

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



**EFICIENCIA INTRÍNSECA DIARIA DEL USO DEL AGUA DE UNA
HUERTA DE NOGAL PECANERO Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA**

POR:
Pedro Ruiz Ruiz

TESIS
Presentada como requisito parcial
para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Marzo de 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

**EFICIENCIA INTRÍNSECA DIARIA DEL USO DEL AGUA DE UNA
HUERTA DE NOGAL PECANERO Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA**

POR:

Pedro Ruiz Ruiz

TESIS

Que somete a consideración del H. Jurado Examinador
como requisito parcial para obtener el título de:

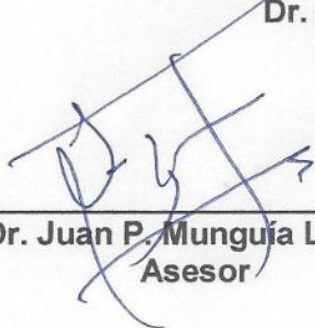
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADA


El presidente del jurado



Dr. Alejandro Zermeño González
Asesor principal



Dr. Juan P. Munguía López
Asesor



Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho
Asesor
Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"



Dr. Luis Samaniego Moreno
Coordinador de la División de Ingeniería



Coordinación de
Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Marzo de 2015

AGRADECIMIENTOS

Es para mí un gran orgullo saber que el esfuerzo que hice día a día en este largo trayecto al fin tendrá una recompensa. Y con la mayor felicidad por haber terminado mi carrera profesional, siendo la mejor herencia de mi vida, agradezco de todo corazón...

A Dios, por haberme dado su bendición y la oportunidad de realizar el sueño que siempre tuve, llegar felizmente a esta etapa de superación y formación profesional, quien me acompañó en los momentos buenos y malos hasta lograr una meta más en mi vida. Gracias por todo lo que tengo, una hermosa familia. Solo me queda pedirte Señor la fortaleza física y espiritual para superarme día a día y dominar satisfactoriamente esta etapa tan importante en mi vida, porque sin tu presencia no soy nada.

A mis padres, porque son ellos quienes sin límite de esfuerzos han dedicado gran parte de su vida para formarme, educarme y para la construcción de este gran sueño hecho realidad. Lo han hecho solo se puede entender por el gran amor que me tienen. Hoy me es muy grato decirles que lo hemos logrado... ... ¡¡Muchas gracias papás!!

A mi Alma Mater, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por brindarme la oportunidad de superarme en mi formación profesional como Ingeniero Agrónomo en Irrigación y convertirme en un mejor ser humano, por brindarme cobijo y refugio durante estos cinco años cuando más lo necesitaba.

A todo el personal docente que participo en mi formación, gracias por brindarme los conocimientos y las herramientas necesarias para poder lograr mis metas.

A mis Asesores:

A mi asesor principal, Dr. Alejandro Zermeño Gonzales, al brindarme la oportunidad de trabajar con él en uno de sus trabajos de investigación. Gracias por su valiosa colaboración, apoyo, asesoría, por el tiempo incondicional que me dedicó para la realización y revisión del presente trabajo de tesis. Gracias por su generosidad, confianza, afecto y amistad, que fueron fundamentales para la concreción de este trabajo.

Al Dr. Juan P. Munguía López, por su apoyo y colaboración que ha compartido conmigo en este trabajo de investigación; y la revisión del trabajo de tesis.

Al Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho, por su apoyo y colaboración en la revisión de este proyecto, y a sus enseñanzas como docente.

A mis compañeros de generación CXVI, por esa amistad que nos tuvimos y por ayudarnos unos a otros en aquellas materias en las que sufríamos todos con los trabajos. A ustedes Norma, Dulce, Inés, Yaz, Maribel Nacho, Beno, Güero, Mosqueda, Burro, Alexander, Humberto, Omar, Sala, Eloy, Herman, etc. y a ustedes Osvaldo, Rolfi, Napo, Carlos, Gabriel, muchas gracias por su amistad y apoyo

Y por supuesto a mis amigos y a mi novia Micaela Hernández Díaz que me acompañaron y me apoyaron durante estos cinco años de carrera, por los buenos e inolvidables momentos gracias a ustedes Mica, Hugo, Viko, Chusi Pancho, Alex, Híber, Cecy, Genaro, José.

DEDICATORIAS

A mis padres Sr. Lucas Ruíz Ruíz y Sra. Juana Ruíz Ruíz quienes sin limitar esfuerzo alguno sacrificaron gran parte de su vida para educarme:

Para tí madre, que eres el ser más maravilloso del mundo, gracias por el apoyo moral, tu cariño y comprensión que desde niño me has brindado, por guiar mi camino y estar junto a mí en los momentos más difíciles.

Para tí padre, porque desde pequeño has sido para mí un gran hombre maravilloso al que siempre he admirado, gracias por guiar mi vida con energía, esto ha hecho que sea lo que soy.

Para ustedes hermanos Martín, Marcelino, Antonia, Mario, Armando, Martha y Carmela, porque tuvieron la esperanza de verme convertido en un hombre de provecho, y por ser mi fuente de inspiración para seguir adelante y abrir la brecha para ustedes que vienen detrás de mí.

Para mis tías Pascuala Ruíz Ruíz y Antonia Ruíz Pérez por apoyarme en el momento justo que lo necesite. Y en general, a todos mis familiares les dedico y comparto con ustedes mi éxito.

Para usted madrina Manuela Jiménez Hernández porque ha sido como mi segunda madre al brindarme incondicionalmente su apoyo cuando más lo necesitaba.

A mis abuelitos Miguel Ruíz Gonzales (+), Micaela Ruíz Gómez (+), Juan Ruíz Núñez y Dionicia Ruíz Pérez (+), porque sé que siempre confiaron en mí y sé que hoy se sienten felices por este logro.

Y para mis amigos que siempre me han brindado su amistad y su apoyo incondicional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

<i>AGRADECIMIENTOS</i>	<i>III</i>
<i>DEDICATORIAS</i>	<i>V</i>
RESUMEN	XI
I.- INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVO	14
HIPÓTESIS	14
II.- REVISIÓN DE LITERATURA	15
2.1.- Aspectos generales del nogal pecanero	15
2.1.1.- Origen, distribución y hábitat	15
2.1.2.- Clasificación taxonómica	17
2.1.3.- Características botánicas	17
2.1.4.- Requerimientos climáticos	20
2.1.5.- Requerimientos edáficos	22
2.2.- Manejo Agronómico del Cultivo	24
2.2.1- Selección y preparación del terreno	24
2.2.2.- Sistema de plantación	24
2.2.3.- Podas	25
2.2.4.- Fertilización	26
2.2.5.- Riego	28

2.3.- Importancia Económica y Social del Nogal Pecanero en México y en el Mundo	29
2.3.1.- Países productores en el mundo	29
2.3.2.- Producción en México	30
2.3.3.- Producción en Coahuila.....	31
2.4.- Eficiencia Intrínseca del Uso del Agua.....	34
2.5.- Métodos para Obtener la Eficiencia Intrínseca del Uso del Agua	35
2.6.- Efecto de las Variaciones del Clima en la Tasa De Evapotranspiración y de Fotosíntesis y su Relación con la Eficiencia Intrínseca del Uso del Agua.....	36
III.- MATERIALES Y MÉTODOS	38
3.1 Ubicación y Carteristas del Sitio del Estudio	38
3.2 Manejo Agronómico de la Huerta.....	38
3.3 Instrumentación y Mediciones.....	39
IV.- RESULTADOS Y DISCUSION.....	44
4.1.- Distribución Diurna de los Flujos de Energía.	44
4.2.- Distribución Diurna de los Flujos de CO ₂	48
4.3.- Flujos Integrados Diurnos de Energía y CO ₂	52
4.4.- Eficiencia Intrínseca del Uso del Agua y su Relación con las Condiciones del Clima.....	54
V.- CONCLUSIONES.....	58
VI.- BIBLIOGRAFIA.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Anemómetro sónico tridimensional y analizador de vapor de agua y bióxido de carbono de sendero abierto. Sobre el dosel de la huerta de nogal pecanero en Zaragoza, Coahuila, México.....41
- Figura 2.** Evolución diurna (8:00 a 20:00 h) bajo condiciones de cielo despejado de los flujos de energía: Radiación neta (R_n), flujo de calor latente (LE), flujo de calor sensible (H) y flujo de calor en la superficie del suelo (G) observados en una huerta de nogal pecanero, en Zaragoza, Coahuila entre el 21 de julio y el 1 de agosto de 2012.46
- Figura 3.** Evolución diurna (8:00 a 20:00 h) bajo condiciones de cielo nublado de los flujos de energía: Radiación neta (R_n), flujo de calor latente (LE), flujo de calor sensible (H) y flujo de calor en la superficie del suelo (G) observados en una huerta de nogal pecanero, en Zaragoza, Coahuila entre el 20 de julio y el 5 de agosto de 2012.47
- Figura 4.** Patrón de distribución diurna del flujo de CO_2 entre el dosel de los árboles de una huerta de nogal pecanero y la atmósfera para condiciones de cielo despejado observado entre el 21 de julio y el 1 de agosto de 2012, en Zaragoza, Coahuila. Valores negativos indican asimilación de CO_2 (fotosíntesis) por el dosel y positivos liberación (respiración).50

Figura 5. Patrón de distribución diurna del flujo de CO₂ entre el dosel de los árboles de una huerta de nogal pecanero y la atmósfera para condiciones de cielo nublado observado entre el 20 de julio y el 5 de agosto de 2012, en Zaragoza, Coahuila. Valores negativos indican asimilación de CO₂ (fotosíntesis) por el dosel y positivos liberación (respiración).51

Figura 6. Relación entre la eficiencia intrínseca del uso del agua (WUE_i), la Radiación neta (Rn), la tasa de evapotranspiración (ET), la temperatura del aire (T_{aire}) y el déficit de presión de vapor (DPV) en una huerta nogal pecanero, observada del 20 de julio al 5 de agosto de 2012. Zaragoza, Coahuila.56

Figura 7. Relación entre la tasa de asimilación de CO₂ (FCO₂), la temperatura del aire (T_a) y el déficit de presión de vapor (DPV).57

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del nogal pecanero	17
Cuadro 2. Producción de nuez pecanera en México 2012.	31
Cuadro 3. Producción de nuez pecanera en el estado de Coahuila 2012.	33
Cuadro 4. Flujos integrados diurnos (8:00 a 20:00 h) de radiación neta (R_n), flujo de calor latente (LE), flujo de calor sensible (H), Flujo de calor en la superficie del suelo (G), flujo de bióxido de carbono (FCO_2), flujo de vapor de agua (FH_2O) y la eficiencia intrínseca del uso del agua por la huerta de nogal (WUE_i) para el mismo segmento de tiempo. Zaragoza, Coahuila, del 20 de julio al 5 de agosto, 2012.	53

EFICIENCIA INTRÍNSECA DIARIA DEL USO DEL AGUA DE UNA HUERTA DE NOGAL PECANERO Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA

Pedro Ruiz Ruiz, pedroruiz_88@live.com.mx

RESUMEN

Por su valor económico e importancia social el nogal pecanero (*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch) es uno de los frutales caducifolios más importantes del norte de México. Debido a su creciente demanda de agua por las superficies agrícolas, es indispensable mejorar la eficiencia del uso de este recurso, y para lograrlo es necesario determinar la eficiencia intrínseca del uso del agua (WUE_i) por el dosel del cultivo, lo que es función de la tasa de fotosíntesis y conductancia estomática de las hojas al flujo de vapor de agua, que a su vez depende de las condiciones atmosféricas. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de las variaciones climáticas en la eficiencia intrínseca diaria del uso del agua de una huerta de nogal pecanero.

El estudio se realizó en el verano de 2012, en una huerta de nogal pecanero de la propiedad Las Tres Marías en el municipio de Zaragoza Coahuila. Para analizar la tasa de asimilación de bióxido de carbono por los árboles de la huerta y la WUE_i se usó el método de la covarianza eddy. Para esto, se realizaron mediciones (promedios de 30 min) de todos los componentes de la ecuación del balance de energía y los flujos de bióxido de carbono (FCO_2) sobre la superficie vegetal.

La WUE_i por la superficie vegetal, se obtuvo con la relación de los valores integrados entre las 8:00 y 20:00 hr de los FCO_2 y el agua evapotranspirada (ET) en el mismo intervalo de tiempo. Y para analizar su relación con las condiciones climáticas, se graficaron los valores integrados diarios de WUE_i contra la radiación neta (R_n), la tasa de evapotranspiración (ET), la temperatura del aire (T_a) y el déficit de presión de vapor (DPV). Similarmente, se analizó la relación entre la tasa de asimilación de CO_2 (NEE) y las condiciones climáticas, graficando NEE contra la temperatura del aire y el déficit de presión de vapor.

Se observó que las tasas instantáneas de máxima asimilación de CO_2 por el dosel de los árboles se presentaron entre las 12:00 y las 14:00 horas, y fue de entre -16 y $-20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en las diferentes condiciones climáticas, lo que correspondió con las horas de máxima incidencia de radiación solar y máximas tasas de ET, obteniéndose un promedio diario de absorción de CO_2 de $328.06 \text{ mmol m}^{-2}$, mientras que la ET promedio fue $352.415 \text{ mol m}^{-2}$, lo que resultó en una WUE_i diaria promedio de $0.947 \text{ mmol } CO_2 \text{ por mol de } H_2O$.

La WUE_i diaria fue lineal e inversamente proporcional con la radiación neta (R_n), la tasa de evapotranspiración (ET), temperatura del aire (T_a) y el déficit de presión de vapor (DPV), indicando que la WUE_i decrece a medida que aumentan los valores de las variables mencionadas.

Palabras Clave: Asimilación de CO_2 , eficiencia del uso del agua, nogal pecanero, clima.

I.- INTRODUCCIÓN

El nogal pecanero (*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch) es uno de los frutales más importantes en el norte de México (Ávila, 2012), su producción comercial en México inició a partir de 1946 (Ojeda-Barrios *et al.*, 2009). Actualmente existen aproximadamente 90 mil ha de nogal pecanero (Burrola *et al.*, 2012), y su producción es una actividad en amplio crecimiento, sobre todo en los estados del norte, debido a la amplia adaptación edafoclimática y por las condiciones de mercado y alta rentabilidad que presenta, al exportarse a Estados Unidos de América (Orona-Castillo *et al.*, 2013), y hacia el mercado asiático, donde China, y Hong Kong, son los más importantes (Rodríguez-Andujo *et al.*, 2007).

