

DINÁMICA DE LOS FLUJOS DE BIÓXIDO DE CARBONO Y DE ENERGÍA SOBRE UN PASTIZAL ÁRIDO DEL NORESTE DE MÉXICO

JORGE AIMIR RIOS ESTUDILLO

TESIS

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

**Maestro en Ciencias
en Ingeniería de Sistemas de Producción**



**Universidad Autónoma Agraria
“Antonio Narro”
PROGRAMA DE GRADUADOS**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Septiembre de 2008**

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. Martín Cadena Zapata

Asesor: _____
Dr. José Ángel Villarreal Quintanilla

Dr. Jerónimo Landeros Flores
Director de Postgrado

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México. Septiembre de 2008

AGRADECIMIENTOS

A **DIOS**, por brindarme la vida.

A mi **UNIVERSIDAD**, gracias por darme las herramientas para trabajar incansablemente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACYT**), mil gracias por apoyar a los futuros científicos y tecnólogos de México.

A mis padres, por que en ustedes siempre encontré ESTIMULO, AMOR y CONFIANZA, por ustedes, soy quien soy.

A todos mis HERMANOS, en ustedes siempre encontré palabras de aliento para seguir adelante, gracias.

Al amor de mi vida, Adriana, Gracias por brindarme cariño, amor y confianza para seguir adelante.

A las personas que invirtieron gran parte de su valioso tiempo en la dirección y revisión de este trabajo:

Al Dr. Alejandro Zermeño González.

Al Dr. Martín Cadena Zapata.

Al Dr. José Ángel Villarreal Quintanilla.

A todos y cada uno de mis amigos mil gracias por darme su apoyo, amistad y confianza, gracias por compartir conmigo, sus alegrías, ilusiones, anhelos, sueños y esperanzas, siempre sigan adelante.

DEDICATORIA

A MIS PADRES:

Sr. Noé Ríos Borges †

Sra. Donaciana Estudillo Vázquez

Por ser los pilares inquebrantables,
ejemplos a seguir.

A MIS HERMANOS:

Javier

Alba

Aída †

Eliseo

Consuelo

Dalia

Luís Fernando

Gabriel

Gracias a dios, no pudo darme otros
mejores.

Adriana

Por hacer mis días maravillosos

A mis compañeros y amigos:

Juan, Odilón, Benito, Nely, Robertoni, Audberto, Alonso, Octavio.

Por saber que puedo contar con ellos.

Solo anhelo que mis seres queridos se sientan
tan orgullosos de mí, como yo de ellos.

Jorge Aimir Ríos Estudillo.

COMPENDIO

Dinámica de los flujos de bióxido de carbono y de energía sobre un pastizal árido del noreste de México.

POR

JORGE AIMIR RIOS ESTUDILLO

MAESTRÍA

INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

Buenavista, Saltillo, Coahuila. Septiembre 2008

Dr. Alejandro Zermeño González –Asesor

Palabras clave: Covarianza eddy, pastizal, secuestro de carbono, flujo de CO₂, balance de energía.

Los pastizales cubren 20 por ciento de la superficie continental del planeta y aproximadamente 16 por ciento del territorio de México, y tienen una participación en el secuestro de carbono atmosférico. Por tal motivo, se utilizó el método de la covarianza eddy para medir los flujos de bióxido de carbono (CO₂) y energía sobre un pastizal árido

del noreste de México, para evaluar el potencial de secuestro de carbono por la superficie vegetal y la distribución de los flujos de energía. Se observó que el pastizal tiene alto potencial de secuestro de carbono, ya que se obtuvieron tasas máximas de asimilación de CO₂ de 18 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. La asimilación de CO₂ durante el día (fotosíntesis) fue mayor que la liberación durante la noche (respiración nocturna), indicando una retención neta de carbono por la superficie. La asimilación de CO₂ fue mayor con cielo despejado, pero la eficiencia del uso del agua y de la radiación por la superficie fue mayor en días nublados. La radiación neta (Rn) se disipó principalmente en flujo de calor latente (LE), flujo de calor sensible (H) y en menor proporción en flujo de calor en el suelo (G), indicando la importancia de la evapotranspiración para la disipación de la radiación absorbida por la superficie vegetal.

ABSTRACT

**Dynamics of carbon dioxide and energy fluxes over an arid
rangeland of northeast Mexico**

BY

JORGE AIMIR RIOS ESTUDILLO

MASTER

PRODUCTION SYSTEM ENGINEERING

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

Buenavista, Saltillo, Coahuila. September 2008

Dr. Alejandro Zermeño González –Advisor-

Key words: Eddy covariance, grassland, carbon sequestration, CO₂ flux, energy balance.

The rangelands cover 20 percent of the continental surface of the planet and approximately 16 percent of the Mexico territory, and have an important participation in the atmospheric carbon sequestration. The eddy covariance method was used to measure the carbon dioxide (CO₂) and energy fluxes over an arid rangeland of

northeast Mexico, to evaluate the potential of carbon sequestration by the vegetated surface and the partitioning of the energy fluxes. It was observed that the rangeland has the potential of carbon sequestration, since rates of CO₂ assimilation of 18 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ were measured. The CO₂ assimilation during daytime (photosynthesis) was higher than the release during nighttime (dark respiration), showing a net retention of carbon by the surface. The assimilation of CO₂ was higher under clear sky conditions, but the water and radiation use efficiency was higher in cloudy days. Net radiation (R_n) over the surface dissipated mainly in latent heat flux (LE), sensible heat flux (H) and in a less proportion in soil heat flux (G), indicating the importance of evapotranspiration for the dissipation of radiation absorbed by the vegetated surface.

