

**EFFECTO DEL CLIMA Y SISTEMA DE RIEGO EN LA EFICIENCIA
INTRÍNSECA DEL USO DEL AGUA DEL NOGAL PECANERO.**

CLAUDIA IVETTE CRUZ SANTES

TESIS

**Presentada como Requisito Parcial para
Obtener el Grado de:**

Maestro en Ciencias en Ingeniería
de Sistemas de Producción



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre, 2011

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO**

**EFFECTO DEL CLIMA Y SISTEMA DE RIEGO EN LA EFICIENCIA
INTRÍNSECA DEL USO DEL AGUA DEL NOGAL PECANERO.**

TESIS

POR

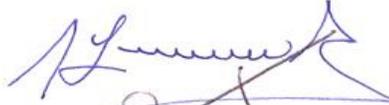
CLAUDIA IVETTE CRUZ SANTES

Tesis elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y aprobada como requisito parcial, para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**

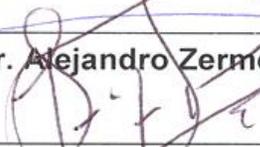
COMITÉ PARTICULAR

Asesor principal:



Dr. Alejandro Zermeño González

Asesor:



Dr. Juan P. Munguía López

Asesor:



Dr. Ernesto A. Catalán Valencia

Asesor:



Dr. Santos G. Campos Magaña



**Dr. Fernando Ruiz Zárate
Subdirector de Postgrado**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Diciembre, 2011.**

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por darme sus bendiciones y las fuerzas necesarias para lograr mis metas en la vida.

A mi **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por darme la oportunidad de formarme profesionalmente.

Al **Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA)** especialmente al Departamento de Plásticos en la Agricultura por permitirme participar en un proyecto de Investigación para la realización de este trabajo de tesis.

Al **Fondo Mixto de Investigación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** y Gobierno del Estado de Coahuila a través del Proyecto “Estimación del consumo de agua del cultivo de nogal en la región norte y laguna de Coahuila en base a los componentes del balance de energía” con clave COAH- 2006-C05- 62029.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por el apoyo económico brindado durante mi formación como Maestro en ciencias.

Al **Dr. Alejandro Zermeño González**, por su apoyo incondicional, orientación, sugerencias en la realización de este trabajo y por su amistad.

A mis asesores que aportaron su valioso tiempo en la revisión de este trabajo:

Dr. Juan P. Munguía López.

Dr. Ernesto Catalán Valencia.

Dr. Santos G. Campos Magaña.

Al **Dr. Javier de J. Cortés Bracho** por el apoyo y orientación recibida en el análisis estadístico de este trabajo.

DEDICATORIA

A mi esposo:

Porfirio Hernández Ruiz

A mi hijo:

Brahayam Hernández Cruz

A mis padres:

Raúl Ernesto Cruz Leal.

Margarita Santes Hernández

A mis hermanos:

Karina, Nancy Vanesa, Yesenia, Leslie Guadalupe y Raúl Oswaldo.

A mis sobrinos:

Ángel Said, Sara Fabiola y bebé.

A mis amigos:

Sandra y Elvia

A todos mis compañeros de la Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas de Producción por su amistad. GRACIAS!!!

COMPENDIO

EFECTO DEL CLIMA Y SISTEMA DE RIEGO EN LA EFICIENCIA INTRÍNSECA DEL USO DEL AGUA DEL NOGAL PECANERO.

POR

CLAUDIA IVETTE CRUZ SANTES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN

INGENIERIA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. DICIEMBRE 2011

DR. ALEJANDRO ZERMEÑO GONZÁLEZ – ASESOR

Palabras clave: Balance de energía, covarianza de remolinos, tasa de evapotranspiración, sistema de riego.

Por el valor económico de su producción, el nogal pecanero (*Carya Illinoensis* K) es una especie frutícola de gran importancia para México. Su cultivo se realiza en regiones de clima semidesértico donde el agua es el factor limitante de la producción, por lo que es necesario obtener la máxima eficiencia del uso de este recurso, que es función del sistema de riego y de las condiciones climáticas de la región. El estudio se realizó en el verano de 2008,

en dos huertas de nogal pecanero del noreste de México: una de ellas ubicada en el Suroeste del Estado de Coahuila (Matamoros) con riego por goteo subsuperficial, la otra en el norte del mismo estado (Zaragoza) regada con aspersión. La eficiencia intrínseca del uso del agua de las huertas de nogal pecanero se definió como la relación entre moles de CO₂ asimiladas por mol de agua evapotranspirada por el dosel de los árboles. Para medir el flujo de CO₂ y vapor de agua entre el dosel de los árboles de las huertas y la atmósfera, se utilizó el método de la covarianza de remolinos. Para evaluar la precisión de las mediciones, se determinaron todos los componentes del balance de energía sobre una superficie vegetal. Los resultados del estudio mostraron que aunque la asimilación de CO₂ promedio diurna en la huerta de Mieleras (441.68 mmol m⁻²) fue estadísticamente igual a la observada en la huerta de Zaragoza (489.04 mmol m⁻²), la eficiencia intrínseca promedio diaria del uso del agua fue mayor ($p \leq 0.05$) en la huerta de Zaragoza (1.82 mmol CO₂ mol H₂O⁻¹) que la que se obtuvo en la huerta de Mieleras (1.42 mmol CO₂ mol H₂O⁻¹). Esto se debió a que las condiciones climáticas en Mieleras fueron de un mayor déficit de presión de vapor y una mayor tasa de evapotranspiración, que tuvieron un efecto mayor en la eficiencia intrínseca del uso del agua que el sistema de riego utilizado en las huertas.

ABSTRACT

EFFECT OF WEATHER AND IRRIGATION SYSTEM ON THE INTRINSIC WATER USE EFFICIENCY OF PECAN NUT TREES.

BY

CLAUDIA IVETTE CRUZ SANTES

MASTER OF SCIENCE

PRODUCTION SYSTEMS ENGINEERING

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO. DECEMBER 2011**

DR. ALEJANDRO ZERMEÑO-GONZÁLEZ – ADVISOR

**Key words: Energy balance, eddy covariance, evapotranspiration rate,
irrigation system.**

For its production economical value, the pecan nut (*Carya Illinoensis K*) is an important fruit tree for Mexico. It is grown on arid regions where water availability is the limiting factor for its production, therefore, it is necessary to obtain the highest water use efficiency, which is a function of the irrigation method and the weather conditions of the region. So that the objective of this study was to evaluate the intrinsic water use efficiency of two orchards of pecan nut trees, with different methods of irrigation under different weather conditions. The study was done during the summer of 2008, in two orchards of pecan nut trees of Northeast Mexico. One of them located in the Southeast of Coahuila

State (Matamoros) irrigated with a subsurface drip irrigation method, the other in the North of the same Coahuila State (Zaragoza) with a sprinkling irrigation system. The intrinsic water use efficiency of the two orchards was defined as the relation between the moles of CO₂ absorbed and the moles of water vapor evapotranspired by the trees canopy. The eddy covariance method was used to measure the flux of CO₂ and water vapor between the trees canopy and the atmosphere. To evaluate the precision of the measurements, all components of the energy balance equation over a vegetated surface were determined. The results of this study showed that although the average daily CO₂ assimilation rate of the orchard of Mieleras (441.68 mmol m⁻²) was statistically equals to that observed in the orchard of Zaragoza (489.04 mmol m⁻²), the average daily intrinsic water use efficiency was higher ($p \leq 0.05$) in the orchard of Zaragoza (1.82 mmol CO₂ mol H₂O⁻¹) than that observed in the orchard of Mieleras (1.42 mmol CO₂ mol H₂O⁻¹). This was due to the weather conditions of Mieleras that were of a higher water vapor pressure deficit and a higher evapotranspiration rate, which had a major effect in the intrinsic water use efficiency than the irrigation system used in the orchards.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	x
I. INTRODUCCIÓN	1
Objetivo.....	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA	5
Origen y características del cultivo de nogal pecanero.....	5
Requerimientos de agua.....	6
Requerimientos edafoclimáticos.....	7
Producción mundial y en México de nuez pecanera	7
Sistemas de riego utilizados en nogal pecanero en el Norte de México.....	9
Riego por aspersión.....	9
Riego por goteo subsuperficial	10
Efecto del riego por aspersión y riego por goteo subsuperficial en el microclima de las huertas y en la tasa de evapotranspiración	11
Intercambio neto de CO ₂ y eficiencia intrínseca del uso del agua.....	12
Estudios previos de Intercambio neto de CO ₂ y la eficiencia intrínseca del uso del agua en otros cultivos.....	13
Estudios previos con relación con el intercambio neto de CO ₂ y la eficiencia intrínseca del uso del agua del cultivo de nogal pecanero.....	14
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
Ubicación y características del sitio de estudio.....	15
Instrumentación y mediciones.....	16
Intercambio neto de CO ₂ y la eficiencia intrínseca del uso del agua.....	18
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
Balance de energía sobre el dosel de los árboles de las huertas.....	20
Tasa instantánea y acumulada de intercambio neto de CO ₂ por el dosel de los árboles de las huertas	22
Eficiencia intrínseca del uso del agua por las huertas de nogal pecanero	23
V. CONCLUSIONES.....	30
VI. LITERATURA CITADA.....	31

ÍNDICE DE CUADROS

- Cuadro 1. Valores promedio diarios de radiación neta (R_n), déficit de presión de vapor ($\bar{\delta}e$), temperatura del aire (T_a), intercambio neto diario de CO_2 (NEE), evapotranspiración (ET) y eficiencia intrínseca del uso del agua (EF_{H_2O}), observadas en una huerta de nogal pecanero en Mieleras, Matamoros, Coahuila (M) y en Zaragoza, Coahuila (Z), entre mayo y julio de 2008. 29

