabolismo C3 (granado e higuera) y CAM (tuna), se optó por tomar los valores de HR y T en el momento en que estas plantas tuvieran sus estomas abiertos, lo cual ocurre durante el día ($RG > 20 W m^{-2} s^{-1}$) en plantas C3 y durante la noche ($RG < 20 W m^{-2} s^{-1}$) en plantas CAM¹, aproximadamente.

Variabilidad a nivel espacial, estacional y horaria de la eficiencia en el uso del agua instantánea (EUAI) a escala foliar en granado e higuera.

Para el cálculo de EUAI se seleccionaron cuatro hojas adultas, cada una orientada en dirección norte (N), sur (S), este (E) y oeste (O), elegidas al azar, sanas, totalmente desarrolladas y expuestas a la luz solar directa, a cuatro plantas por especie en distintas fechas, a las que se les midió la tasa transpiratoria instantánea (E) y la tasa fotosintética instantánea (A), por medio de un analizador de gases infrarrojo (IRGA), tomando dos mediciones por exposición. Con aquellos datos se estimó la EUAI usando la Ecuación IV:

$$\text{Ecuación IV: } EUAI = \frac{A}{E}$$

Dónde: A = $\mu mol_{[CO_2]} m^{-2} s^{-1}$, E = $mmol_{[H_2O]} m^{-2} s^{-1}$.

¹Dr. Nicolás Franck, Profesor asistente de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, (comunicación personal).

Con los datos de EUAi obtenidos anteriormente, se construyó la siguiente hipótesis, que fue utilizada para los 3 ensayos (a, b y c) que se muestran a continuación, con los cuales se buscó observar la variabilidad de la EUAi para conjeturar posibles variaciones en EUA.

Hipótesis:

Ho: Todos los tratamientos son iguales.

H1: Al menos un tratamiento es distinto.

Ensayos:

- a) **Variación horaria:** Se consideraron 4 tratamientos por periodo horario, donde para la higuera se utilizaron los tratamientos T1, T2 y T4 y para el granado se utilizaron los tratamientos T2, T3 y T4, la razón de seleccionar tratamientos fue debido a que se buscaron los tratamientos donde fuera medida la misma planta y de esa manera disminuir la variación. Los datos de EUAi se obtuvieron a 4 plantas por especie, como se indicó al comienzo, a medida que avanza el ensayo tomando 16 mediciones por tratamiento y fecha en las exposiciones indicadas en el ensayo (b), donde los días son los que se muestran en el ensayo (c). El diseño experimental fue en bloques completamente aleatorio (DBCA) en que el bloque fueron los días y la variable aleatoria la EUAi. A continuación se indican los horarios comunes que se realizaron las mediciones.

T1: Periodo 0 (09:30 a 11:30 h)

T2: Periodo 1 (11:30 a 13:30 h)

T3: Periodo 2 (13:30 a 15:30 h)

T4: Periodo 3 (15:30 a 17:30 h)

- b) **Variación espacial:** Se consideraron 4 tratamientos a distintas exposiciones a la radiación en ambas especies. Los datos de EUAi se obtuvieron de 4 plantas por especie, como se indicó al comienzo, a medida que avanza el ensayo tomando 12 mediciones, 4 por cada periodo indicado el ensayo (a) por tratamiento y fecha, donde las fechas de medición se muestran en el ensayo (c). El diseño experimental fue un DBCA en que el bloque fueron los días y la variable aleatoria la EUAi.

E1: Exposición Norte

E2: Exposición Sur

E3: Exposición Este

E4: Exposición Oeste

- c) **Variación estacional:** Para observar las variaciones a medida que avanzó el experimento se realizaron mediciones en dos días consecutivos (uno antes y el otro después de la aplicación de riego) de inicios y fines de enero de 2011 (cuatro días en total). Los datos se obtuvieron como se indicó previamente, utilizando los datos de los periodos horarios (a) y exposición (b), por lo tanto se utilizaron 48 mediciones

por tratamiento. El diseño experimental fue un diseño completamente aleatorio (DCA) donde la variable aleatoria fue la EUAi.

S1: 06/01/2011 antes del riego
 S2: 07/01/2011 después del riego
 S3: 31/01/2011 antes del riego
 S4: 01/02/2011 después del riego

Eficiencia en el uso de la radiación (EUR) a nivel estacional en granado e higuera.

Se midió la **radiación fotosintéticamente activa no interceptada (PAR_{ni})** por medio de un ceptómetro lineal, a cuatro plantas por especie entre los meses de diciembre de 2010 y abril del 2011, con una frecuencia de medición de 2 semanas determinada por la condición climática, es decir, cuando estuviera completamente despejado. Se asumió una simetría entre la intercepción matinal y vespertina con horarios de medición al medio día solar (MDS), MDS + 2 h (MDS2) y MDS + 4 h (MDS4) ubicando el ceptómetro de forma perpendicular a la hilera del frutal, bajo la canopia a 0,2 m del lisímetro, para lo cual, se realizó un transecto de este-oeste del ancho de la sombra (variable por planta) por el largo de ceptómetro (1 m), desplazando el ceptómetro entre cada postura por la distancia correspondiente a su ancho (0,013 m), de manera de abarcar la sombra de la planta debido a que eran plantas jóvenes y en macetas (Figura 3). Cada 10 minutos, se realizó una medición de la radiación incidente (PAR₀) en un sector no sombreado del ensayo.

Se traspasaron los datos de PAR_{ni} al programa EXCEL, donde se corrigieron los datos obtenidos de cada celda, la metodología fue multiplicar el valor de cada celda por el valor obtenido de la división del promedio de PAR₀ de las 64 celdas por el PAR₀ de una celda, repitiendo el procedimiento para las 64 celdas. Posteriormente se asumió que cuando el valor registrado por una celda era inferior a un 80 % de PAR₀, está bajo la sombra de las hojas.

La **radiación fotosintéticamente activa interceptada (PAR_i)** se estimó utilizando los valores de las celdas sombreadas, como indica la ecuación V.

$$\text{Ecuación V: } \sum_{k=1}^{k=n} PAR_{ik} = [(PAR_{0k} - PAR_{nik}) * A] (\mu\text{mol} * \text{seg}^{-1})$$

Dónde: PAR_{ik} = Corresponde a la radiación fotosintéticamente activa interceptada de la celda k; PAR_{0k} = Corresponde al PAR₀ para la celda k, considerándose el PAR₀ para todas las celdas por igual; PAR_{nik} = Radiación fotosintéticamente activa no interceptada para la celda; A = área de una celda del ceptómetro equivalente a 2,03 * 10⁻⁴ m⁻² y “n” corresponde al número de celdas sombreadas.

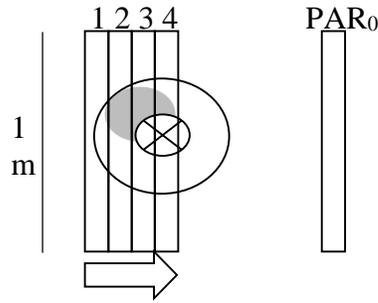


Figura 3: Forma de medición de PAR_{ni}, donde el círculo mayor corresponde al lisímetro, el círculo con una x corresponde a la planta que proyecta una sombra (circunferencia gris), los rectángulos corresponden al ceptómetro, donde cada número es una postura. Se ve que el transecto correspondió al largo de la sombra por el ancho del ceptómetro (1 m). Cada diez minutos se medía el PAR₀ fuera de la acción de la sombra.

Para cada medición o planta, se calculó la **superficie equivalente sombreada (SES)** (Ecuación VI) la cual, corresponde a la fracción de la radiación que la planta absorbería en un metro cuadrado si tuviera todas sus hojas horizontales al sol, la razón de ese cálculo es para multiplicarlo por la radiación global (RG) como lo veremos más adelante. Posteriormente se calculó un promedio ponderado de las tres mediciones de SES (en los horarios entregados previamente) correspondiendo al promedio de la medición de cuatro plantas durante el día, donde la del MDS fue ponderado por uno, MDS2 y MDS4 se ponderaron por dos, siendo el divisor 5.

$$\text{Ecuación VI: } SES (m^2) = \frac{PAR_i (\mu mol * seg^{-1})}{PAR_0 (\mu mol * m^{-2} * seg^{-1})}$$

Dónde: PAR_i corresponde al valor obtenido por la ecuación V y PAR₀ corresponde a la radiación incidente calculada como el promedio de las 64 celdas.

Los valores de SES se interpolaron entre dos mediciones (extracciones) para obtener la **superficie equivalente sombreada diaria (SESd)**, la cual, se utilizó junto con la **radiación global (RG)** obtenida de la estación agroclimática en el cálculo del PAR interceptado diario (**PARid**) mediante la ecuación VII. La PARid se acumuló para cada fecha de extracción, obteniendo la PAR interceptada acumulada (PARia).

$$\text{Ecuación VII: } PAR_{id} (MJ \text{ planta}^{-1} \text{ día}^{-1}) = RG_d (W \text{ m}^{-2}) * 0.0864 (s \text{ MJ J}^{-1}) * 0.5 * SES_d$$

Dónde: 0,5 = fracción de radiación visible en la R_g (m²); 0,0864 = constante para transformar unidades de RG.

Se utilizaron los promedios de las diferencias de crecimiento de biomasa seca acumulada total utilizados para la EUA y la PARia para cada especie y fecha de extracción, con esto se obtuvo la EUR como la primera derivada de la recta ajustada por regresión lineal a la relación

entre la materia seca acumulada ($g_{[MS]}$) y la PAR_{ia} (MJ) tal como se observa en la ecuación VIII. La unidad experimental correspondió a la planta

$$\text{Ecuación VIII: } EUR = \frac{dB}{dPAR_{ia}}$$

Dónde: EUR = eficiencia en el uso de la radiación; B = biomasa (g); PAR_{ia} = radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (MJ).

Análisis Estadístico

Para la EUA, kDPV y EUR, el análisis de regresión se realizó con el programa INFOSTAT, aceptando el modelo con un p-valor menor a 0,05. Se ejecutaron pruebas de normalidad a los residuos por el método Shapiro Wilks (modificado) y análisis de homogeneidad de varianzas por el método gráfico, donde en el eje de las ordenadas se encuentran los residuos y en el eje de las abscisas los predichos del modelo.

Para la variación a nivel espacial, estacional y horaria de la EUA_i , los tres análisis de varianzas (ANDEVAS) para cada ensayo se realizaron con el programa estadístico INFOSTAT y el análisis de homogeneidad de varianza con el programa estadístico MINITAB. Los datos obtenidos en los 3 ensayos (a, b y c) se sometieron a un análisis de normalidad por el método de Shapiro-Wilks modificado y un análisis de homogeneidad de varianzas por el método de Barlett (Balzarini *et al*, 2008). Cuando los datos se comportaron de una manera normal y homogénea, se les realizó un ANDEVA, con un nivel de confianza del 95% y cuando presentaron diferencias estadísticas significativas, se realizó la prueba de comparaciones de rangos múltiples de Tukey al 5%. Cuando los datos no fueron normales, se realizó un análisis no paramétrico de Friedman (DBCA) o Kruskal Wallis (DCA), según sea el caso, con un nivel de confianza del 95%. La unidad experimental para todos los tratamientos fue la hoja.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Eficiencia en el Uso del Agua instantánea (EUAi)

Los ANDEVAS para los distintos ensayos (a, b y c) se presentan en la figura 4, para la variación estacional en granado se utilizó la prueba de Kruskal Wallis al 5%, mientras que para la variación horaria y espacial se aplicó la prueba de Friedman al 5%, en el caso de la higuera, para la variación estacional se realizó la prueba de Kruskal Wallis al 5%; para la variación horaria, se aplicó una prueba de Friedman al 5% y para el análisis espacial se realizó un DBCA, en donde la variable aleatoria EUAi se transformó por logaritmo natural. Los resultados en la figura 4 indican que la EUAi de ambas especies presenta diferencias significativas en el ensayo de variación horaria y variación estacional. Las razones estarían relacionadas a la variabilidad que posee la EUA ante distintos factores tales como: régimen hídrico, fertilización (Faustino et al., 2011), calidad de agua, clima, contaminación atmosférica, textura de suelo, cambio climático asociado al carbono de referencia (Liu-Kang and Hsiao, 2004) y especie (Nobel, 2003). Tanner y Sinclair (1983), también incluyen en la variabilidad el efecto de plagas y malezas. De los factores mencionados inferimos en esta investigación que el clima es el que ejerce la mayor influencia, debido a que al presentar variaciones horarias (figuras 4.c y 4.d) se están absorbiendo todas las diferencias que corresponden a niveles hídricos, fenología y fertilización, puesto que dentro de un día permanecen constantes, la sola variación de temperatura, humedad relativa o radiación, desde el amanecer al anochecer, indujeron marcadas diferencias significativas sobre la EUAi.