INDICE DE CONTENIDO

Página

ÍNDICE DE CUADROS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
La problemática del calentamiento global.....	4
Principales fuentes de emisión de GEI.....	5
Sector energético y combustibles fósiles.....	5
Cambios en el uso del suelo.....	6
Incendios y quema de biomasa.....	6
Deforestación.....	7
Proceso de fotosíntesis y fijación de carbono en las plantas.....	7
Los pastizales, características y distribución.....	9
Técnicas para medir los flujos de CO ₂ y de energía.....	11
Mediciones de flujos de CO ₂ en pastizales.....	12
Mediciones de flujos de energía y evapotranspiración en pastizales..	13
Generalidades del zacate picoso.....	14
Clasificación taxonómica.....	14
Distribución.....	15
Hábitat.....	16
Época de crecimiento.....	16
Descripción técnica.....	16
Hábito y forma de vida.....	16
Tamaño.....	16
Tallo.....	16
Hojas.....	17
Inflorescencia.....	17
Espiguillas/Flores.....	17
Frutos y semillas.....	18
Plántulas.....	18
Valor forrajero.....	18
Manejo.....	18

III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
Localización geográfica del sitio de estudio.....	19
Características generales del sitio de estudio.....	20
Clima.....	20
Suelos.....	21
Hidrología.....	21
Vegetación.....	21
Pastizal mediano abierto.....	22
Pastizal amacollado.....	22
Matorral rosetófilo.....	22
Izotal.....	23
Matorral esclerófilo.....	23
Bosque de pino-encino.....	23
Matorral de <i>Dasyliirion</i> con pastos amacollados.....	24
Instrumentación y mediciones.....	26
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
Dinámica de los flujos.....	30
Flujos de CO ₂ y de energía durante el día.....	32
Flujos de CO ₂ y de energía durante la noche.....	34
Distribución de los flujos y eficiencia fotosintética.....	37
V. CONCLUSIONES.....	40
VI. RESUMEN.....	41
VII. LITERATURA CITADA.....	42

INDICE DE CUADROS

Num. Cuadro		Página
Cuadro 4.1	Características físicas y químicas del suelo del sitio de estudio en el Rancho los Ángeles, municipio de Saltillo, Coahuila, México.....	25
Cuadro 4.2	Relación de especies presentes en la pradera donde se realizó el estudio; Rancho Los Ángeles, municipio de Saltillo, Coahuila, México.....	25
Cuadro 5.1	Valores diarios (8:00 a 20:00) de la fracción de la radiación neta (Rn) disipada en calor latente (LE), calor sensible (H), y calor en la superficie del suelo (G), en diferentes condiciones climáticas en un pastizal árido del noreste de México; y la eficiencia del uso del agua y de la radiación por la superficie suelo-vegetación.....	38

INDICE DE FIGURAS

Num. Figura		Página
Figura 4.1	Localización geográfica del rancho “Los Ángeles”.....	20
Figura 4.2	Sensores del sistema eddy utilizados para medir los flujos de bióxido de carbono, vapor de agua y calor sobre el pastizal del norte de México.....	27
Figura 5.1	Dinámica del flujo de bióxido de carbono entre la superficie vegetal y la atmósfera, en varios días del verano de 2007 en un pastizal árido del noreste de México. Valores negativos indican que la dirección del flujo es de la atmósfera a la superficie suelo-vegetación, y positivos de la superficie a la atmósfera.....	31
Figura 5.2	Dinámica del flujo de radiación neta (R_n), calor latente (LE), calor sensible (H) y calor en la superficie del suelo (G) en un pastizal árido del Noreste de México, en varios días del año del verano de 2007.....	33
Figura 5.3	Dinámica del flujo de radiación neta (R_n), calor latente (LE), calor sensible (H) y calor en la superficie del suelo (G) en un pastizal del Noreste de México, observados en diferentes noches del año del verano de 2007.....	36

I. INTRODUCCIÓN

La temperatura promedio del planeta ha aumentado entre 0.3 y 0.6 °C en los últimos 100 años, debido a las grandes emisiones de gases de invernadero como bióxido de carbono (CO₂), dióxido de nitrógeno (N₂O), metano (CH₄), ozono (O₃) y clorofluro carbonos (gases de refrigeración) (Carson, 1996; Cao-MingKui *et al.*, 1998). Este calentamiento global ha inducido un cambio climático en varios países y regiones (Smith, 1996), que ha tenido diferentes efectos. Stocks *et al.* (1998) reportan que el cambio climático puede resultar en un peligroso incremento de incendios en los bosques boreales de Rusia y Canadá. Además, debido a este calentamiento global y el fenómeno climático el Niño, han aumentado los eventos climáticos extraordinarios como sequías, inundaciones, temperaturas extremas altas y extremas bajas (Lauenroth y Smith, 1996; Smith, 1996).

Otros estudios muestran que el incremento de la temperatura global y del CO₂ en la atmósfera tendrá un efecto en la agricultura (Wittwer, 1998; Dhakhwa y Campbell, 1998), ya que mayor concentración de CO₂ en la atmósfera favorecerá una mayor fotosíntesis, sin embargo, las temperaturas más altas resultarán en una mayor tasa de evapotranspiración de los cultivos (Chattopadhyay *et al.*, 1997).

También se ha demostrado que el cambio climático tendrá efectos en los patrones de precipitación y en las reservas subterráneas de agua (Cortes *et al.*, 1998). McMichael y Haines (1997) predicen que los cambios climáticos tendrán también un efecto negativo en la salud humana.

Las actividades humanas de mayor emisión de CO₂ son: la generación de energía eléctrica, los vehículos motorizados (combustión interna) y la industria cementera (Gay y Martínez, 1995). Para mitigar este problema es necesario reducir las emisiones de CO₂ implementado tecnologías para hacer más eficiente la generación de energía eléctrica, implementar sistemas de energía alternativa (nuclear, solar, eólica), y hacer más eficientes los motores de combustión interna. Sin embargo, los ecosistemas vegetales son el único proceso natural para sustraer CO₂ atmosférico, ya que mediante la fotosíntesis el carbono es fijado en la estructura vegetal y lo almacena por largos periodos de tiempo, lo cual está en función de las características de la vegetación y del manejo de la misma (Ordoñez y Masera, 2001).

Los pastizales cubren cerca de 3.4 billones ha, lo que equivale a la quinta parte de la superficie continental del planeta; entonces, aumentos en la captura de CO₂ por los pastizales pueden tener un efecto importante en la disminución de la concentración de CO₂ en la atmósfera (Fisher *et al.*, 1994). Al respecto, México tiene 1 964 375 km², del cual 311 794.02 km² (15.9 por ciento) está ocupado por pastizales (INEGI, 2007). Este ecosistema vegetal podría tener un gran potencial para el secuestro de carbono atmosférico.