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Sistema de covarianza de remolinos sobre el dosel de un cultivo de nogal pecanero para medir el flujo de calor, vapor de agua y CO_2 18
- Figura 2. Relación entre la energía disponible (R_n-G) y la suma de los flujos por turbulencia ($H+LE+S+PH$) sobre el dosel de los árboles de la huerta de nogal pecanero en Mieleras y Zaragoza Coahuila..... 21
- Figura 3. Tasa instantánea de intercambio neto de CO_2 por el dosel de los árboles de la huerta de Mieleras, Matamoros, Coahuila, observados del 26 de mayo al 15 de junio de 2008. Valores negativos indican asimilación y positivos liberación de CO_2 . Los números dentro de la figura representan el valor integrado durante el segmento del día y el de la noche..... 24
- Figura 4. Tasa instantánea de intercambio neto de CO_2 por el dosel de los árboles de la huerta de Mieleras, Matamoros, Coahuila, observados del 21 de junio al 18 de julio de 2008. Valores negativos indican asimilación y positivos liberación de CO_2 . Los números dentro de la figura representan el valor integrado durante el segmento del día y el de la noche..... 25
- Figura 5. Tasa instantánea de intercambio neto de CO_2 por el dosel de los árboles de la huerta de Zaragoza, Coahuila, observados del 9 al 24 de mayo de 2008. Valores negativos indican asimilación y positivos liberación de CO_2 . Los números dentro de la figura representan el valor integrado durante el segmento del día y el de la noche. 26
- Figura 6. Tasa instantánea de intercambio neto de CO_2 por el dosel de los árboles de la huerta de Zaragoza, Coahuila, observados del 24 de mayo al 5 de junio de 2008. Valores negativos indican asimilación y positivos liberación de CO_2 . Los números dentro de la figura representan el valor integrado durante el segmento del día y el de la noche. 27

I. INTRODUCCIÓN

El nogal pecanero (*Carya illinoensis Koch.*) es un frutal de gran importancia a nivel mundial, ya que se tiene establecida una superficie aproximada de 307 mil ha. Los principales países productores son: Estados Unidos (72 %) y México (25 %). En México la superficie de nogal sembrada aumentó de 48 mil en 1980 a 84 mil ha en 2009 (75%), de las cuales se tienen establecidas 82 mil hectáreas en condiciones de riego (SAGARPA-SIAP, 2009). En México, los estados de Chihuahua, Coahuila, Sonora, Durango y Nuevo León, representan el 95.32% del total de la producción nogalera (SAGARPA-SIACON 2008). El estado de Coahuila tiene una superficie de 14 mil ha, que corresponde al 16.9% de la superficie total nacional, con una producción de 19,432.56 ton y un rendimiento de 1.53 ton/ha. (SAGARPA-SIAP, 2009).

En la producción de nuez, el riego es indispensable para incrementar y mantener la producción y calidad de nuez. El manejo adecuado del agua del riego resulta en una alta eficiencia fotosintética de las hojas y, por consiguiente un adecuado crecimiento y desarrollo de los diferentes órganos en la planta (Godoy y López, 2000a).

En México, los sistemas establecidos para el riego de las huertas de nogal son: gravedad, aspersion y goteo. En algunas regiones donde el agua es escasa, se ha establecido el riego por goteo subsuperficial. El riego por aspersion consiste en aplicar gotas de agua en forma de lluvia más o menos

intensa y uniforme sobre el suelo con el objetivo de que se infiltre. Se ha demostrado que el rendimiento y la eficiencia del uso del agua de los cultivos es mayor con riego por aspersión que el obtenido con riego por gravedad (Yang *et al.*, 2000; Liu y Kang, 2006) debido a que el riego por aspersión puede producir un microclima favorable para el crecimiento de los cultivos. Sin embargo, Chávez *et al.* (2008) reportaron una mayor eficiencia del uso del agua de una huerta de nogal pecanero bajo riego por goteo con relación a la eficiencia con riego por aspersión y microaspersión.

En el riego por goteo subsuperficial se aplican bajos volúmenes de agua con altas frecuencias, con el propósito de mantener el contenido de humedad en el suelo en un nivel que permita un crecimiento óptimo de la planta; el sistema consiste en una serie de tuberías, principales y secundarias, que conducen el agua hasta llegar a la planta mediante mangueras colocadas en hileras, a una profundidad promedio de 20 a 40 cm (Charles *et al.*, 1999). El agua llega a las raíces en forma subsuperficial, de manera que se evitan las pérdidas directas por la evaporación de la superficie del suelo, al mantener un régimen de humedad más alto y uniforme en la zona de mayor actividad radicular, se reduce la evaporación de la superficie del suelo y se incrementa la tasa de transpiración, mejorando la apertura de los estomas y la actividad fotosintética, lo que resulta en una mayor eficiencia intrínseca del uso del agua. El empleo de esta técnica es una alternativa favorable en las regiones semiáridas ya que se mejora la eficiencia en el uso del agua (Romero *et al.*, 2004). Estudios realizados por Godoy *et al.* (2004) indicaron un ahorro del 48.5 % en el agua de riego y un incremento del rendimiento de 37 % en huertas de

nogal con riego por goteo subsuperficial respecto a las huertas regadas por inundación. Estudios realizados en otros cultivos, han mostrado las ventajas del riego por goteo subsuperficial respecto al riego por goteo, aspersión, y superficial. Por ejemplo, Bryla *et al.* (2003) reportaron un mayor rendimiento y eficiencia del uso del agua en árboles de durazno regados con un sistema de riego por goteo superficial y por goteo subsuperficial, que los árboles regados con riego por aspersión. El sistema de riego por goteo subsuperficial ofrece beneficios significativos en el ahorro de agua para riego ya que tiene mayor eficiencia del uso del agua en comparación con el riego superficial (Bhattarai *et al.*, 2005). De manera similar Al-Omran *et al.* (2005) demostraron que la eficiencia del uso del agua y el rendimiento de un cultivo fue significativamente mayor con el riego por goteo subsuperficial que el obtenido con el sistema de riego por goteo superficial.

La eficiencia intrínseca del uso del agua es una importante característica de la productividad de un ecosistema vegetal, al relacionar la tasa de asimilación de CO₂ con la tasa de evapotranspiración (Blum, 2005; Kuglitsch *et al.*, 2008;). Picon *et al.* (1997), encontraron que el aumento en la eficiencia intrínseca del uso del agua depende de un aumento en la concentración de CO₂ independiente de los distintos niveles de humedad en que se encuentren las plantas. Estudios previos muestran que la eficiencia intrínseca del uso del agua es mayor en cultivos de cobertura completa bajo condiciones de riego (Baldocchi, 1994; Zhao *et al.*, 2007).

Las condiciones climáticas de una determinada localidad, afectan la eficiencia intrínseca del uso del agua de los ecosistemas vegetales por su

efecto en la tasa de evapotranspiración (Law *et al.*, 2002; Yu *et al.*, 2008). La eficiencia del uso del agua puede ser mayor en días con abundante nubosidad debido a una menor radiación solar hacia la superficie, menor temperatura de las hojas, y menor déficit de presión de vapor (DPV), que reduce la tasa de evapotranspiración (Freedman *et al.*, 2001). Por ejemplo, Wang *et al.* (2007) reportaron que la eficiencia del uso del agua del nogal pecanero fue mayor a niveles bajos del déficit de presión de vapor.

Por lo anterior, se establece que la eficiencia intrínseca del uso del agua del nogal pecanero puede ser afectada por las condiciones climáticas de la localidad y por el sistema de riego utilizado.

Objetivo

Evaluar el efecto del riego por aspersión y el riego por goteo subsuperficial en la eficiencia intrínseca del uso del agua en dos huertas de nogal pecanero ubicadas en diferentes condiciones climáticas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Origen y características del cultivo de nogal pecanero

Se considera que el nogal pecanero es originario del norte de México y sur de los Estados Unidos. Se han encontrado restos fósiles junto con millones de árboles nativos de nuez pecanera a lo largo de los márgenes de arroyos y cauces de ríos en el sur de Estados Unidos de América y norte de México (Herrera, 2004). La primera plantación de nuez pecanera bajo riego en el país se reporta en 1911 en el pueblo de Bustamante Nuevo León; México (Campos *et. al.*, 2005).

En México, la distribución natural del nogal se encuentra en catorce estados, siendo los centros más importantes de asociaciones nativas los estados de Nuevo León, Coahuila y Chihuahua (Ojeda *et al.*, 2003).

El nogal pecanero (*Carya illinoensis* K.) pertenece a la familia Juglandaceae, es un árbol que puede superar los 30 metros de altura, es muy vigoroso y longevo, inicia su producción entre los 6 y 10 años de edad y continúa produciendo comercialmente durante más de 50 años. La fruta del nogal se considera una drupa, la cual consta de pericarpio, mesocarpio y semilla (almendra). Las variedades más importantes para los estados del norte de México son Wichita y Western Schley (Puente 2002).

Requerimientos de agua

El agua es el factor principal de manejo agronómico que permite al nogal pecanero [*Carya illinoensis* (Wangehn.) K. Koch] alcanzar una alta eficiencia fotosintética de las hojas, para un mayor rendimiento y calidad del fruto (Godoy-Ávila y López-Montoya, 2000), ya que el consumo de agua del nogal es alto comparado con el de otros cultivos (Wang *et al.*, 2007; Andales, *et al.*, 2006).

La falta de agua afecta algunas etapas fenológicas importantes como son: la elongación del fruto, que ocurre durante los meses de abril y mayo; la expansión, desde principios de julio a principios de agosto; produciendo nueces pequeñas (Godoy *et al.*, 2000).

Por otro lado, el suministro de agua es fundamental durante el llenado de la almendra, si esta es insuficiente, se presentara germinación y falta de llenado de la nuez. En un estudio realizado en la comarca lagunera, Godoy y López (2000), detectaron que el 100 % de las huertas de nogal pecanero tenían problemas de llenado de fruto y en el 68 % se presenta germinación en un 15 %. La causa de estos problemas quedó claramente identificada por la deficiencia en el suministro de agua durante el llenado de la almendra que corresponde a los meses de agosto y parte de septiembre.

Respecto a lo anterior, se demostró que aplicar 3 ó 4 riegos durante la etapa de llenado de la almendra, se obtienen nueces de buen peso y buena calidad; así como también, disminuye la germinación de las nueces y promueve la apertura normal del ruezno (Godoy y López, 2000).

Requerimientos edafoclimáticos

El tipo de suelo que el nogal requiere, debe ser profundo, es decir, mayor de 2 metros de profundidad; con buen drenaje y de textura media ya sea franco o franco arenosa, que le proporcione una buena aireación radicular, retención de humedad y nutrientes y resistencia al desarrollo de las raíces. Los suelos compactados, extraen efectos negativos en el transporte de agua, difusión de gases y limitan el espacio de exploración radicular (González *et al.*, 2000).