La eficiencia del uso del agua por las plantas es un importante indicador del intercambio de vapor de agua entre los cultivos y la atmósfera (Seibit *et al.*, 2008). Debido a la creciente demanda de agua por los diferentes sectores de la sociedad y el incremento de la superficie agrícola, es indispensable mejorar la eficiencia del uso del agua en la agricultura (Bramley *et al.*, 2013) y para lograr este objetivo es necesario determinar la WUE_i por los diferentes cultivos (Condon *et al.*, 2002).

La WUE_i por el dosel de un determinado cultivo es la relación entre la tasa de asimilación de bióxido de carbono y la tasa de ET ($\text{mmol CO}_2 / \text{mol H}_2\text{O}$), que es función de la capacidad fotosintética de las hojas y de la conductancia de los estomas al flujo de vapor de agua, que a su vez depende de las condiciones atmosféricas de la localidad al momento de la medición (Medrano *et al.*, 2007; Gilbert *et al.*, 2011; Bramley *et al.*, 2013).

Para obtener la WUE_i por el dosel de un cultivo, es necesario medir simultáneamente la tasa de asimilación de CO_2 por el dosel y la tasa de ET de la vegetación, para obtener la relación de moles de CO_2 asimilados por mol de vapor de agua evapotranspirada (Bramley *et al.*, 2013).

Feng (1999) afirma que el aumento de la concentración de CO_2 en la atmosfera provoca un incremento en la tasa de asimilación de CO_2 por mol de agua evapotranspirada, lo que implica un aumento en la WUE_i

En condiciones de riego abundante, sin limitaciones hídricas para la planta, la WUE_i es menor, y aumenta exponencialmente según decrece la cantidad de agua aplicada, pero a valores extremos de sequía las plantas se vuelven menos eficientes en el uso del agua debido a que sufren un cierre estomático severo (Medrano *et al.*, 2007).

OBJETIVO

Evaluar el efecto de las variaciones climáticas en la eficiencia intrínseca diaria del uso del agua de una huerta de nogal pecanero.

HIPÓTESIS

Las variaciones climáticas diarias afectan el valor de la eficiencia intrínseca del uso del agua de una huerta de nogal pecanero.

II.- REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.- Aspectos generales del nogal pecanero

2.1.1.- Origen, distribución y hábitat

El Nogal (*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch) es un árbol nativo del norte de México y el sur de Estados Unidos, y particularmente de los estados de Chihuahua, Coahuila y Nuevo León en México y del centro de Texas en Estados Unidos donde se localiza la mayor población de árboles nativos (Aguilar, 2006), es uno de los árboles de frutas comestibles más antiguo del mundo, tiene sus orígenes en la prehistoria, ya que se han encontrado restos fósiles en el norte de México y en Texas, indicando su existencia desde antes que los americanos nativos habitaran ahí (Ojeda-Barrios *et al.*, 2009). Los colonizadores españoles llamaron “Nogal” al árbol pecanero y a su fruto la “pecana” le llamaron “nuez”. El nombre de pecana o pecanera es derivado del vocablo indígena Algonquin que le da el nombre de “Pakan” que significa nueces tan duras que requieren una piedra para quebrarlas (Medina y Cano, 2002).

De todos los productos hortícolas que nos heredaron los nativos, la nuez pecanera es quizá el producto más importante, ya que a los indígenas les tomo más de 400 años domesticar la nuez (Campos *et al.*, 2005).

Las áreas productoras de nuez alrededor del mundo se localizan principalmente entre los 25° y 35° de latitud norte y entre 25° y 35° latitud sur (Ojeda-

Barrios *et al.*, 2009). En condiciones naturales esta planta se desarrolla en las riveras
de los ríos

donde hay o había abundante suministro de agua, el suelo es fértil, con pH de ligeramente ácido a ligeramente alcalino (Martínez y Jiménez, 2008).

En el país se identifican principalmente dos áreas nogaleras por excelencia que son: el sur del estado de Chihuahua y la frontera norte de Coahuila con Estados Unidos, principalmente la región denominada “Cinco Manantiales” que concentra la mayor población de nogal (Aguilar, 2006).

2.1.2.- Clasificación taxonómica

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del nogal pecanero

Rango	Nombre científico y nombre común
Reino	<i>Plantae</i> – planta
Subreino	<i>Tracheobionta</i> – plantas vasculares
Superdivisión	<i>Spermatophyta</i> – fanerógamas
División	<i>Magnoliophyta</i> – plantas con flores
Clase	<i>Magnoliopsida</i> – dicotiledóneas
Subclase	<i>Hamamelidae</i>
Orden	<i>Juglandales</i>
Familia	<i>Juglandaceae</i> – familia Walnut
Género	<i>Carya</i> Nutt. – Nogal
Especie	<i>Carya illinoensis</i> (Wangenh.) K. Koch – Pecan

Fuente: United States Department of Agriculture (USDA, 2014)

2.1.3.- Características botánicas

El nogal pecanero (*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch) es una especie monoica que presenta el fenómeno de dicogamia en su floración, ya que produce flores masculinas y femeninas en el mismo árbol, pero en lugares separados, las flores masculinas son formadas desde el ciclo anterior y las femeninas se forman al inicio de la brotación sobre crecimientos del año (Aguilar, 2006; Vendrame and Wetzstein, 2005; Pou, 2012).

Los nogales nativos son vigorosos que llegan a medir de 25 a 40 m de altura, aunque generalmente no sobrepasa los 20 m, y empieza a fructificar ordinariamente entre los 6 y 10 años, la nuez que produce es de forma ovalada, de cascara café oscuro y pulpa cremoso o café claro (Aguilar, 2006; Pou, 2012).

El tronco, que es grueso, tiene la corteza lisa de color gris plateado cuando es joven y va agrietándose y adquiriendo tonos marrones con la edad. El interior de la madera va tomando tonalidades coloreadas según el árbol va envejeciendo. Los árboles frutales cultivados tienen un tronco corto, ya que queda determinada en la poda de formación (Pou, 2012).

El sistema radicular es pivotante y tiene gran desarrollo, desde el primer año, la raíz principal puede alcanzar de 5 a 80 centímetros, para continuar creciendo hasta 3, 4 ó 5 metros si el suelo se lo permite. En suelos de textura franca, bien drenados, puede llegar a 4 m de profundidad, aunque lo normal es que no sobrepase de 2 m. Al menos el 5% del sistema radicular está en el primer metro del perfil del suelo. Las raíces se extienden horizontalmente, más allá de lo que delimita la proyección de la copa y en algunos casos puede llegar a 20 m de distancia del tronco (Pou, 2012).

Las hojas son alternas y compuestas, que varían en tamaño, los folíolos son por lo general de 5 a 10 cm de longitud y varían desde las nueve hasta 17 folíolos por hoja. Cuando son jóvenes tienen un color rojo pardusco y son muy tiernos. A medida que van creciendo se van endureciendo y tomando tonalidades verdes, más oscuro por el haz que por el envés. En el envés, se presentan unas nervaduras muy

marcadas, de coloración blanco verdosa. (Vendrame and Wetzstein, 2005; Pou, 2012).

Las flores masculinas o estaminadas son inflorescencias alargadas y cilíndricas de 8 a 10 cm de longitud, conocidas como amentos, desarrollados lateralmente en brotes del año anterior (Vendrame and Wetzstein, 2005; Pou, 2012). Cada amento puede contener un centenar de flores que pueden llevar hasta 40 estambres que en su madurez liberan cientos de granos de polen (Pou, 2012).

Las flores femeninas o pistiladas generalmente presentan por parejas, aunque pueden ser solitarias o agrupadas. Se desarrollan en los extremos de los brotes nuevos aparecidos en ramas del año anterior (Vendrame and Wetzstein, 2005; Pou, 2012). En otras variedades también se forman en el extremo de brotes laterales. La parte exterior de la flor está compuesta por el involucro, las brácteas y cuatro sépalos, todos ellos formarán en la madurez el pericarpio de la nuez. El estigma tiene o brazos plumosos, el estilo es muy corto y une el estigma con el ovario. En el ovario hay un lóculo que se divide en cuatro partes, mediante dos paredes denominadas tabiques mayor y menor. Debajo del lóculo hay un ovario simple que dará lugar al grano o semilla después de realizada la fecundación el cuajado y donde el tegumento será la película que cubrirá a la semilla (Pou, 2012).

El fruto del nogal es una drupa globosa indehiscente, a veces en punta en su zona pistilar. El pericarpio es la parte exterior del fruto, compuesta por mesocarpio y exocarpio. Vulgarmente conocido como ruezno o monda, es dehiscente, abriéndose poco después de adquirida la madurez en la semilla. El endocarpio o cáscara es

rugosa y leñosa, formado por dos valvas simétricas, unidas por la línea de sutura. En su interior hay cuatro tabiques membranosos, dos muy desarrollados y otros dos más o menos perceptibles que separan las cuatro partes de las semillas (Pou, 2012).

La semilla o grano, está formada por cuatro lóbulos simétricos sinuosos, separados por los tabiques y cubiertos por una fina película o tegumento más o menos coloreada. Se une a la cáscara en su parte basal a través de unos vasos que conectan con el pedúnculo del fruto (Vendrame and Wetzstein, 2005; Pou, 2012).

2.1.4.- Requerimientos climáticos

El desarrollo del nogal depende de la temperatura, la humedad relativa, las precipitaciones pluviales y otros factores que prevalecen en una determinada región (Medina y Cano, 2002).

El nogal pecanero crece en un clima húmedo, con precipitación anual promedio de 760 mm a 2,010 mm, o por lo menos de 510 mm (Peterson, 1990).

Los nogales se comportan adecuadamente donde la temperatura media en verano es de 25 a 30 °C con extremos de 41 a 46 °C, sin variación amplia entre el día y la noche, con un promedio de 26.7 °C. Y para los meses más fríos en invierno requieren una media entre 7.2 y 12.3 °C con extremos de -18 a -29 °C (Peterson, 1990; Medina y Cano, 2002).

De abril a octubre el nogal requiere de un mínimo de 4500 a 5000 unidades calor con punto crítico de 10 °C. La completa maduración del fruto depende de la suficiente acumulación de calor recibido por el árbol. Para el cultivar Western, se

requieren 4532 ± 214 unidades caloríficas, considerando como punto crítico $4.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Medina y Cano, 2002).

Al igual que los demás frutales caducifolios, al desarrollarse en su hábitat natural, raramente es dañado por el frío ya que en su evolución ha desarrollado mecanismos fisiológicos de adaptación que le permiten permanecer en dormancia y sobrevivir aún a inviernos muy severos (Grageda *et al.*, 2013).

El nogal requiere una estación de crecimiento mínima de 210 días libres de heladas y preferentemente 240 a 280 días (Medina y Cano, 2002).

El nogal requiere de frío durante el invierno para romper el reposo y poder tener una brotación y floración normal y abundante (Núñez *et al.*, 2006), en términos generales requiere de 400 a 1000 horas frío efectivas (resultado de restar número de horas $>0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y \leq de $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ menos número de horas $\geq 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$), con punto crítico de $\leq 7.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para que inicie su brotación dependiendo de la variedad (Medina y Cano, 2002; Grageda *et al.*, 2013), pero se han caracterizado las variedades de uso actual, estimando que Western necesita 600 horas frío efectivo (HFE), Wichita 400 HFE, Mahan 500 HFE y Choctaw 600 HFE (Grageda *et al.*, 2013).

Cuando la humedad relativa durante el período de polinización es superior a 80% limita la polinización efectiva y promueve el desarrollo de enfermedades fungosas que atacan al follaje, además de causar la germinación de la nuez dentro del ruezno antes de cosecharla. Cultivares con ruezno grueso son los más susceptibles ya que esta característica impide su apertura (Medina y Cano, 2002).

2.1.5.- Requerimientos edáficos

Las propiedades del suelo más importantes a considerar al establecer una huerta de nogal son textura, profundidad, compactación, salinidad y sodicidad. Otra propiedad importante es el grado de fertilidad del suelo, aunque éste podrá acondicionarse mediante la suplementación de nutrimentos. Es importante realizar una evaluación del suelo previo a la plantación, por medio de observaciones de campo y análisis de laboratorio, para evitar problemas futuros después de realizar altas inversiones (Figuroa *et al.*, 2002).

La textura del suelo se refiere a la proporción de arena, limo y arcilla en un suelo. Una huerta de nogal puede establecerse en una amplia variedad de suelos, desde texturas franco arenoso hasta franco arcilloso. Sin embargo, los mejores suelos son de textura media, bien drenados y que no están sujetas a inundaciones prolongadas. Estos suelos corresponden a la clase textural franco o migajón que contienen idealmente 40% de arena, 40% de limo y 20% de arcilla (Peterson, 1990; Figuroa *et al.*, 2002; Valdez *et al.*, .2013).

Los suelos arenosos tienen buena infiltración, pero almacenan poca agua disponible para los árboles. Por el contrario, los suelos arcillosos retienen humedad y nutrientes pero tienen poca infiltración, lo que provoca estancamiento de agua que es perjudicial para los nogales (Figuroa *et al.*, 2002).

Los suelos para establecer huertas de nogal deben tener profundidades mayores de 2 m para tener un buen anclaje. Además, un suelo profundo representa

un mayor volumen de suelo que las raíces pueden explorar para un adecuado abastecimiento de nutrimento (Figueroa *et al.*, 2002).

La compactación del suelo es un problema común en huertas nogaleras, los suelos húmedos con altos contenidos de arcilla son los más susceptibles, principalmente a consecuencia del paso de maquinaria. Los principales efectos negativos de este problema son la disminución de la velocidad de infiltración del agua en el suelo, y la limitación del crecimiento de la raíz de los nogales (Figueroa *et al.*, 2002).

La acumulación de sales en el suelo es un problema común en áreas de riego con clima árido y semiárido. Las causas más frecuentes de la salinización del suelo en estas condiciones son el uso de agua de riego de mala calidad, y/o suelos de baja infiltración (Figueroa *et al.*, 2002).

La clasificación tradicional de suelos en base a salinidad indica que a una CE mayor de 4 dS m^{-1} en un extracto de saturación, son salinos y suelos con CE menor de 4 dS m^{-1} se consideran no salinos. El nogal pecanero es sensible a la salinidad, ya que el crecimiento del árbol disminuye a una tasa de 12% por cada unidad que se incremente la CE del suelo, a partir de un valor límite de tolerancia de 2.5 dS m^{-1} (Figueroa *et al.*, 2002).