Por lo tanto, el objetivo del estudio fué analizar la dinámica del flujo de bióxido de carbono y los flujos de energía sobre un pastizal árido del noreste de México, para evaluar su potencial de secuestro de carbono.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

La problemática del calentamiento global

Las actividades humanas, tales como el uso de combustibles fósiles para la producción de energía y los procesos derivados del cambio en el uso del suelo y silvicultura, están generando grandes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), clorofluorocarbonados (CFC's), óxidos de nitrógeno (NO_x) y metano (CH_4), principalmente, siendo el CO_2 uno de los GEI más importantes por las grandes cantidades en las que se emite (Ordoñez y Masera, 2001).

El cambio climático global asociado al aumento potencial de la temperatura superficial del planeta, es uno de los problemas ambientales más severos que se enfrentan en el presente siglo. Este problema se acentúa por el rápido incremento actual en las emisiones de gases de efecto invernadero "GEI" y por las dificultades de reducir en forma sustantiva el incremento de GEI en el futuro próximo (IPCC, 1992). El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 1995) estimó que las emisiones de México contribuyen con el 1.45 por ciento de las emisiones totales de carbono que se dan en nuestro planeta cada año.

Principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero

1. Sector energético y combustibles fósiles.

La primera causa directa de origen humano del cambio climático global es el consumo de combustibles fósiles. La combustión, la extracción, el transporte y el procesamiento de estos productos tienen un impacto directo en la intensificación del efecto invernadero del planeta. Se calcula que el 77 por ciento de las emisiones de CO₂ de origen humano provienen del consumo y procesamiento de los combustibles fósiles. Se ha estimado que el consumo de los combustibles fósiles añade cada año 5.7 Gt de CO₂ a la atmósfera, así entre 1970 y 2004 las emisiones anuales mundiales han aumentado en aproximadamente un 80 %, pasando de 21 a 38 Gt (IPCC, 2007).

Específicamente para México, el calentamiento global es de singular importancia pues, por un lado, se encuentra entre los 20 países con mayores emisiones de estos gases y por el otro, se encuentra entre las regiones más vulnerables a los impactos asociados al cambio climático debido a sus condiciones bioclimáticas y socioeconómicas (Villers y Trejo, 1997; Ordóñez, 1998; Gay, 2000).

La vegetación tiene la capacidad de asimilar el carbono e incorporarlo a su estructura, es decir, lo fija y lo mantiene almacenado por largos periodos, a través de la fotosíntesis (Ordoñez y Masera, 2001).

2. Cambios en el uso del suelo.

Según Gay y Martínez (1995), se entiende por cambio de uso de la tierra el propósito productivo a que se dedica o se subordina la corteza terrestre. Los efectos del cambio de uso de la tierra se traducen en cambios en los ciclos biogeoquímicos, dentro de procesos que tienen una base de ámbito local y acaban presentando consecuencias globales. De igual forma se manifiesta que el cambio en el uso de la tierra a menudo está asociado con un cambio en la cobertura de la tierra y por ende con un cambio en los depósitos de carbono. Por ejemplo, en regiones templadas, los suelos almacenan más carbono que la biomasa aérea. Estos suelos pueden perder hasta un 50 por ciento del carbono disponible cuando los bosques se convierten a agricultura permanente. De igual forma, los pastizales convertidos en bosques también pueden generar una pérdida neta de carbono. Houghton (2001), clasificó siete tipos de cambios en el uso de la tierra por cambios en los depósitos de carbono: (1) conversión de ecosistemas naturales a cultivos permanentes, (2) conversión de ecosistemas naturales por rotación de cultivos, (3) conversión de ecosistemas naturales a pastizales, (4) abandono de tierras cultivables, (5) abandono de pastizales, (6) aprovechamiento de madera y (7) establecimiento de plantaciones de árboles.

3. Incendios y quema de biomasa.

El término “quema de la biomasa” incluye todas las actividades humanas intencionales asociadas con el desmonte, quema de la vegetación de la sabana para estimular la regeneración del pasto para el ganado, quema de leña y de carbón vegetal y consumo de residuos agrícolas (Ciesla, 1996).

Levine (1992), calcula que anualmente se queman entre 12 y 13 millones de hectáreas de bosques y otras tierras arboladas, las cuales en mayor parte son debido a causas antropogénicas. Las causas naturales de los incendios son los relámpagos de las tempestades, la actividad volcánica y la quema de los depósitos de turba y carbón.

4. **Deforestación.**

La deforestación es la causa principal del aumento de los niveles de los gases de efecto invernadero y es la segunda fuente humana más importante de dichos gases. En este proceso no solo se libera CO_2 sino que también se desprenden pequeñas cantidades de metano (CH_4) y monóxido de carbono (CO). A nivel mundial la deforestación contribuye con el 20 por ciento anual de las emisiones de CO_2 y el sector energético es responsable del 80 por ciento restante. Durante los últimos 150 años, la deforestación ha sido la causa del 30 por ciento del total de las emisiones acumuladas en la atmósfera (Masera, 1995).

Proceso de fotosíntesis y fijación de carbono en las plantas

Los procesos de fotosíntesis y respiración son funciones de muchas variables de tipo ambiental y vegetal, incluyendo la radiación solar, la temperatura y humedad del aire y del suelo, la disponibilidad de agua y nutrientes, el ozono atmosférico y otros contaminantes, el área foliar y la