En la figura 5 se presentan gráficos con las relaciones entre EUAi y factores climáticos como; déficit de presión de vapor de la atmósfera ($DPV_{[Thj]}$), radiación solar (PAR), temperatura de la hoja (Thj) y conductancia estomática al vapor de agua ($gs [H_2O]$) obtenidos con IRGA, para granado e higuera, en ambas especies, se observa una tendencia a disminuir la EUAi al aumentar la PAR, Thj y DPV.

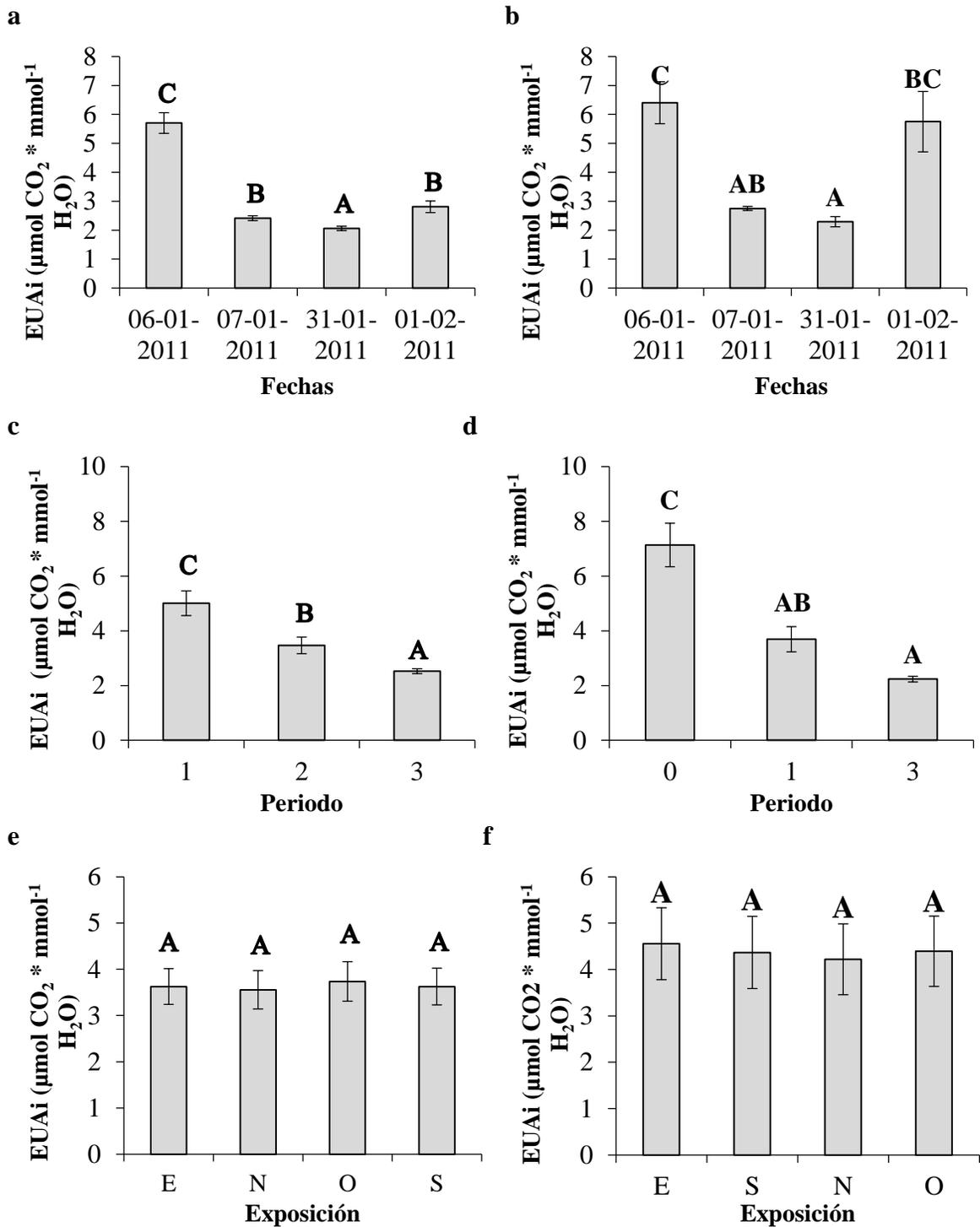


Figura 4. Variación estacional de EUAi de granado (a) e higuera (b). Variación horaria EUAi de granado (c) e higuera (d). Variación espacial de EUAi de granado (e) e higuera (f). Letras diferentes sobre las barras indican diferencias estadísticamente significativas con un p-value de 5%.

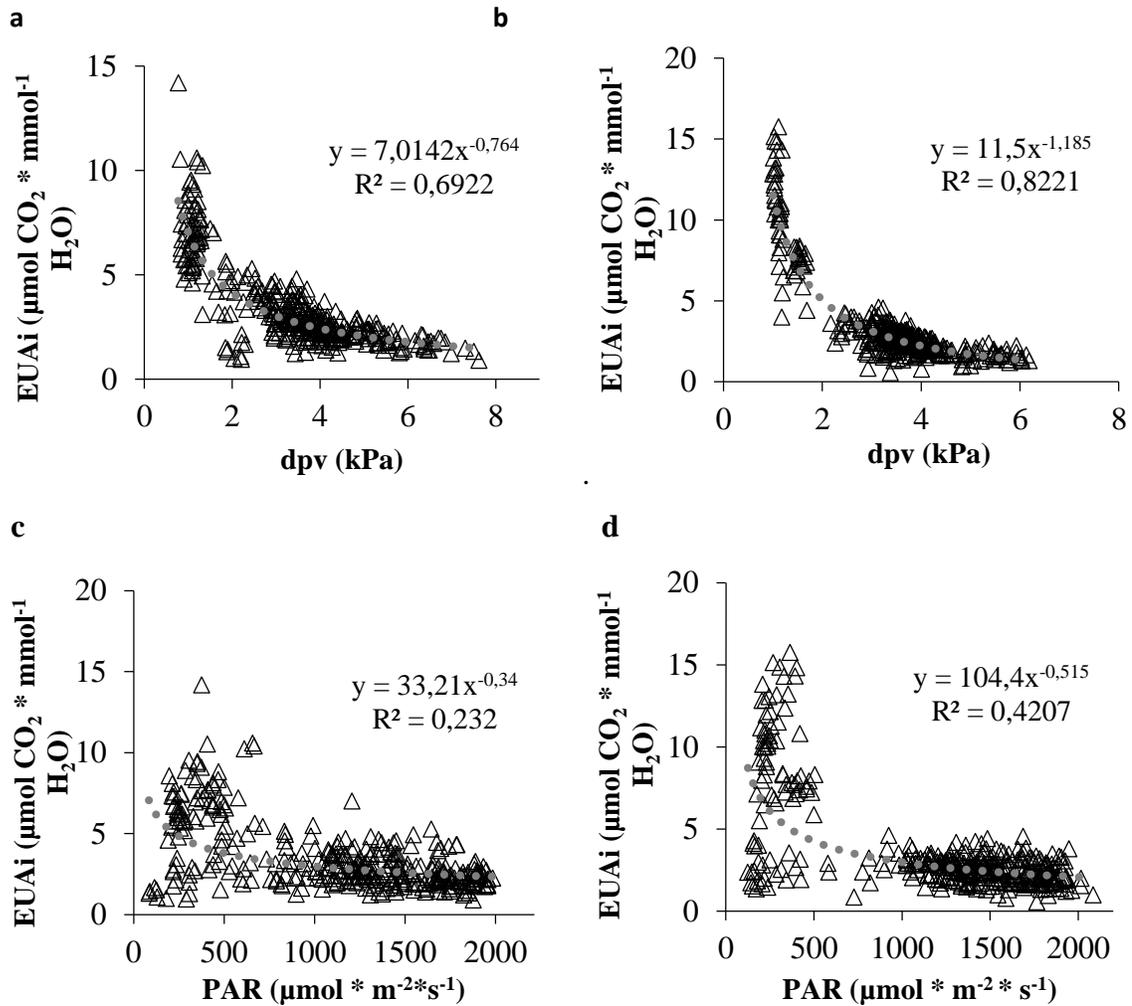


Figura 5. Relación entre EUAi y déficit de presión de la atmosfera (DPV) para granado (a) e higuera (b). Relación entre EUAi y radiación fotosintéticamente activa (PAR) para granado (c) e higuera (d). Dónde: PAR es radiación fotosintéticamente activa y dpv es déficit de presión de vapor.