El contenido de sodio intercambiable (PSI) superior a 3% tiene un efecto negativo en el área transversal del tronco y en el rendimiento de nuez por árbol; en cambio, tiende a estabilizar la producción y a reducir la alternancia del nogal. La

conductividad eléctrica superior a 3 dS m^{-1} , también tiende a reducir el área transversal del tronco y al rendimiento por árbol (Santamaría *et al.*, 2002).

2.2.- Manejo Agronómico del Cultivo

La calidad de la nuez depende en gran medida del manejo agronómico y las condiciones ambientales en las cuáles se desarrolla una huerta nogalera. Las condiciones climáticas de una zona nogalera son difíciles de modificar, y se tiene que adaptar parte del manejo para obtener el mejor rango posible. (Urías, 2013).

2.2.1- Selección y preparación del terreno

El nogal requiere inversión por un largo período, por lo que el productor debe considerar aspectos de suelo y clima entre otros para tener una plantación sustentable. Una vez seleccionado el terreno por sus características de profundidad y textura como índice de drenaje natural del mismo, la preparación del suelo debe realizarse con anticipación antes de la época de plantación. Comprende las labores de subsoleo, cruza, barbecho profundo y rastreo, así como nivelación para el trazo de riego cuando éste sea por gravedad (Arreola y Lagarda, 2002).

2.2.2.- Sistema de plantación

El diseño de la plantación tiene como uno de sus objetivos aprovechar mejor la luz en la huerta durante la vida útil de ésta. Existen diversos sistemas de plantación de nogales de acuerdo con la distancia entre árboles, intercalado de cultivos y la proyección de la huerta a futuro. Entre estos sistemas se encuentran el cuadro o marco real, rectangular y el tresbolillo (Arreola y Lagarda, 2002).

El sistema de plantación más común es el marco real y alcanza el 77%. El sistema rectangular es usado cuando se plantea establecer cultivos intercalados. El diseño tresbolillo permite la máxima utilización del espacio en una huerta, los árboles están equidistantes y es posible cultivar en varias direcciones y se puede plantar alrededor de un 15% más de árboles que en el sistema marco real; sin embargo, implica también el alcanzar el espacio más temprano, por lo que se debe considerar acciones de poda más intensiva para controlar el tamaño de los árboles que maximicen la producción por hectárea (Arreola y Lagarda, 2002).

Los distanciamientos de plantación más comunes son de 10 X 10 m, 12 X 12 m, 15 X 15 m y 20 X 20 m (Arreola y Lagarda, 2002; Arreola, 2010). Sin embargo, evaluaciones efectuadas han mostrado que con espaciamientos de 10m X 10m puede presentar sombreo a partir de los 10 a los 15 años de edad, dependiendo de las características del suelo y manejo de las mismas, ocasionando bajas en la producción y la calidad de nuez (Arreola y Lagarda, 2002).

2.2.3.- Podas

Es importante hacer un balance entre la parte aérea y raíz por lo cual es necesario realizar una poda de plantación. Con el despunte de la raíz principal a 80 cm de longitud, se logra una mayor longitud y peso seco de las nuevas raíces formadas al siguiente año; la poda de tallo a 0.50 m del suelo al momento del trasplante induce a que los nuevos brotes logren una longitud de crecimiento de 30 a 40 cm al final del primer año (Arreola y Lagarda, 2002).

La poda de seto o de despunte de ramas laterales y apicales induce la formación de brotes vigorosos cercanos al corte, principalmente en la periferia del árbol, los cuales fructifican a los 3 o 4 años dependiendo de la severidad del corte, cuando se realiza en forma severa se induce a un considerable sombreo en el interior de la copa (Arreola, 2010).

La poda selectiva de aclareo de ramas permite incrementar la distribución de luz dentro de la copa, el objetivo de esta poda es reducir el volumen del árbol e incrementar la penetración de luz, dentro de la copa del mismo. Esta técnica permite mantener una alta producción de nuez por hectárea y con calidad sin tener que eliminar árboles (Arreola, 2010).

2.2.4.- Fertilización

El nogal necesita de nutrimentos que obtiene del suelo, agua y atmósfera de manera natural, otros se complementan por medio de aplicaciones de fertilizantes vía foliar, al suelo o en el agua de riego. En la región Norte de Coahuila, se reportan deficiencias de N, K, Mg, Mn, Zn, Cu y B. (Chávez *et al.*, 2002).

Los dos nutrientes más aplicados en nogales para el suelo y el follaje son nitrógeno y zinc ya que son los elementos que presentan mayores deficiencias, además de ser los principales responsables en el crecimiento y calidad de las nueces, el resto de los nutrimentos se aplica en menor cantidad, y no en todas las huertas (Lombardini, 2006).

La cantidad de nitrógeno que se debe aplicar está influida por el tamaño o edad de los árboles, por la cantidad de nitrógeno disponible en el suelo y por el nivel de producción esperado (Chávez *et al.*, 2002; Lombardini, 2006), la regla general es 60 g de N por cada cm de diámetro del tronco, y hay tres periodos importantes de aplicación: la crecida primaveral, el desarrollo de las nueces entre junio y julio, y el almacenado de nitrógeno para el año siguiente en agosto (Lombardini, 2006).

El Zinc es el nutrimento clave de los nogales ya que es el responsable del crecimiento de los brotes, su deficiencia causa el problema de la “roseta”, se aplica de manera foliar temprano y frecuentemente (Chávez *et al.*, 2002; Lombardini, 2006), ya que las hojas jóvenes absorben aproximadamente 1.0% mientras que las hojas viejas solo 0.2%, de preferencia se hacen cinco aplicaciones: 0, 2, 4, 6 y 8 semanas después de punto verde (Lombardini, 2006).

El Fósforo solo debe aplicarse cuando el análisis indique cantidades menores de 0.1% en las hojas. La aplicación se debe hacer al suelo a la primera semana de marzo antes del inicio de brotación. Las aplicaciones de fósforo no necesarias bloquean la absorción de zinc (Chávez *et al.*, 2002).

Los valores de potasio requeridos en las hojas son de 1.0 a 2.0%. Para corregir la deficiencia de Manganeso es suficiente aplicar, en abril y mayo, una solución de 2,000 ppm en árboles en desarrollo y 4,000 ppm en los árboles en producción. Para corregir la deficiencia de cobre en árboles en producción se requieren dos aspersiones de 50 ppm cada una en abril y mayo (Chávez *et al.*, 2002).

2.2.5.- Riego

En la actualidad, la disponibilidad en cantidad y calidad del agua para el uso agrícola se torna a términos difíciles, con creciente preocupación a nivel regional y nacional (Chávez-Ramírez *et al.*, 2006).

Desde que el agua de riego es extraída de la fuente abastecedora, hasta que llega a las raíces de las plantas, se producen pérdidas que es necesario reducir o eliminar con el propósito de optimizar su uso, el riego por goteo es el método más avanzado de que se dispone actualmente para la aplicación eficiente de agua a los cultivos (Godoy-Ávila, 2002).

El máximo rendimiento del agua se obtiene cuando las fluctuaciones no sobrepasan el 2% en el contenido de humedad óptima requerida por el cultivo. Los requerimientos de agua para este cultivo son de 100 a 130 cm por año (Godoy-Ávila, 2002).

Con el intervalo de riegos menor de 20 días, durante el desarrollo de la almendra, que significa más riegos, se incrementa el número de raíces por árbol, el área transversal del tronco y el rendimiento de nuez por árbol, pero se reduce el Zn foliar, probablemente por un efecto de dilución (Santamaría *et al.*, 2002).

Los intervalos de riego de cada 14 días mantienen una mejor condición hídrica con alta disponibilidad de agua en el suelo, lo que genera una mayor capacidad de crecimiento de almendra, mayor velocidad de acumulación de peso seco y altos

porcentajes de almendra, acelera la apertura del ruezno y disminuye significativamente el porcentaje de nueces germinadas (Godoy-Ávila *et al.*, 2005).

2.3.- Importancia Económica y Social del Nogal Pecanero en México y en el Mundo

Desde el punto de vista socioeconómico los productos obtenidos del nogal tienen muchas utilidades, el objetivo principal de su cultivo en forma comercial es la obtención de nuez, la cual recibe diferentes procesos de transformación antes de llegar al consumidor final, pudiendo ser desde solamente nuez pelada (sin cáscara), elaboración de platillos (ensaladas), elaboración de dulces, helados, galletas, pasteles o botanas, hasta de procesar aceite de nuez, que también tiene diversos usos en alimentación, salud y cosmetología (Aguilar, 2006).

La producción mundial de nuez pecanera en cáscara se estima en alrededor de las 210,000 toneladas. El mayor volumen de nuez pecanera se comercializa sin cáscara, es decir la semilla, la cual pesa alrededor del 50% del peso total de la nuez. Las semillas son normalmente empacadas al vacío o en nitrógeno y pueden ser refrigeradas sin peligro alguno por largos períodos de almacenamiento, hasta 12 meses (Ojeda-Barrios *et al.*, 2010).

2.3.1.- Países productores en el mundo

Los principales productores son los Estados Unidos (72%) y México (25%). Otros productores menores son Australia, Sudáfrica, Israel, Brasil, Argentina, Perú y Egipto. Los Estados Unidos además de ser el principal productor y exportador de nuez encáscara es el más grande consumidor y México es el principal exportador

de nuez con cáscara hacia ese país, alcanza las 25,000 toneladas anuales (Ojeda-Barrios *et al.*, 2010).

La producción mundial de nueces está claramente liderada por EE.UU. y México, que representan el 93% de la producción mundial. Su producción estimada en 2013 fue de 42,510 y 32,930 toneladas métricas de almendra, respectivamente, seguido de Sudáfrica, con 3,685 toneladas y Australia con 1,301 toneladas métricas. La producción mundial se estima en 81,052 toneladas métricas (INC, 2013).

Los principales exportadores de nuez pecanera sin cascara a nivel mundial son México y EE.UU. con 57.43% y 40.24% respectivamente en el 2012 y solo el 2.33% lo ocupaban Sudáfrica y otros países. Los importadores más importantes son EE.UU., Canadá, México, Reino Unido, Holanda, Israel, Francia y China (INC, 2013).

2.3.2.- Producción en México

La producción de nuez pecanera en México es una actividad en amplio crecimiento, sobre todo en los estados del norte, debido a la amplia adaptación edafoclimática y por las condiciones de mercado y alta rentabilidad que presenta, al exportarse a Estados Unidos de América (Orona-Castillo *et al.*, 2013), actualmente existen aproximadamente 90 mil ha de nogal pecanero (Burrola *et al.*, 2012).

La superficie cultivada de nogal pecanero en México es de 97,901 ha de los cuales 69,261.68 ha están en producción con rendimiento promedio de 1.58 t ha⁻¹, es el segundo país con mayor producción a nivel mundial con 109,210.28 toneladas anuales y un valor de más de \$ 4,737 millones de pesos, los principales estados

productores son: Chihuahua con 61.53%, Coahuila con 16.30%, Sonora 9.77%, Durango con 6.10% y Nuevo León con 4.30%, el resto (1.99% del total nacional) se localiza en los estados de Hidalgo, Aguascalientes, Oaxaca, Querétaro, San Luis Potosí, Guanajuato y Zacatecas (SIAP, 2014).

Cuadro 2. Producción de nuez pecanera en México 2012.

Estado	Superficie Sembrada (ha)	Superficie Cosechada (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (ton ha ⁻¹)	PMR (\$ ton ⁻¹)	Valor Producción (Miles de Pesos)
Chihuahua	60,243.12	39,035.51	60,031.31	1.54	43,477.62	2,610,018.59
Coahuila	15,962.29	12,091.81	15,002.86	1.24	43,547.43	653,336.04
Sonora	9,561.50	7,394.00	17,146.93	2.32	48,091.15	824,615.51
Durango	5,972.32	5,184.85	6,548.65	1.26	48,523.04	317,760.39
Nuevo León	4,212.07	3,958.81	6,073.95	1.53	38,170.69	231,846.89
Hidalgo	1,169.70	901.7	2,751.05	3.05	21,035.36	57,869.34
Aguascalientes	229	174	368.5	2.12	43,947.73	16,194.74
Oaxaca	213	199	462.58	2.32	17,247.09	7,978.16
Querétaro	135	133	172.9	1.30	10,472.61	1,810.71
San Luis Potosí	106	95	547.75	5.77	24,736.28	13,549.30
Guanajuato	60	60	48.6	0.81	11,200.00	544.32
Zacatecas	34	34	55.2	1.62	31,044.20	1,713.64
Total	97,901.00	69,261.68	109,210.28	1.58	43,377.21	4,737,237.63

Fuente: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesca (SIAP), 2014

2.3.3.- Producción en Coahuila

El estado de Coahuila cuenta con 13 mil hectáreas de nogal pecanero distribuidas en toda la entidad y es centro de origen del mismo (Orona-Castillo *et al.*, 2013).

Coahuila es el segundo estado con mayor superficie sembrada, tiene 15,962.29 ha de los cuales 12,091.81 ha están en producción con rendimiento promedio de 1.24 ton ha⁻¹, y ocupa el tercer lugar en producción a nivel nacional con

15,002.86 toneladas al año con valor de producción de más de \$ 653 millones de pesos en el 2012. (SIAP, 2014).

Los mayores centros de población nativa se encuentran distribuidos principalmente en los municipios de Parras (18.58%), Zaragoza (15.53%), Morelos (9.76%), General Cepeda (9.22%), Allende (7.13%), Saltillo (6.29%) y Villa Unión (6.16%), además de Ramos Arizpe, Jiménez, Nava, Piedras Negras, Ocampo, Cuatrociénegas, Candela, Frontera, San Buenaventura, Muzquiz, La Madrid, Arteaga, Sacramento, Acuña, Guerrero, Sabinas, Castaños, Monclova, Nadadores, Sabinas, Escobedo, Abasolo e Hidalgo (Aguilar, 2006; SIAP, 2014).

Cuadro 3. Producción de nuez pecanera en el estado de Coahuila 2012.