nutrición foliar. El cambio climático por consiguiente afecta estos procesos de muchas formas. La fotosíntesis probablemente se reduce por un incremento en la cobertura de las nubes o se incrementa por el aumento de la concentración de CO_2 atmosférico (Chattopadhyay *et al.*, 1997). Todos los procesos respiratorios son sensitivos a la temperatura, así como al incremento poblacional de órganos respiratorios, tales como raíces finas y organismos heterotróficos del suelo. Por lo tanto, “la respiración del suelo” es una función de la temperatura del suelo (Boone *et al.*, 1998; Rayment y Jarvis 2000), el cual; si se incrementa, conlleva en el corto plazo a un aumento de la mineralización de la materia orgánica del suelo y la liberación de nutrientes; la cual a su vez, estimula la fotosíntesis, el incremento en el área foliar y el desarrollo de los árboles (Andreae y Schimel, 1990; Mosier *et al.*, 1991). Las plantas mediante el proceso de fotosíntesis absorben el CO_2 de la atmósfera. De este proceso, se obtiene carbono el cual es fijado en el follaje, tallos, sistemas radiculares y sobre todo en el tejido leñoso de los troncos y en las ramas principales de los árboles (Ordóñez 1998). La captura de carbono es un proceso fisiológico que se inicia con la absorción de dióxido de carbono por parte de las plantas a través de los estomas (o poros estomáticos); los cuales están localizados principalmente en la superficie foliar. El CO_2 junto con el agua constituyen la “materia prima” que en el proceso fotosintético es necesaria para transformar la energía radiante (o lumínica) en energía química. En muchos organismos la energía que captan es utilizada para fijar anhídrido carbónico (CO_2) y sintetizar sustancias orgánicas, en particular glúcidos, tales como el almidón, proceso que está acompañado de producción de oxígeno (Lira, 1994).

Los pastizales, características y distribución

Los pastizales son áreas dominadas por pastos y hierbas donde los árboles son escasos o están ausentes. Se encuentran en sitios donde llueve poco para ser bosques pero mucho para ser desiertos (Manzano, 2006). Son ecosistemas que están limitados de agua, donde la producción de biomasa puede ser influenciada por la temperatura, humedad, radiación, secuencia de precipitación, variabilidad climática y otros factores (Dugas *et al.*, 1996; Polley *et al.*, 2002).

Cubren una cuarta parte de la superficie del planeta, ayudan a mitigar el calentamiento global y evitan la erosión de los suelos, sin embargo los pastizales son un ecosistema seriamente amenazados por la agricultura, la ganadería y la actividad forestal. En el fenómeno del calentamiento global, desempeñan un importante papel al secuestrar CO₂ (a razón de unos 60 kg de carbono por hectárea al año) y evitan que este gas se acumule en la atmósfera e influya en la temperatura del planeta, regulan el clima, protegen y regeneran la fertilidad de los suelos, realizan un control sobre las plagas, purifican el agua y el aire, evitan las inundaciones y polinizan los cultivos, entre otras funciones (D'Atri, 2007).

México cuenta con una superficie de 82 millones de ha de pastizales, 11 millones de ha praderas tropicales y 5 millones ha de forrajes bajo riego. Los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas dedican el 77, 70 y 59 por

ciento respectivamente de su superficie a actividades pecuarias. El establecimiento de praderas y cultivos forrajeros es una opción para complementar la alimentación del ganado de los sistemas de producción extensivos comunes en esta región. El estado de Coahuila cuenta con praderas en una superficie de 90,000 ha principalmente de buffel (*Cenchrus ciliaris*) y ballico anual (*Lolium multiflorum*), el estado de Nuevo León tiene una superficie aproximada de 500,000 ha principalmente de buffel y Tamaulipas 1,063,000 ha de buffel, guinea (*Panicum maximum*) y estrella africana (*Cynodon plectostachyus*). Además de la superficie sembrada, casi 5 millones de ha en el Noreste de México tienen potencial para el establecimiento de praderas (López, 1994).

Los pastizales y otros tipos de agostaderos en general se encuentran intensamente sobrepastoreados como resultado de un aprovechamiento ganadero poco organizado. Dedicamos con frecuencia a la agricultura terrenos impropios para tal fin y en otros sitios no aplicamos con suficiente rigor ni amplitud las medidas elementales de conservación de suelo y agua. El manejo de los agostaderos es el principal problema que afrontan los ganaderos en el norte de México, y se encuentra aunado al factor de la baja precipitación. El manejo científico del recurso pastizal tiene como prerrequisito el conocimiento e identificación de las plantas más comunes. Mediante el conocimiento de las plantas existentes en un determinado pastizal se determina que plantas son tóxicas, buenas forrajeras, medicinales e industriales, así como las menos deseables y las invasoras (Arredondo, 1981).

Técnicas para medir los flujos de CO₂ y de energía

En ecosistemas terrestres, los flujos de CO₂, así como otras variables de flujo energético, pueden ser medidos básicamente por tres métodos: i) Covarianza eddy, (CE); ii) Relación Bowen, (RB); y iii) Sistemas de intercambio gaseoso (CIG). Sin embargo, cada uno de estos métodos tienen ventajas y desventajas respecto al registro de las magnitudes que caracterizan el comportamiento de los flujos, debido a que son afectados por la variabilidad de las condiciones del sitio y su entorno en el transcurso del día y la noche, donde se pueden citar los siguientes: humedad, temperatura, presión barométrica, presencia de viento, etc. (Peters *et al.*, 2001; Clark *et al.*, 2001; Massman y Lee, 2002).

En este caso, la medición total del flujo de CO₂ y de energía forma parte de un estudio basado en el método covarianza eddy, el cual, tiene las características siguientes: i) mide directamente el flujo de calor, vapor de agua y bióxido de carbono; ii) no se asumen valores de coeficientes; iii) las mediciones son independientes; iv) permite evaluar la precisión del balance de energía ($R_n = H + LE + G$); y v) es considerado el método mas preciso para medir flujos superficiales (Prueger *et al.*, 1998; Zermeño, 2001).

Mediciones de flujo de CO₂ en pastizales

Estudios previos muestran que los pastizales tienen gran potencial de asimilación de bióxido de carbono. Por ejemplo, Flanagan *et al.*, (2002) realizaron mediciones de flujos de bióxido de carbono (con el método de la covarianza eddy) en una pradera templada cerca de Lethbridge, Alberta, Canadá, y reportaron tasas máximas de asimilación de bióxido de carbono de $19.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, sobre una pradera templada compuesta de *Agropiron dasystachyum*, *Stipa comata*, *Stipa viridula*, y *Bouteloua gracilis*.