Por su amplia adaptación a las condiciones de suelo y clima, así como por la amplia aceptación de su fruto en el mercado nacional e internacional, las variedades Western y Wichita son las de mayor importancia en la Comarca Lagunera (Medina y Cano, 2002).

El nogal es un cultivo que se caracteriza por tener una excelente adaptación a las condiciones climáticas del norte de México, comprendidas entre las 50 a 600 unidades frío y 3000 o más de unidades calor y baja humedad ambiental y de precipitación (Lagarda, 2007).

Producción mundial y en México de nuez pecanera

El nogal pecanero es un frutal de gran importancia a nivel mundial, ya que se tiene establecida una superficie aproximada de 307 mil ha. Los principales países productores son: Estados Unidos (72 %) y México (25 %). En México la superficie de nogal sembrada aumentó de 48 mil en 1980 a 84 mil ha en 2009 (75%), de las cuales se tienen establecidas 82 mil hectáreas en condiciones de riego (SAGARPA-SIAP, 2009).

En México, las primeras plantaciones comerciales de nogal se establecieron el año de 1946, desde entonces se han desarrollado sistemas de producción sustentables y muy competitivos y para el año 2000 se tenían plantadas más de 60 mil hectáreas a nivel nacional. (Tarango, 2004).

Los estados de Chihuahua, Coahuila, Sonora, Durango y Nuevo León, representan el 95.32% del total de la producción nogalera en México (SAGARPA-SIACON 2008). El estado de Coahuila tiene una superficie de 14 mil ha, que corresponde al 16.9% de la superficie total nacional, con una producción de 19,432.56 ton y un rendimiento de 1.53 ton/ha. (SAGARPA-SIAP, 2009).

Las plantaciones de nogal pecanero han crecido substancialmente en México y se considera que este cultivo es sumamente rentable como resultado de los altos precios pagados al productor (Puente *et. al.*, 2002). La rentabilidad de este frutal perenne ha sido superior a la de muchos cultivos anuales en los últimos años, por lo que en la Comarca Lagunera se ha extendido tanto la superficie como el valor de su producción (Orona et al., 2006).

Tradicionalmente, la nuez ha sido utilizada para consumo directo o en industrias de panadería y dulcería. Sin embargo, existen otras oportunidades de mercado para subproductos obtenidos de la nuez que podrían incrementar la rentabilidad, tales como la extracción de aceites esenciales y vitamina E, taninos y carbón activado, estos últimos obtenidos a partir de la cáscara (López, 2004).

Sistemas de riego utilizados en nogal pecanero en el Norte de México

En la producción de nuez, el riego es indispensable para incrementar y mantener la producción y calidad de nuez. El manejo adecuado del agua del riego resulta en una alta eficiencia fotosintética de las hojas y, por consiguiente un adecuado crecimiento y desarrollo de los diferentes órganos en la planta (Godoy y López, 2000a).

El cultivo requiere la aplicación de riego en las huertas (1.40 m/año), implicando con ello la consiguiente tecnificación de los sistemas productivos con nuevos métodos de aplicación de agua y fertilizantes, con la utilización de los conceptos de fertirrigación, mínima labranza en el manejo de suelos y control integrado de plagas, con lo que se ha evolucionado al desarrollo de sistemas de producción de nuez poco contaminantes y muy competitivos (Lagarda, 2007).

Para la Región Lagunera se reportan requerimientos de agua de 1.30 a 1.75 m de lámina de riego por año para el nogal pecanero; sin embargo, mediante la utilización de sistemas presurizados de riego, éstas se pueden disminuir hasta 1.12 m. (Mendoza et al., 2005).

Riego por aspersión

Cerca del 10% de las áreas de riego en todo el mundo son por aspersión, siendo este porcentaje más elevado en países desarrollados, con altos costos de mano de obra y bajos costos de energía. Las innovaciones que se introducen mejoran el funcionamiento del riego y favorecen la adaptación de la

aspersión a todos los tipos de suelo, de topografía, de cultivos y de clima (Santos *et al.*, 2010).

El riego por aspersión se basa en la emisión de gotas de agua en forma de lluvia, las cuales viajan a través del aire en forma discreta, la distancia en la que caen está influenciada por el tipo de aspersor y boquilla utilizados, las condiciones hidráulicas de trabajo y las características medioambientales de la región (Bautista, 2008).

Se ha demostrado que el rendimiento y la eficiencia del uso del agua de los cultivos es mayor con riego por aspersión que el obtenido con riego por gravedad (Yang *et al.*, 2000; Liu y Kang, 2006) debido a que el riego por aspersión puede producir un microclima favorable para el crecimiento de los cultivos.

Riego por goteo subsuperficial

Este método de riego por goteo subsuperficial consiste en la aplicación de bajos volúmenes de agua con altas frecuencias por debajo de la superficie del suelo a través de emisores, con el propósito de mantener el contenido de humedad en el suelo en un nivel que permita un crecimiento óptimo de la planta; el sistema está compuesto por una serie de tuberías, principales y secundarias, que conducen el agua hasta llegar a la planta mediante mangueras colocadas en hileras, a una profundidad promedio de 20 a 40 cm (Charles *et al.*, 1999). El agua llega a las raíces en forma subsuperficial, de manera que se evitan las pérdidas directas por la evaporación de la superficie del suelo.

El empleo de esta técnica es una alternativa favorable en las regiones semiáridas ya que se mejora la eficiencia en el uso del agua (Romero *et al.*, 2004). Al utilizar este sistema de riego se tiene como resultado ventajas biofísicas, como una disminución de la humedad del dosel de los árboles, además de la poca presencia de malas hierbas y la reducción de las enfermedades que afectan el cultivo (Camp and Lamm, 2003).

Phene (1999), menciona que el sistema de riego por goteo subsuperficial proporciona un mayor volumen de suelo mojado y un área disponible para la proliferación y desarrollo de raíces más profundas que el riego por goteo superficial no provee.

El sistema de riego por goteo subsuperficial ofrece beneficios significativos en el ahorro de agua para riego ya que tiene mayor eficiencia del uso del agua en comparación con el riego superficial (Bhattarai *et al.*, 2005).

Estudios realizados por Godoy *et al.* (2004) indicaron un ahorro del 48.5 % en el agua de riego y un incremento del rendimiento de 37 % en huertas de nogal con riego por goteo subsuperficial respecto a las huertas regadas por inundación.

Efecto del riego por aspersión y riego por goteo subsuperficial en el microclima de las huertas y en la tasa de evapotranspiración

Las pérdidas directas de agua mediante la evaporación de las gotas durante el riego por aspersión tienen un efecto significativo sobre el microclima de la huerta. Tolk *et al.* (1995) reportaron que cuando hay una disminución de la temperatura y el déficit de presión de vapor es menor, da como resultado una

disminución en la transpiración y evaporación de la superficie del suelo, lo que promueve una mejora del microclima de la zona de riego.

Hay muchos factores que afectan o contribuyen a las pérdidas de agua por evaporación al utilizar el sistema de riego por aspersión en las huertas, Lorenzini (2002) demostró que las pérdidas por evaporación en gran medida son por el efecto de la temperatura del aire.

Las prácticas del cultivo y el método de riego pueden alterar el microclima, afectar las características del cultivo y la capacidad de absorción de agua del suelo y la superficie de cultivo. La evaporación del suelo de un huerto con árboles jóvenes, en donde los árboles están ampliamente espaciados, puede ser reducida usando un sistema de riego por goteo bien diseñado. Los goteros aplican el agua directamente al suelo cerca de los árboles, de modo en que dejan la mayor parte de la superficie del suelo seca, limitando las pérdidas por evaporación (FAO, 2006).

Intercambio neto de CO₂ y eficiencia intrínseca del uso del agua

El intercambio neto de CO₂ de un ecosistema (NEE) (suelo-vegetación) se define como el flujo neto de CO₂ hacia (asimilación por fotosíntesis) o desde (liberación por respiración) el ecosistema vegetal, sin considerar el CO₂ almacenado o liberado por la capa de aire bajo las mediciones del flujo de CO₂ (Martens *et al.*, 2004).

El intercambio neto de CO₂ entre el ecosistema y la atmósfera, (NEE) depende de la actividad fotosintética que fija el CO₂ atmosférico y de la respiración que libera CO₂ a la atmósfera. La respiración total del ecosistema se

compone de la respiración de la cobertura foliar, del tejido leñoso y de las raíces de los árboles (respiración autotrófica del suelo) así como de la respiración de los microorganismos del suelo (respiración heterotrófica del suelo) (Janssens *et al.*, 2001).

El NEE se puede medir directamente mediante el método de covarianza Eddy (CE), que proporciona un espacio de intercambio neto de carbono integrado de forma continua con el mínimo disturbio posible a la vegetación circundante (Aubinet *et al.*, 2000; Baldocchi *et al.*, 2001).

La eficiencia intrínseca del uso del agua es una importante característica de la productividad de un ecosistema vegetal, al relacionar la tasa de asimilación de bióxido de carbono con la tasa de evapotranspiración (Blum, 2005; Kuglitsch *et al.*, 2008).

Estudios previos de Intercambio neto de CO₂ y la eficiencia intrínseca del uso del agua en otros cultivos

Rossi *et al.* (2007) observaron en una huerta de kiwi [*Actinidia deliciosa* (A. Chev)] que el NEE fue de aproximadamente 3 toneladas de carbono (asimilación) en un periodo de observación de siete meses, cuando los árboles se encontraban en su máximo esplendor vegetativo, pero se perdieron en el ecosistema mediante el proceso de respiración 8,5 toneladas de carbono. La tasa de asimilación instantánea de CO₂ fue 14 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Ramírez y Pimienta, (2003) reportaron valores de asimilación neta diaria de CO₂ de 359 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ en julio; 647 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ en agosto y 200 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ en septiembre en una huerta de ciruelo (*Spondias purpurea* L.) y

una tasa de asimilación instantánea de CO₂ de 10.7 μmol m⁻² s⁻¹. La ganancia de carbono registrada en la huerta de ciruelo puede ser considerada alta.

Zhao *et al.* (2007) reportaron valores de eficiencia intrínseca del uso del agua de 2.205–2.79 mmolCO₂ molH₂O⁻¹ para un cultivo de trigo en invierno (*Triticum aestivum* L.) en la llanura del norte de China, en condiciones de precipitaciones escasas y variables; utilizando el método de la covarianza Eddy se realizaron las mediciones sobre el dosel del cultivo que se encontraba en su máxima etapa de crecimiento.