Municipio	Superficie Sembrada (ha)	Superficie Cosechada (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (ton ha ⁻¹)	PMR (\$ ton ⁻¹)	Valor Producción (Miles de Pesos)
Parras de La Fuente	2,147.00	1,997.00	2,805.79	1.41	52,503.58	147,314.02
Zaragoza	1,794.20	1,305.00	991.80	0.76	38,909.42	38,590.36
Morelos	1,128.00	649.00	699.72	1.08	42,067.40	29,435.40
General Cepeda	1,065.00	442.00	658.14	1.49	54,683.77	35,989.58
Allende	823.50	709.50	665.04	0.94	41,894.98	27,861.84
Saltillo	727.00	711.00	1,011.04	1.42	55,502.55	56,115.30
Villa Unión	711.70	513.00	440.04	0.86	40,806.93	17,956.68
Ramos Arizpe	494.00	380.00	541.12	1.42	57,134.56	30,916.65
Jiménez	314.00	167.00	64.80	0.39	19,090.28	1,237.05
Nava	284.05	122.00	111.80	0.92	42,463.33	4,747.40
Piedras Negras	280.00	168.00	151.20	0.90	43,000.00	6,501.60
Ocampo	260.50	59.50	63.07	1.06	35,000.00	2,207.45
Cuatro Ciénegas	225.21	225.21	225.21	1.00	40,000.00	9,008.40
Candela	199.50	199.50	399.00	2.00	40,500.00	16,159.50
Frontera	152.75	142.75	285.50	2.00	39,000.00	11,134.50
San Buenaventura	119.50	118.00	206.50	1.75	40,000.00	8,260.00
Muzquiz	111.00	49.50	9.10	0.18	56,000.00	509.60
La Madrid	102.00	102.00	183.60	1.80	40,000.00	7,344.00
Arteaga	96.00	96.00	140.35	1.46	57,202.35	8,028.35
Sacramento	80.50	80.50	148.93	1.85	40,000.00	5,957.20
Acuña	74.50	57.25	37.72	0.66	34,003.23	1,282.60
Guerrero	64.50	33.00	23.10	0.70	40,000.00	924.00
San Juan de Sabinas	61.28	16.00	20.80	1.30	48,700.00	1,012.96
Castaños	58.50	58.50	102.38	1.75	40,000.00	4,095.20
Monclova	58.50	55.50	99.90	1.80	37,000.00	3,696.30
Nadadores	45.00	42.00	73.50	1.75	40,000.00	2,940.00
Sabinas	37.00	28.00	37.80	1.35	48,500.00	1,833.30
Escobedo	18.50	18.50	32.38	1.75	40,000.00	1,295.20
Abasolo	13.50	13.50	23.63	1.75	40,000.00	945.20
Hidalgo	1.00	1.00	0.70	0.70	37,000.00	25.90
Total	11,554.69	8,559.71	10,253.66	1.20	47,136.88	483,325.54

Fuente: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesca (SIAP), 2014

2.4.- Eficiencia Intrínseca del Uso del Agua

La eficiencia de la transpiración de los cultivos es generalmente baja, ya que se transpira cientos de veces más agua que las unidades equivalentes de carbono fijado por la fotosíntesis (Bramley *et al.*, 2013), por esto y por a la creciente demanda de agua por los diferentes sectores de la sociedad y el incremento de la superficie agrícola, es indispensable mejorar la eficiencia del uso del agua en la agricultura (Bramley *et al.*, 2013). Para lograr este objetivo es importante determinar la eficiencia intrínseca del uso del agua por los diferentes cultivos bajo diferentes condiciones climáticas y de manejo agronómico (Condon *et al.*, 2002).

La eficiencia del uso del agua por las plantas es generalmente la proporción de la biomasa aérea o el rendimiento económico de la utilización del agua o evapotranspiración, se utiliza de varias maneras en función del nivel de las observaciones y debe ser medido para toda la temporada de crecimiento del cultivo (Bramley *et al.*, 2013).

La eficiencia intrínseca del uso del agua, es la relación entre la fotosíntesis y la evapotranspiración y a menudo se utiliza como un índice para el uso del agua de los cultivos en los proyectos de mejoramiento genético de plantas (Gilbert *et al.*, 2011).

La eficiencia intrínseca del uso del agua por el dosel de un determinado cultivo es la relación entre la tasa de asimilación de bióxido de carbono y la tasa de evapotranspiración ($\text{mmol CO}_2 / \text{mol H}_2\text{O}$), que es función de la capacidad fotosintética de las hojas y de la conductancia de los estomas al flujo de vapor de agua, que a su vez depende de las condiciones atmosféricas de la localidad al

momento de la medición (Medrano *et al.*, 2007; Gilbert, *et al.*, 2011;.Bramley *et al.*, 2013).

Uno de los problemas asociados a la medición de la eficiencia del uso del agua en el campo es que el uso del agua o ET incluye la pérdida de agua por evaporación del suelo, así como la transpiración de los cultivos por lo que los cambios en la eficiencia del uso del agua pueden reflejar los cambios en la evaporación del suelo en lugar de los cambios en la producción de plantas por transpiración. Es difícil medir la evaporación del suelo cultivado, ya que es diferente de la evaporación del suelo desnudo (Bramley *et al.*, 2013).

2.5.- Métodos para Obtener la Eficiencia Intrínseca del Uso del Agua

A nivel de hoja, la eficiencia intrínseca del uso del agua se puede medir con un equipo de intercambio de gases como la relación de la tasa de fotosíntesis neta de la hoja por tasa de transpiración de la hoja. Integrando a lo largo de la vida de la planta, las pérdidas de carbono por la respiración y las pérdidas de agua a través de la cutícula y estomas parcialmente cerrada deben ser también representados al determinar la eficiencia de transpiración (Bramley *et al.*, 2013).

Las técnicas micrometeorológicas permiten la medición de intercambio gaseoso sobre el dosel de un cultivo a campo abierto con casi ninguna perturbación de las condiciones naturales, las mediciones se basan en el muestreo de aire que fluye sobre áreas relativamente grandes y por lo tanto deben representar al campo como un todo (Asseng and Hsiao, 2000).

Un método micrometeorológico ampliamente utilizado para el estudio de balance de energía y la medición de la tasa de evapotranspiración (flujo de calor latente) es el método de la relación de balance de energía de Bowen (Asseng and Hsiao, 2000).

El otro método micrometeorológico actual para medir el intercambio de gases sobre el dosel es el método de covarianza de remolinos (Eddy Covariance), a menudo considerado el de mayor precisión, ya que se basa en las teorías de transporte turbulento, sin embargo, el costo alto del equipo requerido por este método, así como la complejidad del diseño del sistema, su implementación y el procesamiento de grandes volúmenes de datos, representan una seria limitación para realizarlo. Por tanto, este método se ha utilizado principalmente para evaluar y calibrar modelos menos complejos y que requieren menos mediciones (Asseng and Hsiao, 2000; Zermeño-González *et al.*, 2010).

La eficiencia intrínseca del uso del agua de un ecosistema vegetal, se puede determinar a partir de mediciones directas de covarianza turbulenta como la relación entre la asimilación neta de CO₂ y la tasa de evapotranspiración (Scanlon and Albertson, 2004)

2.6.- Efecto de las Variaciones del Clima en la Tasa De Evapotranspiración y de Fotosíntesis y su Relación con la Eficiencia Intrínseca del Uso del Agua

El clima es de los principales factores del ambiente que influyen en el desarrollo del nogal, ya que como factor abiótico puede generar daños en plantas cultivadas de una manera directa (falta de frío, heladas, golpes de aire y sol, granizo,

sequía, etc.), así como influir en el desarrollo de desórdenes fisiológicos, plagas y enfermedades (viviparidad, barrenadores, pulgones, etc.) y modificar la programación del agua de riego (Grageda *et al.*, 2013).

Para las comparaciones entre ubicaciones o estaciones, las diferencias en la humedad o déficit de presión de vapor influyen en el valor de la transpiración medido, de manera que la eficiencia del uso del agua y la eficiencia de transpiración también se ven afectados (Bramley *et al.*, 2013).

El contenido de agua del suelo y la temperatura, explican el 70 al 80% de la variabilidad estacional de la respiración del ecosistema (Reichstein *et al.*, 2002).

Las temperaturas bajas retardan el desarrollo vegetativo mientras que las altas, con cierto límite, lo aceleran y acortan las diferentes etapas fenológicas (Grageda *et al.*, 2013).

El aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera provoca un incremento en la tasa de asimilación de CO₂ por mol de agua evapotranspirada, lo que implica un aumento en la eficiencia intrínseca del uso del agua, pero la magnitud de este efecto y su interacción con el clima aún es poco conocido (Feng, 1999; Leavitt *et al.*, 2003; Battipaglia *et al.*, 2013)

Las características genéticas de los cultivos pueden influir también en la eficiencia fotosintética de las plantas debido al desarrollo de la densidad y apertura estomática y/o al desarrollo de la raíz o el crecimiento de brotes (Bramley *et al.*, 2013).

III.- MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación y Características del Sitio del Estudio

El trabajo se realizó en el verano de 2012, en una huerta de nogal pecanero (*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch), en la pequeña propiedad Las Tres Marías en el municipio de Zaragoza Coahuila, Las coordenadas geográficas del sitio son: 28° 28' 31" latitud Norte, 100° 55' 10" longitud Oeste a una elevación de 360 msnm.

El estudio se desarrolló en una superficie de aproximadamente 40 ha, con árboles de las variedades Wichita, Western y Pauni, de 28 años de edad y una altura promedio de 12 m, la distribución de los árboles es en marco real a una distancia de 15 m entre árboles. Las dimensiones promedio del área de estudio fueron 660 m (norte-sur) por 600 m (este-oeste).

El clima de la región es seco semicálido, con temperaturas medias de 22 a 24 °C, precipitación anual media 300 a 500 milímetros con un régimen de lluvias en los meses abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y escasas el resto del año, los vientos predominantes soplan en dirección sureste a velocidad de 15 km h⁻¹.

3.2 Manejo Agronómico de la Huerta

Los árboles de la huerta se riegan con un sistema de aspersión fijo, aplicando un intervalo promedio entre riegos de 10 días con láminas promedio de 60 mm. La fertilización consistió en cuatro aplicaciones de 250 kg ha⁻¹ de sulfato de amonio

más aplicaciones foliares de 4 l de Zn al 17% y 4 kg de N por ha. Las aplicaciones se dieron el 10 de marzo, 15 de mayo, 8 de junio y el 18 de julio de 2012.

El manejo fitosanitario, se dio únicamente para el control del gusano barrenador de la nuez. Para esto, durante el 2012, se realizaron cuatro aplicaciones de pesticidas (dosis por ha) de la siguiente forma: el 12 de mayo, se aplicaron 5 l de endosulfan y 1.2 l de prozan; el 28 de mayo, se aplicaron 4 l de clover y 4 l de clorpirifos; el 6 de junio 2 l de malatión 100 y 2 kg de promil; y el 28 de julio 4 l de clover y 1.2 l de prozan.

3.3 Instrumentación y Mediciones

Para analizar el potencial de secuestro de carbono por los árboles de la huerta y la eficiencia intrínseca del uso de agua por el ecosistema, se midieron todos los componentes de la ecuación del balance de energía sobre una superficie vegetal, la cual se describe como:

$$R_n = H + LE + G + PH + S \quad (1)$$

Donde: R_n es la radiación neta, H y LE son el flujo de calor sensible y latente respectivamente, G es el flujo de calor en la superficie del suelo, PH es la energía utilizada en la fijación de bióxido de carbono (CO_2) y S es la energía almacenada por cambios de temperatura del aire, la vegetación y por cambios en la humedad específica de la capa de aire a la altura de los árboles, las unidades de todos los términos de la ecuación son $J s^{-1} m^{-2}$ que equivale a $W m^{-2}$, ya que representan un flujo o almacenamiento de energía por unidad de superficie y unidad de tiempo.

Las mediciones de flujo de calor latente, calor sensible y flujo de bióxido de carbono (FCO₂) se realizaron de acuerdo con el método de la covarianza eddy utilizando las siguientes relaciones (Ham y Heilman, 2003)

$$LE = L \overline{w' \rho_{wv}'} \quad (2)$$

$$H = \rho_a C_p \overline{w' Ts'} - 0.51 Ta \frac{\rho_a C_p}{L} LE \quad (3)$$

$$FCO_2 = \overline{w' \rho_{CO_2}'} \quad (4)$$

Donde: ρ_a y C_p son la densidad y capacidad calorífica del aire respectivamente, L es el calor de vaporización del agua, T_a es la temperatura del aire. El producto $w' \rho_{CO_2}'$, $w' \rho_{wv}'$, $w' Ts'$ representa la covarianza entre la velocidad vertical del viento (w) y la densidad del bióxido de carbono (ρ_{CO_2}), densidad del vapor de agua (ρ_{wv}) y la temperatura sónica (T_s) respectivamente. La barra horizontal representa el segmento de tiempo en el que se determina la covarianza. La velocidad vertical del viento y la temperatura sónica se midieron con un anemómetro sónico tridimensional (CSI-CSAT3, Campbell, Sci, Inc), mientras que ρ_{wv} y ρ_{CO_2} con un analizador de bióxido de carbono y vapor de agua de conducto abierto (open path CO₂/H₂O analyzer, LI-7500; LI-COR). Ambos sensores se montaron en una torre de 14 m de alto para lograr una distancia vertical mínima de 2 m sobre el dosel de los árboles (Figura 3.1). La torre se instaló a 225 m del extremo norte y 140 m del extremo oeste, a una orientación de 135° (sur-este) para lograr un fetch (distancia horizontal desde la ubicación de los sensores al límite del área de estudio) de por lo menos 200 m, en un ángulo de +/- 90° respecto a la orientación del anemómetro

sónico tridimensional, ya que en esta localidad se presentan vientos dominantes del sureste. La velocidad vertical del viento, temperatura sónica, densidad del vapor de agua y del bióxido de carbono se midieron a una frecuencia de 10 Hz, y las covarianzas se calcularon cada 30 min

Los flujos de vapor de agua y bióxido de carbono se corrigieron por efectos de densidad (Webb *et al.*, 1980). La temperatura del aire se midió (a la misma altura que las mediciones de T_s) con un sensor de temperatura y humedad relativa (HP45C, Vaisala, Inc), a una frecuencia de 1 s y promedios de 30 min.



Figura 1. Anemómetro sónico tridimensional y analizador de vapor de agua y bióxido de carbono de sendero abierto. Sobre el dosel de la huerta de nogal pecanero en Zaragoza, Coahuila, México.