Similarmente, Miranda *et al.* (1997) obtuvieron tasas máximas de asimilación de 10 y 15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en una pradera de Brasil en la temporada seca y húmeda respectivamente. Sin embargo, las máximas tasas de asimilación (30-40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) se han encontrado en praderas perennes productivas compuestas de especies de pastos C₄, bajo condiciones de un adecuado contenido de humedad en el suelo (Suyker y Verma, 2001; Dugas *et al.*, 1999).

Las praderas donde predominan pastos del tipo C₃, muestran menores tasas de asimilación de bióxido de carbono. Mediciones realizadas por Li *et al.* (2005) por un periodo de un año en una pradera dominada por plantas C₃ en Mongolia, encontraron que la tasa máxima de asimilación de CO₂ fue de 3.6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{S}^{-1}$. De igual forma valores muy bajos de asimilación de CO₂ fueron encontrados por Hunt *et al.* (2002) en una pradera de pastos C₃ en Nueva

Zelanda durante un periodo largo de sequía, donde el valor máximo de asimilación de CO₂ fue de 5.0 μmol m⁻² s⁻¹

Mediciones de flujos de energía y evapotranspiración en pastizales

El intercambio de masa, momento y energía entre el suelo y la atmósfera es de gran importancia para estudios climáticos, los cuales están ligados con los procesos de crecimiento de la vegetación y los ciclos del carbono de ecosistemas terrestres a través de actividades fisiológicas de fotosíntesis, respiración y cambio morfológico (Dan et al., 2005). El flujo de calor sensible y latente de la superficie son las principales variables que controlan la partición de la energía relacionadas con el cambio de fase del agua y el cambio de gradiente de temperatura entre el suelo y el aire (Varejao et al., 1998; Chen y Dudhia, 2001). La variación del flujo de calor sensible y latente pueden afectar el clima a través de un fuerte impacto en la evolución de la capa límite atmosférica (Koster et al., 2002), por ejemplo el fuerte efecto refrescante de la evapotranspiración (ET) en la temperatura de la superficie y la transferencia conductiva-convectiva del calor sensible a la capa límite atmosférica de la superficie del suelo (Shukla y Mintz, 1982).

Small y Kurc (2001), en una comunidad de pastos en Nuevo México donde las especies dominantes fueron *Bouteloua eriopoda*, *Bouteloua gracilis*, *Hilaria sp.*, *Sporobolus sp.*, *Gutierrezia sarothrae*, encontraron durante un día húmedo

valores máximos de radiación neta (R_n) de 700 Wm^{-2} , calor sensible (H) 280 Wm^{-2} , calor latente (LE) 320 Wm^{-2} y calor en el suelo 180 Wm^{-2} , mientras que para un día seco los valores máximos alcanzados fueron de 600, 450, 90 y 120 Wm^{-2} , para R_n , H, LE y G respectivamente, además se alcanzaron valores máximos de evapotranspiración (ET) de 4 mm por día.

Por otro lado, en una comunidad semiárida arbustiva y de pastizal en Arizona, donde los pastos fueron del tipo C_4 , mientras que los arbustos en su mayoría fueron C_3 , Emmerich (2007), encontró valores promedios de evapotranspiración (ET) diaria de 2.6 mm para la comunidad de arbustos y 5.4 mm para el pastizal la cual aumentó conforme aumentó la temperatura y la radiación. Así mismo Ponton *et al.* (2006) encontraron tasas máximas de evapotranspiración (ET) de 5 mm para un pastizal en Alberta, Canadá. De igual forma, Fredeen *et al.* (1997) encontró tasas máximas de evapotranspiración (ET) de 5.1 mm en una pradera en California.

Generalidades del zacate picoso

Clasificación taxonómica

De acuerdo con Clayton *et al.* (2002) la clasificación taxonómica de este tipo de pasto es:

Familia: Poaceae

Tribu: Stipeae

Nombre científico: *Stipa clandestina* Hack.

Nombre común: Zacate picoso

Longevidad: Perenne

Origen: Nativa

Tipo de metabolismo: C₃

Planta perenne, culmos erectos con 2-3 nudos, hojas basales en su mayor parte; vainas abiertas, lisas, aurículas ausentes, hojas redondeadas a agudas, ápices muy tiesos y puntiagudos. Inflorescencias paniculadas, con una panícula terminal principal. Espiguillas de panículas terminales con una flor. Lemas pubescentes, a menudo más densamente y / o de modo más persistente en los nervios laterales, pelos en la parte inferior alrededor de 0.7-2 mm de largo, pelos en la porción distal y a menudo más largos; Corona no desarrollada; tres estambres, las anteras a veces todas de igual tamaño, de 2 mm de largo; Ovarios glabros, el estilo con dos divisiones, unidos en la base, estigmas plumosos. Bases estilares de 1-2 mm de largo, persistente, a veces excéntrico; espiguillas de panículas axilares de 0.5-1 mm de largo, glumas delgados, más cortos que las flores (Arriaga y Barkworth, 2006).

Distribución:

Es una especie endémica para México, se ha reportado para Coahuila, Nuevo León, Michoacán, Aguascalientes, Estado de México, Hidalgo, San Luis Potosí, Tlaxcala y Zacatecas (McVaugh, 1983; Rzedowski y Rzedowski, 2001; Villaseñor y Espinosa, 1998).

Hábitat:

Se encuentra en regiones templadas, en valles con suelos profundos y fértiles y en laderas, crecen en bosques de pino-encino de los 1880 a 2300 msnm.

Época de crecimiento:

Es una especie que empieza a retoñar temprano en la primavera, antes que el resto de los zacates asociados y se mantiene verde hasta que se presentan las bajas temperaturas del mes de octubre en el norte de México.

Descripción técnica:

Basada en Espinosa y Sarukhán, 1997; McVaugh, 1983; Rzedowski y Rzedowski, 2001:

Hábito y forma de vida:

Hierba perenne, erguida, amacollada.

Tamaño:

De 50 a 80 cm de alto.

Tallo:

Con uno a tres nudos sin pelos, con algunos pelos o bien ásperos al tacto.