La eficiencia intrínseca del uso del agua para un bosque templado de hoja caduca fue 1.31 mmolCO₂ molH₂O⁻¹, sin embargo, fue mayor a la observada en un bosque de coníferas de clima templado (1.0 mmolCO₂ molH₂O⁻¹) y para una vegetación de tundra (0.62 mmolCO₂ molH₂O⁻¹) Law *et al.* (2002).

La eficiencia del uso del agua puede ser mayor en días con abundante nubosidad debido a una menor radiación solar hacia la superficie, menor temperatura de las hojas, y menor déficit de presión de vapor (DPV), que reduce la tasa de evapotranspiración (Freedman *et al.*, 2001).

Estudios previos con relación con el intercambio neto de CO₂ y la eficiencia intrínseca del uso del agua del cultivo de nogal pecanero

Wang *et al.* (2007) reportaron que la eficiencia del uso del agua en una huerta de nogal pecanero fue mayor a niveles bajos del déficit de presión de vapor, por el efecto que causan las condiciones climáticas en el índice de eficiencia del uso del agua.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y características del sitio de estudio

El estudio se realizó durante los meses de verano de 2008, en dos huertas de nogal pecanero (*Carya Illinoensis Koch*) del estado de Coahuila del Norte de México. Una de la huertas se ubica en la propiedad Tierra Blanca, del ejido Mieleras, municipio de Matamoros, Coahuila, México, cuyas coordenadas geográficas son 25°25' N, 103°18' O con una elevación de 1200 m. Las dimensiones del área de estudio dentro de la huerta fueron 1120 m en la dirección norte-sur por 400 m este-oeste. La huerta está formada por árboles de los cultivares Wichita y Western Schley, de 50 años de edad y altura promedio de 14 m. La distribución de los árboles en la huerta es en tresbolillo con una separación de 15 m. La huerta se riega diariamente entre marzo y noviembre con un sistema de riego por goteo subsuperficial, aplicando una lámina promedio diaria de 5 mm.

La otra huerta se encuentra en la propiedad Las Tres Marías, del municipio de Zaragoza, Coahuila, las coordenadas geográficas del sitio son: 28°28'31" N, 100°55'10" O a una elevación de 360 m. Las dimensiones promedio del área de estudio fueron 660 m norte-sur por 600 m este-oeste. Los árboles de la huerta son de los cultivares Wichita, Western Schley y Pawnee, 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. La huerta se riega con un sistema de aspersión fijo, aplicando láminas promedio de 55 mm a intervalos de 10 días.

Instrumentación y mediciones

Los flujos de calor latente (LE), calor sensible (H) y de CO₂ (FCO₂), entre el dosel de la vegetación y la atmósfera se obtuvieron con el método de la covarianza eddy, utilizando las siguientes relaciones: (Ham y Heilman, 2003):

$$LE = L \overline{w' \rho_{wv}'} \quad (1)$$

$$H = \rho_a C_p \overline{w' Ts'} - 0.51 Ta \frac{\rho_a C_p}{L} LE \quad (2)$$

$$FCO_2 = \overline{w' \rho_{CO_2}'} \quad (3)$$

Donde: ρ_a y C_p son la densidad y capacidad calorífica del aire respectivamente, L es el calor de vaporización del agua, Ta es la temperatura del aire, los productos $w' \rho_{CO_2}'$, $w' \rho_{wv}'$ y $w' Ts'$, representan la covarianza entre la velocidad vertical del viento (w) y la densidad del CO₂ (ρ_{CO_2}), densidad del vapor de agua (ρ_{wv}) y la temperatura sónica (Ts), respectivamente. La barra horizontal representa el valor medio del producto de las desviaciones en un segmento de tiempo (30 min). La velocidad vertical del viento y la temperatura sónica se midieron con un anemómetro sónico tridimensional (CSI-CSAT3, Campbell, Sci, Inc, Logan, Utah, USA), mientras que ρ_{wv} y ρ_{CO_2} con un analizador de CO₂ y vapor de agua de sendero abierto (open path CO₂ H₂O analyzer, LI-7500; LI-

COR; Lincoln, NE, USA). Ambos sensores se montaron en una torre (Figura 1) de 16 m de altura (Mieleras) y 14 m (Zaragoza) para lograr una distancia vertical mínima de 2 m sobre el dosel de los árboles.

El anemómetro sónico tridimensional se orientó hacia el noreste (Mieleras) y sureste (Zaragoza), para obtener una distancia horizontal desde la ubicación de los sensores al límite del área de estudio (fetch) de 200 m en un ángulo de 90° respecto a la orientación del anemómetro sónico tridimensional. La velocidad vertical del viento, la temperatura sónica, la densidad del vapor de agua y del CO₂ se midieron a una frecuencia de 10 Hz, y las covarianzas se calcularon cada 30 min.

Para evaluar la precisión de las mediciones del flujo de calor latente, vapor de agua y CO₂, se obtuvieron todos los componentes del balance de energía sobre una superficie vegetal utilizando la siguiente ecuación:

$$R_n = H + LE + G + PH + S \quad (4)$$

Donde: R_n es la radiación neta, H y LE definidos anteriormente, G es el flujo de calor en la superficie del suelo, PH es la energía utilizada en la fijación de CO₂ y S es la energía almacenada por cambios de temperatura del aire, la vegetación y por cambios en la humedad específica de la capa del aire a la altura de los árboles, las unidades de todos los términos de la ecuación (4) son W m⁻².



Figura 1. Sistema de covarianza de remolinos sobre el dosel de un cultivo de nogal pecanero para medir el flujo de calor, vapor de agua y CO₂.

Los flujos de vapor de agua y CO₂ se corrigieron por efectos de densidad (Webb *et al.*, 1980). Posteriormente, los flujos de H y LE se corrigieron para cerrar el balance de energía, considerando que el método de la covarianza eddy proporciona una buena determinación de la relación Bowen (H/LE). El flujo de CO₂ se corrigió con el mismo factor (Ham y Heilman, 2003).

Intercambio neto de CO₂ y la eficiencia intrínseca del uso del agua

El intercambio neto de CO₂ del ecosistema (NEE) formado por el suelo y los árboles de la huerta se obtuvo con la siguiente relación (Martens *et al.*, 2004):

$$NEE = FCO_2 + \frac{\Delta\rho CO_2}{\Delta t} * \Delta z \quad (5)$$

Donde: FCO_2 , es el flujo de CO_2 medido con el método de la covarianza eddy, $\Delta\rho CO_2$ es el cambio en la densidad del CO_2 medido a la misma altura a la que se midió el flujo de CO_2 , en el intervalo de tiempo considerado ($\Delta t=30$ min) y Δz es la altura a la que se realizaron las mediciones (14 m en la huerta de Zaragoza y 16 m en la de Mieleras). La retención neta diaria de CO_2 por el ecosistema se estimó con la diferencia entre la integración de los valores negativos (durante el día) y positivos (durante la noche) de NEE obtenido cada 30 min.

La eficiencia intrínseca diaria del uso del agua (Ef_{H_2O}) por el ecosistema, se obtuvo con la relación de los valores integrados entre las 8:00 y 20:00 h de los flujos (promedios de 30 min) de NEE y el agua evapotranspirada (ET) en el mismo intervalo de tiempo.

$$Ef_{H_2O} = \frac{NEE}{ET} \quad (6)$$

La comparación de los valores promedio diarios de la eficiencia intrínseca del uso del agua, tasa de evapotranspiración, déficit de presión de vapor, temperatura del aire, radiación neta y tasa diaria de asimilación de CO_2 se realizó con la prueba t-student ($\alpha=0.05$) para muestras apareadas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Balance de energía sobre el dosel de los árboles de las huertas

Al aplicar la ecuación del balance de energía sobre el dosel de los árboles de las huertas de nogal pecanero se observó que la suma de los flujos de calor sensible, calor latente, la energía utilizada en la fijación de CO₂ y la energía almacenada por cambios de temperatura del aire, vegetación y cambios en la humedad específica de la capa del aire (H+LE+PH+S) fueron en promedio 17% y 14.5% menores que la energía disponible (Rn-G) en la huerta de Mieleras y de Zaragoza respectivamente (Figura 2). Al respecto, Twine *et al.* (2000) después de realizar varias pruebas en el cierre del balance de energía en diferentes sitios, afirmó que los flujos por turbulencia son sistemáticamente de 10% a 30% menores que la energía disponible. Investigaciones amplias y detalladas realizadas por Wilson *et al.* (2002) en 22 sitios de la red de FLUXNET de los Estados Unidos, sobre diferentes tipos de vegetación y condiciones climáticas, reportaron que en promedio la suma de los flujos por turbulencia (H+LE) fueron en promedio 20% menores que la energía disponible (Rn-G). De manera similar Foken (2008), de una revisión de 20 años de investigaciones relacionadas con el problema del cierre del balance de energía sobre superficies vegetales, demostró que la suma de los flujos por turbulencia son aproximadamente 20% menor que la energía disponible. Para cerrar el

balance de energía, Ham y Heilman (2003) consideran que la energía disponible (R_n-G) es correcta y que los flujos por turbulencia son subestimados, por lo que se deben corregir asumiendo que la relación Bowen (H/LE) es bien determinada con el método de la covarianza de remolinos. Al realizar esta corrección se cierra el balance de energía. Este procedimiento se aplicó a los datos de las dos huertas para cerrar el balance de energía de cada segmento de 30 min.