El flujo de bióxido de carbono (FCO_2) que se obtuvo con la Ec. 4, se expresa en $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Para expresarlo en unidades de flujo de energía ($W \text{ m}^{-2}$) se utilizó la relación: $PH = FCO_2 * 0.469$. La radiación neta se midió con un radiómetro neto (modelo Q7.1, REBS, Inc.), que se colocó en la torre a una altura de 2 m sobre la copa de los árboles. El flujo de calor en la superficie del suelo se midió usando dos transductores de calor (modelo HFT3, Campbell Scientific, Inc) que se enterraron a una profundidad de 0.08 m por debajo de la superficie del suelo, uno en condiciones de suelo y humedad y el otro en suelo seco y bajo radiación solar directa en la superficie del suelo. Esto para generar el valor promedio de G de la superficie de estudio. A cada valor de G medido a 0.08 m, se le sumó el cambio de energía del estrato de suelo sobre el transductor por cambios de temperatura del perfil de suelo sobre el sensor. La temperatura del suelo se midió con un termopar (chromel-constantan) de cuatro puntas (Kanemasu *et al.*, 1992; Kustas *et al.*, 2000). Estas mediciones se realizaron a una frecuencia de un segundo y se generaron promedios de 30 min.

La tasa de evapotranspiración (ET) se obtuvo dividiendo el flujo de calor latente (LE) integrado en los segmentos de tiempo mencionados por el factor 2.44, para obtener la lámina de agua evapotranspirada diaria (mm).

El intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE), formado por el suelo y los árboles de la huerta se obtuvo con la siguiente relación:

$$NEE = FCO_2 + \frac{\Delta\rho_{CO_2}}{\Delta t} * \Delta z \quad (8)$$

Donde: F_{CO_2} , es el flujo de bióxido de carbono medido con el método de la covarianza eddy, Δp_{CO_2} es el cambio en la densidad del CO_2 medido a la misma altura a la que se midió el flujo de CO_2 , Δt es el intervalo de tiempo (30 min) y Δz es la altura de la capa (14 m).

La eficiencia intrínseca del uso del agua (WUE_i) por el ecosistema, se obtuvo con la relación de los valores integrados entre las 8:00 y 20:00 hr de los flujos (promedios de 30 min) de NEE y el agua evapotranspirada en el mismo intervalo de tiempo.

Para analizar la relación entre la eficiencia intrínseca del uso del agua (WUE_i) y las condiciones climáticas, se graficaron los valores integrados diarios de WUE_i contra la radiación neta, la temperatura del aire (T_a) y el déficit de presión de vapor (DPV). Similarmente, la relación entre la tasa de asimilación de CO_2 (NEE) y las condiciones climáticas de la región se analizó graficando NEE contra la temperatura del aire y el déficit de presión de vapor.

IV.- RESULTADOS Y DISCUSION

4.1.- Distribución Diurna de los Flujos de Energía.

En la Figura 2 se muestra la evolución diaria de los flujos de energía en la huerta de nogal pecanero entre el 21 de julio y el 1 de agosto para condiciones de cielo despejado. Nótese que la radiación neta (R_n) es el flujo de energía de mayor magnitud, y que este se disipa principalmente en flujo de calor latente (LE), seguido por flujo de calor sensible (H) y en menor proporción en flujo de calor en la superficie del suelo (G). Nótese también el patrón uniforme de la evolución de los flujos para condiciones de cielo despejado. Resultados similares fueron por Zermeño-González, *et al.* (2011) en un pastizal natural del norte de México.

Se observó que alrededor de las 13:30 h, el flujo de calor sensible cambio de valores positivos a negativos (Figura 2), indicando la ocurrencia de un fenómeno de advección (flujo de masas de aire caliente y seco de los alrededores a la superficie de riego) (Tolk *et al.*, 2006). Esta advección aportó energía adicional para la ET y el flujo de calor latente fue mayor que la radiación neta a partir de las 17:00 h (Figura 2), lo que concuerda con los estudios reportados por Lee *et al.* (2004).

Para condiciones de cielo con nubosidad intermitente durante el día, se obtuvo un patrón irregular de la evolución diaria de los flujos de energía (Figura 3). Sin embargo, la proporción de los flujos de energía, la disipación de la radiación neta (R_n) y la presencia del fenómeno de advección fue similar a lo observado en los días con cielo despejado.

En general, los flujos instantáneos máximos de R_n recibida sobre el dosel de los árboles en las diferentes condiciones fueron entre 682 y 796 $W m^{-2}$, y los máximos valores de disipación de dicha energía fueron entre 481 y 718.7 $W m^{-2}$ en forma de LE que corresponde a la mayor proporción de la disipación, entre 39 y 168 $W m^{-2}$ en H, y entre 120 y 145 $W m^{-2}$ en forma de G. Lo que concuerda con el reporte de Marín *et al.* (2013), donde se menciona que alrededor del 76% de la energía neta disponible se utiliza en los procesos de evapotranspiración.

Estos resultados muestran que el principal mecanismo de disipación de la radiación neta sobre superficies agrícolas irrigadas es en forma de calor latente (evapotranspiración) (Zermeño-González, *et al.*, 2011; Carmona *et al.*, 2011; Tonti, *et al.*, 2013).

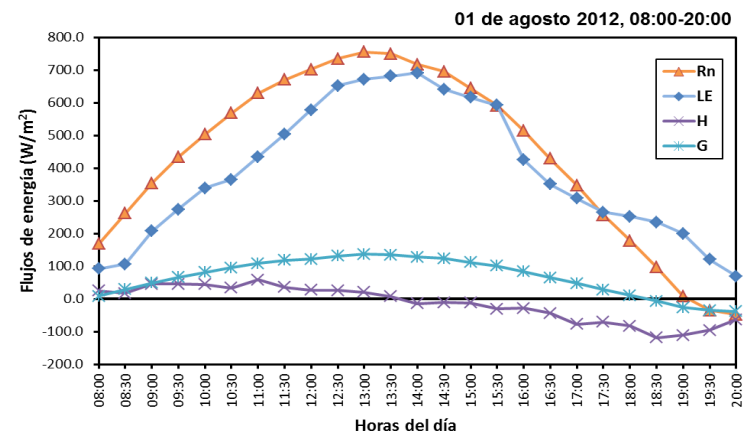
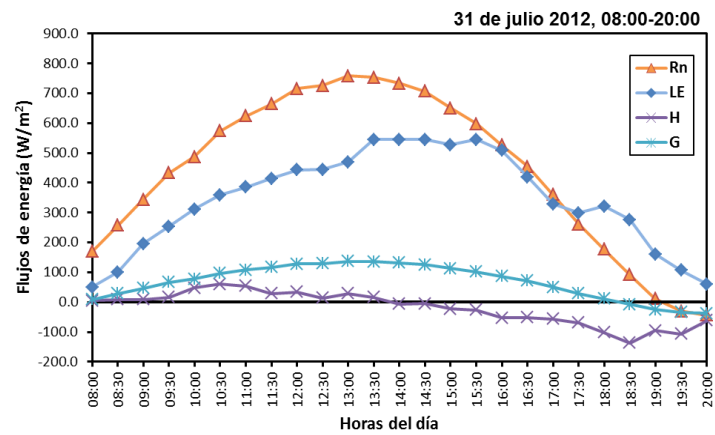
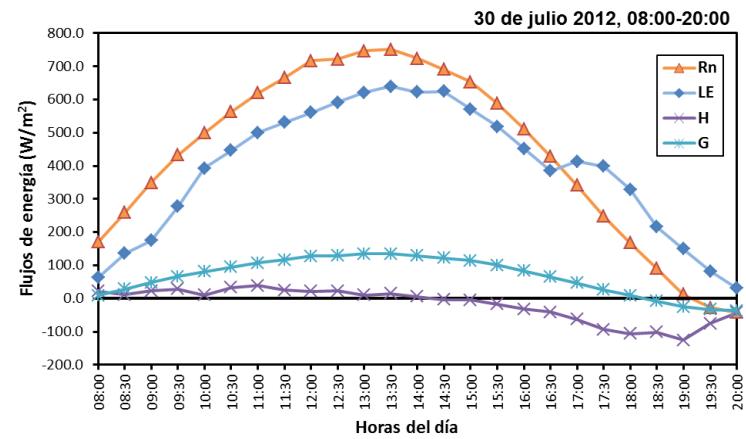
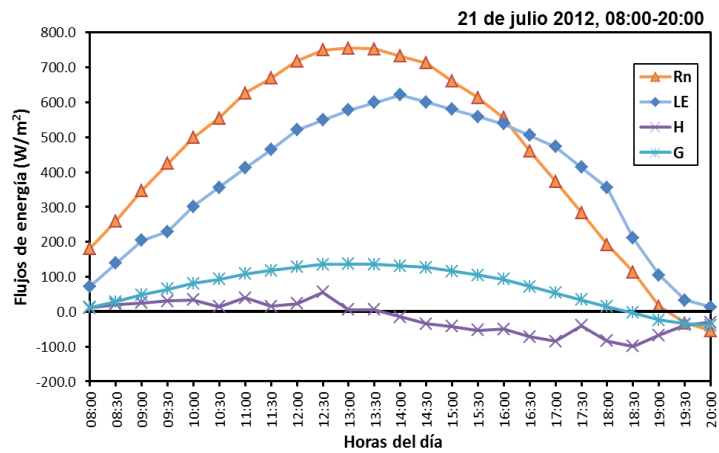


Figura 2. Evolución diaria (8:00 a 20:00 h) bajo condiciones de cielo despejado de los flujos de energía: Radiación neta (Rn), flujo de calor latente (LE), flujo de calor sensible (H) y flujo de calor en la superficie del suelo (G) observados en una huerta de nogal pecanero, en Zaragoza, Coahuila entre el 21 de julio y el 1 de agosto de 2012.

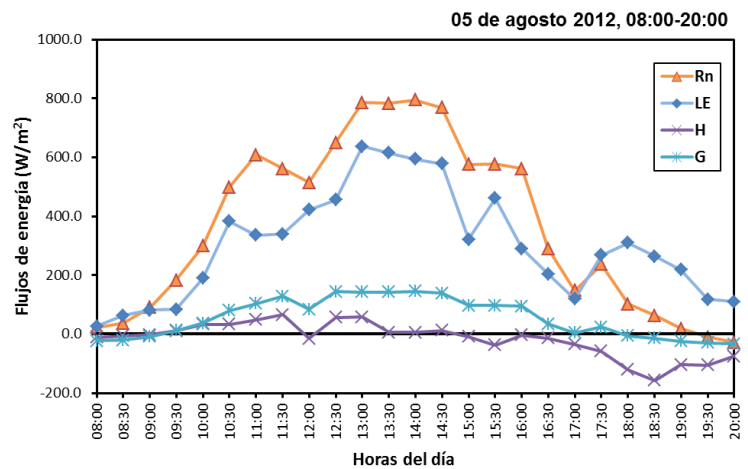
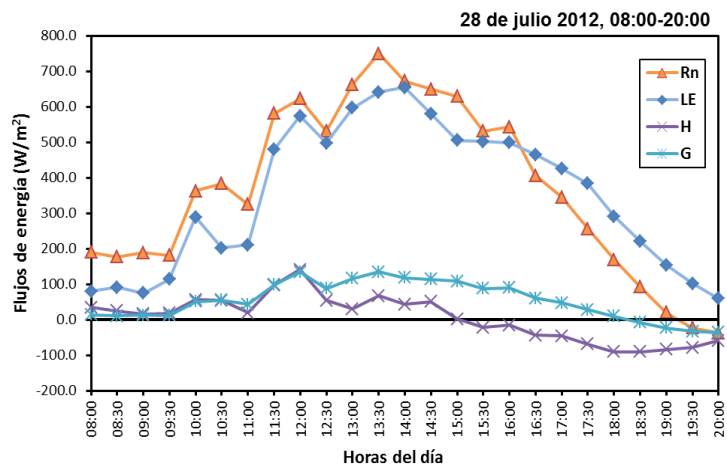
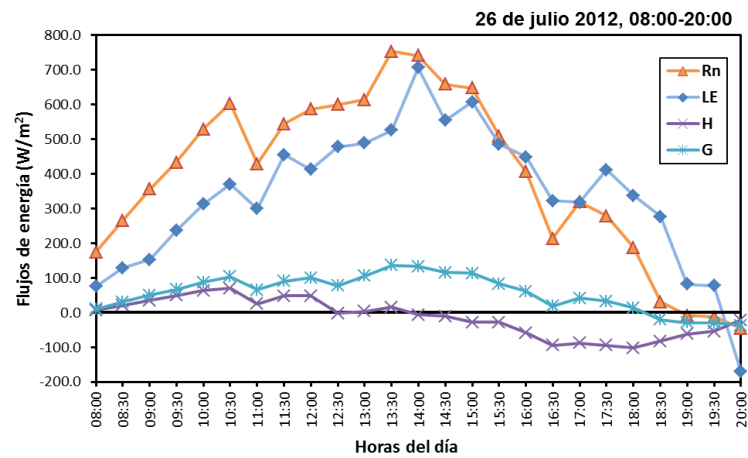
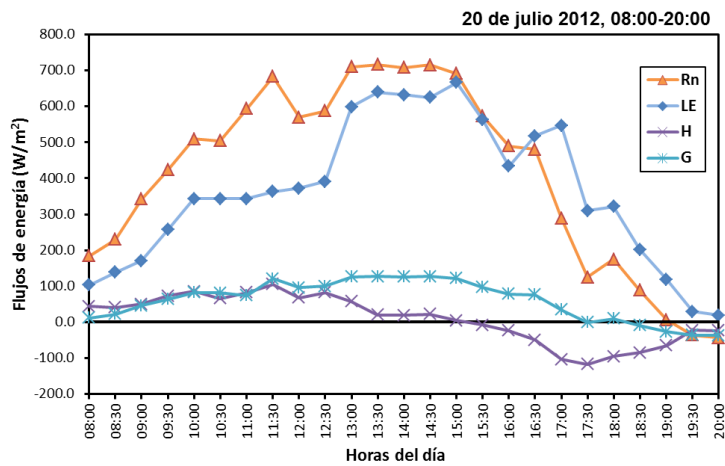


Figura 3. Evolución diurna (8:00 a 20:00 h) bajo condiciones de cielo nublado de los flujos de energía: Radiación neta (Rn), flujo de calor latente (LE), flujo de calor sensible (H) y flujo de calor en la superficie del suelo (G) observados en una huerta de nogal pecanero, en Zaragoza, Coahuila entre el 20 de julio y el 5 de agosto de 2012.

