

**POTENCIAL DE SECUESTRO DE CARBONO Y LA EFICIENCIA
INTRÍNSECA DEL USO DEL AGUA DE UNA HUERTA DE NOGAL
PECANERO DEL NORTE DE MÉXICO**

ROBERTONI VÁZQUEZ FARRERA

TESIS

**Presentada como requisito parcial
para obtener el grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA
DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

Programa de Graduados

**Buenavista, Saltillo, Coahuila.
Agosto, 2009**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIRECCIÓN DE POSTGRADO

**POTENCIAL DE SECUESTRO DE CARBONO Y LA EFICIENCIA
INTRÍNSECA DEL USO DEL AGUA DE UNA HUERTA DE NOGAL
PECANERO DEL NORTE DE MÉXICO**

POR

ROBERTONI VÁZQUEZ FARRERA

Tesis elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y aprobada como requisito parcial, para optar al 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. Martin Cadena Zapata

Asesor:

Dr. Ernesto A. Catalán Valencia

Dr. Jerónimo Landeros Flores
Director de Postgrado
Buenavista, Saltillo, Coahuila, Agosto de 2009.

AGRADECIMIENTOS

- ❖ A Dios por darme la oportunidad de existir en este mundo y con ello poder realizar mis sueños y anhelos durante este tiempo.
- ❖ A mi “Alma Terra Mater”, por brindarme los conocimientos y las herramientas necesarias para poder lograr mis metas.
- ❖ Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACYT**), por el apoyo brindado durante mi formación como Maestro en ciencias.
- ❖ Al Centro de Investigación en Química Aplicada por permitir hacer mi trabajo de Tesis en uno de sus proyectos de Investigación, del Departamento de Plásticos en la Agricultura.
- ❖ 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.
- ❖ A mis asesores que invirtieron gran parte de su valioso tiempo en la dirección y revisión de este trabajo:
 - Dr. Alejandro Zermeño González.
 - Dr. Juan Munguía López.
 - Dr. Martin Cadena Zapata.
 - Dr. Ernesto Catalán Valencia.

- al Ingeniero Felipe Hernández Castillo y al M.C Eduardo Alfonso Treviño López, por sus valiosos apoyos que me brindaron durante la instrumentación del experimento de campo.

DEDICATORIA

- ❖ A mi madre y mi hermana:
Sr. Hermelinda Farrera Álvarez y Martha Vázquez Farrera.
Por ser las dos mujeres que me han guiado por el camino del bien durante mi proceso de formación como profesional.

- ❖ A mis hermanos Beltrán y Antonia:
Que me han acompañado en los buenos y malos ratos de mi vida.

- ❖ A Lindy (mi princesa):
Por ser mi mejor compañera y por los momentos felices que me ha dado durante este tiempo.

- ❖ A mis compañeros y amigos:
Audberto, Sasirot y Sandino, por ser mis amigos y saber que en un futuro podemos echarnos la mano tanto en lo profesional como en lo personal.

La ciencia tiene una característica maravillosa, y es que aprende de sus errores, que utiliza sus equivocaciones para reexaminar los problemas y volver a intentar resolverlos, cada vez por nuevos caminos. **Ruy Pérez Tamayo. Científico mexicano.**

COMPENDIO

Potencial de Secuestro de Carbono y la Eficiencia Intrínseca del Uso del Agua de una Huerta de Nogal Pecanero del Norte de México.

POR

ROBERTONI VÁZQUEZ FARRERA

MAESTRÍA

INGENIERIA DE SISTEMAS DE PRODUCCION

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

Buenavista, Saltillo, Coahuila. Agosto 2009

Dr. Alejandro Zermeño González – Asesor

Palabras clave: Nogal Pecanero, Secuestro de carbono, eficiencia del uso del agua, covarianza eddy.

Se utilizó el método de la covarianza eddy para realizar mediciones de flujo de calor sensible, calor latente y flujo de bióxido de carbono (CO₂) sobre el dosel de una huerta de nogal pecanero del Norte de México. También se obtuvo la radiación neta, flujo de calor en la superficie del suelo y la energía almacenada

en la capa de aire y vegetación (de la superficie a la altura promedio de los árboles). Con esta información se obtuvo el balance de energía sobre el dosel de los árboles, la lámina de agua diaria evapotranspirada, el intercambio neto de bióxido de carbono entre el ecosistema (suelo – vegetación) de la huerta de nogal (NEE) y la eficiencia intrínseca del uso del agua por el ecosistema vegetal. Los resultados de la investigación indicaron que La huerta de nogal evaluada mostró un alto potencia de secuestro de carbono, ya que la asimilación de CO₂ por el ecosistema (NEE durante el día) fue aproximadamente 3 veces mayor que la liberación (NEE durante la noche). El valor de la retención promedio diaria (mayo a julio) de CO₂ se obtuvo por la diferencia entre el NEE durante el día y el NEE durante la noche, y fue de -303.51 mmol CO₂ m². Esto correspondió a 36.4 kg C ha⁻¹ d⁻¹ y considerando que el ciclo de mayor crecimiento es de mayo a septiembre (150 días), se tendría una retención de 5.46 t C ha⁻¹ por ciclo de crecimiento. Este valor mostró la alta capacidad de secuestro de carbono que tiene este ecosistema, ya que fue aproximadamente igual a la tasa de retención de carbono de un bosque boreal (39 kg C ha⁻¹ d⁻¹), pero mucho mayor que el reportado para un bosque de abeto negro (0.21 t C ha⁻¹ a⁻¹), ambos en Canada. La mayor retención de carbono del ecosistema se relacionó más con valores menores de respiración nocturna, que con valores altos de asimilación integrada durante el día. La tasa de respiración nocturna estuvo linealmente relacionada con el incremento de la temperatura foliar.

La eficiencia intrínseca del uso del agua (EUA) por el ecosistema fue de aproximadamente 2 mmolCO₂ molH₂O⁻¹ valor mayor que el observado en un

bosque caducifolio (0.6135) y el de una sabana abierta (0.920), pero menor que el observado en un cultivo de cobertura completa. Para el rango de valores de evapotranspiración registrados en este estudio, se observó una relación lineal decreciente entre EUA y la lámina de agua evapotranspirada.

ABSTRACT

Carbon Sequestration Potential and the Intrinsic Water Use efficiency of a Pecan Nut Orchard of Northern Mexico.

**BY
ROBERTONI VAZQUEZ-FARRERA**

**MASTER OF SCIENCE
IN
PRODUCTION SYSTEMS ENGINEERING
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

Buenavista, Saltillo, Coahuila. August 2009

Dr. Alejandro Zermeño González – Advisor

Key words: Pecan nut, carbon sequestration, water use efficiency, eddy covariance.

The eddy covariance method was used to make flux measurements of sensible and latent heat flux and carbon dioxide flux (CO₂) above the canopy of an orchard of pecan nut of Northern Mexico. Net radiation, soil heat flux and the energy stored in the layer of air and vegetation (from the surface to the canopy

height) was also measured. With this information, the energy balance above the canopy, the daily depth of water evapotranspired, the carbon dioxide net ecosystem exchange (NEE) and the intrinsic water use efficiency by the ecosystem was obtained. The results of this study showed that the pecan nut orchard evaluated had a high potential of carbon sequestration, since the assimilation of CO₂ by the ecosystem (NEE at daytime) was approximately 3 times bigger than the release (NEE at nighttime). The average value of the daily carbon retention by the ecosystem was obtained by the difference between NEE during daytime and NEE during nighttime and was of 303.51 mmolCO₂ m². This corresponded to 36.4 kg C ha⁻¹ d⁻¹, considering that the stage of main growth is from May to September (150 days) it was equivalent to 5.46 t C ha⁻¹ per stage of growth. This value showed the potential of carbon sequestration of this ecosystem, since it was approximately equal to the rate of carbon retention of a boreal forest (39 kg C ha⁻¹ d⁻¹), but much higher than the one reported for a boreal black spruce forest (0.21 t C ha⁻¹ a⁻¹) both from Canada. The highest carbon retention by the ecosystem was more related with small values of dark respiration than with high values of carbon assimilation during daytime. The rate of dark respiration was linearly related with the increase of leaf temperature.