Hojas:

Alternas, dispuestas en dos hileras sobre el tallo, con las venas paralelas, divididas en dos porciones, la inferior llamada vaina que envuelve al tallo, con abundantes pelos blancos en su ápice, y la parte superior de la hoja llamada lámina que es larga, angosta, plegada o enrollada, sin pelos; entre la vaina y la lámina, por la cara interna, se presenta una pequeña prolongación membranácea terminada en pelos, llamada lígula.

Inflorescencia:

Una panícula abierta, pálida o purpúrea, de hasta 20 cm de largo, con abundantes pelos blancos en su nudo basal, compuesta de pocas ramas largas y muy separadas entre sí, en las que se encuentran numerosas espiguillas provistas de largas aristas dobladas en dos puntos y ásperas al tacto. Los ejes de la inflorescencia a veces ásperos al tacto.

Espiguillas/Flores:

Espiguillas con un solo flósculo que se desarticula por encima de las glumas; glumas iguales o subiguales de 4 a 7 mm de largo, color verdoso o purpúreo; flósculo tan largo o menor que las glumas, purpúreo, piloso, con una arista de 12 a 18 mm de largo. Las flores son muy pequeñas y se encuentran cubiertas por una serie de brácteas, algunas de ellas presentan aristas.

Frutos y semillas:

El fruto es un cariopsis de contorno ovado o casi ovado, de forma clavada o casi clavada, de hasta 2.7 mm de largo y 1.2 mm de ancho. Cariopsis envueltas en un flósculo formado por una palea y lema setosas, desprendibles, la lema tiene una arista muy larga, retorcida y frágil, el flósculo es de color verdoso o purpúreo. Una sola semilla fusionada a la pared del fruto.

Plántulas:

Coleóptilo alargado, hialino, dos nervaduras convergentes conspicuas. Primera hoja con vaina del mismo tamaño que el coleóptilo, lámina linear de 7 a 25 mm de largo y 0.5 mm de ancho, sin pelos. Segunda hoja con lámina de 8 a 37 mm de largo y hasta 1 mm de ancho, linear, ápice agudo, sin pelos, con nervaduras conspicuas.

Valor forrajero:

Esta especie provee forraje de regular calidad durante el invierno, pues permanece verde, no es muy apetecible por el ganado debido a lo punzante del ápice de los limbos y a las aristas rígidas que presenta en la inflorescencia.

Manejo:

A pesar de no ser aceptado por el ganado como otros zacates con los que se asocia, es común observar que el ganado pastorea sus hojas basales durante el invierno, por lo que se puede recomendar pastorearlo o pisotearlo para disminuir la presencia de tallos y hojas viejas y lignificadas.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Localización geográfica del sitio de estudio

El estudio se realizó durante el verano de 2007 (18 de julio al 21 de agosto), en el rancho experimental ganadero “Los Ángeles”, municipio de Saltillo, Coahuila, México ($25^{\circ} 06' 30''$ N y $100^{\circ} 59' 20''$ O), con elevación promedio de 2,100 m y una superficie total aproximada de 6,700 ha (Figura 4.1); localizado aproximadamente a 34 km al sur de la capital del estado. Por la carretera Saltillo-Concepción del Oro, Zacatecas, en el km 318.5 entronca un camino de terracería con dirección oriente rumbo al Ejido Hedionda Grande, y en el km 4 de este camino da principio el rancho, terminando en el km 15.

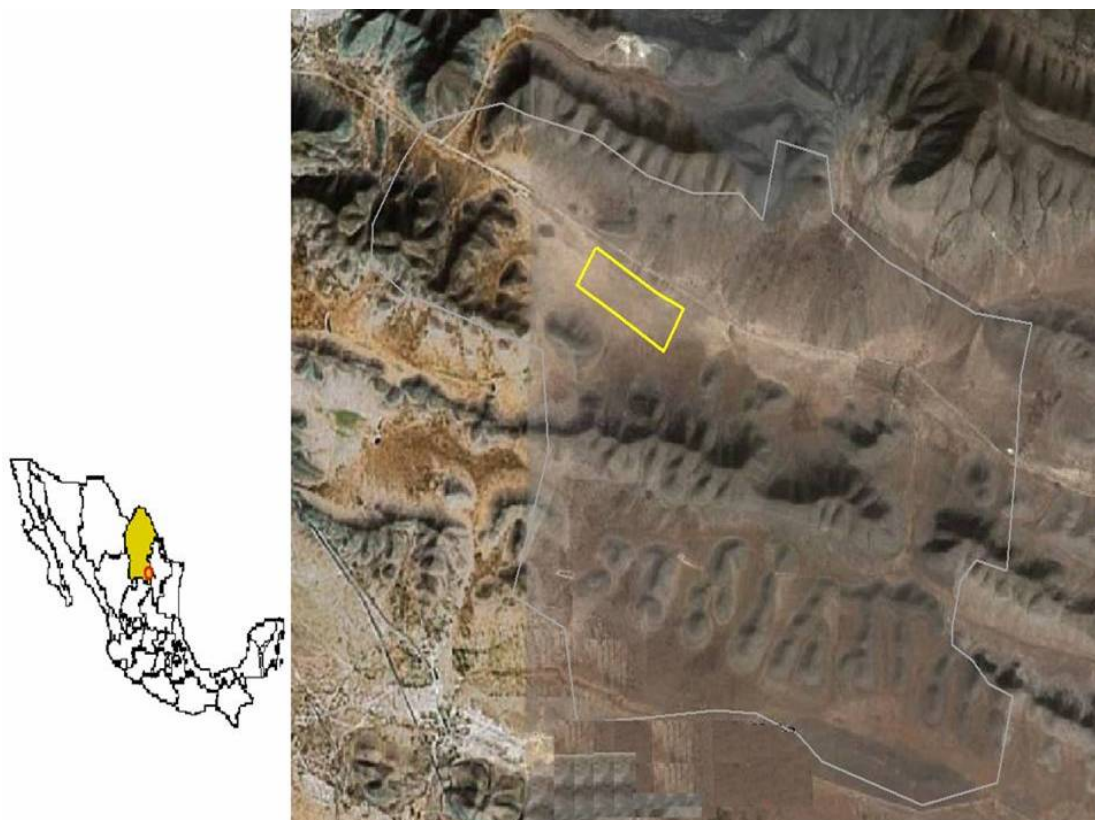


Figura 4.1. Localización geográfica del rancho “Los Ángeles”

Características generales del área de estudio

Clima

El clima del lugar (García, 1981) se clasifica como [BWhw(x')(e)], que corresponde a seco árido, semicálido, de invierno fresco, temperatura media anual que fluctúa entre 18 y 22 °C, precipitación promedio anual entre 450 y 550 mm distribuida principalmente en verano e invierno.