4.2.- Distribución Diurna de los Flujos de CO₂.

Las tasas instantáneas de asimilación máxima de CO₂, en los diferentes días evaluados, se presentaron entre las 12:00 y las 14:00 horas (Figuras 4 y 5), lo que correspondió con las horas de máxima incidencia de radiación solar y máximas tasas de evapotranspiración (Zermeño *et al.*, 2014). En las Figuras 4 y 5 se muestran los flujos instantáneos de bióxido de carbono (CO₂), los valores negativos de flujo indican que el ecosistema está tomando CO₂ o fotosintetizando, mientras que los valores positivos indican que el ecosistema está respirando o emitiendo CO₂ (Serrano-Ortiz *et al.*, 2006; Zermeño-González, *et al.* 2011).

Para condiciones de cielo despejado, el patrón de asimilación de CO₂ por el dosel de los árboles fue de una campana invertida (valores negativos de la Figura 4) donde la máxima tasa de asimilación se observó entre las 12:00 y las 14:00 h, que coincide con las horas del día de mayor incidencia de radiación solar (Figuras 2 y 3). Patrones similares fueron reportados por Sanz *et al.* (2001) en un bosque de *Pinus halepensis*, Igreja-Aires *et al.* (2008) en una pradera de una mezcla de pastos C3/C4 y por Zermeño-González *et al.* (2012) en un cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.).

Para este periodo de tiempo, la máxima tasa de asimilación de CO₂ por el dosel de los árboles fue de hasta -16 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. A partir de las 19:00 h la tasa de liberación de CO₂ por respiración del dosel de los árboles fue mayor que la asimilación y el flujo fue positivo (Figura 4).

Para días con nubosidad, se observó el mismo patrón de asimilación de CO₂ (campana invertida) pero con irregularidades debido a los cambios en la magnitud de la radiación incidente (Figura 3) que tuvieron efecto en la tasa de asimilación de CO₂ (Figura 4). La máxima tasa de asimilación también se observó entre las 12:00 y las 14:00 h y el flujo de CO₂, cambio de negativo a positivo a partir de aproximadamente las 18:30 h.

La máxima tasa de asimilación de CO₂ fue de hasta -20 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 5), que probablemente se debió a una menor temperatura de las hojas de los árboles, debido a las condiciones de nubosidad intermitente que resultó en una mayor apertura de los estomas (Jones, 1992; Nobel, 2009).

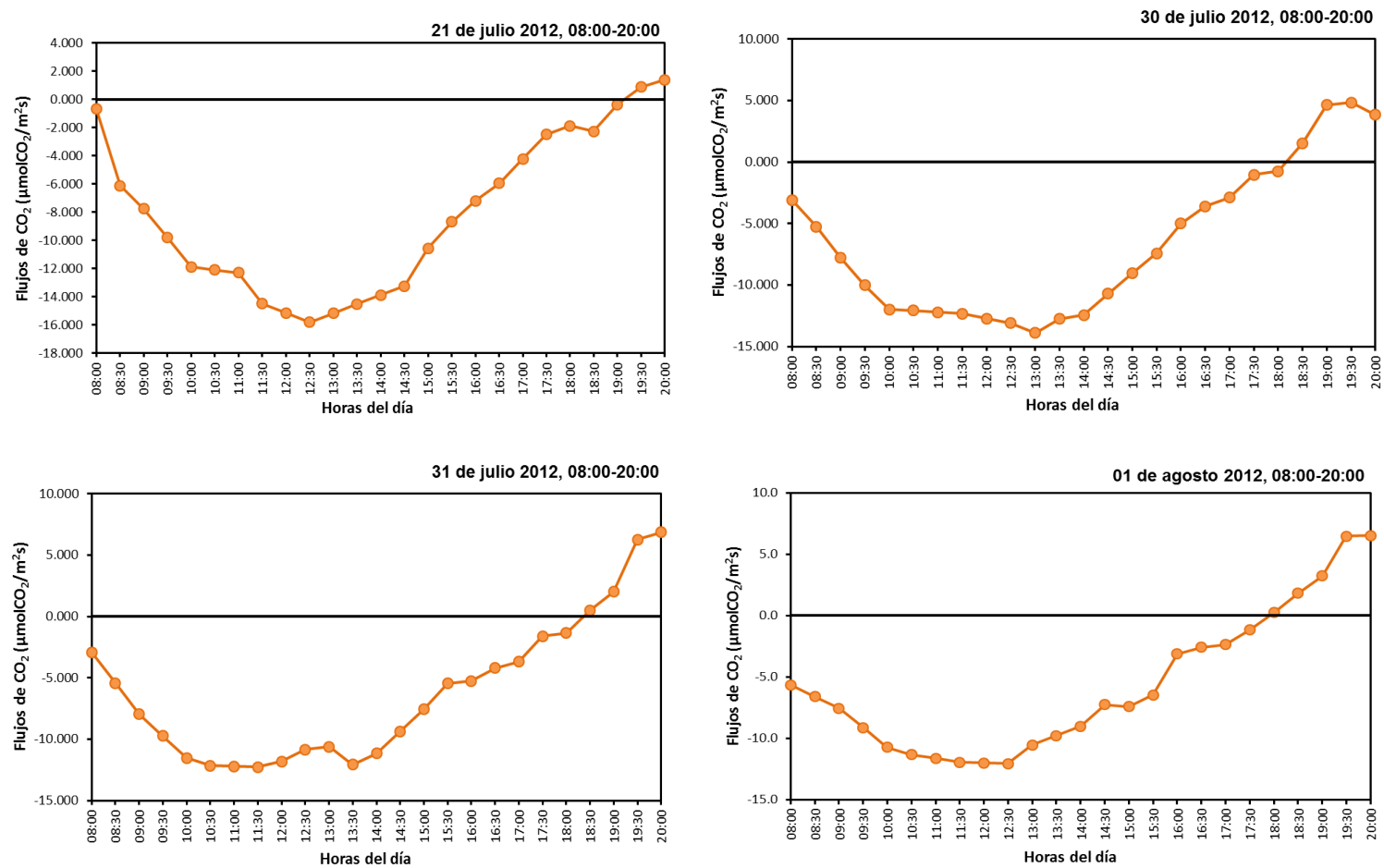


Figura 4. Patrón de distribución diurna del flujo de CO₂ entre el dosel de los árboles de una huerta de nogal pecanero y la atmósfera para condiciones de cielo despejado observado entre el 21 de julio y el 1 de agosto de 2012, en Zaragoza, Coahuila. Valores negativos indican asimilación de CO₂ (fotosíntesis) por el dosel y positivos liberación (respiración).

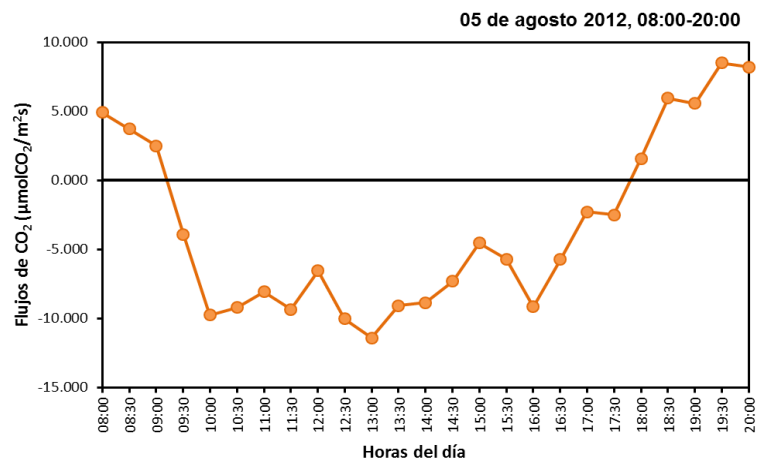
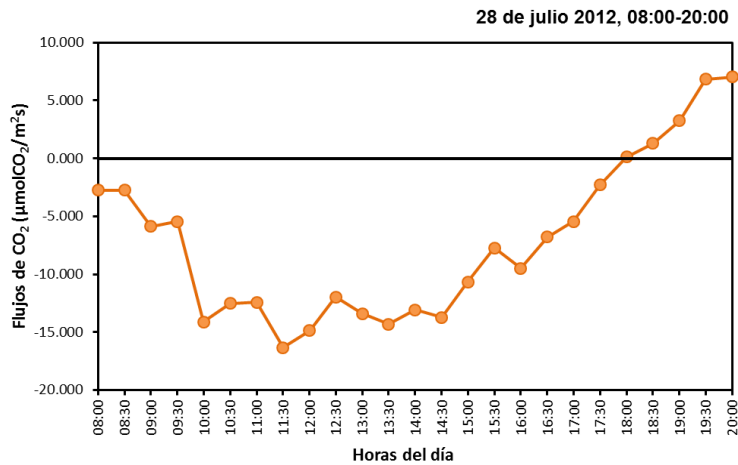
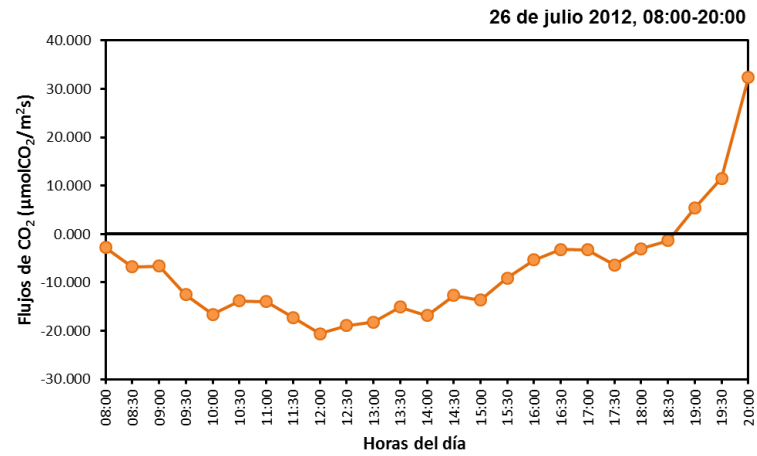
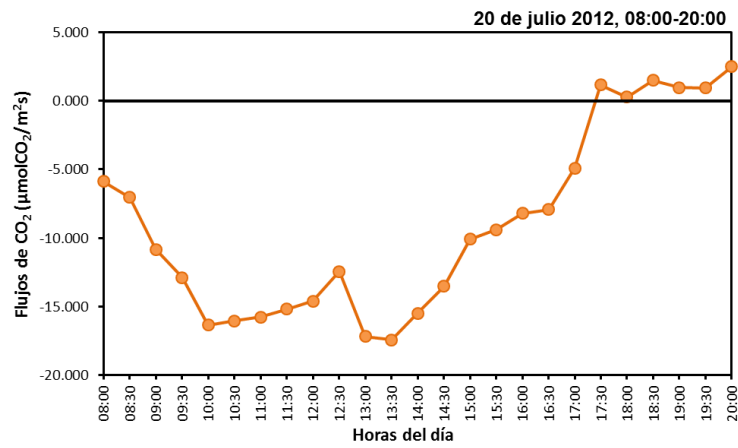


Figura 5. Patrón de distribución diurna del flujo de CO₂ entre el dosel de los árboles de una huerta de nogal pecanero y la atmósfera para condiciones de cielo nublado observado entre el 20 de julio y el 5 de agosto de 2012, en Zaragoza, Coahuila. Valores negativos indican asimilación de CO₂ (fotosíntesis) por el dosel y positivos liberación (respiración).

4.3.- Flujos Integrados Diurnos de Energía y CO₂.

En el Cuadro 4 se muestran los valores diurnos integrados (entre las 8:00 y las 20:00 h) de los flujos de energía, vapor de agua, bióxido de carbono y la eficiencia intrínseca del uso del agua. Nótese que la radiación neta (Rn) se disipa principalmente en flujo de calor latente (LE) y que el flujo de calor sensible (H) es muy pequeño o negativo lo que indica la presencia de advección hacia la huerta.

El transporte horizontal de calor y déficit de presión de vapor (advección), también ha sido reportado por otros estudios: Moguel-Ordóñez *et al.* (2001) en un cultivo de alfalfa, Lee *et al.* (2004) en un cultivo de trigo bien regado en el norte de China, Zermeño-González *et al.* (2012) en un cultivo de caña de azúcar y Zermeño-González *et al.* (2010) en una huerta de nogal pecanero. En promedio, el 85.6 % de Rn se disipo en LE, el 15.1 % en G y se tuvo una energía por advección promedio de 2.04 % del valor de Rn.

Para el periodo del estudio, el promedio diario de absorción de CO₂ por el dosel de los árboles de la huerta fue 328.06 mmol m⁻², mientras que la evapotranspiración promedio fue 352.415 mol m⁻², lo que resultó en una eficiencia intrínseca promedio del uso del agua de 0.947 mmol CO₂ por mol de H₂O.

Esta eficiencia fue ligeramente menor a los reportes de Law *et al.* (2002) para un bosque de coníferas de clima templado (1.0 mmol CO₂ / mol H₂O) y un bosque caducifolio de clima templado (1.31 mmol CO₂ / mol H₂O). Sin embargo, fue mayor

que la máxima eficiencia intrínseca de un cultivo de vid ($0.073 \text{ mmol CO}_2 / \text{mol H}_2\text{O}$) (Medrano *et al.*, 2007).

Cuadro 4. Flujos integrados diurnos (8:00 a 20:00 h) de radiación neta (Rn), flujo de calor latente (LE), flujo de calor sensible (H), Flujo de calor en la superficie del suelo (G), flujo de bióxido de carbono (FCO_2), flujo de vapor de agua (FH_2O) y la eficiencia intrínseca del uso del agua por la huerta de nogal (WUE_i) para el mismo segmento de tiempo. Zaragoza, Coahuila, del 20 de julio al 5 de agosto, 2012.