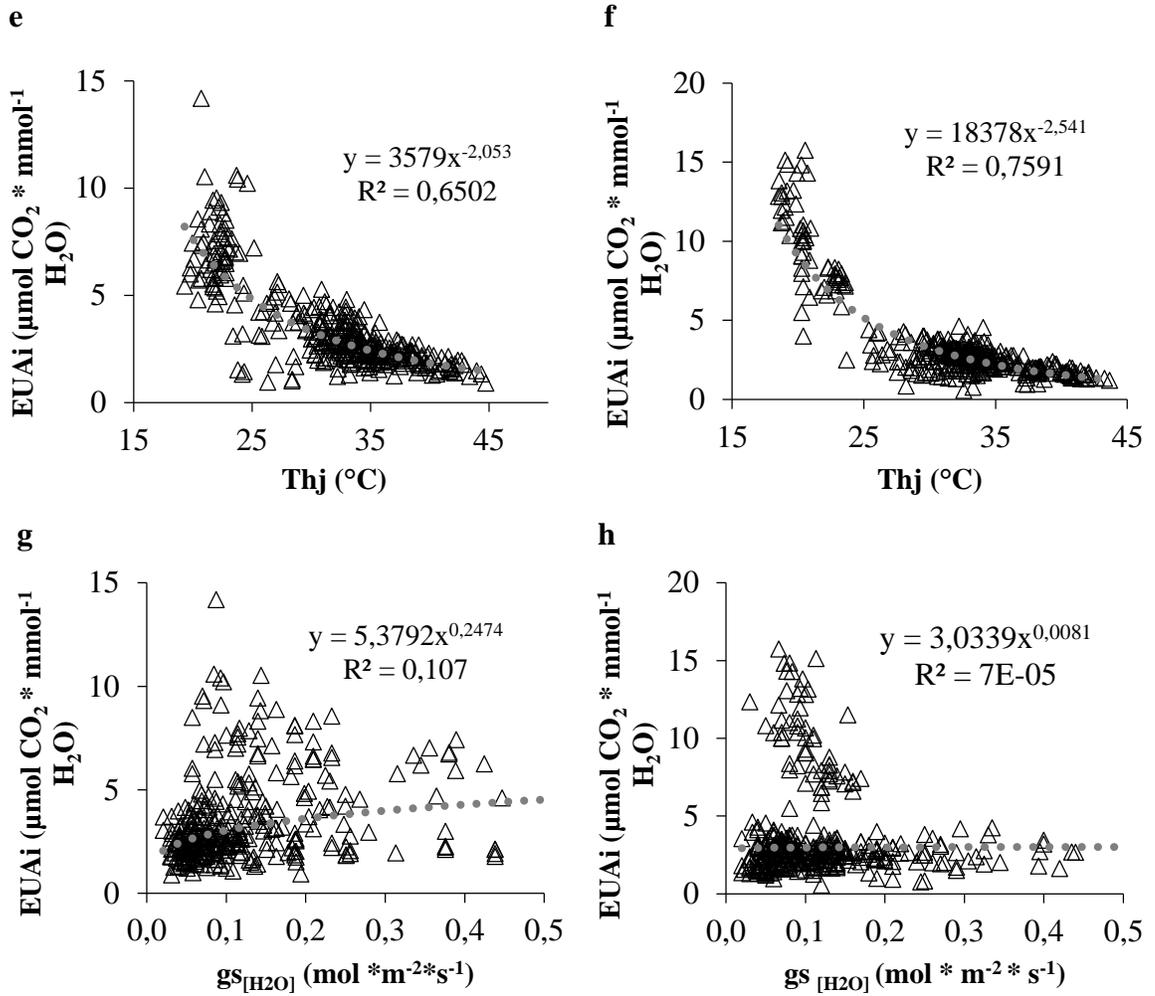


Figura 5. Continuación. Correspondencia entre la EUAi con la temperatura de la hoja (Thj) para granado (e) e higuera (f). Relación entre EUAi y conductancia estomática al vapor de agua ($g_{[\text{H}_2\text{O}]}$) para granado (g) e higuera (h). Dónde: $g_{[\text{H}_2\text{O}]}$ es la conductancia estomática al vapor de agua y Thj es la temperatura en la superficie de la hoja.

De lo anterior se puede inferir que estas especies disminuyen su EUAi en condiciones de estrés, al igual que la tuna (Silva y Acevedo, 1995). Similares observaciones fueron encontradas por Rouphael and Colla (2005), quienes realizaron un experimento en pepino (*Cucurbita pepo* L.) en lisímetros bajo invernadero, para observar la variabilidad de EUR y EUA estacional bajo dos fechas de siembra distintas (primavera-verano y verano-otoño), encontrando que la EUA obtenida antes de cosecha, calculada como el cociente entre la materia seca de la planta (excluyendo raíz) y la transpiración (obtenida del pesaje de lisímetros), no tuvo variación para las temporadas de primavera-verano y verano-otoño, sin embargo, después de cosecha, la EUA varía de 2,72 a 4,02 $\text{g}_{[\text{MS}]} \text{kg}^{-1}[\text{H}_2\text{O}]$ para primavera-verano y verano-otoño respectivamente, que lo atribuyeron a cambios en la fenología y a los factores climáticos como radiación solar, DPV y temperatura. Además, estos autores,

observaron una razón exponencial negativa al graficar la EUAi versus radiación solar (Rs), temperatura (T) y DPV, similar que en este estudio, alcanzando los valores más altos de EUAi cuando Rs, T y DPV fueron menores a 15 MJ/m², 20°C y 0,8 kPa respectivamente.

Para confirmar las tendencias previamente señaladas, se realizaron correlaciones lineales entre las siguientes variables; EUAi, DPV, PAR, Thj y gs [H₂O] a ambas especies y a cada parámetro se les aplicó el logaritmo en base 10 para linealizar sus relaciones. Se puede ver en el cuadro 1 y 2 que la EUAi se correlaciona negativamente con DPV, PAR y Thj en ambas especies, como se observó en los gráficos previamente presentados. Respecto a gs [H₂O], se observó que en higuera no hay relación con EUAi, en cambio en el granado, se observó una relación positiva entre la apertura estomática y la EUAi. Pese a que no se observó una correlación alta, la conductancia estomática posee correlaciones lineales significativas con todos los parámetros climáticos en granado, en higuera en cambio, no existió una correlación lineal significativa, indicando que la conductancia estomática fue más sensible en granado a parámetros climáticos que en el caso de la higuera.

Cuadro 1. Coeficiente de correlación de Pearson para granado, calculado con los datos utilizados en los Análisis de Varianza, las columnas indican el factor de correlación y las filas indican la probabilidad.

Granado	LOG10_EUAI	LOG10_DPV	LOG10_PAR	LOG10_Thj	LOG10_gs
LOG10_EUAI	1	0	0	0	1,00E-05
LOG10_DPV	-0,95	1	0	0	2,60E-07
LOG10_PAR	-0,74	0,83	1	0	2,40E-04
LOG10_Thj	-0,94	0,99	0,87	1	4,40E-07
LOG10_gs	0,38	-0,44	-0,32	-0,43	1

Cuadro 2. Coeficiente de correlación de Pearson para higuera, calculado con los datos utilizados en los Análisis de Varianza, las columnas indican el factor de correlación y las filas indican la probabilidad.

Higuera	LOG10_EUAI	LOG10_DPV	LOG10_PAR	LOG10_TI	LOG10_gs
LOG10_EUAI	1	0	0	0	0,22
LOG10_DPV	-0,98	1	0	0	0,29
LOG10_PAR	-0,9	0,91	1	0	0,84
LOG10_Thj	-0,98	0,99	0,93	1	0,17
LOG10_gs	0,13	-0,11	-0,02	-0,15	1

A continuación analizaremos valores de EUAi obtenidos en otras investigaciones para cada especie estudiada, a su vez, a pesar de que no se midió la EUAi en tuna se presentan valores referenciales encontrados en literatura:

Granado: En un ensayo de fotosíntesis realizado en Turquía por Hepaksoy *et al.* (S.A) a distintas variedades de granado como: Lefon, Kadi, Feyiz, Seedless, Siyah y Koycegiz, indican que aquellas especies tienen rangos de EUAi que varían de 1,245–1,682, 1,034–1,135, 1,082–1,279, 1,147–1,455, 0,789–0,971 y 0,621–0,921 $\mu\text{mol}_{[\text{CO}_2]} \text{mmol}^{-1}_{[\text{H}_2\text{O}]}$ respectivamente, también concluyeron que las variedades con mayor EUAi se correlacionaban con menor incidencia de partidura. Esos valores son menores a los obtenidos en el presente estudio (cada valor diario de las figuras 4.a y 4.b) y se pueden explicar por la diferencia entre variedades o variabilidad ambiental como se ha discutido previamente.

Higuera: Un estudio realizado por Andersen, (1989) en época de verano, en Florida (EEUU) donde se evaluó en campo la EUAi a distintas plantas frutales, bajo condiciones edafoclimáticas similares (a excepción del arándano) en hojas totalmente expandidas, arrojó los siguientes resultados; nuez lisa (*Carya illinoensis* cv. Elliot) $1,63 \pm 0,04$; duraznero (*Prunus persica* cv. Flordaking), $1,45 \pm 0,04$; manzano (*Malus domestica* cv. Anna), $1,35 \pm 0,06$; peral (*Pyrus communis* cv. Flordahome), $2,1 \pm 0,04$; Mandarino (*Citrus reticulata* cv. Owari), $2,02 \pm 0,04$; Kaki (*Diospyros kaki* cv. Fuyu) $1,39 \pm 0,05$; arándano (*Vaccinium ashei*), $0,86 \pm 0,04$; vid (*Vitis* sp. Cv Suwannee), $1,06 \pm 0,04$; mora (*Rubus* sp. cv. Shawnee) $2,08 \pm 0,07$; Kiwi (*Actinidia deliciosa* cv. Hayward) $2,00 \pm 0,06$, e higuera de dos años regadas tres veces por semana (*Ficus carica* cv. Alma) $2,20 \pm 0,1$, $\mu\text{mol CO}_2 \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$. De lo anterior se observa que la higuera es la que alcanzó la mayor EUAi y que aquel resultado es más bajo que el obtenido en el presente estudio. Por su parte, Da Silva (2010), quien describió el intercambio gaseoso de *Ficus carica* cv. Roxo de Valinhos, en campo, en hojas totalmente expandidas y en un periodo horario de 9:00 a 10:30 AM, señala que la EUAi de la higuera varía de 2,8 a 3,8 $\mu\text{mol CO}_2 \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$, valores que no presentan diferencias significativas entre sí y al compararlo con el valor promedio de la EUAi matinales (medidas en aquellos horarios) de esta investigación, cuyo promedio fue $7,13 \pm 4,48$, resulta inferior.

Tuna: Silva y Acevedo (1995), calcularon la EUAi en función del intercambio gaseoso diario, resultando $53,98 \pm 4,88 \text{ mg}_{[\text{MS}]} \text{g}^{-1}_{[\text{H}_2\text{O}]}$, indican que aquel valor es un tanto mayor que su valor calculado a escala estacional debido a la variación espacial y temporal de la radiación fotosintéticamente activa y a la pérdida respiratoria.

Biomasa

Las curvas de biomasa fresca (MF) y seca (MS) con respecto al tiempo se encuentran en la figura 6, con la curva de MF se estimó el crecimiento de las especies para sumarla a la transpiración obtenida por pesaje, como se mencionó en la metodología. Las curvas de tasa de crecimiento diaria de materia fresca (ΔMF) y materia seca (ΔMS) se encuentran en la figura 7, la razón de que higuera presente menos datos tanto en ΔMF y ΔMS fue que el promedio de la extracción de MS en aquellas ocasiones era menor que la fecha anterior, dando un valor negativo que no fue considerado dentro del análisis, aquello fue provocado probablemente por la variabilidad del crecimiento de las plantas.

Para las tres especies se observó un aumento exponencial de MF y MS a lo largo de las 2 temporadas (Figura 6), se aprecia que la tuna es la que presenta mayor crecimiento de MF, seguido de higuera y en último lugar el granado (Figura 6.a). Sin embargo, la tendencia anteriormente descrita cambia al analizar la MS (Figura 6.b) donde se apreció que la higuera sobrepasa a la tuna en las últimas dos extracciones. Esta diferencia se explica, por el contenido de agua de las especies, donde el promedio de agua presente en la planta fue para granado de $64,93 \pm 6,32$, para higuera de $75,26 \pm 7,26$ y para tuna de $91,63 \pm 1,41$ %.

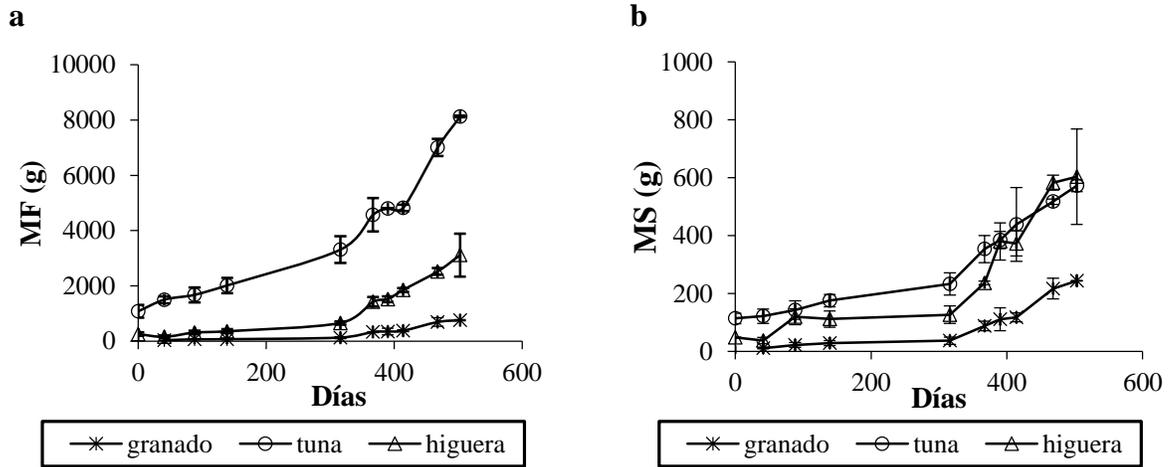


Figura 6. Se observa el aumento de biomasa fresca (MF) (a) y el aumento de biomasa seca (MS) (b) de granado, higuera y tuna, donde cada punto corresponde a una extracción.