The intrinsic water use efficiency (WUE) by the ecosystem was approximately 2 mmolCO₂ molH₂O⁻¹, this value was higher than the one observed in a deciduous forest (0.6135) and open savanna (0.920), but smaller than the one

observed in a crop of full cover. For the range of values of evapotranspiration registered in this study, a decreasing lineal relation between WUE and depth of water evapotranspirated was observed.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CONTENIDO	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE CUADROS	xvi
I. INTRODUCCIÓN	1
Objetivo	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Características del Nogal	4
Orígenes	4
Manejo Agronómico del Cultivo.....	5
Poda selectiva de ramas.....	5
Poda de producción.	5
Fertilización.....	5
Riego	6
Producción mundial y en México de Nuez Pecanera.	6
Importancia del secuestro de carbono por los Ecosistemas Vegetales.....	9
Secuestro y/o tasa de asimilación de bióxido de carbono por diferentes tipos de vegetación.	11
Intercambio neto de Bióxido de carbono de los Ecosistemas (NEE).....	12
Eficiencia intrínseca del uso del agua por diferentes tipos de vegetación.....	14

Descripción del método de la Covarianza eddy	15
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
Ubicación y características del sitio de estudio	18
Manejo agronómico de la huerta	19
Instrumentación y Mediciones	19
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
Dinámica del flujo de Bióxido de Carbono.....	25
Eficiencia intrínseca del uso del agua de la huerta.	29
Potencial de secuestro de Carbono de la huerta de nogal.....	31
V. CONCLUSIONES.....	35
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Núm. Figura	Páginas
Figura 3. 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.	22
Figura 4. 1. Tasa de asimilación neta (NEE) del sistema suelo-vegetación, de una huerta de nogal pecanero para varios ciclos día-noche del 9 al 24 de mayo de 2008, en Zaragoza, Coahuila, México.	27
Figura 4. 2. Tasa de asimilación neta (NEE) del sistema suelo-vegetación, de una huerta de nogal pecanero para varios ciclos día-noche del 24 de mayo al 5 de junio de 2008, en Zaragoza, Coahuila, México.	28
Figura 4. 3. Relación entre la eficiencia intrínseca del uso del agua (EUA) y la lámina de agua evapotranspirada (ET), observada del 9 de mayo al 5 de junio en una huerta de nogal.	30
Figura 4. 4. Relación entre la eficiencia intrínseca del uso del agua (EUA) y la lámina de agua evapotranspirada (ET), observada del 5 de junio al 6 de julio en una huerta de nogal.	30

Figura 4. 5. Relación entre la tasa de respiración nocturna
(RespNoct) y la temperatura promedio de la hoja (T_h , °C) de una huerta
de nogal pecanero en Zaragoza, Coahuila, México.....34

ÍNDICE DE CUADROS

Num. Cuadro	Páginas
Cuadro 2.1. Estadísticas de nogal en México.....	9
Cuadro 4.1. Intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) de una huerta de nogal en Zaragoza, Coahuila, y la relación día/noche de NEE del 9 de mayo al 5 de junio, 2008.....	33

I. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas vegetales tienen la capacidad de asimilar el carbono (por medio de la fotosíntesis) e incorporarlo a su estructura, es decir, lo fijan y lo pueden mantener almacenado por largos periodos de tiempo. De tal forma que grandes comunidades de árboles (bosques y huertas) son importantes sumideros de carbono (Benjamin y Masera, 2001). La fijación o secuestro del CO₂ atmosférico por parte de los ecosistemas vegetales terrestres constituye un componente muy importante en el balance global del carbono en el planeta (González-Alonso *et al.*, 2004).

El nogal pecanero es un frutal (fruta seca) 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 %). La superficie de nogal sembrada en México aumento de 48 mil en 1980 a 83 mil ha en 2009 (72.9%) (SAGARPA-SIAP, 2009). El estado de Coahuila tiene una superficie de 14 mil ha, que corresponde al 16.9% de la superficie total nacional.

El árbol de nogal pecanero, es un árbol caducifolio, vigoroso de gran porte que puede llegar a medir de 15 a 20 metros de altura (Núñez, 2001). Los árboles de nogal pecanero inician su producción entre los 6 y 10 años de edad

y continúan produciendo comercialmente durante más de 50 años (Puente *et al.*, 2002).

Debido a estas características, las huertas de nogal pueden ser un ecosistema importante de retención de bióxido de carbono (CO₂) atmosférico. Por ejemplo, en una huerta de nogal pecanero de 15 años, la producción de biomasa debido al crecimiento del tronco, ramas, raíces, hojas y frutos puede ser de hasta 179 kg árbol⁻¹ año⁻¹ (Mexal *et al.*, 2003). Por cada kg de biomasa formado se remueven de la atmósfera 1.467 kg de CO₂. Si consideramos que únicamente el 43% del CO₂ asimilado es retenido por el árbol (Mexal *et al.*, 2003), esto correspondería a un secuestro de 128.63 kg de CO₂ árbol⁻¹ año⁻¹, o 1.54 t ha⁻¹año⁻¹

Aunque pocos estudios se han realizado para determinar la tasa de asimilación neta de CO₂ por el dosel de huertas de nogal, se han observados valores de hasta 30 μmol m⁻² s⁻¹ (Wang *et al.*, 2007). En mediciones de tasas de asimilación de CO₂ en hojas de nogal, se han observado valores de 23 μmol m⁻² s⁻¹ (Rosati *et al.*, 2006). Estos valores de fijación neta de CO₂ observados en nogal, son igual o mayores que los observados (15 μmol m⁻² s⁻¹) sobre el dosel de un bosque boreal de coníferas (Kellomäki y Wang, 2000). Similarmente, Ueyama *et al.* (2006) observaron valores de 22 μmol m⁻² s⁻¹ en un bosque subártico de abeto negro americano. Esto sugiere que las huertas de nogal pecanero pueden tener una importante contribución en la fijación y retención del CO₂ atmosférico

Objetivo

Analizar el potencial de secuestro de carbono de una huerta de nogal pecanero del norte de México y evaluar la eficiencia intrínseca del uso del agua del ecosistema vegetal.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Características del Nogal

Orígenes

La historia de la nuez pecanera está relacionada con la historia de los indígenas del norte de México y del sur de los Estados Unidos. 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)

La nuez pecanera, conocida también como nuez encarcelada es una especie nativa de México y de los Estados Unidos, con ambos países dominando la producción mundial, e integrando una economía “bilateral de la nuez” estrechamente vinculada a través de los precios (Puente *et al.*, 2002).

El nogal pecanero, pertenece a la familia Juglandaceae que comprende plantas arbóreas que producen una drupa, es un árbol que puede superar los 30 metros de altura, muy vigoroso y longevo, que inicia su producción de los 6 a los 10 años de edad y continúa produciendo comercialmente durante más de 50 años (Puente *et al.*, 2002).

Manejo Agronómico del Cultivo.

Poda selectiva de ramas

La poda selectiva de ramas en árboles adultos es necesaria para mantener un equilibrio entre la cantidad de nueces y el follaje, para así tener una producción y calidad aceptable. El desarrollo de brotes se observa principalmente en la parte apical de las ramas, situación que limita la formación de estos para una mayor producción. (Arreola *et al.*, 2002).

Poda de producción.

En huertas adultas, esta poda tiene por objetivo renovar la copa de los árboles en un periodo de 5 años aproximadamente. Con esto se evita tener una disminución repentina en el rendimiento, por eliminación excesiva de madera. Esta práctica induce la formación de follaje denso en la periferia del árbol, provocando un sombreado notable en el interior de la copa algunos años después de efectuarla (Arreola *et al.*, 2002)

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. Estos nutrimentos son indispensables para el desarrollo del nogal y se clasifican en función de la cantidad en que

son requeridos. Así se tienen los macronutrientes que son los elementos que las plantas consumen en mayor cantidad y los micronutrientes que son los que utiliza en cantidades pequeñas pero no por ello son menos importantes. Los macronutrientes son: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre. Los micronutrientes son: zinc, manganeso, hierro, boro, cobre, cloro y molibdeno (Chavez *et al.*, 2002)

Riego

En las zonas productoras de nuez, el factor más importante para la producción de este frutal es el agua, este recurso no solo influye en las fases de crecimiento y desarrollo del fruto sino en todo su ciclo, incluyendo la dormancia. El nivel de disponibilidad de agua, junto con el nivel de nutrimento, afecta la cantidad y calidad de la almendra durante el año y el potencial para una buena cosecha en los siguientes años. En una huerta que cuente con 70 árboles ha^{-1} , con un diámetro de tronco de 7 cm su consumo de agua anual puede ser de 212 mm aproximadamente; mientras que otra huerta con el mismo número de árboles, pero con diámetro de tronco de 50 cm, su consumo de agua anual podría ser de 1429 mm (Godoy *et al.*, 2000)

Producción mundial y en México de Nuez Pecanera.

La producción mundial de nuez pecanera [*Carya Illinoensis* (Wangenh) K. Koch] se estima en alrededor de 210,000 toneladas anuales. Los principales productores son Estados Unidos (72 %) y México (25 %). Otros productores a

baja escala son Australia, Sudáfrica, Israel, Brasil, Argentina, Perú y Egipto (Puente *et al.*, 2002)

En México la producción de nuez promedio en condiciones de riego del año 2000-2007, se estima en aproximadamente $1.41 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, con una superficie sembrada con sistema de riego en el año 2007 de 75,332.94ha y una producción de aproximadamente 77,822.09 t. De temporal la producción de nuez se estima $0.85 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ y la superficie sembrada de temporal en el 2007 fue 2,249.05ha con una producción de 1,339.46 t (SAGARPA-SIAP, 2009).