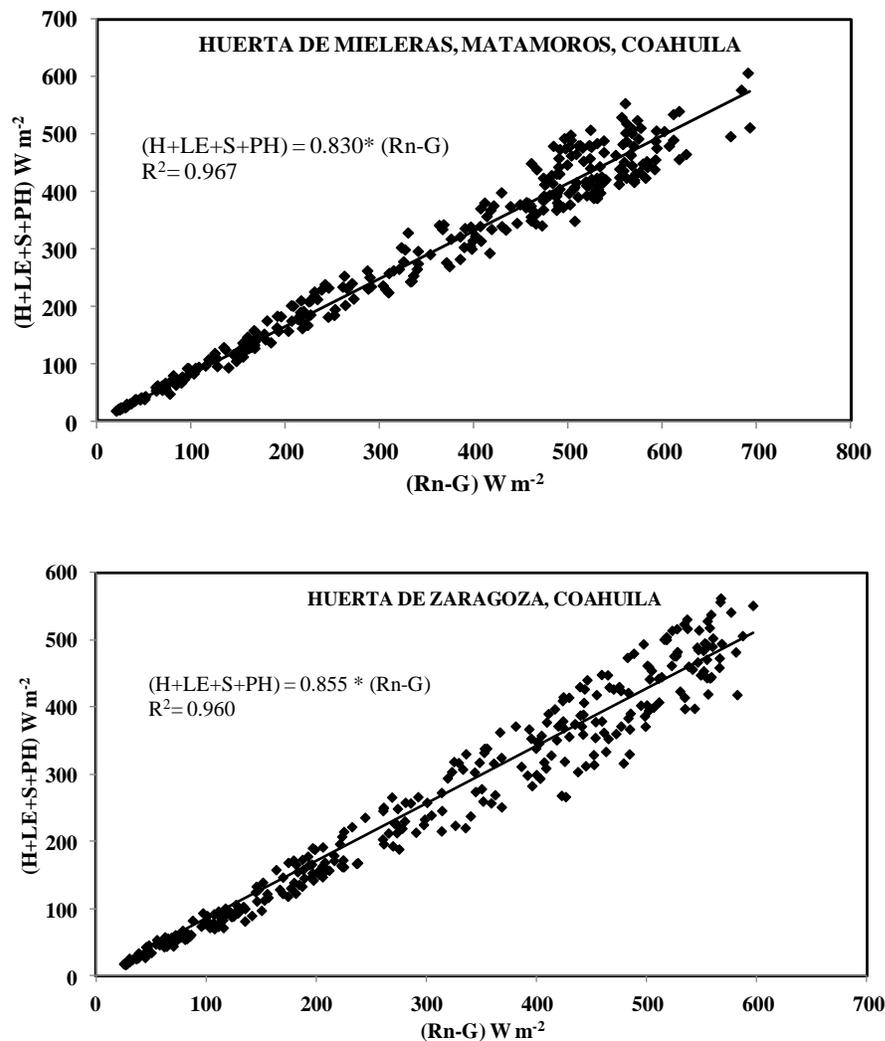


Figura 2. Relación entre la energía disponible (R_n-G) y la suma de los flujos por turbulencia ($H+LE+S+PH$) sobre el dosel de los árboles de la huerta de nogal pecanero en Mieleras y Zaragoza Coahuila.

Tasa instantánea y acumulada de intercambio neto de CO₂ por el dosel de los árboles de las huertas

Tanto en la huerta de Mieleras como en la de Zaragoza, los valores de las tasas instantáneas de asimilación de CO₂ máximas en los diferentes días evaluados se presentaron sistemáticamente entre las 11 y las 16 h, (Figura 3 y 4) esto correspondió con las horas de la máxima incidencia de radiación solar y las máximas tasas de evapotranspiración. El promedio de las tasas de asimilación instantáneas máximas de CO₂ en los árboles de la huerta de Mieleras fue 17.028 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 3), y fue muy similar (17.957 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) a la observada en los árboles de la huerta de Zaragoza (Figura 4). Estos valores mostraron el potencial de asimilación de CO₂ que tienen las huertas de nogal pecanero, ya que fueron mayores que la tasa de asimilación de CO₂ reportadas para otros frutales. Por ejemplo, Rossi *et al.* (2007) observaron una tasa de asimilación instantánea de CO₂ de 14 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en una huerta de kiwi [*Actinidia deliciosa* (A. Chev)], mientras que por Ramírez y Pimienta (2003) reportaron una tasa de 10.7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para una huerta de ciruelo (*Spondias purpurea* L.).

Durante la noche, la liberación de CO₂ instantánea máxima promedio fue menor ($p \leq 0.05$) en la huerta de Mieleras (4.606 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Figura 3 y 4), que en la huerta de Zaragoza (6.66 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Figura 5 y 6). Esto se debió a que la frecuencia del riego en la huerta de Zaragoza fue de aproximadamente 10 días, (riego por aspersión), mientras que en la huerta de Mieleras fue diario (riego por goteo subsuperficial), por lo que los árboles de la huerta de Zaragoza en los días previos a la aplicación del siguiente riego probablemente estuvieron

bajo estrés hídrico. Esto incrementó la temperatura foliar, de tal forma que al llegar la noche la temperatura de las hojas en los árboles de la huerta de Zaragoza fue mayor, resultando en una mayor tasa de respiración nocturna. Estudios previos han mostrado relaciones directas entre la tasa de respiración y la temperatura foliar (Atkin y Tjoelker, 2003; Tcherkez *et al.*, 2003).

La retención promedio diaria de CO₂ por los árboles de las huertas observada en los intervalos de tiempo de las Figuras 3, 4, 5 y 6, se obtuvo con la diferencia entre el intercambio neto integrado diurno de CO₂ (números negativos dentro de las Figuras 3, 4, 5 y 6) y el intercambio neto integrado nocturno (números positivos dentro de las mismas figuras). La retención promedio diaria de CO₂ fue mayor en la huerta de Mieleras (337.31 mmol m⁻²), que en la huerta de Zaragoza (305.88 mmol CO₂ m⁻²), debido a una mayor tasa de respiración nocturna por los árboles de la huerta de Zaragoza.

Eficiencia intrínseca del uso del agua por las huertas de nogal pecanero

Las condiciones climáticas de la localidad tuvieron un efecto mayor en la eficiencia intrínseca del uso del agua, que la eficiencia del sistema de riego utilizado en las huertas. La eficiencia intrínseca promedio diaria del uso del agua en la huerta de Zaragoza (1.82 mmol CO₂/mol H₂O) fue mayor ($p \leq 0.05$) que la eficiencia observada en la huerta de Mieleras (1.42 mmol CO₂/mol H₂O) (Cuadro 1).

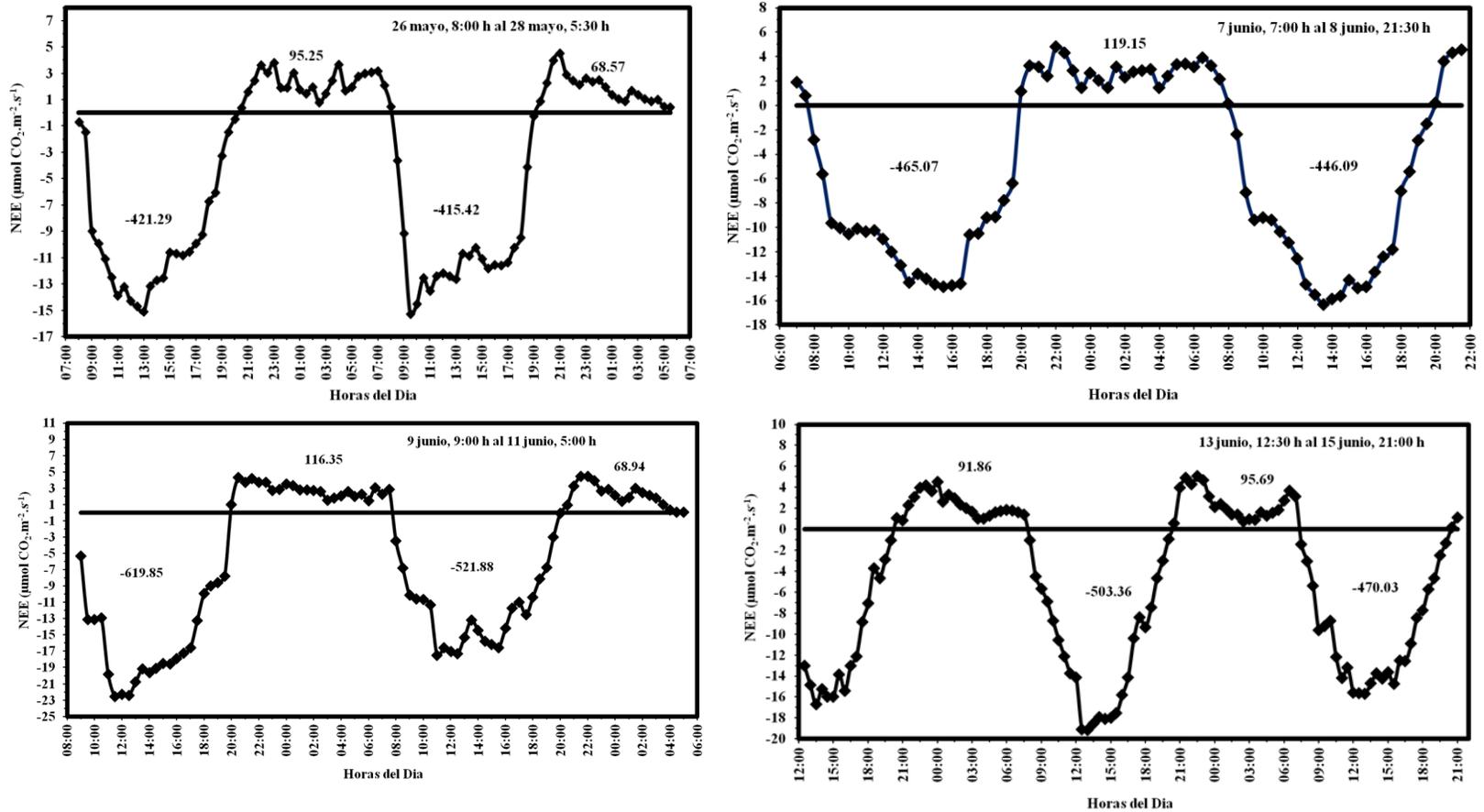


Figura 3. Tasa instantánea de intercambio neto de CO₂ por el dosel de los árboles de la huerta de Mieleras, Matamoros, Coahuila, observados del 26 de mayo al 15 de junio de 2008. Valores negativos indican asimilación y positivos liberación de CO₂. Los números dentro de la figura representan el valor integrado durante el segmento del día y el de la noche.