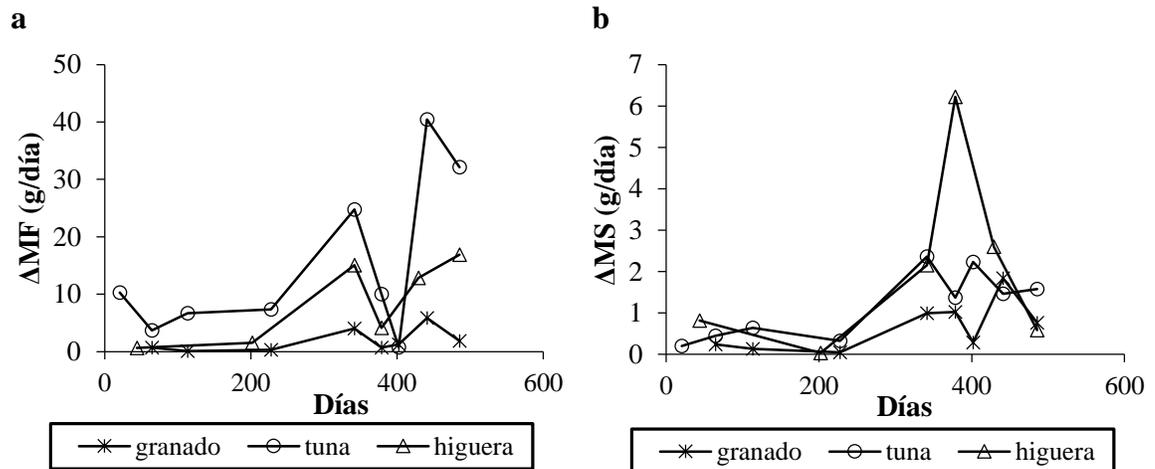


Figura 7. Tasa de crecimiento diaria de materia fresca (a) (ΔMF) y tasa de crecimiento diaria de materia seca (b) (ΔMS) a lo largo del periodo de estudio, donde cada punto corresponde a una extracción de las 3 especies.

Crecimiento de órganos y coeficiente de reparto (CR)

De manera adicional, se realizaron curvas de crecimiento en base a MS, de los diferentes órganos vegetales para cada extracción (figura 8) junto con su proporción relativa (figura 9). La tuna tiene 8 fechas (Figura 8.c y 9.c) a pesar de tener 10 extracciones, debido a que en su primera extracción era sólo un cladodio y en la segunda extracción se tomaron datos totales de biomasa sin separarla de sus órganos. Se logró apreciar en la figura 8, que todos los órganos presentaron un aumento de peso a medida que avanzó el tiempo, sin embargo, al analizar la proporción relativa de cada órgano en cada extracción, estos sufren fluctuaciones importantes a medida que avanza el ensayo (Figura 9).

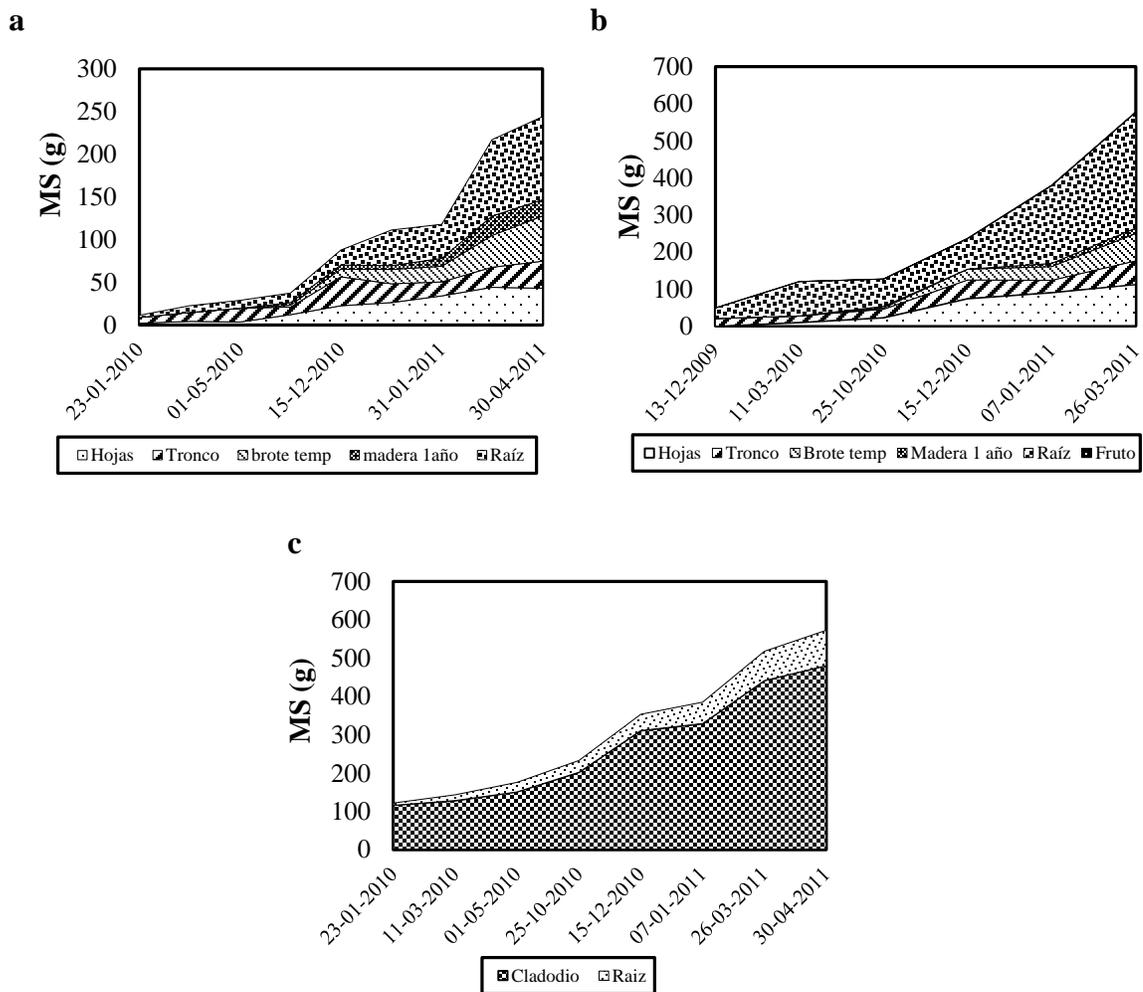


Figura 8. Curvas de crecimiento en base a materia seca de cada órgano; granado (a), higuera (b) y tuna (c). Dónde: “Bromte temp” es el brote de la temporada.

Se destaca en la Figura 9, el gran porcentaje de raíz que tiene la higuera por sobre el granado y la tuna, siendo esta última especie, la que tiene la menor proporción en todo el ensayo. Otro

punto a destacar es que la higuera en un comienzo tiene una proporción 0% en las hojas, debido a que al comienzo del ensayo fue podada, situación similar a la ocurrida a las raíces de tuna las cuales son cercanas a 0% debido a que fueron plantadas sin ellas.

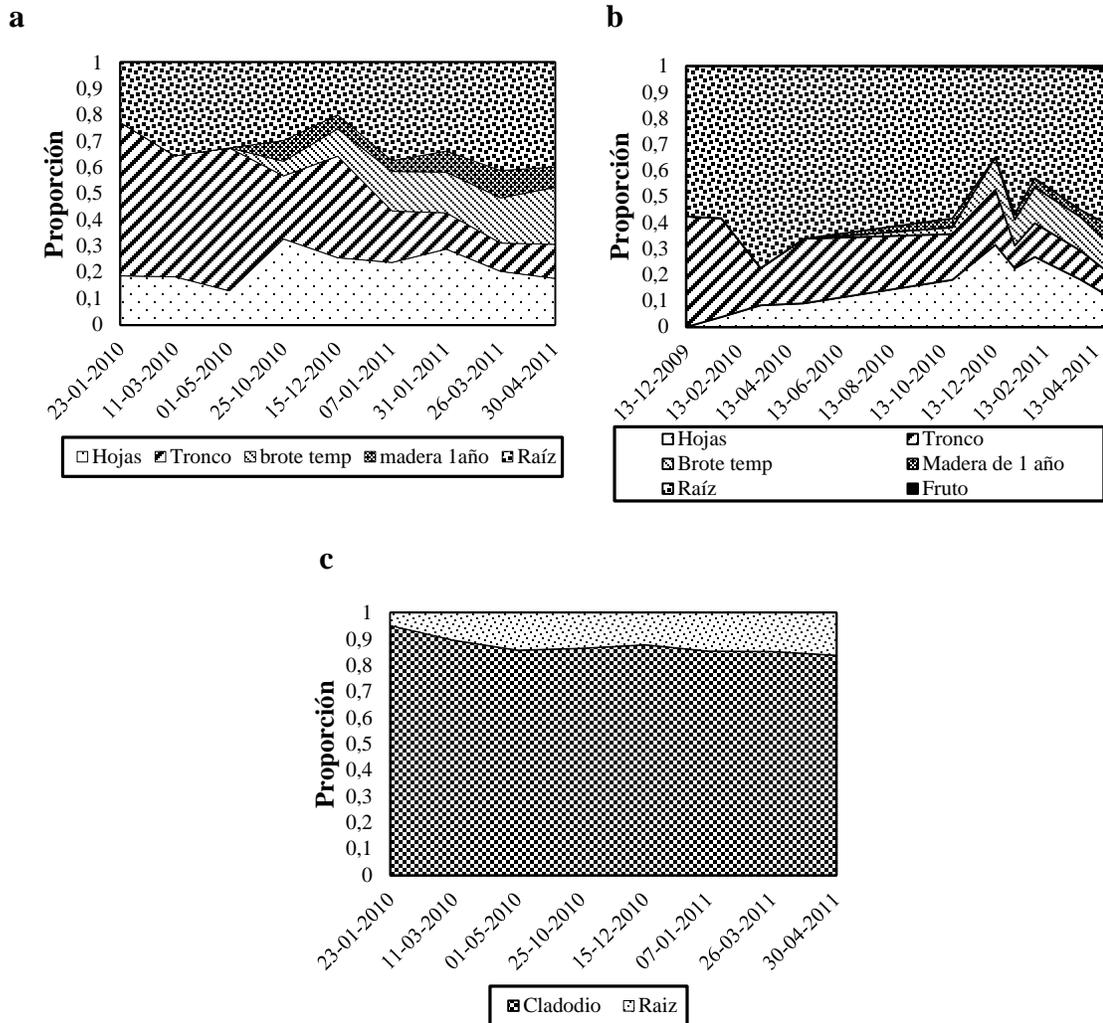


Figura 9. Proporción relativa de cada órgano para cada extracción; granado (a), higuera (b) y tuna (c). Dónde: “Brote temp.” son los brotes de la temporada.