México se caracteriza por contar con una de las principales zonas de producción de nuez pecanera en el mundo el área total de árboles de nuez plantados en México se estima en 80,000 hectáreas, la producción se estima en 90,300 toneladas, las exportaciones están estimadas en 50,000 toneladas (USDA, 2008). En el ámbito nacional, La Comisión Nacional de Fruticultura, reportó en 1980 la existencia de 48 mil hectáreas plantadas de nogal, de las cuales aproximadamente 10 mil correspondían a nogales nativos y criollos. Para 1996, había 59,695 hectáreas de nogal pacanero plantadas en México, de las cuales 34,495 eran del estado de Chihuahua; que representa el 58% de la superficie nacional; 12,500 de Coahuila, 6,200 de Nuevo León, 3,300 de Durango y 3,200 de Sonora, aproximadamente. Para 1999, Chihuahua tenía 35,135 hectáreas; por lo tanto son un total de 60,335 hectáreas de nogal plantadas en México. En menor importancia en superficie de nogal están Hidalgo, San Luis Potosí,

Aguascalientes, Guanajuato, Jalisco, Oaxaca, Baja California Norte, Puebla, Querétaro, Sinaloa, Tamaulipas y Zacatecas (Medina y Cano, 2002)

En México la producción de nuez pecanera ha registrado un crecimiento paulatino, al pasar de 57 mil 873 toneladas en el 2000 a 68 mil 222 en el 2005. Este producto se cultiva principalmente en los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León y Sonora. Estados Unidos es el mayor productor de nuez pecanera en el mundo, seguido por México. Entre ambos países producen entre el 90 y 95 por ciento de la nuez pecanera del mundo, debido al gran porcentaje de participación en la producción mundial y a la constante investigación y desarrollo de tecnologías aplicadas a la nuez (SAGARPA, 2006)

Cuadro 2.1. Estadísticas de nogal en México

Estado	Superficie (ha)			Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)
	Sembrada	Cosechada	Siniestrada	Obtenida	Obtenido
Aguascalientes	152	148	-	219	1.48
Baja California	20	-	-	-	-
Coahuila	12,603	11,202	35	9,029	0.806
Chihuahua	48,535	29,080	102	43,924	1.51
Durango	4,287	3,586	199	2,775	0.774
Guanajuato	86	86		57	0.66
Hidalgo	1,010	623		2,277	3.656
Jalisco	203	197		709	3.599
Morelos	14	14		42	3
Nuevo Leon	3,984	3,839		1,362	0.355
San Luis Potosi	111	110		518	4.709
Sonora	7,368	6,572	14	6,896	1.049
Tamaulipas	98	64		76	1.186
Zacatecas	35	13	6	17	1.361
TOTAL	78,506	55,533	356	67,900	1.223
Region Lagunera	6,264	6,029	234	4,208	0.698
Laguna Coahuila	3,549	3,513	35	2,424	0.69
Laguna Durango	2,715	2,516	199	1,784	0.709

(SAGARPA-SIAP, 2008)

Importancia del secuestro de carbono por los Ecosistemas Vegetales

La estimación y predicción de la absorción de dióxido de carbono por los ecosistemas representa un desafío crítico en la cuantificación del ciclo del carbono. La comunidad científica ha dedicado mucho tiempo y recursos para determinar el balance global de carbono en el contexto del cambio climático (Ciais *et al.* 2005; Boisvenue y Running 2006; Schulze, 2006)

Una forma de mitigar el efecto invernadero del CO₂, además de reducir las emisiones, es almacenarlo el mayor tiempo posible en la biomasa y el suelo. Los bosques son el principal sumidero de CO₂ (López, 1998).

La biosfera terrestre desempeña un papel importante en el ciclo global del carbono (C). Aunque una fuente neta de C, son los ecosistemas terrestres que mantienen acumulando C, los bosques, sistemas agronómicos y el desierto parecen una opción factible para mantener o aumentar el almacenamiento de C. Los ecosistemas forestales pueden ser utilizados a nivel mundial para secuestrar y almacenar grandes cantidades de C. Los agroecosistemas y las tierras áridas pueden ser utilizados para la conservación del C existente en la tierra, pero la tasa de captura de CO₂ por la vegetación en estos sistemas es relativamente bajo (Wisniewski *et al.*, 1993)

Los sistemas forestales, agroforestales y silvopastoriles del trópico, pueden tener una importante contribución en la mitigación de los gases de efecto invernadero, principalmente el CO₂, debido a que presentan crecimiento continuo durante todo el año, lo que se traduce en tasas de acumulación de biomasa y carbono superiores a los obtenidos en zonas templadas. La inclusión de especies nativas tropicales en proyectos que busquen la venta de servicios ambientales requiere de un mayor conocimiento básico de su capacidad fotosintética y cómo dicha eficiencia se traduce en mayores incrementos de su biomasa (López *et al.*, 2001)

En sistemas agroforestales, el componente más importante de la biomasa arriba del suelo es el de los árboles. El 68% del carbono fijado proviene de los árboles de sombra debido al volumen de celulosa que contienen. También se ha observado que la mayor fijación de carbono tiene una relación directa con las regiones, debido a las condiciones climáticas (Alvarado *et al.*, 1999).

López *et al.* (2001) menciona que el potencial que representa el uso de especies forestales como mecanismo para la regulación del incremento en la concentración ambiental de CO₂ amerita que se lleven a cabo investigaciones básicas orientadas hacia el conocimiento de su ecofisiología y a la identificación de aquellas con mayor capacidad para la captura de carbono (fotosíntesis) para incorporarlas en sistemas de producción que permitan no solo hacer un uso más eficiente de la tierra sino también disminuir la contaminación ambiental.

Secuestro y/o tasa de asimilación de bióxido de carbono por diferentes tipos de vegetación.

Kellomäki y Wang (2000) realizaron un estudio en un bosque Boreal de pino (*Pinus sylvestris*) en el este de Finlandia, a finales de la estación de crecimiento de 1998, utilizando el método de covarianza eddy realizando mediciones cada 30 minutos, en la que obtuvieron la tasa media de fijación de CO₂ durante el día fue de 5.76 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ y la máxima de 15 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ y durante la noche la tasa media de liberación de CO₂ fue de 2.2 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ y la máxima 4.8

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, la máxima captura de CO_2 fue de $7.3 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ en los inicios de la mañana y $3.6 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ liberados durante la noche.

Wang *et al.* (2007) realizaron un estudio en Mesilla valle de Nuevo México durante el periodo 2002-2005, en árboles de nogal pecanero, utilizando el método de la covarianza eddy, durante los ciclos de crecimiento (mayo a noviembre), y con ello medir los componentes del balance de energía sin considerar los términos menores. Por temporada obtuvieron una ET promedio de 122.7 cm, la media de producción de materia seca para los árboles de nogal pecanero fue de $22\ 082.3 \text{ Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, el promedio de la eficiencia del uso del agua para los árboles fue $179.7 \text{ Kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ en el año de alto rendimiento el 13.8% de la materia seca producida fue asignado a la cosecha de nueces, mientras que el año de bajo rendimiento solo 0.8% fue asignado. También midió la asimilación y liberación del CO_2 y obtuvo hasta $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ de CO_2 asimilado, y una tasa promedio de CO_2 liberado no mayor de $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Intercambio neto de Bióxido de carbono de los Ecosistemas (NEE).

Curtis *et al.* (2002) utilizando el método de covarianza eddy, realizaron un estudio en bosques caducifolios para medir el NEE en diferentes años y 5 lugares, Walker Branch en el este de Tennessee durante el año 1995 (WB), Morgan Monroe en el centro-sur de Indiana durante el año 1997 (MMSF), Bosque de Harvard en la parte norte-central de Massachusetts durante el año 1990 (HF),

en la estación biológica de la universidad de Michigan en el norte de Michigan en el año 1998 (UMBS) y Willow Creek en la parte norte-centro de Wisconsin en el año 1998 (WC) en la que obtuvieron los siguientes resultados de NEE, WB $5.77 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, MMSF $2.36 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, HF $2.00 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, UMBS $1.67 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y WC $2.20 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Li *et al.* (2005) utilizando en método de covarianza eddy realizaron un estudio para medir la NEE en una estepa típica del centro de Mongolia, cuya especie predominante eran plantas C3 en la que obtuvieron valores de NEE de $4.1 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Jaksic *et al.* (2006) realizaron un estudio en el suroeste de Irlanda durante dos años (2002-2003), en un pastizal templado de especie *Lolium perenne* L., en la que reportan un valor promedio de NEE para el año 2002 de 1.93 t C ha^{-1} y 2.58 t C ha^{-1} para el año 2003, también mencionan que el valor promedio más alto reportado se debe a que durante el año 2003 estuvo más húmedo en comparación con el año 2002.

Wilson *et al.* (2001) midieron el NEE en un bosque mixto de Oak Ridge, Tennessee, EE.UU. utilizando el método de covarianza eddy en la que reportan que la máxima tasa de intercambio neto de CO_2 del ecosistema fue de $3.21 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Eficiencia intrínseca del uso del agua por diferentes tipos de vegetación.

La eficiencia intrínseca del uso de agua se define como la relación entre el flujo de bióxido de carbono asimilado y el vapor de agua evapotranspirado por una superficie vegetal (FCO_2/FH_2O). Baldocchi (1994) reporto valores de eficiencia intrínseca del uso del agua ($4.45 \text{ mmolCO}_2 \text{ molH}_2\text{O}^{-1}$) para un cultivo de trigo y uno de maíz.

López *et al.* (2001) mencionan que al realizar un estudio en Chinchiná, Colombia en especies que sirven como sombra en cafetales, observaron que Bertol (*T. rosea*) fue la especie que presentó la mayor incorporación neta de CO_2 por unidad de agua transpirada ($5.2 \text{ mmolCO}_2 \text{ molH}_2\text{O}^{-1}$) seguida de Meliaceae (*C. odorata*), Capa prieto ó laurel (*C. alliodora*), Taruma o Pechiche (*V. cymosa*) y Catarina Cherry (*P. integrifolia*) con valores de 5.1, 4.0, 4.3 y 3.5 $\text{mmolCO}_2 \text{ molH}_2\text{O}^{-1}$ respectivamente. Al estimar la cantidad de H_2O requerida para la producir 1g de biomasa se encontró que *T. rosea* consumió menos agua (117.7 g) seguida de *C. odorata*, *C. alliodora*, *V. cymosa* y *P. integrifolia* con gastos de 119.3, 138.3, 144.3 y 177.8g de agua respectivamente. Desde el punto de vista de captura de carbono, *C. odorata* y *C. alliodora* fueron las que mayor tasa de asimilación de CO_2 presentaron.