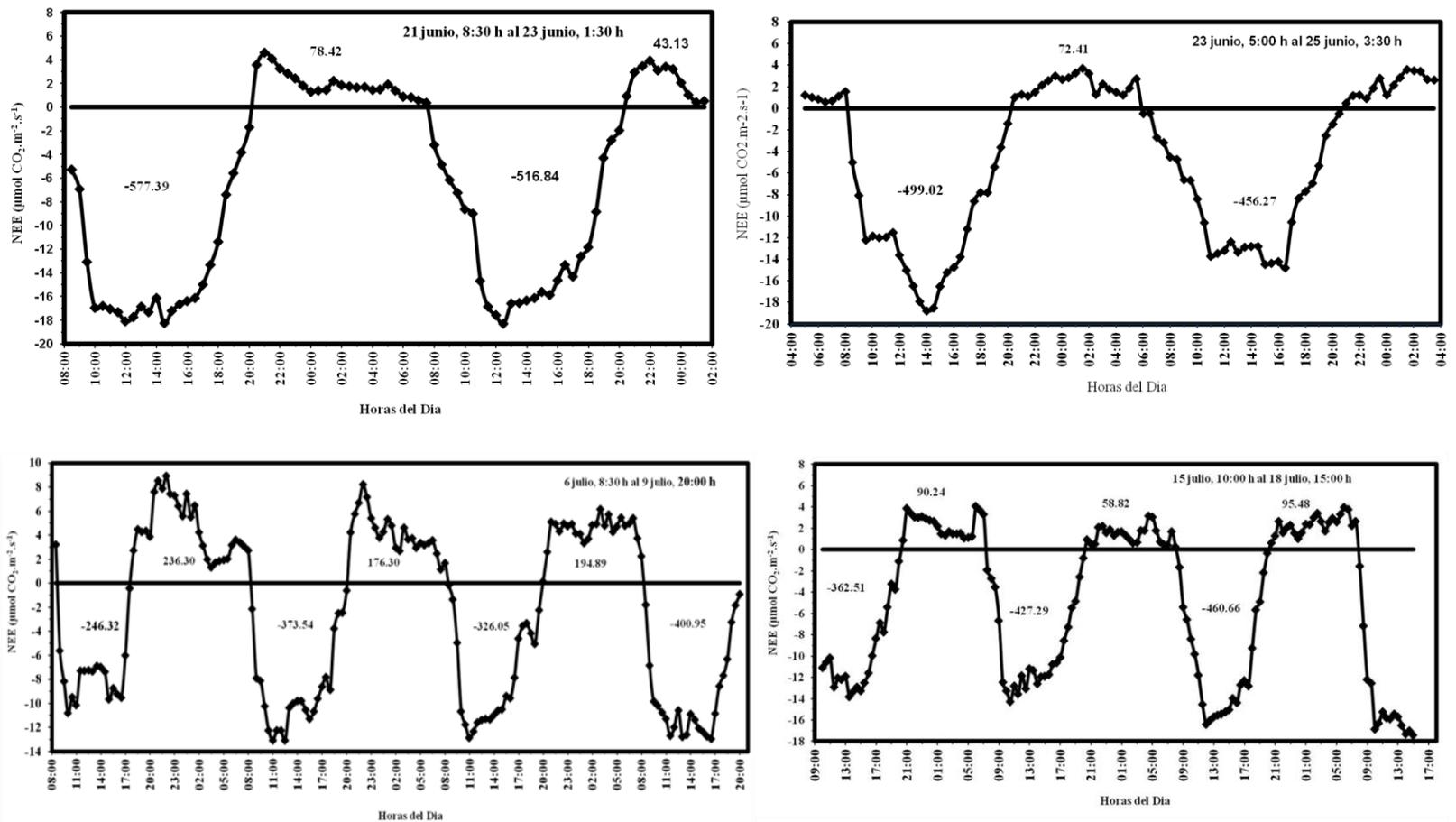


Figura 4. Tasa instantánea de intercambio neto de CO₂ por el dosel de los árboles de la huerta de Mieleras, Matamoros, Coahuila, observados del 21 de junio al 18 de julio de 2008. Valores negativos indican asimilación y positivos liberación de CO₂. Los números dentro de la figura representan el valor integrado durante el segmento del día y el de la noche.

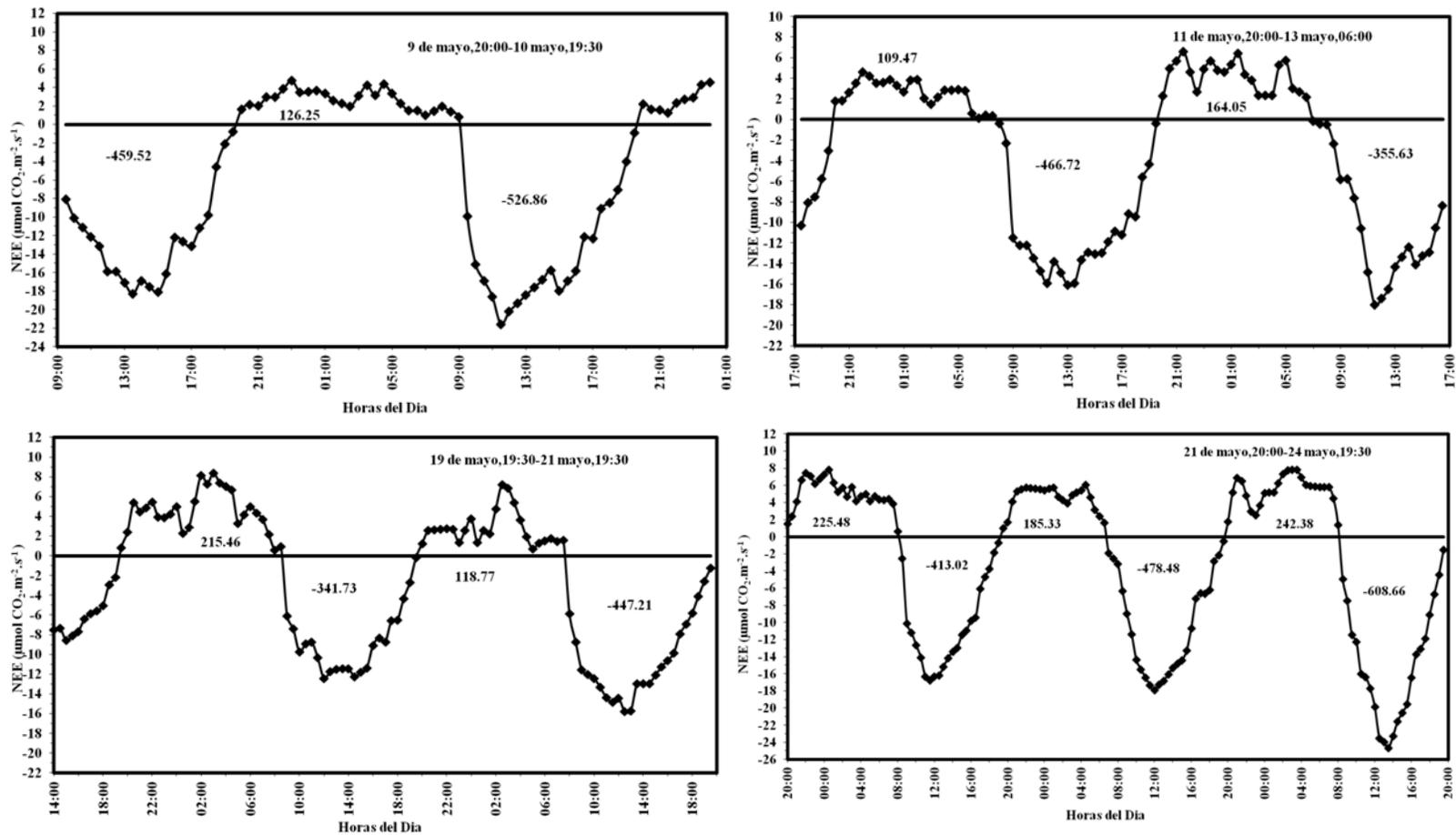


Figura 5. Tasa instantánea de intercambio neto de CO₂ por el dosel de los árboles de la huerta de Zaragoza, Coahuila, observados del 9 al 24 de mayo de 2008. Valores negativos indican asimilación y positivos liberación de CO₂. Los números dentro de la figura representan el valor integrado durante el segmento del día y el de la noche.