Lo mencionado en el párrafo anterior puede corroborarse observando los coeficientes de reparto (Figura 10), en granado se observa la relación inversa existente entre el CR de la raíz con el de las hojas (Figura 10.a), donde para abril de 2010 y abril del 2011 el CR en hojas fue 0, privilegiando el crecimiento de raíces, tronco y brotes. Para la higuera (Figura 10.b), entre la fecha de plantación y la primera extracción, el principal CR fue el de las raíces, luego se observó hasta julio del 2010 un aumento proporcional del CR de la mayoría de los órganos junto con una disminución del CR a raíz, se destaca el gran CR que lograron las hojas debido a la poda mencionada anteriormente, luego desde noviembre del 2010 el CR cambia

principalmente hacia raíz junto con tronco y madera de un año con una gran disminución del CR de las hojas, lo cual indicaría que se está acumulando reservas para el invierno. Para el caso de tuna (Figura 10.c) el CR de raíz fue mayor en un comienzo debido a que eran cladodios sin raíces, luego el CR aumenta en favor de los cladodios hasta noviembre de 2011 donde comienza a intercalarse el CR entre cladodios y raíces.

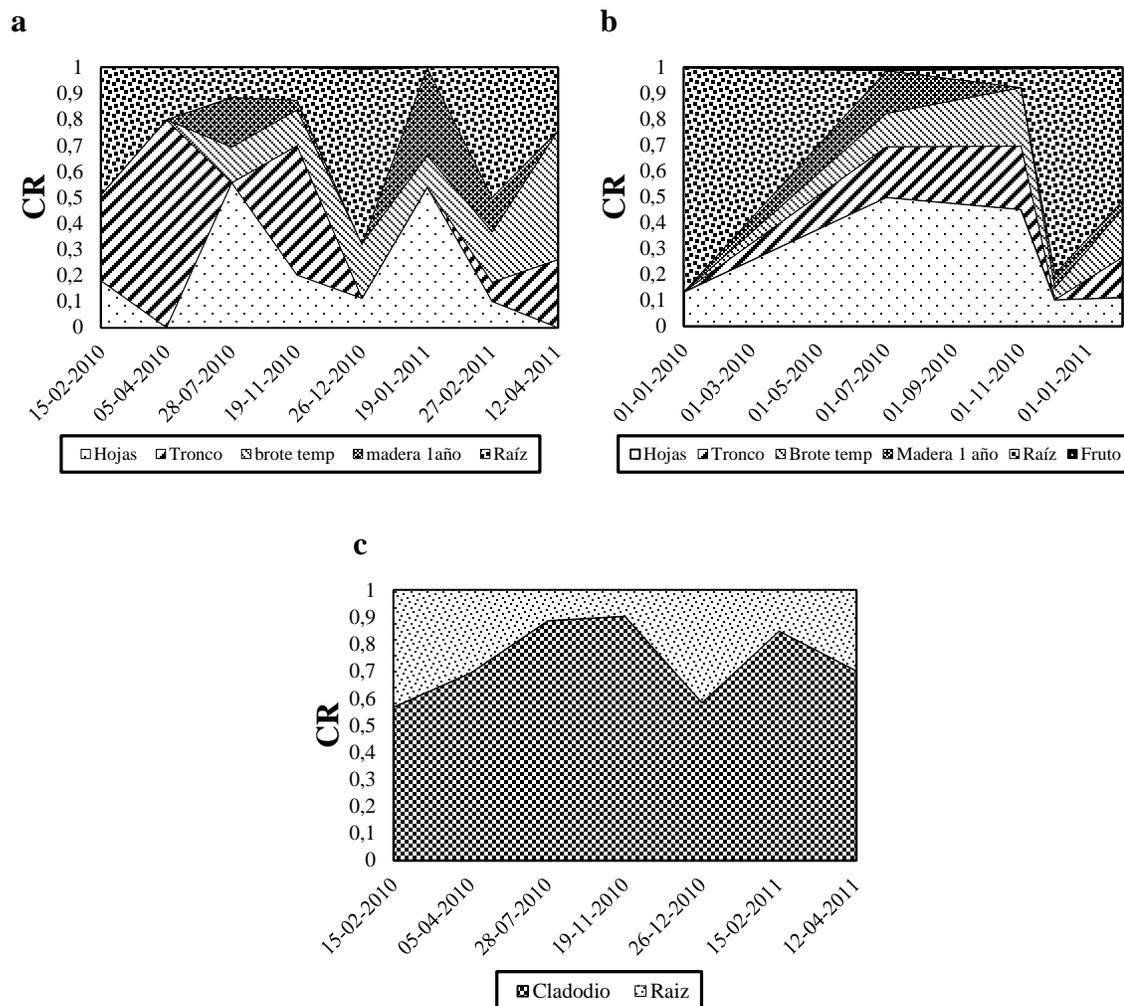


Figura 10. Coeficiente de reparto para granado (a), higuera (b) y tuna (c). Dónde: “Brote temp.” son los brotes de la temporada.

Transpiración

La transpiración (E) fue en todo momento mayor en higuera, como se observa en la figura 11, tanto en la cantidad de H₂O transpirada acumulada (E acumulado) como en la tasa diaria de H₂O transpirada (E). En granado y tuna ambos parámetros (E acumulado y E) fueron similares en un comienzo, pero luego la tuna se aleja disminuyendo levemente (Figura 11). Aquello indicó el menor consumo de agua por parte de tuna debido a su metabolismo CAM, en comparación con granado e higuera que son de metabolismo C3 (Taiz and Seiger, 2002).

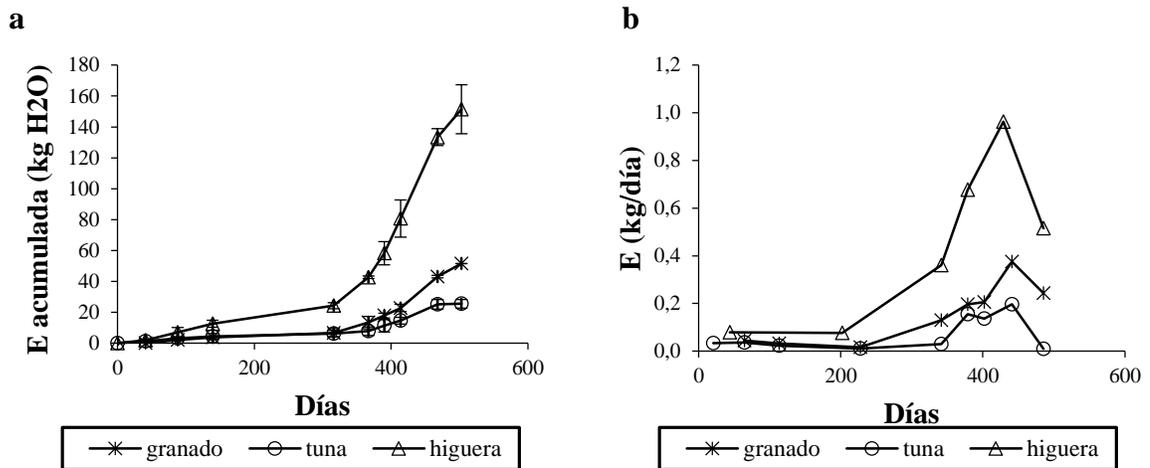


Figura 11. Transpiración acumulada para granado higuera y tuna (a) y tasa transpiratoria diaria de granado higuera y tuna (b). Dónde: “E acumulada” corresponde al transpiración acumulada y E corresponde a la tasa transpiratoria diaria.

Eficiencia en el uso del agua a nivel estacional (EUA)

Las eficiencias en el uso del agua para granado, higuera y tuna se encuentran en la figura 12. En el caso de la higuera, se tuvo un problema en tres ocasiones, en que el promedio de la extracción de biomasa seca fue menor que la fecha anterior, por lo que, esos datos no fueron considerados dentro del análisis. En el caso del granado, se tuvo un dato menos ya que se plantó el 21/01/2010 a diferencia de la Tuna e Higuera que fueron plantadas el 13/12/2009.

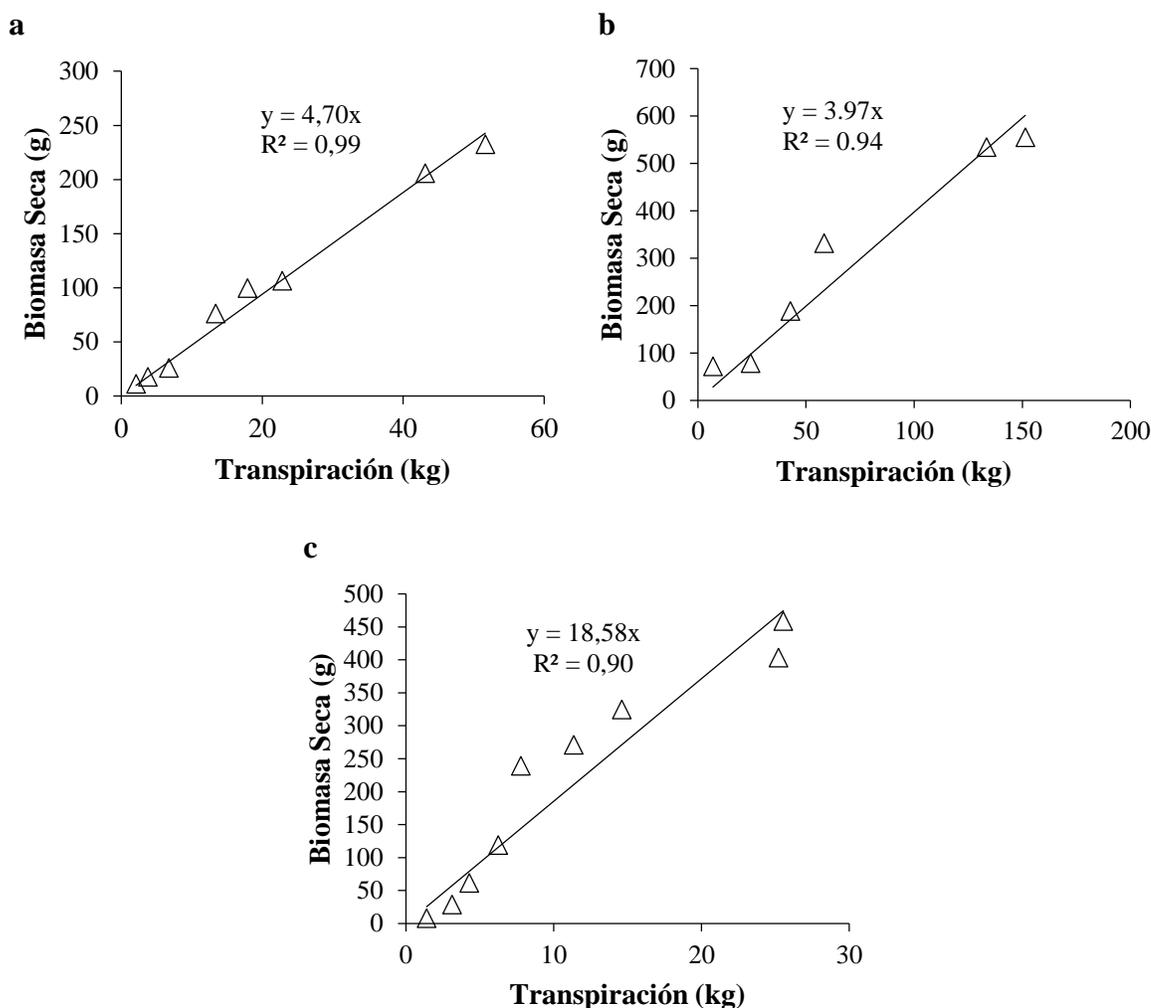


Figura 12. Biomasa versus transpiración (E) obtenida por lisímetros para granado (a), higuera (b) y tuna (c). Donde la pendiente corresponde a la EUA.