Hastings *et al.* (2005) mencionan que realizaron un estudio en Baja California sur, México, durante tres años, en especies comunes de arbustos del desierto de esta región, en la que reportan valores máximos de eficiencia en el uso del

agua de $3.45 \text{ mmolCO}_2 \text{ molH}_2\text{O}^{-1}$ para el año 2001, $2.25 \text{ mmolCO}_2 \text{ molH}_2\text{O}^{-1}$ en el año 2002 y $2.64 \text{ mmolCO}_2 \text{ molH}_2\text{O}^{-1}$ en el año 2003, además hacen mención que los valores máximos obtenidos en la eficiencia del uso del agua se debió a que en esos años hubo mayor precipitación.

Bota *et al.* (2001) realizaron un estudio la isla de Mallorca, España, en 20 genotipos de uva y encontraron la mayor eficiencia en el uso del agua de $0.073 \text{ mmolCO}_2 \text{ molH}_2\text{O}^{-1}$ en la variedad Calop Blanc.

Descripción del método de la Covarianza eddy

Los métodos micrometeorológicos, junto con la información fisiológica, proveen uno de los mejores medios para examinar el proceso de la interacción del cultivo y su ambiente (Baldocchi y Vogel, 1997).

Baldocchi (2003) menciona que la importancia de la técnica eddy covariance radica fundamentalmente en la posibilidad de medir directamente flujos reales de un compuesto sin causar perturbación en el ecosistema.

El flujo de materia (vapor de agua, CO_2 , etc.), momento o energía (calor) transferido entre la atmósfera y una superficie debe atravesar una capa turbulenta de la atmósfera. Dentro de esta capa, los intercambios se producen a través de flujos turbulentos. Matemáticamente, los intercambios turbulentos de momento, calor, humedad y CO_2 se definen por las covarianzas de las cantidades respec-

tivas (inercia, temperatura, concentración de vapor de agua y de CO₂) con el viento (Baldocchi, 2003)

El método de covarianza eddy consiste en medir directamente la componente vertical instantánea de la velocidad del viento mediante un anemómetro tridimensional, simultáneamente se miden concentraciones instantáneas de vapor de agua, bióxido de carbono u cualquier otro gas (De Santa *et al.*, 2005)

Baldocchi (2003) menciona que el método de covarianza eddy es el más exacto cuando las condiciones atmosféricas (lluvia, temperatura, humedad y CO₂) son contantes y es fundamental en vegetaciones homogéneas y el sistema se coloca en medio del terreno durante largos periodos de tiempo y direcciones de viento favorables. Cuando esta técnica se aplica a sistemas de vegetación más complejos o en condiciones atmosféricas que varían con el tiempo, la cuantificación del intercambio de CO₂ entre la biosfera y la atmosfera debe incluir las mediciones atmosféricas de almacenamiento, el flujo de la divergencia y de advección.

La covarianza eddy es una técnica bastante eficaz y fiable para la cuantificación de los intercambios de energía (flujo de calor sensible, inercia) y de materia tales como: vapor de agua, CO₂, aerosoles, etc. (Serrano-Ortiz *et al.*, 2006)

Los flujos superficiales (H, LE) se pueden determinar por varios enfoques. A diferencia del método aerodinámico y el de la relación Bowen, la cova-

rianza eddy es un método directo para medir los flujos superficiales, sin la necesidad de asumir coeficientes de similitud, ni condiciones de estabilidad atmosférica (Kanemasu *et al.*, 1979).

Los términos del balance de energía LE, H y FCO₂ se pueden medir mediante el método de covarianza eddy, que consiste en medir directamente la componente vertical instantánea de la velocidad del viento mediante un anemómetro tridimensional y simultáneamente se mide concentraciones instantáneas de vapor de agua (De Santa *et al.*, 2005; Castillo 2001; Serrano-Ortiz *et al.*, 2006; Launiainen *et al.*, 2005)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y características del sitio de estudio

El trabajo se realizó en el verano 2008, 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 m.

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 15m 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.

Manejo agronómico de la huerta

En enero de 2008 se realizó a la huerta una poda de formación y aclareo. Los árboles de la huerta se regaron 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 cuatro litros de Zn al 17% y cuatro 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 2008. El manejo fitosanitario, se dio únicamente para el control del gusano barrenador de la nuez. Para esto, durante el 2008, se realizaron cuatro aplicaciones de pesticidas (dosis por ha) de la siguiente forma: el 12 de mayo, se aplicaron cinco litros de endosulfan y 1.2 litros de prozan; el 28 de mayo, se aplicaron cuatro litros de clover (cloropirifos etil); el 6 de junio dos litros de malatión 100 y dos kg de promil (venomila); y el 28 de julio dos litros de clover y 1.2 litros de prozan.

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 la superficie vegetal de la huerta de nogal, 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 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 (FCO_2) se realizaron de acuerdo con el método de la covarianza eddy utilizando las siguientes relaciones (Ham y Heilman, 2003)

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

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

$$\text{FCO}_2 = \overline{w' \rho_{\text{CO}_2}'} \quad (4)$$

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. Los productos $w' \rho_{\text{CO}_2}'$, $w' \rho_{\text{wv}}'$, $w' T_s'$ representa las covarianzas 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 valor medio del producto de las desviaciones en un determinado segmento de tiempo. 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_{co2} con un analizador de bióxido de carbono y vapor de agua de sendero abierto (open path CO_2 H_2O^{-1} 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, y los sensores se instalaron apuntando 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 $\pm 90^\circ$ 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). Posteriormente los flujos de H y LE se corrigieron para cerrar el balance de energía, considerando que con el método de la covarianza eddy se obtienen una buena determinación de la relación Bowen (H/LE). El flujo de CO_2 se corrigió con el mismo factor (Ham y Heilman, 2003). 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 3. 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 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 húmedo y sombra 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 energía almacenada en la capa (S), es el resultado de los cambios de temperatura del aire en la capa (Sa), cambios de temperatura de la vegetación en la capa (Sv) y cambios en la humedad específica del aire en la capa (Sq), que se determinó con la siguiente relación:

$$S = \int_0^z (\rho_a C_p \frac{\partial T_a}{\partial t}) dz + \int_0^z (m C_w \frac{\partial T_v}{\partial t}) dz + \int_0^z (\rho_a \lambda \frac{\partial q}{\partial t}) dz \quad (5)$$

Donde: ρ_a y C_p son la densidad y capacidad calorífica del aire, T_a es la temperatura del aire, t es tiempo, z es profundidad, m es la relación de kg de agua por m^3 de vegetación, C_w es la capacidad calorífica del agua, T_v = temperatura de la vegetación, λ es el calor de vaporización del agua y q es la humedad específica del aire. La temperatura del aire y la humedad específica se obtuvieron a 4 y 8 m de altura (1/3 y 2/3 de la altura de los árboles) con un sensor de temperatura y humedad (HP45C, Vaisala, Inc) colocado en cada elevación. El segundo término de la Ec. 5 se determinó midiendo la temperatura del follaje a las mismas elevaciones a las que se midió la temperatura del aire, utilizando dos termómetros infra-rojo, y considerando un contenido de 2 kg de agua del follaje por m^2 de superficie de suelo. Las mediciones de T_a , T_v y q se realizaron a una frecuencia de un segundo y promedios de 30 min.

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 (Martens *et al.*, 2004):

$$NEE = FCO_2 + \frac{\Delta\rho_{CO_2}}{\Delta t} * \Delta z \quad (6)$$

Donde: FCO_2 , es el flujo de bióxido de carbono medido con el método de la covarianza Eddy (negativo hacia la superficie vegetal), $\Delta\rho_{CO_2}$ es el cambio en la densidad del CO_2 medido a la misma altura a la que se midió el flujo de CO_2 , Δt es el intervalo de tiempo (30 min) y Δz es la altura a la que se realizaron las mediciones (14 m). La retención 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.

La eficiencia intrínseca del uso del agua (EUA) 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 en el mismo intervalo de tiempo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dinámica del flujo de Bióxido de Carbono

Entre el 9 y el 24 de mayo de 2008, la tasa promedio máxima de intercambio neto de CO₂ (NEE) durante el día, fue $-17.957 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, y se presentó entre las 12:00 y las 14:00 hr. Nótese que la tasa de NEE es baja en las primeras horas del día, alcanza su valor máximo entre las 12 y las 14 hr y después decrece. Durante la noche, la tasa promedio máxima de NEE fue $6.66 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, y se observó entre las 21:00 y las 5:00 hr del día siguiente. Esto representó una alta capacidad de asimilación de CO₂ del ecosistema vegetal, ya que la tasa promedio máxima de NEE durante el día fue 2.7 veces mayor que la observada durante la noche. De la última semana de mayo a la primera de junio (24 de mayo al 5 de junio), la tasa promedio máxima de NEE aumento a $-21.03 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mientras que la tasa promedio máxima de NEE durante la noche fue aproximadamente igual ($6.61 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Figura 4.2). De tal forma que la tasa promedio máxima de NEE durante el día fue 3.18 veces mayor que la observada durante la noche. Esto probablemente se debió a que la radiación neta integrada promedio diaria de los días correspondientes a la Figura 4.1 fue menor (14.88 MJ m^{-2}), que la correspondiente a los días considerados en la Figura 4.2 (15.39 MJ m^{-2}).