Fecha	Rn int. MJ/m ²	H int. MJ/m ²	LE int. MJ/m ²	G int. MJ/m ²	FCO ₂ int. mmolCO ₂ /m ²	FH ₂ O int. molH ₂ O/m ²	WUE _i mmolCO ₂ /molH ₂ O
20/07/2012	18.445	0.393	16.181	2.756	-406.800	368.124	1.105
21/07/2012	19.983	-0.757	16.892	3.140	-371.391	384.280	0.966
22/07/2012	19.276	-1.433	16.281	2.986	-337.865	370.381	0.912
23/07/2012	19.400	-0.765	15.996	2.965	-366.314	363.901	1.007
24/07/2012	18.583	-0.773	15.015	2.809	-300.804	341.585	0.881
25/07/2012	17.897	-0.406	14.454	2.687	-342.050	328.817	1.040
26/07/2012	17.519	-0.632	15.169	2.558	-424.266	345.088	1.229
27/07/2012	13.203	1.535	10.524	1.668	-366.159	239.425	1.529
28/07/2012	16.457	0.228	15.527	2.424	-348.324	353.225	0.986
29/07/2012	19.588	-0.466	18.509	3.043	-339.702	421.064	0.807
30/07/2012	19.476	-0.773	17.422	3.030	-320.532	396.350	0.809
31/07/2012	19.702	-0.807	15.409	3.079	-300.806	350.555	0.858
01/08/2012	19.568	-0.639	17.267	3.044	-278.726	392.829	0.710
02/08/2012	19.287	-0.805	16.905	2.984	-249.372	384.587	0.648
03/08/2012	18.194	-0.215	15.891	2.751	-299.855	361.524	0.829
04/08/2012	14.701	0.710	12.539	1.993	-307.754	285.260	1.079
05/08/2012	16.456	-0.682	13.365	2.491	-216.240	304.057	0.711
Promedio	18.10	-0.37	15.49	2.73	-328.06	352.415	0.947

4.4.- Eficiencia Intrínseca del Uso del Agua y su Relación con las Condiciones del Clima

La eficiencia intrínseca del uso del agua fue lineal e inversamente proporcional con la radiación neta, la tasa de evapotranspiración, temperatura del aire y el déficit de presión de vapor (Figura 6), indicando que la eficiencia del uso del agua incrementa a medida que disminuyen los valores de las variables mencionadas. Esto probablemente se debió a que el cierre de los estomas debido al incremento de las variables mencionadas tuvo un efecto mayor en la tasa de asimilación de bióxido de carbono que en la de evapotranspiración (Jones *et al.*, 2002; De la Hera-Orts *et al.*, 2004; Medrano *et al.*, 2007). El mejor ajuste se observó entre la eficiencia del uso del agua y la temperatura del aire ($r^2 = 0.8573$) y con el déficit de presión de vapor ($r^2 = 0.8506$).

Estudios previos (Jones *et al.*, 2002; Medrano *et al.* 2006; Medrano *et al.* 2007; Gago *et al.*, 2014) han demostrado que las tasas de asimilación de CO₂ y transpiración dependen directamente de la apertura y cierre estomático, el cual es afectado constantemente por factores climáticos como la radiación solar, la temperatura del aire y el déficit de presión de vapor, y a medida que aumentan los valores de estos factores disminuye la eficiencia intrínseca del uso del agua debido a un incremento en la tasa evapotranspiración.

Otros estudios (Freedman *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2007; Zermeño *et al.*, 2014) reportan que el déficit de presión de vapor es la variable del clima que más efecto tiene en la eficiencia intrínseca del uso del agua de una huerta de nogal pecanero.

La relación entre la tasa de asimilación de CO₂ y la temperatura del aire se describió con un polinomio de segundo orden (Figura 7) donde el valor máximo de la tasa de asimilación se obtiene a una temperatura del aire de aproximadamente 30 °C. A valores menores o mayores de 30 °C la tasa de asimilación de CO₂ disminuye. Similarmente la relación entre la tasa de asimilación de CO₂ y el déficit de presión de vapor también se describió con un polinomio de segundo orden, donde la máxima tasa de asimilación se observó a un déficit de presión de vapor de 1.95 Kpa. Estudios anteriores también han mostrado relaciones similares, por ejemplo, López *et al.* (2001) determinaron que la máxima tasa de asimilación de CO₂ en cinco especies forestales se presentó a temperaturas del aire de entre 25 y 28 °C, con valores de déficit de presión de vapor entre 1 y 2.27 Kpa. Mientras que Medina-Torres *et al.*, (2011) observaron en varios cultivares de aguacate que la tasa máxima de asimilación de CO₂ fue a una temperatura aproximada de 26 °C con déficit de presión de vapor de 1.97 Kpa.

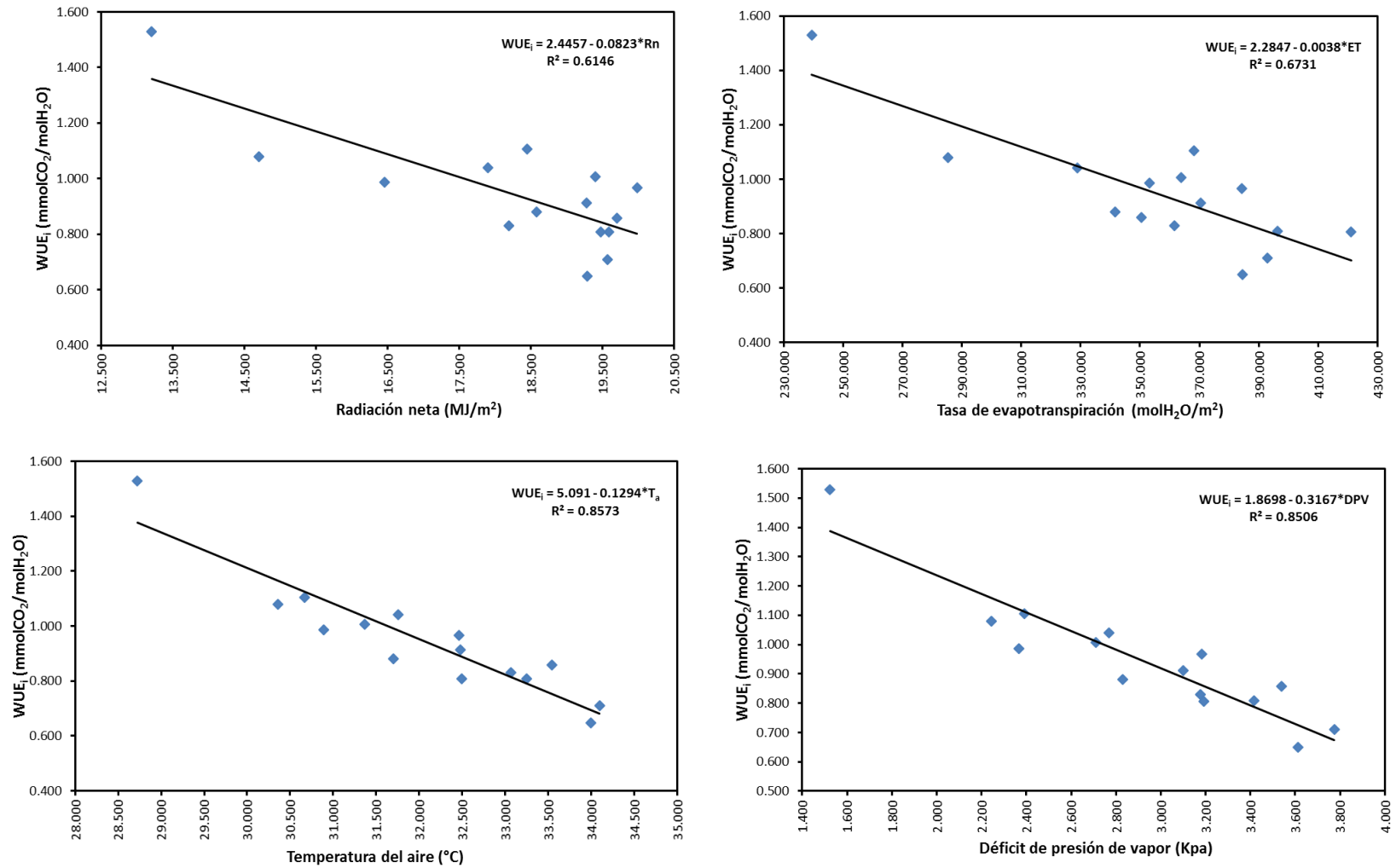


Figura 6. Relación entre la eficiencia intrínseca del uso del agua (WUE_i), la Radiación neta (R_n), la tasa de evapotranspiración (ET), la temperatura del aire (T_a) y el déficit de presión de vapor (DPV) en una huerta nogal pecanero, observada del 20 de julio al 5 de agosto de 2012. Zaragoza, Coahuila.

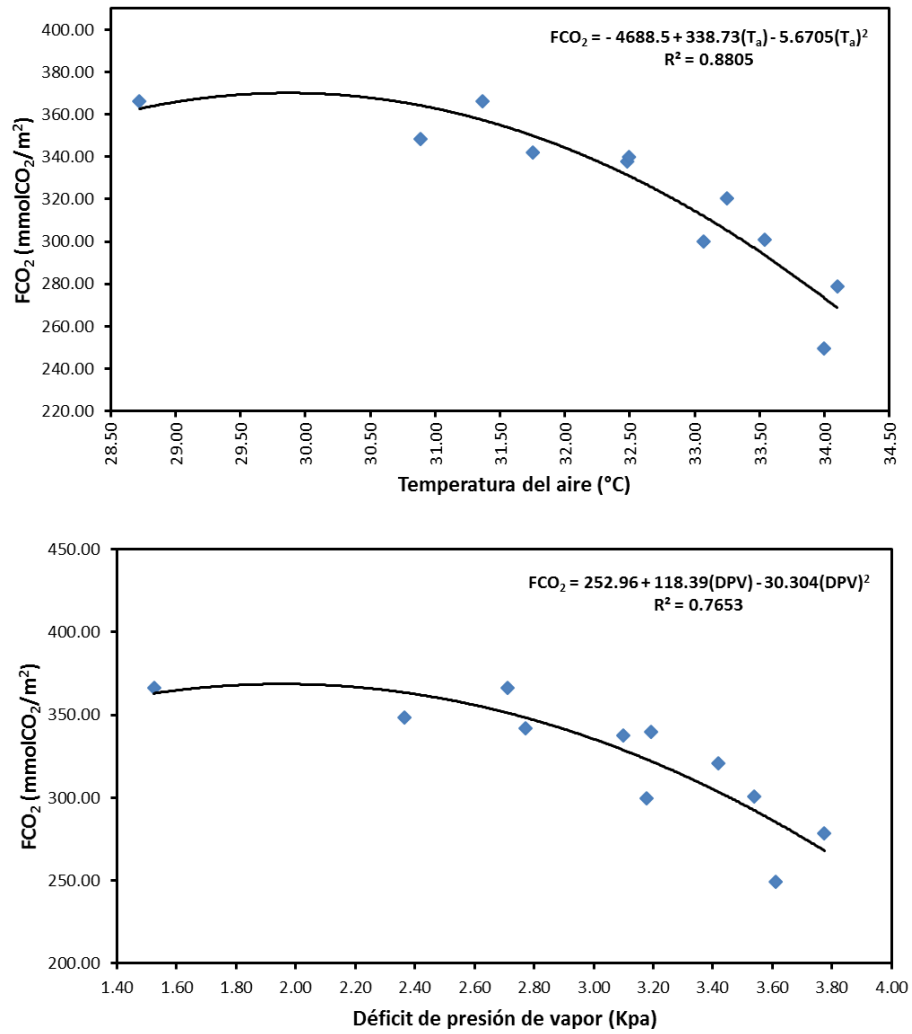


Figura 7. Relación entre la tasa de asimilación de CO₂ (FCO₂), la temperatura del aire (T_a) y el déficit de presión de vapor (DPV).

V.- CONCLUSIONES

La huerta de nogal pecanero mostro un alto potencial de absorción de CO₂, obteniendo un promedio diario de 328.06 mmol m⁻², con evapotranspiración promedio de 352.415 mol m⁻², dando como resultado un promedio de eficiencia intrínseca diaria del uso del agua de 0.947 mmol de CO₂ por mol de H₂O evapotranspirada.

La eficiencia intrínseca diaria del uso del agua fue lineal e inversamente proporcional con la temperatura del aire, el déficit de presión de vapor, la radiación neta y la tasa de evapotranspiración. Esto correspondió a una mayor eficiencia del uso del agua a valores bajos de las variables mencionadas.

La relación entre la tasa de asimilación de CO₂ con la temperatura del aire y el déficit de presión de vapor se describió con un polinomio de segundo orden, lo que indicó un valor máximo de asimilación de CO₂ para un determinado valor de la temperatura del aire y el déficit de presión de vapor.

VI.- BIBLIOGRAFIA

- Aguilar, P. H. 2006. Valor e importancia de la colección de genotipos mexicanos de nogal pecanero. En 10° día del nogalero. MEMORIAS. Delicias, Chihuahua, México. pp: 14-31.
- Arreola, A. J. G. 2010. Poda en nogal pecanero. En XI Simposio internacional de nogal pecanero. Hermosillo, Sonora, México. pp: 27-34.
- Arreola, A. J. G. y A. Lagarda M. 2002. Establecimiento de una huerta. Tecnología de producción del nogal pecanero. INIFAP. SAGARPA. Campo Experimental La Laguna. Matamoros, Coahuila, México. pp: 231.
- Asseng, S. and T. C. Hsiao. 2000. Canopy CO₂ assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting. *Field Crops Research*. 67(3): 191-206.
- Ávila, J. G. A. 2012. Manejo de luz para mejora de producción y calidad en nogal pecanero. En XIII Simposio Internacional de Nogal Pecanero. Hermosillo, Sonora, México. pp: 18-26.
- Battipaglia, G., M. Saurer, P. Cherubini, C. Calfapietra, H. R. McCarthy, R. J. Norby, and M. Francesca-Cotrufo. 2013. Elevated CO₂ increases tree-level intrinsic water use efficiency: insights from carbon and oxygen isotope analyses in tree rings across three forest FACE sites. *New Phytologist*. 197(2): 544-554.