Para el granado se obtuvo una EUA de $4,70 \pm 0,29 \text{ g [MS] kg}^{-1} \text{ [H}_2\text{O]}$, para la higuera $3,97 \pm 0,65 \text{ g [MS] kg}^{-1} \text{ [H}_2\text{O]}$ y para la tuna de $18,58 \pm 2,84 \text{ g [MS] kg}^{-1} \text{ [H}_2\text{O]}$. La regresión fue forzada a pasar por el origen, ya que sus interceptos resultaron ser no significativos (Cuadro 3).

Cuadro 3. P-valor de la pendiente (EUA) y la constante para la regresión calculada previamente a forzarla a pasar por el origen, se observa que el p-valor de la constante es mayor a 0,05 por lo tanto no se considera dentro del análisis.

	EUA	pendiente	p-valor	constante	p-valor
Granado	4,56		<0,0001	4,88	0,36
Higuera	3,57		0,0007	45,08	0,24
Tuna	17,46		0,0001	19,76	0,52

Con respecto a estos últimos datos y los resultados de investigaciones similares realizadas por otros autores se puede indicar lo siguiente:

Granado: Khattab *et al.* (2011), en un estudio llevado a cabo en dos temporadas de crecimiento 2007 y 2008 en arboles de granado variedad “Manfalouty” de 20 años bajo tres niveles hídricos distintos, indicaron que el granado disminuye su EUA tanto con niveles hídricos bajos ($7 \text{ m}^3 \text{ árbol}^{-1} \text{ temporada}^{-1}$), como con altos ($15 \text{ m}^3 \text{ árbol}^{-1} \text{ temporada}^{-1}$), con valores de 2,93 y 2,98 kg m^{-3} respectivamente, logrando la EUA más elevada con $13 \text{ m}^3 \text{ árbol}^{-1} \text{ temporada}^{-1}$ ($3,22 \text{ kg m}^{-3}$) junto con una menor partidura de fruta. Los valores anteriores se estimaron en base rendimiento de fruta dividido por el volumen de agua aplicada. Proyectando estos datos a una hectárea y considerando el marco de plantación utilizado en la investigación ($5 \times 5 \text{ m}$), junto con el tratamiento de mayor EUA se obtiene un consumo por temporada de $5200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, monto que coincide con los utilizados en Israel los cuales varían entre 5000 a $6000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ por temporada (Intrigliolo, 2010). El valor de EUA en máxima demanda obtenido por Khataab *et al.* (2011) es menor que el obtenido en el presente estudio. Las diferencias se pueden explicar en las metodologías utilizadas, en donde, en el presente estudio se utilizaron árboles jóvenes (1 año) y se consideró el total de materia seca, mientras que la transpiración fue estimada por lisímetros de pesada, en la otra vereda el experimento de Khataab *et al.* (2011) consideró árboles adultos, se midió el rendimiento comercial, y se usó un nivel de riego por árbol basado en la reposición de la transpiración en base a un balance hídrico del suelo, sumado a que ambas experiencias se realizaron en condiciones climáticas distintas.

Tuna: Felker and Huiem (1995) realizaron un experimento a campo abierto en Texas (USA), durante 4 años en *Opuntia ellisiana*, (de crecimiento más lento que *Opuntia ficus-indica* pero con mayor tolerancia a las heladas), donde midieron materia seca (sin raíces) y transpiración, la cual fue estimada por métodos indirectos. Los resultados obtenidos por dichos autores, como tasa de transpiración (inverso de EUA) fue $162 \text{ kg}_{[\text{H}_2\text{O}]} \text{ kg}^{-1}_{[\text{MS}]}$ ($6,17 \text{ g kg}^{-1}$, la cual es prácticamente un tercio de lo obtenido en el presente estudio (Figura 12.c) las diferencias podrían explicarse, por ser distintas especies, la no inclusión de la biomasa de raíces, la estimación de la transpiración a través de modelos y, finalmente, diferencias climáticas.

Por el contrario, un estudio realizado por Silva y Acevedo (1995) en la misma localidad donde se desarrolló este ensayo con 10 taxa de *Opuntia*, donde se determinó la EUA de plantas bien regadas y con déficit hídrico, dio como resultado un rango de 22 a $55 \text{ mg}_{[\text{MS}]} \text{ g}^{-1}_{[\text{H}_2\text{O}]}$. El valor de EUA para *Opuntia ficus-indica* encontrado en ese estudio fue de $49,63 \pm 3,31$ y $40,61 \pm 2,81 \text{ mg}_{[\text{MS}]} \text{ g}^{-1}_{[\text{H}_2\text{O}]}$ para plantas bien regadas y con déficit hídrico, respectivamente. Se pudo observar que *Opuntia ficus-indica* disminuye su EUA al experimentar un déficit hídrico y que estos valores son aproximadamente 2 veces mayores a los obtenidos en el presente estudio. Esto se puede atribuir a que Silva y Acevedo (1995) realizaron el experimento bajo invernadero, permitiendo una mayor concentración de H_2O que en el aire libre a similar temperatura, lo que mantiene un bajo DPV en la noche, y por lo tanto, como indican diversos estudios y corroboramos en nuestra investigación para plantas C3 (Figuras 5.a y 5.b), mayor EUA. Por otro lado, en dicho estudio, las plantas fueron

mantenidas ocho meses creciendo en macetas previo al inicio del ensayo, en cambio en el presente ensayo, los cladodios fueron plantados sin raíces, por lo tanto, durante unos meses se ocupó la energía del cladodio en formar aquellas estructuras generando probablemente mayor respiración y consecuentemente disminuyendo la EUA, aquello se observó en la Figura 9.c donde se observó un aumento radical hasta mayo de 2010.

Por otro lado Mizrahi *et al.* (2007) determinaron la “EUA hortícola” en *Opuntia ficus-indica*, obteniendo un resultado $83 \text{ g}_{[\text{MS}]} \text{ de fruta por kg}^{-1} \text{ [H}_2\text{O]}$, el cual, es un valor alto en comparación con los anteriores valores presentados, la lógica indica que fuera más bajo ya que considera el rendimiento de fruta y evapotranspiración. Respecto a los datos anteriores, se observó que el valor obtenido en esta investigación (Figura 12) fue relativamente bajo, sin embargo, se espera que a medida que avancen el desarrollo de la planta la EUA aumente, ya que la ineficiencia causada en los primeros meses se vería reducida.

Diferencias de EUA entre CAM, C4 y C3

La tuna es una planta con metabolismo CAM (Nobel and Hartsock, 1983) a su vez la higuera y granado son plantas C3, debido a esto observamos en la figura 12 que la tuna cuadriplica la EUA del granado e higuera, resultado similar a lo expuesto por Carvajal *et al.* (2010), quienes presentan, en un estudio sobre la absorción de CO_2 por los cultivos, rangos de EUA en base a g de CO_2 fijado por kg de H_2O transpirada, para plantas C3, C4 y CAM de 1-3; 2-5 y 10-40 g kg^{-1} respectivamente, lo que concuerda con lo mencionado por Nobel (2003), el que en un estudio sobre eco-fisiología en tunas, indica que las plantas CAM tienen una EUA del triple de las plantas C4 altamente productivas (maíz o caña de azúcar) y de 5 veces más grande que para plantas C3 altamente productivas (alfalfa, algodón o trigo).

La EUA para el maíz (C4) varía entre 2 y $5,4 \text{ g kg}^{-1}$ (Tanner and Sinclair, (1983, citado por Jorgensen and Shelde, 2001)) y para alfalfa (C3) es de $4,3 \text{ g kg}^{-1}$ (Lindroth and Cienciala, (1996, citado por Jorgensen and Shelde, 2001)) medida en base a transpiración por el total de biomasa seca. Al comparar esos antecedentes con los valores obtenidos en esta investigación, se observa que tanto el granado como la higuera, tuvieron valores de EUA que caen dentro del rango de una planta C4, lo que indicaría que serían una alternativa para zonas áridas. También observamos que las tunas de este estudio presentaron una EUA que cae dentro del promedio de una planta CAM.

Nobel (2003), en el estudio mencionado anteriormente, menciona que la alta EUA de la tuna en relación a las plantas C3 observadas en el presente estudio, se relaciona con la reducida diferencia de concentración de vapor entre la planta y la atmósfera durante el periodo de máxima apertura estomática, lo que se puede observar en la figura 13, donde el DPV nocturno es prácticamente la mitad del DPV diurno. Otra adaptación mencionada por Nobel (2003) son las raíces superficiales con una profundidad media de 15 cm, lo que facilita una respuesta rápida a lluvias ligeras, esto determina que el sistema radical sea pequeño, de hecho, Silva y Acevedo (1995) y Nobel (2003) señalan que las raíces representan sólo el 12% del total de

la biomasa de *Opuntia ficus-indica*, lo cual se corroboró en esta investigación con un promedio de raíces en el periodo de $12,48\% \pm 3,59$ (Figura 9.c).

Diferencias de EUA entre Granado e Higuera

Al comparar la EUA obtenida en este estudio para granado e higuera, se observó que el granado presentó una mayor EUA, lo cual puede ser explicado por la ecuación de eficiencia de transpiración deducida por Tanner y Sinclair (1983), en que una de las posibles fuentes de variación de EUA es “b”, la cual indican, es el factor de transformación de hexosa a producción final. Penning de Vries (1975b, citado de Tanner and Sinclair 1983), estimó que 1g de hexosa produce 0,83 g de hidratos de carbono, 0,4 g de proteínas (asumiendo nitrato como fuente de N) o 0,33 g de lípidos. Por lo tanto, la producción de lípidos es energéticamente más costosa que la de proteínas e hidratos de carbono. Al respecto, hay que señalar que la higuera es una especie que genera látex y caucho, el cual tiene un alto costo energético (Kim *et al*, 2003), lo que podría explicar diferencias como una menor EUA con respecto al granado. Lo anterior se reafirmó con el promedio de EUAi obtenida en este estudio, la cual para granado fue de $3,64 \pm 2,26$ y para higuera fue $4,38 \pm 3,62$ (Figura 4), como podemos observar la higuera tuvo una mayor EUAi lo cual es relevante, ya que indica que el tejido de higuera es más “caro de producir”, es decir para niveles similares de asimilación de CO₂ por unidad de agua transpirada se logran menores niveles de acumulación de biomasa en higuera, ya que la transformación de hexosas (el producto de la asimilación) en biomasa sería menor como se observó en la EUA (Figura 12).

Parámetro KDPV

En la figura 13 se muestra el DPV utilizado para normalizar el componente de transpiración diaria, observándose que los valores más bajos se encuentran de mayo a agosto. También se aprecia que el DPV diurno fue un poco más del doble que el DPV nocturno.

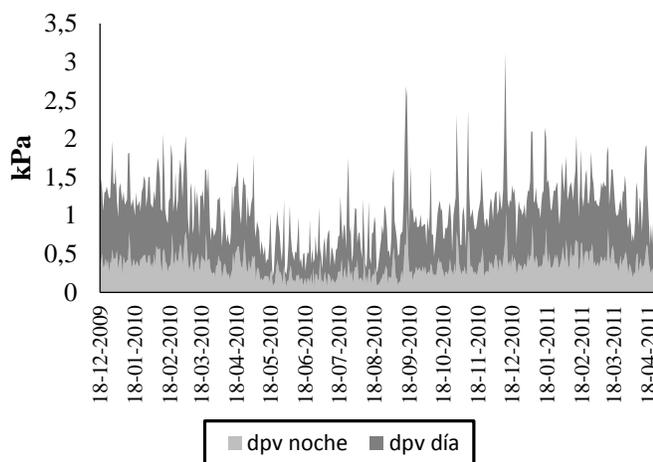


Figura 13. Comparación del DPV durante el día y el DPV durante la noche a lo largo del ensayo.