Y los árboles de la huerta tuvieron menor disponibilidad de radiación, debido a condiciones de nubosidad. En los meses de mayo y junio, el valor de la tasa promedio máxima de NEE durante el día y la noche fue de -19.50 y $6.79 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivamente. De tal forma que para mayo y junio, en promedio la tasa máxima de NEE durante el día fue 2.87 veces mayor que la observada durante la noche. La magnitud de la tasa promedio máxima de NEE durante el día observada en este estudio, fue similar a la que observó Baldocchi (1997) en un bosque templado de hojas anchas del sureste de EU ($20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); Bowling *et al.* (2001) en un bosque caducifolio templado ($-23 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y Dolman *et al.* (2004) en un bosque de alerces en el este Siberia ($18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Esto nuevamente muestra la capacidad de asimilación de CO_2 que tienen las huertas de nogal del Norte de México.

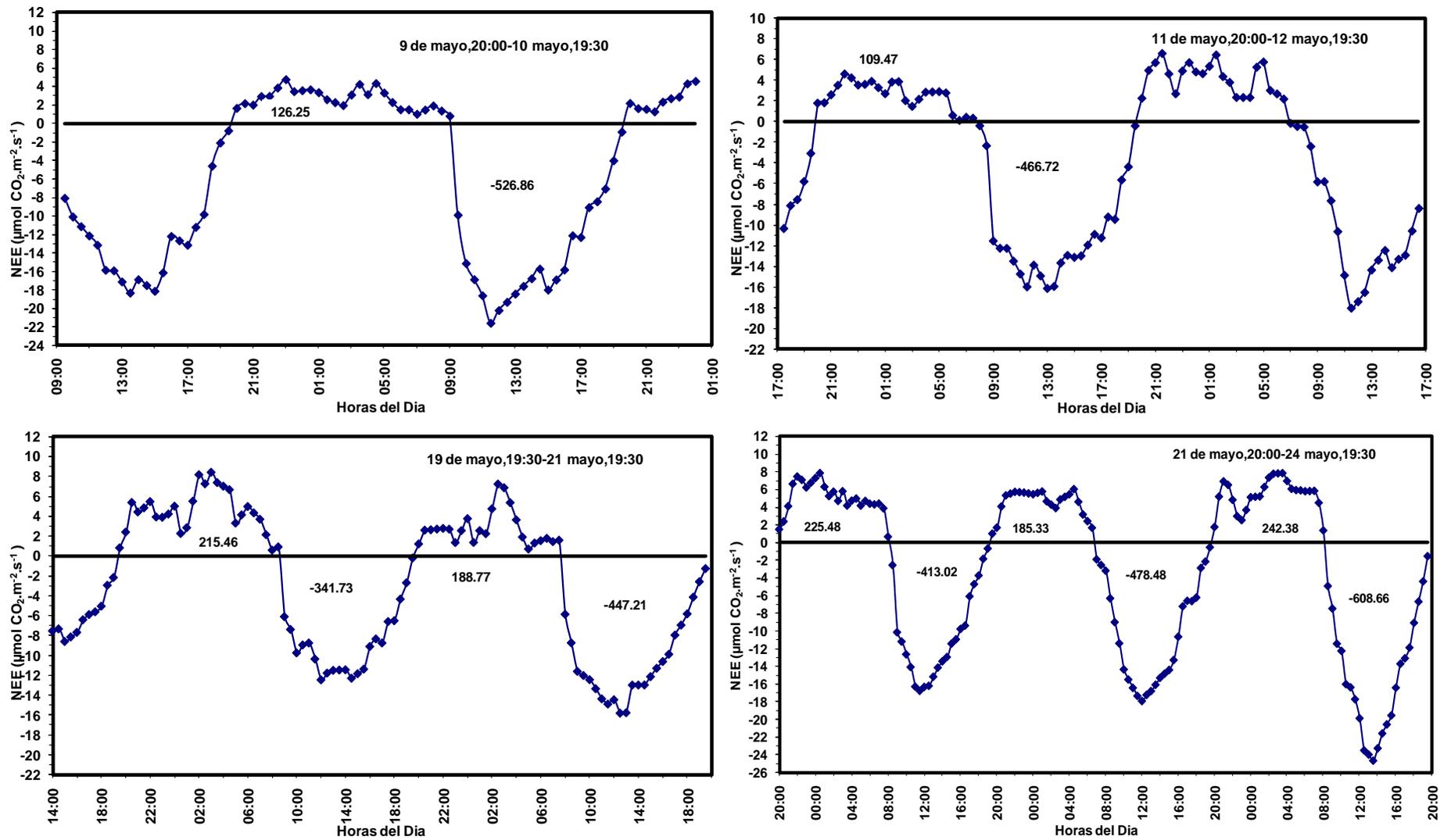


Figura 4. 1. Tasa de asimilación neta (NEE) del sistema suelo-vegetación, de una huerta de nogal pecanero para varios ciclos día-noche del 9 al 24 de mayo de 2008, en Zaragoza, Coahuila, México.

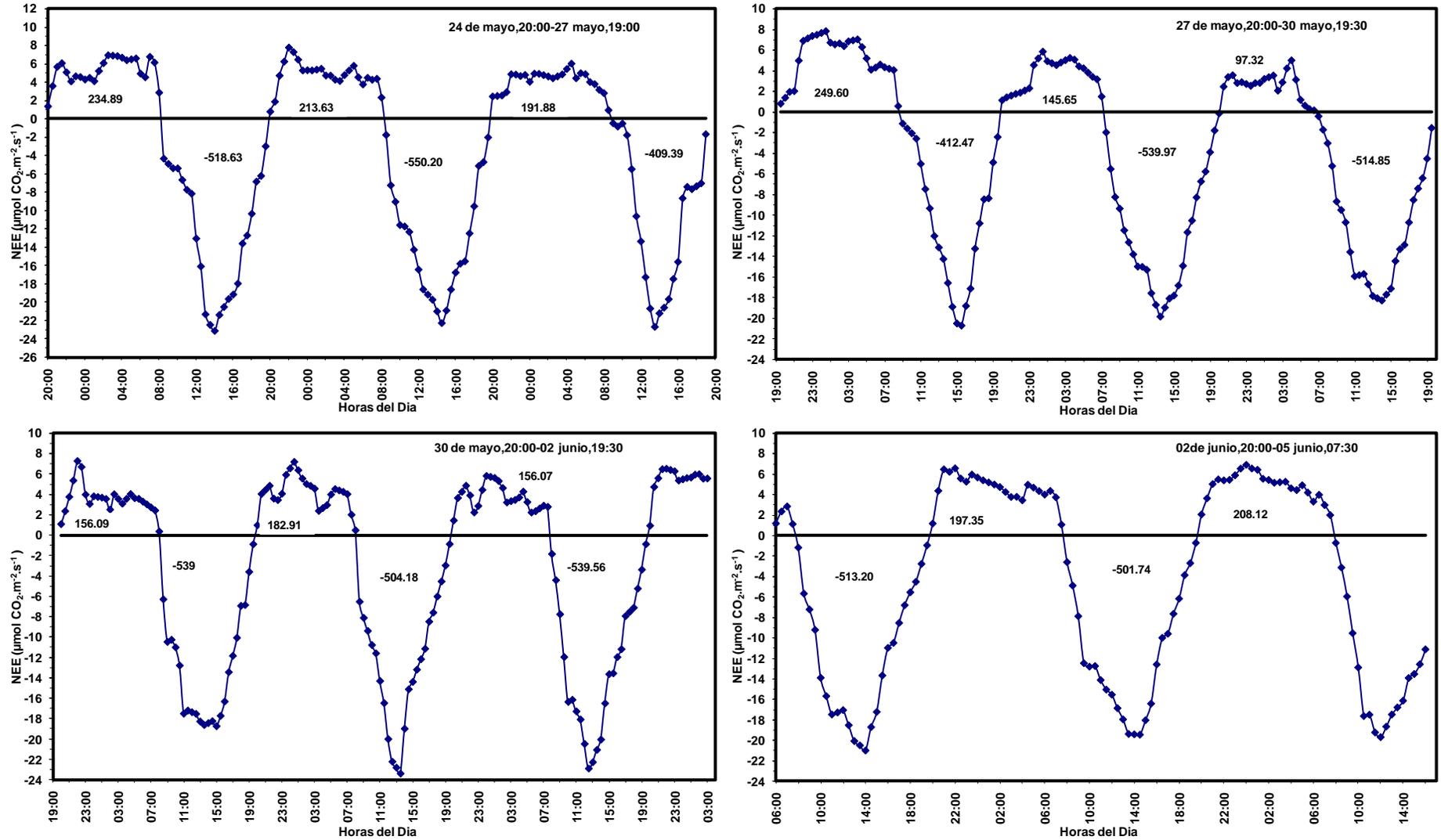


Figura 4. 2. Tasa de asimilación neta (NEE) del sistema suelo-vegetación, de una huerta de nogal pecanero para varios ciclos día-noche del 24 de mayo al 5 de junio de 2008, en Zaragoza, Coahuila, México.