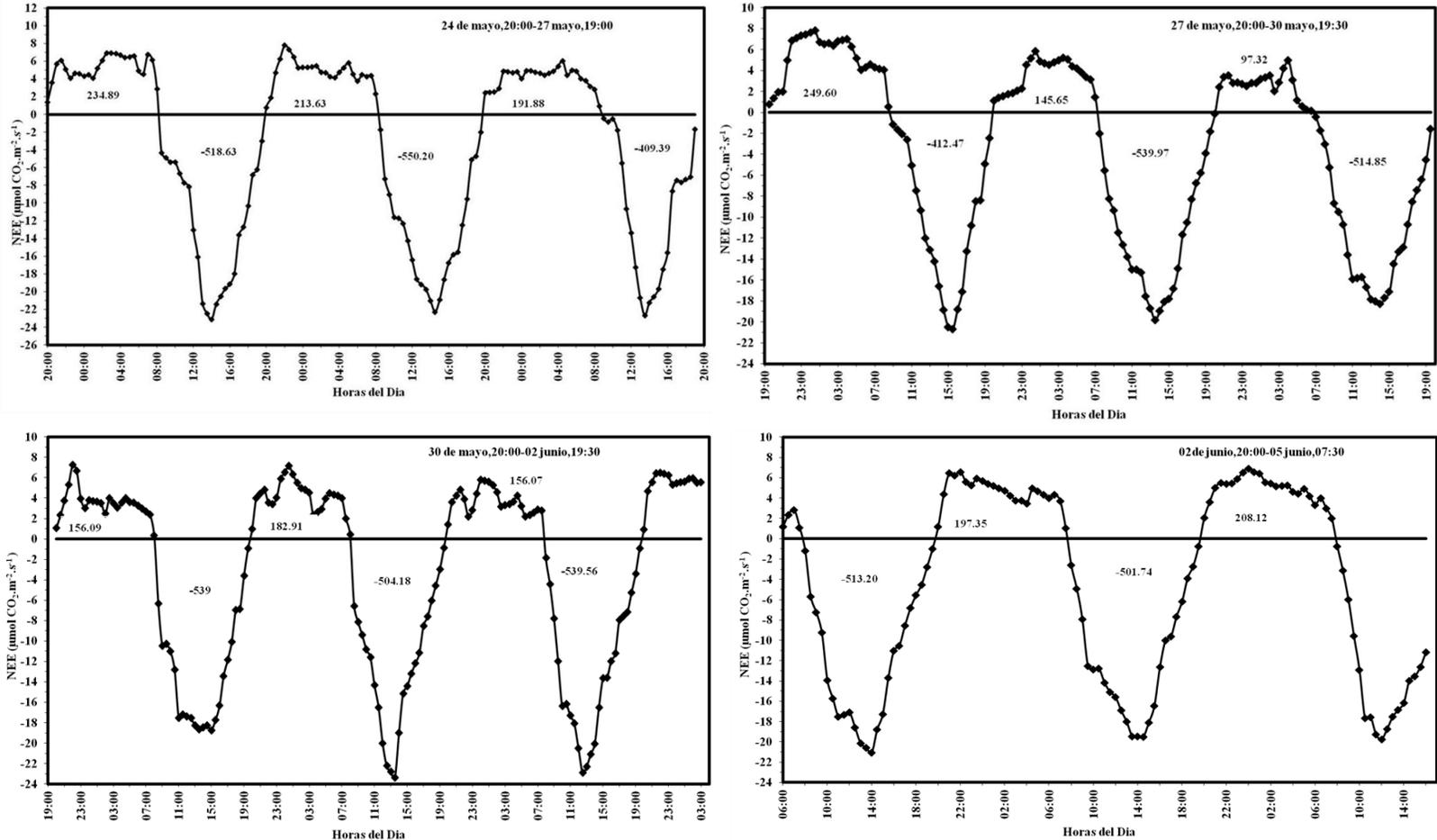


Figura 6. Tasa instantánea de intercambio neto de CO₂ por el dosel de los árboles de la huerta de Zaragoza, Coahuila, observados del 24 de mayo al 5 de junio de 2008. Valores negativos indican asimilación y positivos liberación de CO₂. Los números dentro de la figura representan el valor integrado durante el segmento del día y el de la noche.

La eficiencia de aplicación del sistema de riego por goteo subsuperficial utilizado en la huerta de Mieleras es mayor que la del sistema de riego por aspersión fijo utilizado en la huerta de Zaragoza, ya que el agua se aplica directamente a la profundidad del suelo de mayor actividad del sistema radicular de las plantas y se evita la evaporación del agua de la superficie del suelo (Romero *et al.*, 2004; Bhattarai *et al.*, 2005). Sin embargo, aunque los valores promedio diarios durante el tiempo del estudio (mayo a julio) de radiación neta (Rn) y temperatura del aire (Ta), fueron iguales en las dos localidades ($p \leq 0.05$), que resultaron en valores iguales ($p \leq 0.05$) del intercambio neto de CO₂ (NEE), el déficit de presión de vapor fue mayor ($p \leq 0.05$) en la huerta de Mieleras, que resultó en una mayor tasa de evapotranspiración promedio diaria ($p \leq 0.05$) y una menor eficiencia intrínseca del uso del agua por los árboles de la huerta de Mieleras (Cuadro 1) Estudios previos (Freedman *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2007) muestran que la eficiencia intrínseca del uso del agua de las superficies vegetales es mayor a valores bajos de déficit de presión de vapor, ya que se reduce la tasa de evapotranspiración.

Los valores de la eficiencia intrínseca del uso del agua de las dos huertas de nogal pecanero observadas en este estudio fueron igual o mayores a las reportadas para otras especies vegetales, como bosques templados de hoja caduca (1.31 mmolCO₂/molH₂O) y bosques de coníferas de clima templado (1.0 mmolCO₂/molH₂O) (Law *et al.*, 2002).

Cuadro 1. Valores promedio diarios de radiación neta (Rn), déficit de presión de vapor (Δe), temperatura del aire (Ta), intercambio neto diario de CO₂ (NEE), evapotranspiración (ET) y eficiencia intrínseca del uso del agua (EF_H₂O), observadas en una huerta de nogal pecanero en Mieleras, Matamoros, Coahuila (M) y en Zaragoza, Coahuila (Z), entre mayo y julio de 2008.

Rn		Δe		Ta		NEE		ET		E _r _H ₂ O		
Mj m ⁻²		Kpa		°C		mmol CO ₂ m ⁻²		mm		mmol CO ₂ /mol H ₂ O		
M	Z	M	Z	M	Z	M	Z	M	Z	M	Z	
15.242	11.47	3.62	1.62	31.07	28.95	421.29	550.2	5.67	3.55	1.34	2.79	
17.014	11.39	3.4	1.73	31.53	28.88	415.42	409.39	6.17	4.05	1.21	1.82	
18.212	11.61	2.94	1.73	28.59	27.92	498.09	412.47	6.18	3.88	1.45	1.91	
18.295	18.18	2.99	2.19	30.63	28.43	465.07	539.97	6.28	5.74	1.33	1.69	
17.03	17.86	2.66	2.06	29.61	28.83	446.09	514.85	5.7	5.33	1.41	1.74	
15.093	17.73	2.38	2.47	28.72	30.99	619.85	539	5.27	5.53	2.12	1.75	
16.682	18.124	2.33	2.68	28.41	31.23	521.88	504.18	5.27	5.47	1.78	1.66	
18.104	18.01	3.01	2.35	30.23	30.36	503.36	539.56	6.07	5.4	1.49	1.8	
18.431	17.83	3.02	2.61	30.17	31	470.03	513.2	6.17	5.29	1.37	1.75	
18.228	17.62	3.42	2.47	31.091	30.88	437.4	501.74	6.39	5.07	1.23	1.78	
16.014	10.519	2.61	1.75	28.75	29.28	577.39	423.26	5.73	3.56	1.81	2.14	
18.571	18.96	2.68	2.06	28.30	30.11	516.84	396.72	6.02	5.18	1.54	1.38	
16.408	14.73	2.88	1.98	29.19	29.5	499.02	450.23	5.67	4.54	1.59	1.79	
18.38	18.51	3.01	2.17	29.70	30.01	456.27	437.7	6.11	5.35	1.34	1.47	
18.673	16.916	3.03	2.25	29.80	30.37	506.25	356.2	6.35	5.31	1.44	1.21	
17.506	20.01	2.64	2.47	29.19	30.89	479.57	477.6	5.66	5.88	1.53	1.46	
15.43	20.23	1.51	2.25	25.85	30.19	246.32	527.6	4.51	5.88	0.98	1.62	
16.75	18.97	1.7	2.12	26.59	29.92	373.54	411.09	4.92	5.84	1.37	1.27	
14.27	17.25	1.72	2.55	26.56	31.77	326.05	526.23	4.35	5.22	1.35	1.81	
11.166	16.81	1.81	3.13	26.08	32.67	400.95	449.78	3.92	4.43	1.84	1.83	
19.223	16.15	2.36	2.39	27.80	29.86	324.7	462.69	5.16	5.53	1.13	1.51	
19.568	9.41	2.52	2.54	28.50	30.82	273.07	441.05	5.36	5.02	0.92	1.58	
17.395	18.68	2.54	2.35	28.26	30.22	375.56	568.51	5.08	2.98	1.33	3.44	
18.838	17.16	3.45	2.26	31.06	29.96	427.29	630.53	6.13	5.55	1.26	2.05	
17.482	16.50	2.93	2.21	29.92	29.64	460.66	642.36	5.78	5.39	1.43	2.15	
Promedio	17.12^a	16.43^a	2.69^a	2.26^b	29.02^a	30.11^a	441.68^a	489.04^a	5.6^a	5.0^b	1.42^a	1.82^b

Nota: medias con letra diferente en las columnas de la misma variable son estadísticamente diferentes, de acuerdo con la prueba de t-student ($p \leq 0.05$).

V. CONCLUSIONES

El efecto de las condiciones climáticas en la eficiencia intrínseca del uso del agua, fue mayor que el efecto de la mayor eficiencia del sistema de riego por goteo subsuperficial que el riego por aspersión. La eficiencia intrínseca del uso del agua fue mayor en la huerta de Zaragoza (riego por aspersión) que en la huerta de Mieleras (riego por goteo subsuperficial). Esto se debió a un mayor déficit de presión de vapor en la huerta de Mieleras, que resultó en una mayor tasa de evapotranspiración y una menor eficiencia intrínseca del uso del agua.

VI. LITERATURA CITADA

- Al-Omran, A.M., A.S. Sheta, A.M. Falatah and A.R Al-Harbi. 2005. Effect of drip irrigation on squash (*Cucurbita pepo*) yield and water-use efficiency in sandy calcareous soils amended with clay deposits. *Agricultural Water Management* 73: 43-55.
- Andales, A., J. Wang, T. W. Sammis, J. G. Mexal, L. J. Simmons, D. R. Miller and V. P. Gutschick. 2006. A model of pecan tree growth for the management of pruning and irrigation. *Agricultural Water Management* 84:77-88.
- Atkin O.K. M. G. and Tjoelker, 2003. Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. *TRENDS in Plant Science*. 8(7), 343-351.
- Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, U., Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, A. S., Martin, P. H., Berbigier, P., Bernhofer, C., Clement, R., Elbers, J., Granier, A., Grunwald, T., Morgenstern, K., Pilegaard, K., Rebmann, C., Snijders, W., Valentini, R., and Vesala, T. 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The euroflux methodology, *Adv. Ecol. Res.*, 30, 113–175.
- Baldocchi, D. 1994. A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C₃ (wheat) and an open C₄ (corn) crop: II. CO₂ exchange and water use efficiency. *Agriculture and forest Meteorology*. 67: 291-321.
- Baldocchi, D. D., Falge, E., Gu, L. H., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X. H., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., U, K. T. P., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., and Wofsy, S.: Fluxnet: 2001. A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 82, 2415–2434.
- Bautista, C., Chávez, C., J. González, E. Playán y.R. Salvador. 2008. La teoría balística aplicada en el riego por aspersión. 2008. *Revista Investigación Científica*, Vol. 4, No. 3, Nueva época. ISSN 1870–8196.
- Bhattarai, S. P., A. D. Mchugh, G. Lotz and D. J. Midmore. 2005. The response of cotton to subsurface drip and furrow irrigation in a vertisol. *Experimental Agriculture*. 42: 29–49.