Los resultados de kDPV se presentan en la figura 14, se calculó un kDPV para el granado de $3,30 \pm 0,17 \text{ g}_{[\text{MS}]} \text{ kPa kg}^{-1}_{[\text{H}_2\text{O}]}$ para la higuera de $2,86 \pm 0,44 \text{ g}_{[\text{MS}]} \text{ kPa Kg}^{-1}_{[\text{H}_2\text{O}]}$ y para la tuna de $6,48 \pm 0,85 \text{ g}_{[\text{MS}]} \text{ kPa kg}^{-1}_{[\text{H}_2\text{O}]}$.

Como observamos en la figura 5.a; 5.b y en el cuadro 1 y 2, la EUAi tiene una relación inversa con el DPV, resultados similares a los obtenidos por Lindroth y Cienciala (1996) y Tanner y Sinclair (1983). Debido a esto, muchos investigadores utilizan el DPV para normalizar la EUA y así poder validar sus resultados en cualquier parte del mundo o compararla con otros cultivos. Jorgensen y Shelde (2001) en un estudio recopilatorio mencionado anteriormente, señalan que el kDPV calculado en base a transpiración y biomasa total, de maíz, *Miscanthus* (C4) y alfalfa fueron de 8,2 a 12 g kPa kg^{-1} (Tanner and Sinclair (1983, citado de Jorgensen and Shelde 2001)), 6,6 g kPa kg^{-1} (Clifton-Brown and Lewandowski, (2000, citado de Jorgensen and Shelde 2001)) y 4,3 g kPa kg^{-1} (Tanner and Sinclair (1983, citado de Jorgensen and Shelde 2001)) respectivamente. Al compararla con los resultados del presente estudio, el granado y la higuera tuvieron un bajo kDPV, debido a que el DPV en la zona de estudio fue en promedio $0,72 \pm 0,3 \text{ kPa}$ para las plantas C3 y de $0,35 \pm 0,16 \text{ kPa}$ para la tuna (CAM). Esto indicaría que granado e higuera, en términos absolutos, son menos eficientes que alfalfa, una de las plantas C3 más eficientes en el uso del agua, y la tuna tiene un kDPV similar a *Miscanthus* (C4). Los anteriores resultados indican que en el lugar del ensayo, las plantas maximizaron su EUA debido al bajo DPV, tal como lo menciona Wallace (2000, citado de Jorgensen and Shelde 2001), quien recomienda que para maximizar la EUA se debe cultivar preferentemente en zonas de bajo DPV

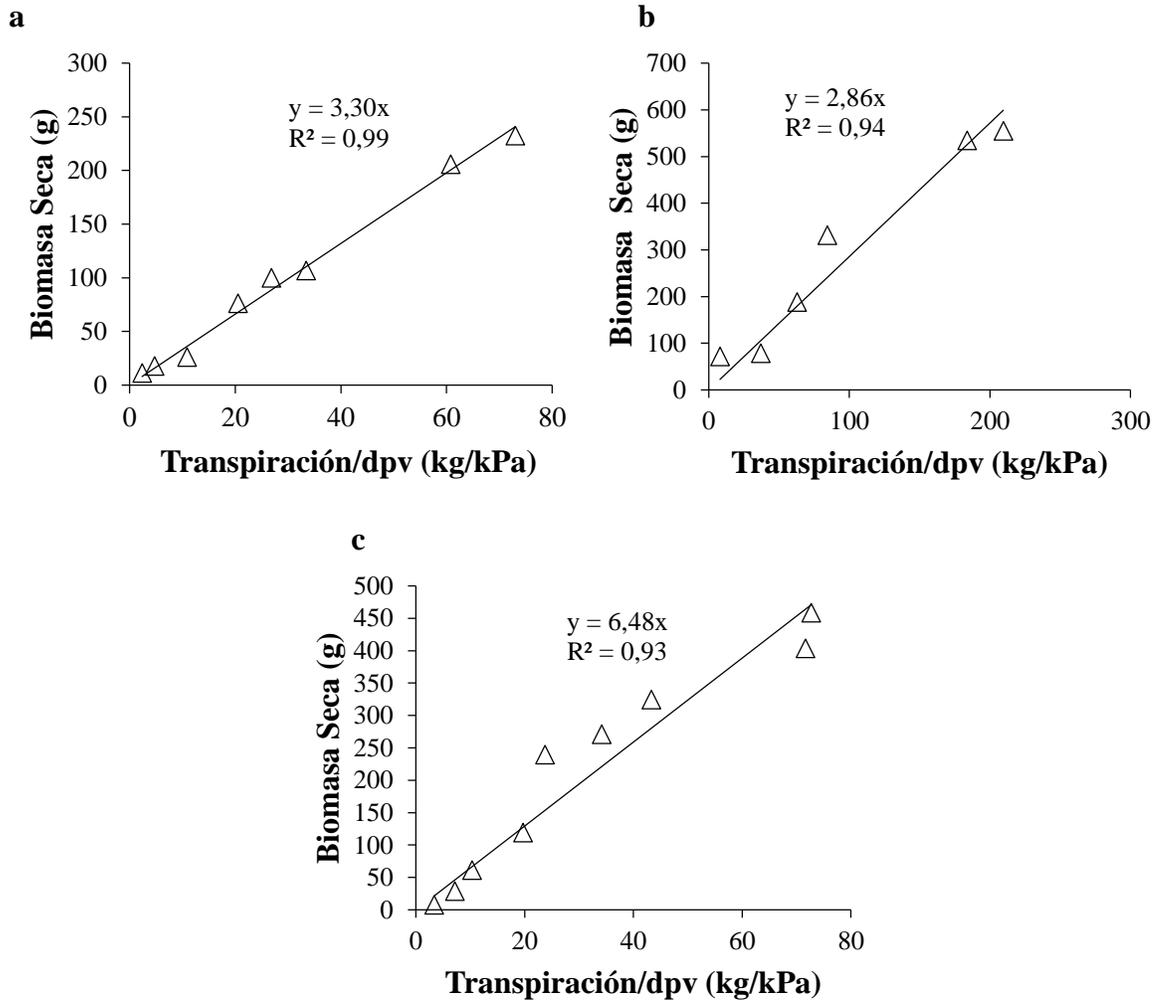


Figura 14. Biomasa seca en función de la transpiración normalizada por dpv para granado (a), higuera (b) y tuna (c). Donde la pendiente corresponde al kDPV

Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR)

La SES de granado e higuera se presenta en las figura 15. Se observó que la higuera tiene una mayor SES respecto del granado en todas las fechas de extracción.

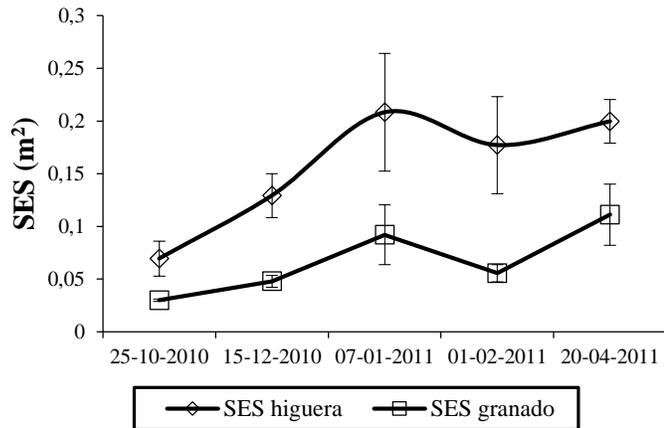


Figura 15. Superficie equivalente sombreada durante la temporada 2010-2011.

Utilizando la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (PARia) y la biomasa acumulada seca (MS), se estimó la EUR (figura 16), que fue de $2,59 \pm 0,18$ y $2,39 \pm 0,12$ g_[MS] MJ⁻¹ para granado e higuera respectivamente. La menor cantidad de datos en higuera, se debe al problema expresado anteriormente en el capítulo de EUA.

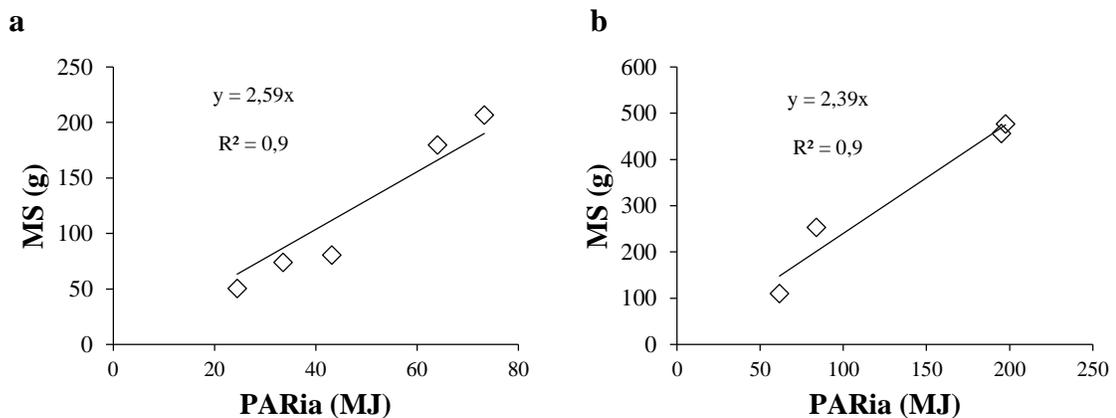


Figura 16. Materia seca en función de radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada de granado (a) e higuera (b).

Stockle y Kiniry (1989) señalan que para maíz y sorgo, ambas plantas C4, la EUR calculada en base a radiación fotosintéticamente activa y biomasa aérea, es de 2,9 a 4,4 g MJ⁻¹ y 2,1 a 3,8 g MJ⁻¹ respectivamente y atribuyen la variabilidad al déficit de presión de vapor de la

atmósfera del lugar donde se realizó el ensayo, entre otros factores. Por su parte, Roupael and Colla (2004), en un estudio realizado en pepino (*Cucurbita pepo L.*) cultivado en hidroponía bajo invernadero, encontraron que la EUR en base a materia seca aérea varió de 1,97 a 4,17 dependiendo de la fenología de la planta (antes o después de inicio de cosecha), así como de manera estacional (primavera-verano o verano-otoño). Además, encontraron una alta correlación negativa entre EUR con radiación solar, temperatura y DPV, indicando los siguientes valores umbrales para la obtención de una alta EUR: 15 MJ m⁻² de radiación solar, 20°C de temperatura y 0,8 kPa de DPV. Lo anterior demuestra que el control climático bajo condiciones de invernadero puede mejorar la EUR y que los efectos del clima deben ser considerados para modelos de acumulación de biomasa (Stockle and Kiniry, 1989).