Eficiencia intrínseca del uso del agua de la huerta.

Del 9 de mayo al 5 de junio la eficiencia intrínseca promedio del uso del agua (EUA) fue $1.87 \text{ mmolCO}_2 \text{ molH}_2\text{O}^{-1}$, y la relación entre la EUA y la lámina de agua evapotranspirada (ET) fue inversamente proporcional (Figura 4.3). Esto probablemente se debió a que el incremento en la apertura de los estomas (debido a una mayor disponibilidad de agua en el suelo) resultó en un mayor flujo de vapor de agua del interior de las hojas hacia el aire que en el flujo de CO_2 del aire hacia el interior de la hojas (Jones, 1992; Nobel, 2009). Del 5 de junio al 6 de julio, la relación entre la EUA y la ET también fue inversamente proporcional (Figura 4.4), y el valor promedio de EUA aumento ligeramente ($2.0 \text{ mmolCO}_2 \text{ molH}_2\text{O}^{-1}$). Esto posiblemente se debió a un mayor desarrollo foliar de los árboles de la huerta de mayo a junio. Los valores de EUA de la huerta de nogal encontrados en este estudio son ligeramente menores a los reportados por Zhao *et al.* (2007) en un cultivo de trigo ($2.205\text{-}2.79 \text{ mmolCO}_2 \text{ molH}_2\text{O}^{-1}$) en su máxima etapa de crecimiento. Pero mayor que el valor promedio de la EUA máxima (0.6135) de un bosque caducifolio de *Brachystegia spiciformis*, y de una sabana abierta (0.920) de la especie *Acacia luederitzii* (Scanlon y Albertson, 2004).

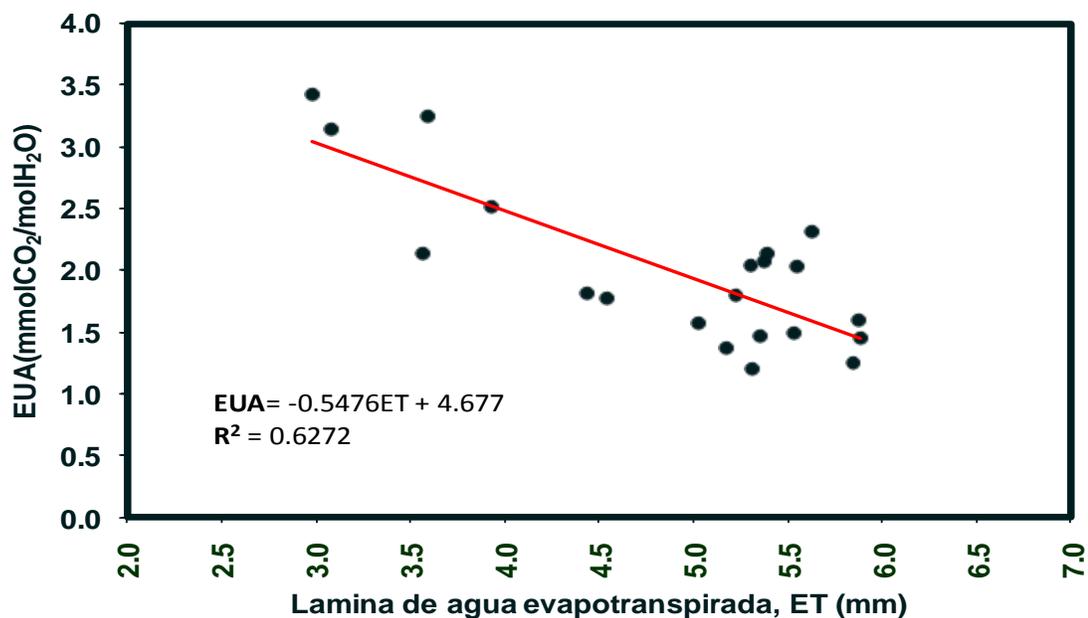


Figura 4. 3. Relación entre la eficiencia intrínseca del uso del agua (EUA) y la lámina de agua evapotranspirada (ET), observada del 9 de mayo al 5 de junio en una huerta de nogal.

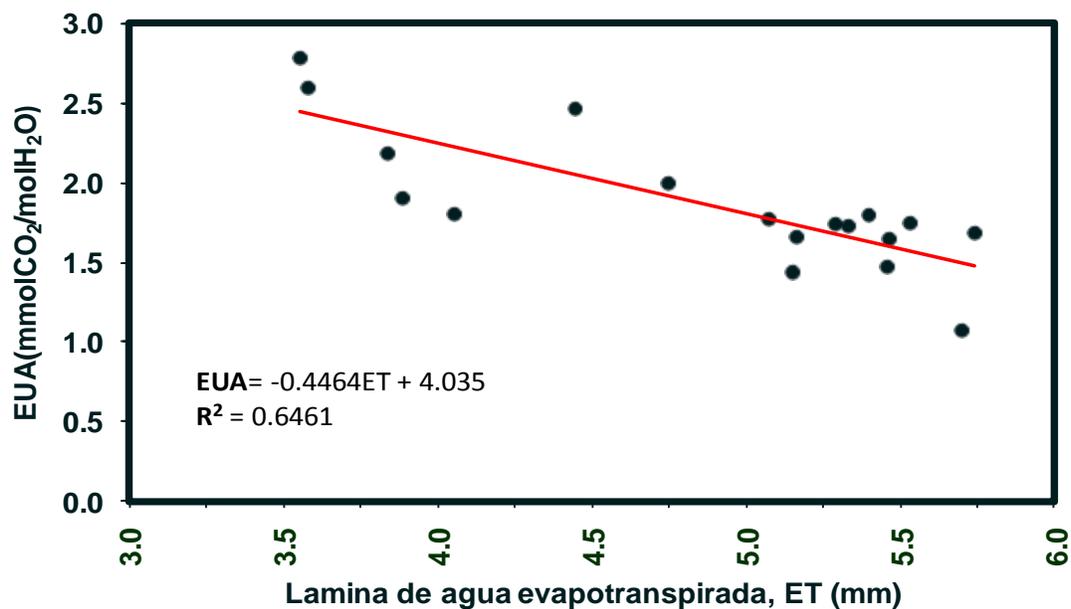


Figura 4. 4. Relación entre la eficiencia intrínseca del uso del agua (EUA) y la lámina de agua evapotranspirada (ET), observada del 5 de junio al 6 de julio en una huerta de nogal.

Potencial de secuestro de Carbono de la huerta de nogal.

Del 9 de mayo al 5 de junio de 2008, el intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) de la huerta de nogal durante el día fue en promedio 2.94 veces mayor que el observado durante la noche (Cuadro 4.1). Esto es un indicador de la capacidad de asimilación de CO₂ que tiene este ecosistema. Nótese que los datos del Cuadro 4.1 sugieren que las relaciones mayores día/noche de NEE, se debieron más a valores bajos de respiración nocturna del ecosistema (NEE durante la noche), que a valores altos de asimilación de CO₂ del ecosistema (NEE durante el día). Ya que por ejemplo, del 23 al 24 de mayo, se observó el valor mayor de asimilación del ecosistema (608.66 mmol CO₂ m⁻²), pero no correspondió con la mayor relación día/noche de NEE (2.51). Sin embargo, del 29 al 30 de mayo donde se observó la máxima relación día/noche de NEE (5.29), la asimilación del ecosistema fue menor (514.85 mmol CO₂ m⁻²), pero la respiración nocturna fue mucho menor (97.32) que la observada del 23 al 24 de mayo (242.38). Estos resultados también sugieren que el mayor potencial de asimilación de carbono de este ecosistema, se relaciona más con una menor tasa de respiración nocturna que con una mayor tasa de asimilación diurna de CO₂. Estudios previos al respecto, han mostrado que la tasa de respiración nocturna de las plantas en ambientes controlados puede ser de hasta el 30% de la tasa de asimilación de CO₂ durante el día, pero bajo condiciones de campo se pueden tener valores muy diferentes (Atkin, *et al.*, 2000).

La retención promedio diaria de CO₂ por el ecosistema (suelo-huerta de nogal) se estimó con la diferencia entre la asimilación promedio diaria del eco-

sistema (NEE durante el día) y la respiración nocturna promedio diaria (NEE durante la noche). Del 9 de mayo al 6 de julio, la asimilación promedio diaria de CO₂ fue de 505.60 y la respiración nocturna promedio diaria de 202.09. Esto correspondió a una retención promedio diaria de 303.51 mmol de CO₂ m⁻², que equivale a 3.64 g C m⁻² o 36.4 kg C ha⁻¹ día⁻¹. Asumiendo que el ciclo de mayor crecimiento del cultivo es de 150 días (mayo-septiembre), y que se mantiene la tasa de retención de carbono promedio diaria mencionada, esto equivaldría a 5.46 t C ha⁻¹ por ciclo de crecimiento. Considerando una superficie establecida de nogal pecanero de 83 000 ha en México, la retención de carbono sería equivalente a 453 180 t C por ciclo de crecimiento del cultivo.