Suelos

Los suelos de los valles corresponden a los suelos aluviales. Su profundidad varía desde 2 hasta 15 m aproximadamente. Los suelos que existen sobre las laderas, coluviales de origen, difieren de los que se encuentran en los llanos porque el agua percolante tiende a moverse lateralmente en vez de hacerlo perpendicularmente a través del perfil; son los más susceptibles a la erosión. Por último los suelos de la parte alta de la sierra, correspondientes al bosque de piñonero son suelos forestales ricos en materia orgánica y humus (Arredondo, 1981).

Hidrología

El área que corresponde al rancho no es tocada por ninguna corriente superficial permanente y tiene una precipitación pluvial anual de aproximadamente de 350 a 450 mm. El nivel freático regional del agua es del orden de los 190 m de profundidad (Arredondo, 1981).

Vegetación

Dentro de las 6478 ha del rancho están diferenciados siete tipos de vegetación importantes para la ganadería del norte de México y cubren una superficie de aprox. 90 millones de ha.

De acuerdo con Vázquez (1973), los diversos tipos de vegetación en el rancho son:

Pastizal mediano abierto

Este tipo de vegetación recibe su nombre de acuerdo a su fisionomía o sea el aspecto general de la vegetación. Se localiza en los valles en suelos cuya profundidad oscila entre 2 y 8 m, es de origen aluvial, moderadamente permeables, y debido a la cubierta vegetal que presenta tiene una alta tasa de retención de humedad y una alta capacidad para evitar escurrimientos que causen erosión. Es el tipo de vegetación que presenta mayor potencial forrajero. Las especies mas importantes que se encuentran en esta comunidad son: *Bouteloua gracilis*, *B. curtipendula*, *Buchloe dactyloides* y *Lycurus phleoides*.

Pastizal amacollado

Situado en las zonas marginales del pastizal mediano abierto en las faldas de las sierras, con suelos poco profundos y pedregosos. Las especies importantes que forman este tipo de vegetación son: *Bouteloua curtipendula*, *B. hirsuta*, *Aristida sp.*, *Muhlenbergia rigida*, *M. dubia* y *Stipa leucotricha*.

Matorral rosetófilo

Situado en las laderas con exposición sur y cimas de cerros que generalmente presentan suelos de origen coluvial, de textura arenosa. La composición vegetal de este tipo de vegetación es: *Agave lecheguilla* (lechuguilla), *A. falcata* (guapilla), *Nolina microcarpa* (cortadillo), *Yucca carnerosa* (palma samandoca), *Dasyllirion cedrosanum* (sotol). En el estrato

herbáceo se presentan especies de gramíneas de las cuales *Bouteloua curtipendula*, *B. gracilis* y *Muhlenbergia parviglumis*, son las más comunes.

Izotal

Situado en laderas con pendientes moderadas y suelos arenosos y pedregosos. Este tipo de vegetación se caracteriza por la dominancia de plantas del género *Yucca* y algunas especies de ramoneo como *Ephedra aspera*, *Dalea tuberculata*, *Opuntia sp.* y algunas gramíneas como *Bouteloua gracilis* y *B. curtipendula*.

Matorral esclerófilo

Situado sobre laderas de sierras altas de considerable pendiente y con exposición norte. Tiene suelo de origen coluvial somero, pedregoso y bien drenado. Este tipo de vegetación se caracteriza por la dominancia de especies arbustivas del género *Quercus*.

Bosque de pino-encino

Situado en laderas y cimas de cerros altos con exposición norte y algunas veces con exposición noroeste. Las especies que dominan en este tipo de vegetación son: *Pinus cembroides* (piñonero), *Quercus intricata* (Encino), *Yucca carnerosana* (Palma samandoca), *Juniperus monosperma* (Enebro), *Rhus virens* y en el estrato inferior por algunas gramíneas del género *Bouteloua*.

Matorral de *Dasyliirion* con pastos amacollados

Situados en la parte sur del rancho, cubre cerros y lomeríos de escasa altura. Las especies dominantes de este tipo de vegetación son: *Dasyliirion cedrosanum*, *Quercus intricata* y *Nolina microcarpa*. El estrato inferior lo representan especies de gramíneas de los géneros *Bouteloua*, *Muhlenbergia*, *Stipa* y *Aristida*.

El trabajo experimental se desarrolló en un pastizal mediano abierto de aproximadamente 200 ha, en un suelo de tipo Feozem lúvico (HI). En el Cuadro 4.1 se muestran las propiedades físicas y químicas más importantes del suelo del sitio de estudio. El pastizal está formado por diferentes especies vegetales nativas de la localidad (Cuadro 4.2), donde el pasto perenne “zacate picoso” (*Stipa clandestina* Hack.) de tipo C₃ y altura promedio de 0.55 m es el predominante. El porcentaje de cobertura vegetal en el sitio de estudio, fué de aproximadamente 60 por ciento utilizando el marco de puntos (Neal et al., 1969)

Cuadro 4.1. Características físicas y químicas del suelo del sitio de estudio en el Rancho los Ángeles, municipio de Saltillo, Coahuila, México.