En especies arbóreas, Mariscal *et al.* (1998), calcularon el valor de la EUR en olivo, otra planta de zonas semi-áridas, en base a biomasa aérea, la cual fue 1,35 g/MJ. García (2011) en un estudio de granados variedad Wonderful de 3 y 5 años, en base a materia seca total y MJ de RGi en la misma región de este estudio, señala que la EUR del granado, al igual que en los estudios mostrados anteriormente, presenta una variación estacional donde en brotación los valores de EUR son 3,2 y 2,8; a finales de cuaja son 0,7 y 0,37; y en cosecha 1,7 a 1,1 g MJ⁻¹ para el huerto de 5 y 3 años respectivamente. Concentrándonos en el huerto joven de 3 años, el valor de EUR obtenido en brotación no fue considerado dentro del análisis debido a que se consideró sobrestimado por sustentarse en asimilados almacenados en la temporada anterior, por lo que el promedio de EUR para el huerto joven fue 0,8 g MJ⁻¹, lo cual, es menor al obtenido en el presente estudio para plantas de 1 año. Una de las posibles razones es que en la presente investigación todos los valores de biomasa fueron tomados en consideración, incluyendo los de brotación y por otro lado en el estudio de García (2011) mencionan que las plantas sufrieron un estrés a mediados de temporada, lo cual en este estudio fue evitado ya que se realizó en condiciones más controladas.

Al observar los valores de olivo y granado en comparación con los mencionados anteriormente para maíz, sorgo y pepino cabe señalar que los valores de EUR para especies arbóreas son generalmente más bajos que para especies herbáceas C3 y C4 debido al alto costo energético requerido para producir estructuras leñosas y a la respiración de los órganos de apoyo (Kiniry *et al.*, (1989, citado por Mariscal *et al.*, 1998)). Por lo tanto, al comparar los valores anteriormente señalados con los obtenidos en la figura 16 del presente estudio, se observó que el granado e higuera poseen una EUR mayor que la obtenida para olivo por Mariscal *et al.* (1998) y relativamente menor a la de sorgo (C4), lo que indica que poseen un alto potencial en la zona.

CONCLUSIONES

Los valores de EUA, EUR y KDPV que se extraen de este estudio son muy valiosos para zonificación agrícola y sirven de comparación con otros cultivos frutales para así buscar la especie que mejor se adapte a la zona maximizando su rendimiento y minimizando su consumo de agua.

Este estudio demuestra la variación de la EUA en granado e higuera frente a parámetros climáticos, debido a que la EUAi presenta una relación potencial inversa con variables climáticas como DPV, Thj y PAR.

Las diferencias de EUA entre tuna y granado e higuera son provocadas por los distintos metabolismos (CAM y C3) y las diferencias de EUA entre granado e higuera podrían atribuirse a los costos de respiración en mantención y crecimiento.

A pesar que la EUA estacional de higuera y granado es similar a la de plantas C4, el kDPV indica que aquello fue provocado por condiciones climáticas favorables de bajo DPV.

Los valores de EUA para granado, higuera y tuna y la EUR para granado e higuera indican que son una buena alternativa para zonas áridas.

Existe poca información acerca de la EUA y la EUR para especies frutales, así como maneras estandarizadas de estimarlas.

BIBLIOGRAFIA

- Andersen. P., 1989. Leaf gas Exchange characteristics of eleven species of fruit crops in north florida. University of Florida, IFAS Agricultural Research and Education Center. pp: 229-234.
- Balzarini. M.G., Gonzales. L., Tablada. M., Casanoves. F., Di Rienzo. J.A., Robledo. C.W. 2008. Manual del Usuario, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina. 336p
- Botti. C. 2001. La higuera. Santiago-Chile. Universidad de Chile Serie Ciencias Agronómicas N° 3. 78p.
- Carvajal. M., Mota. C., Alcaraz-López. C., Iglesias. M. y Ballesta. M. 2010. Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos de la región de Murcia. Departamento de Nutrición Vegetal. CEBAS-Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 30100-Espinardo, Murcia, España. pp: 8-10.
- Da Silva. A., Leonel. S., De Souza. A., Domingos. J. y Ducatti. C. 2010. Trocas gasosas e ciclo fotossintético da figueira “Roxo de Valinhos”. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.40. n.6. pp: 1270-1276.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia. 2006. Estudio FAO Riego y Drenaje No 56. Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, Italia: 31-40.
- Faustino. L., Graciano. C., Gortari. F. y Guiamet. J. 2011. ¿Cómo afectan los nutrientes el uso del agua en plantas leñosas? Instituto de Fisiología Vegetal (CONICET-UNLP). La Plata, Buenos Aires, Argentina. pp: 1-18.
- Felker. P., Han. H., 1995. Field validation of water-use efficiency of the CAM plant *Opuntia ellisiana* in south Texas. Center for Semi-Arid Forest Resources, Caesar Kleberg Wildlife Research Institute, Texas A and M University-Kingsville, Kingsville, TX 78363, USA. pp: 133-148.
- García. K. 2011. Estimación de la acumulación de biomasa y extracción estacional de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio en plantas de granado (*Punica granatum* L.). Tesis de magister en ciencias agropecuarias, Mención Producción Frutícola. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 104p
- Grigera, G., Oesterheld, M., Durante, M. y Pacín, F. 2007. Evaluación y seguimiento de la productividad forrajera. *Revista Argentina de Producción Animal* 27(2) : 137-148

Hepaksoy. S., Aksoy. U., Can. H., Ul. M., S.A. Determination of relationship between fruit cracking and some physiological responses, leaf characteristics and nutritional status of some pomegranate varieties. CiHEAM-Options Mediterraneennes.Turkey. pp: 87-92.

INE. 2007. Estadísticas Agropecuarias [en línea]
<http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_agropecuarias/estadisticas_agropecuarias.php> [consulta: 17 Septiembre 2009]

INIA. 1990. Mapa Agroclimático de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.15p

Intrigliolo. DS., Nicolas. E., Bonet. L., Ferrer. P., Alarcón. J., Bartual. J. 2010. Water relations of field grown Pomegranate trees *Punica granatum* under different drip irrigation regimes. *Agricultural Water Management*. 98: pp: 691-696.

Jarvis, PG. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potencial and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 273: 593-610.

Jorgensen.U., Shelde. K. Energy crop water and nutrient use efficiency.Danish Institute of Agricultural Sciences (DIAS). Departament of Crop Physiology and Soil Science. Research Centre Foulum. Tjele. Denmark pp: 5-10

Khattab. M., Shaban. A., El-Shrief. A. and El-Deen Mohamed. A. 2011. Growth and Productivity of Pomegranate Trees under Different Irrigation Levels I: Vegetative Growth and Fruiting. *Journal of Horticultural Science & Ornamental Plants* 3 (2). 194-198.

Katerji. N., Mastrorilli. M., Rana. G. 2008. Water use efficiency of crops cultivated in the Mediterranean region: Review and analysis. *European Journal of Agronomy*. 28: 493-507.

Kim. S., Kim. O., Ryu. J., Kwak. Y., Lee., Y. Kang. H. 2003. Isolation of Stress-Related Genes of Rubber Particles and Latex in Fig Tree (*Ficus carica*) and their Expressions by Abiotic Stress or Plant Hormone Treatments. *Plant Cell Physiol.* 44(4). JSPP. pp: 412-414

Kremer. C., Stöckle. C., Kemanian. R. 2008. On the Use of Radiation-and Water-Use Efficiency for Biomass Production Models. *In: AHUJA. L., R., REDDY. R., V., SASEENDRAN. A., S. AND QIANG YU (Eds.). Response of Crops to Limited Water: Understandig and Modeling water strees effects on plants growth processes. American society of Agronomy Inc., Crop Science Society of America Inc. and Soil Science Society of America Inc., Madison, USA. 435p.*

Liu-Kang. X., Hsiao. T. 2004. Predicted versus measured photosynthetic water-use efficiency of crop stands under dynamically changing field environments. Department of Land, Air and Water Resources, University of California. USA pp:1-17.

Mariscal. M. J., Orgaz. F., Villalobos. F.J. 1998. Radiation-use efficiency and dry matter partitioning of a Young olive (*Olea europea*) orchard. *Tree Physiology* 20. pp:65-72.

- Matus. N., Fernandez. B., Aedo. M., y Larrain. S. 2004. Recursos Hídricos de Chile: Desafíos para la Sustentabilidad. Santiago de Chile, Programas Chile Sustentable, LOM- ediciones.
- Medrano. H., Bota. J., Cifre. J., Flexas. J., Ribas-Carbó. M., y Gulías. J. 2008. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. Grup de biología de les plantes en condicions mediterrànies. Departament de biología. Universitat de les Illes Balears-IMEDEA. Pp. 63-84
- Mizrahi. Y., Raveh. E., Yossov. E., Nerd. A., Asher-Ben. J. 2007. New Fruit Crops With High Water Use Efficiency. ASHS Press, Alexandria, VA. pp: 216-222
- Nobel. P. 2003. Eco fisiología de OPUNTIA FICUS-INDICA. Department of Organismic Biology, Ecology, and Evolution. University of California (UCLA) Los Angeles, CA 90095-1606, USA. [En Línea]. <<http://www.fao.org/docrep/007/y2808s/y2808s06.htm#fn3>> [consulta: 12 de marzo 2012]
- Nobel. P. y Hartsock. T. 1983. Relationships between Photosynthetically Active Radiation, Nocturnal Acid Accumulation, and CO₂ Uptake for a Crassulacean Acid Metabolism Plant, *Opuntia ficus-indica*. Plant Physiol. 71. pp: 71-75.
- Pizarro. R., Morales. C., Roman. L., y Godoy. P. 2006. Informe país Estado del Medio Ambiente en Chile. 2ª edn. Aguas Continentales, ed. Centro de análisis de Políticas Públicas. Universidad de Chile. Santiago., pp.: 79-82.
- Prat. L. y Botti. C. 2002. El Granado. Santiago-Chile, Universidad de Chile Serie Ciencias Agronómicas N° 7, 64p.
- Prieto. J., Lebon. E. y Ojeda. H. 2005. Respuesta estomática de variedades de vid al estado hídrico del suelo y al déficit de presión de vapor de agua. INTA EEA Mendoza, Argentina. INRA Montpellier SupAgro, Francia. INRA Pech Rouge, Francia. pp: 1-2
- Rosati, A. and. Dejong, T. M. 2003. Estimating Photosynthetic Radiation Use Efficiency Using Incident light and Photosynthesis of Individual Leaves. Annals of Botany 91: 869 – 877. [en línea] <<http://aob.oxfordjournals.org/cgi/reprint/91/7/869>> [consulta: 1 Enero 2010]
- Rouphael. Y., Colla. G. 2004. Radiation and water use efficiencies of greenhouse zucchini squash in relation to different climate parameters. European Journal of Agronomy. 23. pp: 183-194.
- Silva. H., Acevedo. E. 1995. Eficiencia en el uso del agua de diez taxa de Opuntia introducidas en la región mediterránea de Chile. Revista Chilena de Historia Natural. 68. pp: 271-282
- Stockle. C., Kiniry. J. 1989. Variability in crop radiation-use-efficiency associated with vapor-pressure deficit. Field crop research. 25. pp: 171-181.

Sudzuki. F., Muñoz. C., Berger. H. 1993. El Cultivo de la Tuna. Santiago-Chile, Departamento de Producción Agrícola Universidad de Chile. 87p.

Tanner, C.B., and Sinclair, T.R. 1983. Efficient Water Use in crop Production: Research or Re-Search? pp. 1-25. In: H. M. Taylor, W. R. Jordan, and T. R. Sinclair (eds.), Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura). 2006. 2º informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el mundo, Paris. [en línea] pp.: 21-23 [en línea]<http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr2/facts_figures/index_es.shtml> [consulta: 25 Octubre 2009].

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura). 2003. Agua para todos, Agua para la vida. [en línea] pp: 4-5 [en línea]<http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/ex_summary/ex_summary_es.pdf>[consulta: 23 Octubre 2009].

Taiz, L. and E. Zeiger. 2002. Plant physiology. Ed. Sinauer Associates. Massachussets. EE.UU. 623 p.