La tasa de retención de CO₂ observada en la huerta de nogal pecanero, mostro el potencial de secuestro de carbono que tiene este ecosistema, ya que fue aproximadamente igual a la observada en un bosque Boreal (39 kg C ha⁻¹ d⁻¹) de Canadá (Amiro, 2001); y mayor a la observada en un bosque de haya de la especie *Fagus sylvatica* (1.37 g C m⁻² d⁻¹) (Anthoni *et al.* 2004) y el de un bosque de abeto negro (0.21 t C ha⁻¹ año⁻¹) (Dunn *et al.*, 2007). Sin embargo, la tasa de retención de CO₂ de la huerta puede cambiar de un ciclo de producción a otro debido a cambios en el manejo agronómico de la huerta, programación de riegos y cambios del clima.

Cuadro 4.1. Intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) de una huerta de nogal en Zaragoza, Coahuila, y la relación día/noche de NEE del 9 de mayo al 5 de junio, 2008

Rango		NEE Día mmol CO ₂ m ⁻²	NEE Noche mmol CO ₂ m ⁻²	Relación día /noche.
9 mayo,20:00	10 mayo,9:00		126.25	4.17
10 mayo,9:30	10 mayo,19:30	526.86		
11 mayo,20:00	12 mayo,7:30		109.47	4.26
12 mayo,8:00	12 mayo,19:30	466.72		
19 mayo,19:30	20 mayo,8:30		215.464	1.59
20 mayo,9:00	20 mayo,19:30	341.730		
20 mayo,20:00	21 mayo,7:30		118.765	3.77
21 mayo,8:00	21 mayo,19:30	447.210		
21 mayo,20:00	22 mayo,8:00		225.48	1.83
22 mayo,8:30	22 mayo,9:00	413.02		
22 mayo,19:30	23 mayo,6:30		185.33	2.58
23 mayo,7:00	23 mayo,19:30	478.48		
23 mayo,20:00	24, mayo 8:00		242.38	2.51
24 mayo, 8:30	24 mayo,19:30	608.66		
24 mayo, 20:00	25 mayo, 8:00		234.89	2.21
25 mayo, 8:30	25 mayo, 19:30	518.63		
25 mayo, 20:00	26 mayo,8:00		213.63	2.58
26 mayo,8:30	26 mayo,19:30	550.20		
26 mayo,20:00	27 mayo,8:30		191.88	2.13
27 mayo,9:00	27 mayo,19:00	409.39		
27 mayo,19:30	28 mayo,8:30		249.60	1.65
28 mayo,9:00	28 mayo,19:30	412.47		
28 mayo,20:00	29 mayo,7:00		145.65	3.71
29 mayo,7:30	29 mayo,20:00	539.97		
29 mayo,20:30	30 mayo,6:30		97.32	5.29
30 mayo,7:00	30 mayo,19:30	514.85		
30 mayo,20:00	31 mayo,8:00		156.09	3.45
31 mayo,8:30	31 mayo, 19:30	539.00		
31 mayo,20:00	1 junio,8:00		182.91	2.76
1 junio,8:30	1 junio,19:30	504.18		
1 junio,20:00	2 junio,7:30		156.07	3.46
2 junio,8:00	2 junio,19:30	539.56		
3 junio,8:00	3 junio,19:30	513.20		2.60
3 junio,20:00	4 junio,7:30		197.35	
4 junio,8:00	4 junio,19:30	501.74		2.41
4 junio,20:00	5 junio,7:30		208.12	
Promedio		490.33	180.92	2.94

La tasa de respiración nocturna de la huerta estuvo relacionada con la temperatura de las hojas. La Figura 4.5 muestra la relación entre la temperatura promedio de las hojas durante los segmentos de tiempo donde NEE fue positivo (respiración nocturna del ecosistema), y los valores correspondientes de NEE nocturno. Nótese que existe una relación directamente proporcional entre la tasa de respiración nocturna y la temperatura de las hojas. Esto se debió a que el incremento de la temperatura de las hojas por factores ambientales, afectó la tasa de respiración nocturna. Resultados similares han sido reportados para diversas especies vegetales (Atkin, *et al.*, 2000; Atkin y Tjoelker, 2003; Tcherkez, *et al.*, 2003).

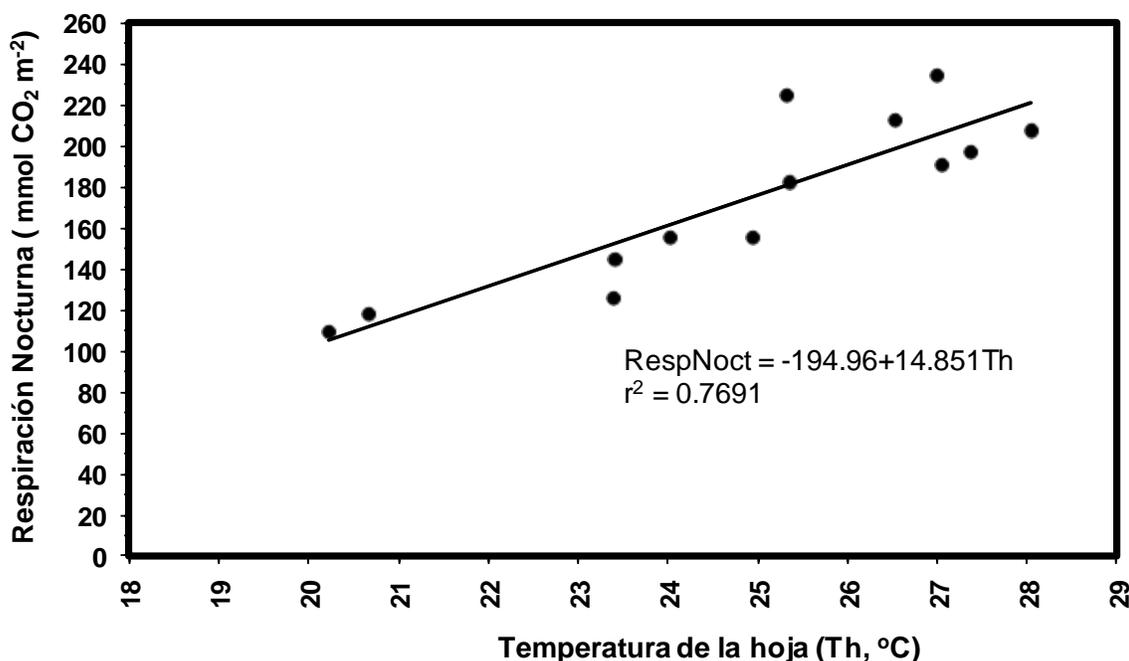


Figura 4. 5. Relación entre la tasa de respiración nocturna (RespNoct) y la temperatura promedio de la hoja (Th, °C) de una huerta de nogal pecanero en Zaragoza, Coahuila, México.

V. CONCLUSIONES

La huerta de nogal evaluada mostro un alto potencial de asimilación de bióxido de carbono (CO_2), ya que el intercambio neto de CO_2 (NEE) diurno de la huerta fue aproximadamente igual al observado en bosques de diferentes especies. El NEE fue mayor a valores altos de radiación neta.

La eficiencia intrínseca del uso del agua (EUA) por la huerta fue mayor que el observado en un bosque caducifolio y el de una sabana, pero menor que el observado en un cultivo de cobertura completa. Dentro del rango de valores de evapotranspiración evaluados en este estudio, se observó una relación inversamente proporcional entre EUA y la lámina de agua evapotranspirada.

La tasa de retención de Carbono por la huerta, evaluado con la diferencia entre los valores integrados de NEE diurnos y nocturnos fue igual o mayor a la tasa de secuestro de carbono de bosques de diferentes especies. La mayor retención de carbono por el ecosistema estuvo relacionada con valores menores de respiración nocturna, que con valores altos de asimilación integrada de CO_2 durante el día. La tasa de respiración nocturna y la temperatura foliar fueron directamente proporcionales.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, J., E. López D. y B. Medina. 1999. Cuantificación estimada del dióxido de carbono fijado por el agroecosistema café en Guatemala. Boletín PROMECAFE 81:7-14.
- Amiro, B.D. 2001. Paired-tower measurements of carbon and energy fluxes following disturbance in the boreal forest. *Global Change Biology* 7:253-268.
- Anthoni, P.M., Knohl, A., rebmann, C., Freibauer, A., Mund, M., Ziegler, W., Kolle, O. and Schulze, D. 2004. Forest and agricultural land-use-dependent CO₂ exchange in Turgina, Germany. *Global Change Biology* 10: 2005-2019.
- Arreola, A.J., Largada M.A., Medina M.M.C. 2002. Sistema de conducción, poda selectiva y aclareo de arboles. Tecnología de producción en nogal pecanero. CELALA, CIRNOC, INIFAP. Libro técnico número 3, Primera edición. ISBN: 968-800-542-8: 39-53
- Atkin, O.K., Holly, C. and Ball, M.C. 2000. Acclimation of snow gum (*Eucalyptus pauciflora*) leaf respiration to seasonal and diurnal variations in temperature: the importance of change in the capacity and temperature sensitivity of respiration. *Plant, Cell and Environ.* 23: 15-26.
- Atkin, O.K. and Tjoelker, M.G. 2003. Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. *TRENDS in Plant Science* 8(7): 343-351
- 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. *Agricultural and Forest Meteorology* 67:291-321.
- Baldocchi, D. D. and A. Vogel C. 1997. Seasonal variation of energy and water vapor exchange rates above and below a boreal jack pine forest canopy, *Journal of Geophysical Research* 102: 28939-28951.