- Blum A. 2005. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential -are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Australian Journal of Agricultural Research*. 56: 1159–1168.
- Bryla, D. R.; T. J. Trout, J. E. Ayars; R. S. Johnson. 2003. Growth and production of young peach trees irrigated by furrow, microjet, surface drip, or subsurface drip systems. *HortScience*. 38(7): 1112-1116.
- Camp, C.R., and Lamm, F.R. (2003) Irrigation systems: Subsurface drip. *Encyclopedia of Water Science* Pp: 560-564.
- Campos, J. S., L. Vázquez P., E. Olivarez S., L. M. Treviño P., O. Santos M., C. Lemus H., H. Aguila S. y J. A. Leyva R. 2005. Diagnóstico del cultivo de nogal en los Municipios de Aramberri, Bustamante, Rayones, Villaldama y Zaragoza, Nuevo León. Pp. 2-87
- Charles, M., B. Stuart, and W. Styles. 1999. Drip and micro irrigation for trees, vines and row crops. Design and management (with special sections on SDI). Irrigation Training and Research Center. California Polytechnic State University. San Luis Obispo, CA. USA. 292 p.
- Chávez-Ramírez, E., G. González-Cervantes, M. A. Velásquez-Valle, M. C. Potisek-Talavera y H. Macías-Rodríguez. 2008. Relaciones entre el manejo del agua de riego, producción de nuez y crecimiento radial en nogal pecanero. *Producción Agrícola. Agrofaz*. 8(3): 1-6.
- Foken, T. 2008. The energy balance closure problem: an overview. *Ecological Applications* 18(6):1351–1367.
- Freedman, J.M., D.R. Firzjarrald, K.E. Moore, and R.K. Sakai. 2001. Boundary layer clouds and vegetation–atmosphere feedbacks. *Journal of Climate*. 14:180–197.
- Godoy-Ávila. C. y M. I. López. 2000. Desarrollo de la almendra y germinación del fruto del nogal pecanero bajo cuatro calendarios de riego. *TERRA Latinoamericana*. 18(4): 305-311. ISSN: 0187-5779.
- Godoy-Ávila. C., J. I. Reyes, E. C. A. Torres, R. M. V. Huitrón, J. C. Chiquito y V. J. Morales 2000. Tecnología de riego en nogal pecanero. México. CELALA, CIRNOC, INIFAP. p. 1-4.
- Godoy-Ávila, C., J. I. Reyes, E.C.A. Torres. 2004. Fertiriego en cultivos anuales y perennes. Libro científico núm. 2. Campo Experimental La Laguna. CIRNOC INIFAP. 161 p.
- Godoy-Ávila., C. e I. López-Montoya. 2000a. Desarrollo de la almendra y germinación del fruto del nogal pecanero bajo cuatro calendarios de riego. *Revista Interamericana Terra*. 18(4): 305-311.
- González, C. G., C. R. López., M. J. Silveira y M. A. Lagarda. 2000. Compactación del suelo y nogal pecanero (*Cayra Illinoensis* Koch). *AGRARIA UAAAN* 16(1): 46-59. ISSN: 0186-8063.

- 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. *Agronomy Journal* 95: 1393-1403.
- Herrera, E.A. 2004. Manejo de huertas de nogal. 239-246.
- Janssens, I.A., Lankreijer, H., Matteucci, G., Kowalski, A.S., Buchmann, N., Epron, D., Pilegaard, K., Kutsch, W., Longdoz, B., Grünwald, T., Montagnani, L., Dore, S., Rebmann, C., Moors, E.J., Grelle, A., Rannik, Ü., Morgenstern, K., Oltchev, S., Clement, R., Gudmundsson, J., Minerbi, S., Berbigier, P., Ibrom, A., Moncrieff, J.B., Aubinet, M., Bernhofer, C., Jensen, N.O., Vesala, T., Granier, A., Schulze, E.-D., Lindroth, A., Dolman, A.J., Jarvis, P.G., Ceulemans, R. y Valentini, R. 2001. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology*, 7: 269 - 278.
- Kuglitsch, F. G., M. Reichstein, C. Beer, A. Carrara, R. Ceulemans, A. Granier, I. A. Janssens, B. Koestner, A. Lindroth, D. Loustau, G. Matteucci, L. Montagnani, E. J. Moors, D. Papale, K. Pilegaard, S. Rambal, C. Rebmann, E. D. Schulze, G. Seufert, H. Verbeeck, T. Vesala, M. Aubinet, C. Bernhofer, T. Foken, T. Grünwald, B. Heinesch, W. Kutsch, T. Laurila, B. Longdoz, F. Miglietta, M. J. Sanz, y R. Valentini. 2008. Characterisation of ecosystem water-use efficiency of european forests from eddy covariance measurements. *Biogeosciences Discuss.* 5: 4481–4519.
- Lagarda, M. A. 2007. Plantaciones de alta densidad en nogal pecanero. III Jornada Nacional y I Congreso internacional sobre el cultivo del pecan. Buenos Aires, Argentina.
- 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(1-4): 97-120.
- Liu, H. J. y Y. Kang. 2006. Effect of sprinkler irrigation on microclimate in the winter wheat field in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 84: 3-19.
- López-Díaz, J. C y Herrera-Aguirre, E. 2004. Comercialización de la nuez y expectativas 2004. Memorias del 8° Día del Nogalero. Chihuahua, México.
- Lorenzini, G (2002) Air temperature effect on spray evaporation in sprinkler irrigation, *Irrigation and Drainage*, 51(4), 301 – 309.
- Martens, C., T.J. Shay, H.P. Mendlovitz, D.M. Mastross, S.S Saleska, S.C. Wofsy, W.S. Woodward, M.C Menton, J.M.S. De Moura, P.M. Crill, O.L.L. De Moraes and R.L. Lima. 2004. Radon fluxes in tropical forest ecosystem of

- Brazilian Amazonia: night-time CO₂ net ecosystem exchange derived from radon and eddy covariance methods. *Global Change Biology*. 10: 618-629.
- Medina, M., M. C. y Cano R, P. 2002. Aspectos generales del nogal pecanero. In: Tecnología de producción en nogal pecanero. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental La Laguna, Matamoros, Coahuila. 222 p. Libro Técnico No. 3.
- Mendoza, M., Felipe, Inzunza I, Marco A., Román, L., Abel, Villa Castorena María Magdalena, Ernesto A. Catalán Valencia, Angel Lagarda Murrieta. Patrón de distribución de humedad óptimo en nogal con riego por microaspersión. Localización: Agrofaz: publicación semestral de investigación científica, ISSN 1665-8892, Vol. 5, N°. 1, 2005 , pags. 725-732
- Ojeda, D. L., A. Reyes, H. Ramírez, A. Lagarda, F. J. Chávez, J. X. Uvalle, R. M. Rivero y L. Romero. 2003. Uso eficiente de la fertilización nitrogenada en el cultivo del nogal pecanero. *Carya illinoensis* (Wangenh) K. Koch. ISBN :8489720983
- Orona, I.; Espinoza, J.; González, G.; Murillo, B.; García, J. L.; Santamaría, J. 2006. Aspectos técnicos y socioeconómicos de la producción de nuez (*Carya illinoensis*) en la Comarca Lagunera, México. *Agricultura Técnica en México* 32(3): 295-301.
- Phene, C J. 1999. Subsurface drip irrigation part I: Why and How?. *Irrig. J.* 49, 8-10.
- Picon, C., A Ferhi and J.M. Guehl. 1997. Concentration and $\delta^{13}C$ of leaf carbohydrates in relation to gas exchange in *Quercus robur* under elevated CO₂ and drought. *Journal of Experimental Botany*, 48(3): 1547-1556.
- Puente G. A., A. Toca U. y A. Verde O. 2002. Nuez, análisis de su rentabilidad. *Revista Claridades Agropecuaria* 107. Edición SAGARPA - ASERCA. México, D.F. pp 3-30.
- Ramírez-Hernández, B. C and E. Pimienta-Barrios .2003. Photosynthesis in Mexican plum [*Spondias purpurea* L. (Anacardiaceae)]. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 9(2): 271-277.
- Richard, G. A., L. S. Pereira, R. Dirk y M. Smith.2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Serie de Riego y Drenaje de la FAO No. 56.
- Romero, P., P. Botia & F. García. 2004b. Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on vegetative development and yield of mature almond trees. *Plant and Soil* 260: 169-181.
- Rossi, F., O. Facini, T. Georgiadis, M. Nardino. 2007. Seasonal CO₂ fluxes and energy balance in a kiwifruit orchard. *Italian Journal of Agrometeorology* 1:44-56.
- Santos, P. L., J.A. De Juan, M. R. Picornell y J. M. Tarjuelo. 2010. El riego y sus tecnologías. ISBN: 13:978-84-692-9979-1.

- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) Sistema de Información Agroalimentario de Consulta. (SIACON). 2008. México.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (SIAP). 2009. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. México.
- Tarango, H. 2004. Manejo del nogal pecanero con base en su fenología. Centro de Investigación Norte-Centro. Campo Experimental Delicias. Folleto Técnico no. 17. Mexico, 35 p.
- Tcherkez G., S. Nogués, J. Bleton, G. Cornic, F. Badeck, and J. Ghashghaie, 2003. Metabolic origin of carbon isotope composition of leaf dark-respired CO₂ in French Bean. *Plant Physiology*. 131, 237-244.
- Tolk JA, Howell TA, Steiner JL, Krieg DR & Schneider AD (1995) Role of transpiration suppression by evaporation of intercepted water in improving irrigation efficiency, *Irrigation Science*, 16(2), 89-95.
- Twine T.E., W.P. Kustas, J.M. Norman, D.R. Cook, P.R. Hourser, T. P. Meyerszz, J. H. Pruegerx, P. J. Starks, M. L. Wesleyk. 2000. Correcting eddy covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*. 103: 279-300.
- 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(1-3): 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. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 106: 85-100.
- Wilson, K., A. Goldstein, E. Falge, M. Aubinet, D. Baldocchi, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Ceulemans, H. Dolman, C. Field, A. Grelle, A. Ibrom., B. E. Law, A. Kowalski, T. Meyers, J. Moncrieff, R. Monsonn, W. Oechel, J. Tenhunen, R. Valentini and S. Verma. 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology* 113(1-4): 223-243.
- Yang, X., F. Chen., F. Gong y D. Song, 2000. Physiological and ecological characteristics of winter wheat under sprinkler irrigation condition. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.* 16 (3): 35–37.
- Yu, G., X. Song, Q. Wang, Y. Liu, D. Guan, J. Yan, X. Sun, L. Zhang and X. Wen. 2008. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables. *New Phytologist*. 177: 927–937.
- Zhao, F.H., G.R. Yu, S.G. Li, C.Y. Ren, X. M. Sun, N. Mi., J. Li and Z. Ouyang. 2007. Canopy water use efficiency of winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 93(3): 99-108.