- Bramley, H., N. C. Turner, and K. H. Siddique. 2013. Water Use Efficiency. In *Genomics and Breeding for Climate-Resilient Crops*. 2(6): 225-268.
- Burrola, M. J. R., S. H. Tarango R. y M. Luján F. 2012. Compensadores de frío alternativos en nogal pecanero. En XIII Simposio Internacional de Nogal Pecanero. Hermosillo, Sonora. México. pp: 86-90.
- Campos, J. S., L. Vázquez P., E. Olivares S., L. M. Treviño P., O. Santos M., C. Lemus H., H. Aguilar S. y J. A. Leyva R. 2005. Diagnóstico del cultivo de nogal en los Municipios de Aramberri, Bustamante, Rayones, Villaldama y Zaragoza, Nuevo León. Gobierno del estado de Nuevo Leon, ALIANZA, SGARPA y CPA. 87 p.
- Carmona, F., R. Rivas, D. Ocampo, J. Schirmbeck y M. Holzman. 2011. Sensores para la medición y validación de variables hidrológicas a escalas local y regional a partir del balance de energía. *Aqua-LAC*. 3(1):26-36.
- Chávez, G. J. F., M. C. Medina M. y U. Figueroa V. 2002. Fertilización del nogal. Tecnología de producción del nogal pecanero. INIFAP. SAGARPA. Campo Experimental La Laguna. Matamoros, Coahuila, México. pp: 231.
- Chávez-Ramírez, E., G González C., M. Rivera G., Juan Estrada A. y J. L. González B. 2006. El consumo hídrico en nogal pecanero, a partir del monitoreo ambiental y el uso de la telemetría. *Agrofaz: publicación semestral de investigación científica*. 6(3): 315-322.

- Condon, A. G., R. A. Richards, G. J. Rebetzke, and G. D. Farquhar. 2002. Improving intrinsic water-use efficiency and crop yield. *Crop Science*. 42(1): 122-131.
- De la Hera-Orts, M. L., A. Martínez-Cutillas, J. M. López-Roca y E. Gómez-Plaza. 2004. Efecto del riego moderado en el crecimiento vegetativo y en los parámetros productivos de viñas Monastrell cultivadas en condiciones semiáridas. *Spanish Journal of Agricultural Research. Revista de Investigación Agraria*. 2(2):273-281.
- Feng, X. 1999. Trends in intrinsic water-use efficiency of natural trees for the past 100–200 years: a response to atmospheric CO₂ concentration. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 63(13): 1891-1903.
- Figuroa, V. U., M. C. Medina M. y J. F. Chávez G. 2002. Manejo del suelo. Tecnología de producción del nogal pecanero. INIFAP. SAGARPA. Campo Experimental La Laguna. Matamoros, Coahuila, México. pp: 231.
- Freedman, J. M., D. R. Fitzjarrald, K. E. Moore, and R. K. Sakai. 2001. Boundary layer clouds and vegetation-atmosphere feedbacks. *Journal of Climate*. 14(2):180-197.
- Gago, J., C. Douthe, I. Florez-Sarasa, J. M. Escalona, J. Galmes, A. R. Fernie, J. Flexas and H. Medrano. 2014. Opportunities for improving leaf water use efficiency under climate change conditions. *Plant Science*. 226:108-119.
- Gilbert, M. E., M. A. Zwieniecki and N. M. Holbrook. 2011. Independent variation in photosynthetic capacity and stomatal conductance leads to differences in

intrinsic water use efficiency in 11 soybean genotypes before and during mild drought. *Journal of Experimental Botany*. 62(8): 2875-2887.

Godoy-Ávila, C. 2002. Métodos y técnicas de riego. Tecnología de producción del nogal pecanero. INIFAP. SAGARPA. Campo Experimental La Laguna. Matamoros, Coahuila, México. pp: 231.

Godoy-Ávila, C., Z. Xopiyaxtle-Jarquín, I. Reyes-Juárez y C. A. Torres-Estrada. 2005. Comportamiento hídrico de hojas y frutos de nogal pecanero y su relación con la calidad y germinación de frutos. *Terra Latinoamericana* 23(4): 505-513.

Grageda, G. J., A. A. Fu C., B. Valdez G., J. H. Núñez M., A. Jiménez L., R. Sabori P. y E. Urías G. 2013. El clima y la producción de nogal pecanero. En XIV Simposio Internacional de Nogal Pecanero. Hermosillo, Sonora. México. pp: 55-60.

Ham, J. M., and J. L. Heilman. 2003. Experimental test of density and energy-balance corrections on carbon dioxide flux as measured using open-path Eddy covariance. *Agron. J.* 95:1393-1403.

Igreja-Aires, L. M., C. Adriaio-Pio., and J. Santos-Pereira. 2008. Carbon dioxide exchange above a Mediterranean C3/C4 grassland during two climatologically contrasting years. *Global Change Biology*. 14(3):539-555.

INC. 2013. International Nut and Dried Fruit. Global Statistical Review 2008-2013. 72 p. (<http://www.nutfriut.org>; fecha de consulta marzo de 2015).

- Jones, H. G. 1992. *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. 2 ed. Cambridge, University. Press, Cambridge. USA. 428 p.
- Jones, H. G., M. Stoll, T. Santos, C. De Sousa, M. M. Chaves, and O. M. Grant. 2002. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*. 53(378):2249-2260.
- Kanemasu, E. T., S. B. Verma, S. A. Smith, L. J. Frittschen, M. Wesely, R. T. Field, W. P. Kustas, H. Weaver, J. B. Stewart, R. J. Gurney, G. Panon, and J. B. Moncrieff. 1992. Surface flux measurements in FIFE: an overview. *J. Geophysics Res.* 97: 18547-18555.
- Kustas, W. P., J. H. Prueger, and J. L. Hatfield. 2000. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. *Agric. For. Meteorol.* 103: 249-264.
- Law, B. E., E. Falge, L. Gu, D. D. Baldocchi, P. Bakwin, P. Berbigier, K. Davis, A. J. Dolman, M. Falk, J. D. Fuentes, A. Goldstein, A. Granier, A. Grelle, D. Hollinger, I. A. Janssens, P. Jarvis, N. O. Jensen, G. Katul, Y. Mahli, G. Matteucci, T. Meyers, R. Monson, W. Munger, W. Oechel, R. Olson, K. Pilegaard, K. T. Paw, H. Thorgeirsson, R. Valentini, S. Verma, T. Vesala, K. Wilson, and S. Wofsy. 2002. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 113(1): 97–120.

- Leavitt, S. W., S. B. Idso, B. A. Kimball, J. M. Burns, A. Sinha and L. Stott. 2003. The effect of long-term atmospheric CO₂ enrichment on the intrinsic water-use efficiency of sour orange trees. *Chemosphere*, 50(2): 217-222.
- Lee, X., Q. Yu, X. Sun, J. Liu, Q. Min, Y. Liu and X. Zhang. 2004. Micrometeorological fluxes under the influence of regional and local advection: a revisited. *Agricultural and Forest Meteorology*. 122:111-124.
- Lombardini, L. 2006. Fertilización y nutrición del nogal pecanero. En 10° día del nogalero. MEMORIAS. Delicias, Chihuahua, México. pp: 54-59.
- López, J. C., N. M. Riaño, y Y. López, F. 2001. Características fotosintéticas de cinco especies forestales. *Cenicafé*. 52(3):161-169.
- Marín, S. M. I., F. Paz P., J. Chávez C., M. Casiano D. y N. Solorio E. 2013. Modelación de la función de distribución bidireccional de la temperatura radiativa en cultivos agrícolas. *Terra Latinoamericana*. 31(4):259-274.
- Martínez, D. G. y J. Jiménez L. 2008. Composición florística de los huertos de nogal pecanero en México. INIFAP, SAGARPA, CENTRO DE INVESTIGACION REGIONAL DEL NOROESTE. Campo experimental Costa de Hermosillo, Sonora, México. 182 p.
- Medina, M. M. C. y P. Cano R. 2002. Aspectos generales del nogal pecanero. Tecnología de producción del nogal pecanero. INIFAP. SAGARPA. Campo Experimental La Laguna. Matamoros, Coahuila, México. pp: 231.

- Medina-Torres, R., S. Salazar-García, M. Ortiz-Catón y R. Valdivia-Bernal. 2011. Variación estacional de la fotosíntesis en varios cultivares de aguacate. *Revista Bio Ciencias*. 1(3):36-45.
- Medrano, H., J. Bota, J. Cifre, J. Flexas, M. Ribas-Carbó, y J. Gulías. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas*. 43(1): 63-84.
- Medrano, H., J. M. Escalona and J. Flexas. 2006. Indicadores fisiológicos para el control del estado hídrico en vid. *Fundamentos, Aplicación y consecuencias del Riego en vid*. Ed Mundiprensa. Madrid. 26 p.
- Moguel-Ordóñez, E., L. Tijerina-Chávez, A. Quevedo-Nolasco, G. Crespo-Pichardo, & G. Haro-Aguilar, (2001). Evapotranspiración y balance de energía en el cultivo de alfalfa. *Agrociencia*. 35:13-21.
- Nobel, P. S. 2009. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. 4 ed. Academic Press. USA. 600 p.
- Núñez, M. J. H., J. A. Márquez C. y L. Esquer P. 2006. Relación de la productividad de nogal pecanero con la aplicación comercial de cianamida de hidrogeno. En 10° día del nogalero. *MEMORIAS*. Delicias, Chihuahua, México. pp: 38-41.
- Ojeda-Barrios, D. L., A. M. Arras V., O. A. Hernández-Rodríguez, J. C. López D., A. Aguilar V. y F. G. Denogean B. 2010. Análisis foda y perspectivas del cultivo del nogal pecanero en chihuahua. *Revista Mexicana de Agronegocios*. 14(27): 348-359.

- Ojeda-Barrios, D. L., O. A. Hernández-Rodríguez, G. R. López-Ochoa, y J. J. Martínez-Téllez. 2009. Evolución de los sistemas de producción de nuez en México. *Tecnociencia Chihuahua* 3(3):115-120.
- Orona-Castillo, I., D. M. Sangerman-Jarquín, M. Fortis H., C. Vázquez V. y M. Á. Gallegos R. 2013. Producción y comercialización de nuez pecanera (*Carya illinoensis* Koch) en el norte de Coahuila, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 4(3): 461-476.
- Peterson, J. K. 1990. *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch pecan. In *Silvics of North America*. 2(1): 205-210.
- Pou, M. M. 2012. El nogal: técnicas de producción de fruto y madera. Editorial Paraninfo. 282 p.
- Reichstein, M., J. D. Tenhunen, O. Roupsard, J. M. Ourcival, S. Rambal, F. Miglietta and R. Valentini. 2002. Severe drought effects on ecosystem CO₂ and H₂O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypotheses?. *Global Change Biology*. 8(10): 999-1017.
- Rodríguez-Andujo. A., J. C. López-Díaz y S. A. García-Muñoz. 2007. Visión y estrategias para las nuevas condiciones de mercado de la nuez pecanera en el mundo. *Aventuras del pensamiento*. 4 p.
- Santamaría, C. J., M. C. Medina M., M. Rivera G. y R. Faz C. 2002. Algunos factores de suelo, agua y planta que afectan la producción y alternancia del nogal pecanero. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(2): 119-125.

- Sanz, M. J., P. Cámara, S. Cosin, E. Moors, J. Elbers y H. Dolman. 2001. Variabilidad estacional de flujos de carbón en un pinar de *Pinus halepensis* Miller. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, 12(1):109-117.
- Scanlon, T.M. and J. D. Albertson. 2004. Canopy scale measurements of CO₂ and water vapor exchange along a precipitation gradient in southern Africa. *Global Change Biology*. 10(3): 329-341.
- Seibt, U., A. Rajabi, H. Griffiths, and J. A. Berry. 2008. Carbon isotopes and water use efficiency: sense and sensitivity. *Oecologia*, 155(3): 441-454.
- Serrano-Ortiz, P., A. S. Kowalski y L. Alados-Arboledas. 2006. La técnica eddy covariance como herramienta para la determinación de la capacidad de asimilación de CO₂ de un ecosistema. *Técnicas y Metodologías. Acta Granatense*. 4(5):95-106.
- SIAP: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesca. 2014. Cierre de la producción agrícola por estado. (<http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>; fecha de consulta marzo 2014).
- Tolk, J. A., S. R. Evett and T. A. Howell. 2006. Advection on Evapotranspiration of Alfalfa in a Semiarid Climate. *Agronomy Journal*. 98:1646-1654.
- Tonti, N., M. Gassmann, M. Covi, C. Pérez y S. Righetti. 2013. Balance de energía sobre un cultivo de soja. *Ciência e Natura*. pp: 305-307.

- USDA: United States Department of Agriculture. 2014. (<http://plants.usda.gov/core/profile?symbol=CAIL2>; fecha de consulta enero 2014).
- Valdez, G. B., F. Vieira F., J. E. Ortiz E., D. Velázquez V., y B. Zárate R. 2013. Consideraciones técnicas en el manejo del agua en huertas de nogal con riego por goteo en la costa de Hermosillo. En XIV Simposio Internacional de Nogal Pecanero. Hermosillo, Sonora. México. pp: 36-41.
- Vendrame, W. and H. Wetzstein. 2005. *Carya illinoensis* Pecan. Biotechnology of fruit and nut crops. In biotechnology in agriculture series. 29(1): 298-306.
- Wang, J., D. R. Miller, T. W. Sammis, V. P. Gutschick, L. J. Simmons, and A. A. Andales. 2007. Energy balance measurements and a simple model for estimating pecan water use efficiency. *Agricultural water management*. 91(1):92-101.
- Webb, E. K., G. I. Pearman, and R. Leuning. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quart J. R. Met. Soc.* 106: 85-100.
- Zermeño, G. A., C. I. Cruz S., J. P. Munguía L., E. A. Catalán V., S. G. Campos M. y J. J. Cortés B. 2014. Efecto del sistema de riego y clima en la eficiencia del uso del agua de nogal pecanero. *Terra Latinoamericana*. 32(1):23-33.
- Zermeño-González, A., J. A. Flores-Guerrero, J. P. Munguía-López, J. A. Gil-Marín, R. Rodríguez-García, E. A. Catalán-Valencia, L. Ibarra-Jiménez y H. Zermeño-

González. 2010. Evapotranspiración y su relación con la evapotranspiración a equilibrio de una huerta de nogal pecanero (*Carya illinoensis*) del norte de México. *Agrociencia*. 44(8): 885-893.

Zermeño-González, A., J. A. Ríos-Estudillo, J. A. Gil-Marín, M. Cadena-Zapata y J. A. Villarreal-Quintanilla. 2011. Dinámica del flujo de bióxido de carbono y de energía sobre un pastizal natural del norte de México. *Bioagro*. 23(1): 35-42.

Zermeño-González, A., S. Villatoro-Moreno, J. J. Cortés-Bracho, M. Cadena-Zapata, E. A. Catalán-Valencia, M. A. García-Delgado y J. P. Munguía-López. 2012. Estimación del intercambio neto de CO₂ en un cultivo de caña de azúcar durante el ciclo de plantilla. *Agrociencia*. 46(6): 579-591.