- Baldocchi, D. 1997. Measuring and modeling carbon dioxide and water vapour exchange over a temperate broad-leaved forest during the 1995 summer drought. *Plant Cell and Environment* 20:1108-1122.
- Baldocchi D.D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rate of ecosystem past present and future. *Global Change Biology*. 9:1-14
- Benjamin, O. J. A. y O. Maser 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7(1):3-12
- Boisvenue, C., Running, S.W. 2006. Impacts of climate change on natural forest productivity – evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology* 12:862-882.
- Bota, J., Flejax, J., Medrano, H. 2001. Genetic variability of photosynthesis and water use in Balearic grapevine cultivars. *Annals of Applied Biology* 138:353-361.
- Bowling, D.R., Tans, P.T. and Monson, R.K. 2001. Partitioning net ecosystem carbon exchange with isotopic fluxes of CO₂. *Global Change Biology* 7: 127-145.
- 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. Gobierno del estado de Nuevo Leon, ALIANZA, SGARPA y CPA. Pp. 2-87
- Castillo, F.E. 2001, *Agrometeorología*. Mundi-Prensa libros, 2da edición, España. Pp. 227
- Chavez, G.J.F., Medina M.M.C., Figueroa V.U. 2002. Fertilización de nogal. Tecnología de producción en nogal pacanero CELALA, CIRNOC, INIFAP. Libro técnico número 3, Primera edición. ISBN: 968-800-542-8: 101-125
- Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogee, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A.D., Friedlingstein, P., Grunwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J.M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J.F., Sanz, M.J., Schulze, E. D., Vesala, T., Valentini, R. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437:529-533.

- Curtis, P. S., Hanson, P. J., Bolstad, P., Barford, C., Randolph J. C., Schmid, H. P. and Wilson, K. B. 2002. Biometric and eddy-covariance based estimates of annual carbón storage in five eastern North American deciduous forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 113:3-19.
- De Santa, O. F. M., J. M. De Santa O., P. López F. y A. Calera B., 2005. *Agua y Agronomía*. Mundi-Prensa libros, España. Pp. 200
- Dolman, A.J., Maximov, T.C., Moors, E.J., Maximov, A.P., Elbers, J.A., Kono-
nov, A.V., Waterloo, M.J. and van der Molen, M.K. 2004. Net ecosystem
exchange of carbon dioxide and water of far eastern Siberian Larch (*Larix
cajanderii*) on permafrost. *Biogeosciences* 1:133-146.
- Dunn, A. L., Barford, C. C., Wofsy, S. C., Goulden, M. and Daube, B. C. 2007. A
long-term record of carbon exchange in a boreal black spruce forest:
means, responses to interannual variability, and decadal trends. *Global
Change Biology* 13:577-590
- Godoy, A. C., Reyes J.I., Morales V.J. 2000. Necesidades de agua por el nogal.
Tecnología de riego en nogal pecanero. CELALA, CIRNOC, INIFAP Libro
científico número 1 Primera edición. I SBN 968-800-465-0: 21-34
- González-Alonso F., A. Calle, J. L. Casanova, J. M. Cuevas. 2004. La actividad
de la vegetación en la España peninsular se incrementó un diecisiete por
ciento durante el periodo 1987-2001, *Teledetección* 21: 47-49
- Ham, J.M. and Heilman J.L. 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.
- Hastings, S.J., Oechel, W.C., and Muhlia-Melo, A. 2005. Diurnal, seasonal and
annual variation in the net ecosystem CO₂ exchange of a desert shrub
community (*Sarcocaulis*) in Baja California, México. *Global Change
Biology* 11:927-939.
- Jaksic, V., G. Kiely, J. Albertson, R. Oren, G. Katul, P. Leahy and K. A. Byrne.
2006. Net ecosystem exchange of grassland in contrasting wet and dry
years. *Agricultural and Forest Meteorology*. 139: 323-334.
- Jones, H.G., 1992. *Plants and microclimate: A quantitative approach to envi-
ronmental plant physiology*, 2 ed. Cambridge, Univ. Press, London, New
York 428 pp.

- Kanemasu, E.T., M. L. Weslwy., B. B Hicks and J.L. Heilman. 1979. Techniques for calculating energy and mass fluxes. In: Modification of the Aerial Environment of crops. B.L Barfield and J.F Gerber, (eds), Amer. Soc. Of Agric. Eng., St. Joseph. MI. pp. 162.
- 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.
- Kellomäki, S. and. Wang, K.Y. 2000. Shor-term environmental controls on carbon dioxide flux in a boreal coniferous forest: model computation compared with measurements by eddy covariance. *Ecological Modelling* 128(1): 63-88.
- Kustas, W.P., J.H. Prueger, and J.L. Hatfield. 2000. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. *Agric. Forest Meteorol.* 103: 249-264.
- Launiainen, S., Rinne, J., Pumpanen, J., Kulmala, L., Kolari, P., Keronen, P., Siivola, E., Pohja, T., Hari, P. and Vesala, T. 2005. Eddy covariance measurements of CO₂ and sensible and latent heat fluxes during a full year in a boreal pine forest trunk-space. *Boreal Environment Research* 10:569-588.
- Li, S.-G., J. Asanuma, W. Eugster, A. Kotani, J.-J. Lui, T. Urano, T. Oikawa, G. Davaas, D. Oyubaatars and M. Sugita. 2005. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Global Change Biology.* 11: 1941-1955.
- López, A. 1998. Aporte de los sistemas silvopastoriles al secuestro de carbono en el suelo. Tesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 50 p.
- López, J. C., M. Riaño N. y Y. López F. 2001, Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales valdivia, Chile. Pp. 2-3
- Martens, C., T. J. Shay, H. P. Mendlovitz, D. M. Matross, 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.
- Mexal, J.G., Herrera, E.A., Sammis, T.W. and Zachritz, W.H. 2003. Noncommensurable values of the pecan industry. Cooperative Extension Service,

Guide H-654. Collage of Agriculture and Home Economics, New Mexico State University 4 p.

Medina M. M. C. y Cano R. P. 2002. Tecnología de producción en nogal pecanero. México. CELALA, CIRNOC, INIFAP, Libro técnico número 3, Primera edición ISBN: 968-800-542-8. p. 1-14,

Nobel, P.S., 2009. Physicochemical and environmental plant physiology, academic press 4 ed., USA, 600 pp.

Núñez M. J. H. 2001. El nogal pecanero en Sonora. México. SAGARPA, INIFAP. Libro técnico No. 3. p. 11-22, ISSN: 1405-597X

Puente G. A., A. Toca U. y A. Verde O. 2002. Nuez, análisis de su rentabilidad. Edición SAGARPA - ASERCA. México, D.F. Revista Claridades Agropecuaria 107.

Rosati, A., Metcalf, S.G., Buchner, R.P., Fulton, A.E. and Lampinen, B.D. 2006. Physiological effects of kaolin applications in well-irrigated and water-stressed walnut and almond trees. *Annals of Botany* 98: 267-275.

Scanlon, T.M. and Albertson, J.D. 2004. Canopy scale measurements of CO₂ and water vapor exchange along a precipitation gradient in southern Africa. *Global Change Biology* 10: 329-341.

Schulze, E.D. 2006. Biological control of the terrestrial carbon sink. *Biogeosciences* 3:147-166.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2006. Boletín informativo Num. 074/06

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) 2009. Anuario estadístico de la producción agrícola. México.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2008. Anuario estadístico de la producción agrícola. México.

Serrano-Ortiz, P., A.S. Kowalsky y L. Alados-Arboledas. 2006. La técnica eddy covariance como herramienta para la determinación de la capacidad de asimilación de CO₂ de un ecosistema. *Acta Granatense* 4(5): 95-106.

- Tcherkez, G., Nogués, S., Bleton, J., Cornic, G., Badeck, F. and Ghashghaie, J. 2003. Metabolic origin of carbon isotope composition of leaf dark-respired CO₂ in French Bean. *Plant Physiology* 131: 237-244.
- Ueyama, M., Harazono, Y., Ohtaki, E. And Miyata, A. 2006. Controlling factor on the interannual CO₂ budget at a subarctic black spruce forest in interior Alaska. *Tellus* 58B:491-501.
- United States Department of Agriculture (USDA). 2008. *Tree Nuts: World Markets & Trade*
- Wang J., Miller D. R., Sammis W. T., Gutschick V. P., Simmons L. J. y Andales A. A. 2007. Energy balance measurements and a simple model for estimating pecan water use efficiency. *Agricultural Water Management* 91:92-101
- Webb, E.K., G.I. Pearman, and R. Leuning. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 106: 85–100.
- Wilson, K. B., D. D. Baldocchi and P. J. Hanson. 2001. Leaf age affects the seasonal pattern of photosynthetic capacity and net ecosystem exchange of carbon in a deciduous forest. *Plant, Cell and Environment*. 24: 571-583.
- Wisniewskil, J., K. Dixon R., D. Kinsman J., N. Sampson R. y E. Lugo A. 1993. Carbon dioxide sequestration in terrestrial ecosystems. *Climate Research*. Vol. 3: 1-5
- Zhao, F.-H., Yu, G.-R., Li, S.-G., Ren, X.-M., Mi, N., Li, Y. and Ouyang, Z. 2007. Canopy water use efficiency of winter wheat in the north China plain. *Agricultural Water Management* 93(3): 99-108