Variable	Profundidad (cm)		Método
	0-60	60-100	
pH	8.09	7.68	Potenciómetro
CE (dS m ⁻¹)	0.136	0.114	Puente de Wheatstone
MO (%)	4.67	3.15	Walkley y Black
N (%)	0.310	0.180	Método Keldal
Arcilla	29.0	25.2	Hidrómetro de Bouyoucos
Limo	28.4	26.0	Hidrómetro de Bouyoucos
Arena	44.7	48.8	Hidrómetro de Bouyoucos
Textura	Migajón-arcilloso	Migajón-arcillo-arenoso	Triángulo de texturas
Carbonatos totales (%)	21.9	24.4	Volumetría de neutralización
Da (Kg m ⁻³)	954		Barrenaextractordenúcleos
Color en seco	2.5 y 5/2	2.5 y 6/4	Tabla de colores Munsell
Reacción al HCl	Fuerte	Fuerte	Prueba cualitativa rápida

Cuadro 4.2. Relación de especies presentes en la pradera donde se realizó el estudio; Rancho Los Ángeles, municipio de Saltillo, Coahuila, México.

Familia	Nombre científico	Nombre común
Acanthaceae	<i>Dischoryste linearis</i> (T.&G.)O. Ktze	Acanto
Asteraceae	<i>Aphanostephus ramosissimus</i> DC.	Perezosa
Asteraceae	<i>Brickellia laciniata</i> Gray.	Jarilla
Asteraceae	<i>Xanthocephalum sarothrae</i> (Pursh) Shinnars	Escobilla
Asteraceae	<i>Zinnia acerosa</i> (DC.) Gray	Hierba del burro
Boraginaceae	<i>Tiquila canescens</i> (DC.) Richardson	Oreja de ratón
Chenopodiaceae	<i>Eurotia lanata</i> (Pursh) Moq.	Gordura de invierno
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia furcillata</i> H.B.K.	Hierba del coyote
Onagraceae	<i>Calylophus berlandieri</i> (Spach) Towner	Amapola
Poaceae	<i>Stipa clandestina</i> Hack	Zacate picoso

Instrumentación y mediciones

El flujo de de bióxido de carbono (F_{CO_2}) y los flujos de energía: calor latente (LE) y calor sensible (H) entre la superficie vegetal y la atmósfera se determinaron de acuerdo con el método de la covarianza eddy, utilizando las siguientes relaciones:

$$F_{CO_2} = \overline{w' \rho_{CO_2}'} \quad (1)$$

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

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

Donde: ρ_a es la densidad del aire (kg m^{-3}), C_p es la capacidad calorífica del aire ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), L es el calor de vaporización del agua (J kg^{-1}), T_a es la temperatura del aire (K). El producto $w' \rho_{CO_2}'$, $w' \rho_{wv}'$, $w' Ts'$ representa la covarianza entre la velocidad vertical del viento (w) y la densidad del bióxido de carbono (ρ_{CO_2}), densidad del vapor de agua (ρ_{wv}) y la temperatura sónica (T_s) respectivamente. La barra horizontal representa el promedio de un segmento de tiempo (20 min).

w y T_s se midieron con un anemómetro sónico tridimensional (CSI-CSAT3, Campbell, Sci, Inc), mientras que ρ_{wv} y ρ_{CO_2} se determinaron con un analizador de bióxido de carbono y vapor de agua de conducto abierto (open path CO_2/H_2O analyzer, LI-7500; LI-COR). Estos sensores (Figura 4.2) se instalaron

a 1.5 m sobre el dosel de la vegetación, en el lado sur del pastizal y orientados hacia el norte, para tener un fetch (distancia horizontal desde los sensores en la superficie de estudio) con mas de 300 m de radio. Los vientos provenientes del sur no se consideraron para el análisis, ya que el flujo se distorsiona al impactar en la parte posterior de los sensores.



Figura 4.2. Sensores del sistema eddy utilizados para medir los flujos de bióxido de carbono, vapor de agua y calor sobre el pastizal del norte de México.

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 para segmentos de 20 min (en forma continua) durante el estudio. 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 establecer el balance de energía, considerando que el método eddy realiza una buena determinación de la relación Bowen. El flujo de CO₂ se corrigió con el mismo factor (Ham y Heilman, 2003).

La temperatura del aire se midió (a la misma altura que las mediciones de Ts) con un sensor de temperatura y humedad relativa (HP45C, Vaisala, Inc), a una frecuencia de 1 s para obtener promedios de 20 min.

El balance de energía sobre la superficie vegetal se obtuvo con la siguiente relación:

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

Donde R_n es la radiación neta y G es el flujo de calor en la superficie del suelo. En la ecuación 4, no se consideró la energía almacenada por cambio de temperatura de la vegetación y del aire a la altura del dosel, ni la energía almacenada (en la fotosíntesis) o liberada (en la respiración) por la vegetación, por ser muy poco significativos con relación a los términos de esta ecuación (Verma, 1990).

Rn se midió con un radiómetro neto (modelo NR-LITE, Keep and Zonen, Inc), a una altura de 1.5 m sobre el dosel de la vegetación. Mientras que G se midió usando dos transductores de calor (modelo HFT3, Campbell Scientific, Inc) enterrados a 0.08 m, uno bajo condiciones de vegetación y el otro en suelo desnudo. 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 sobre el transductor, que 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 20 min. Todos los sensores se conectaron a un datalogger (CR 23X, Campbell, Sci. Inc) donde se hizo el registro electrónico de datos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

Dinámica de los flujos

El pastizal evaluado tuvo un alto potencial de asimilación de CO₂, ya que se midieron tasas máximas de flujo de CO₂ (FCO₂) de la atmósfera hacia la superficie de 18 μmol m⁻² s⁻¹ (Figura 5.1). Las tasas máximas de FCO₂ de la atmósfera a la superficie suelo-vegetación en los días evaluados generalmente ocurrieron de 11:00 a 14:00 hr, que corresponde a los máximos valores de radiación neta. Tappeiner y Cernusca (1996) reportaron tasas menores de asimilación de CO₂ (7 μmol m⁻² s⁻¹) en un pastizal del cinturón subalpino del Cáucaso central; mientras que para condiciones templadas, durante la transición otoñal, Ham y Knapp (1998) observaron tasas máximas de asimilación de 23 μmol m⁻² s⁻¹ en pastizales de Manhattan, KS, EE.UU. Sin embargo, en un pasto nativo del norte de Oklahoma sin déficit de humedad del suelo, la máxima tasa de asimilación de CO₂ fue de 32 μmol m⁻² s⁻¹ (Suyker y Verma, 2001).

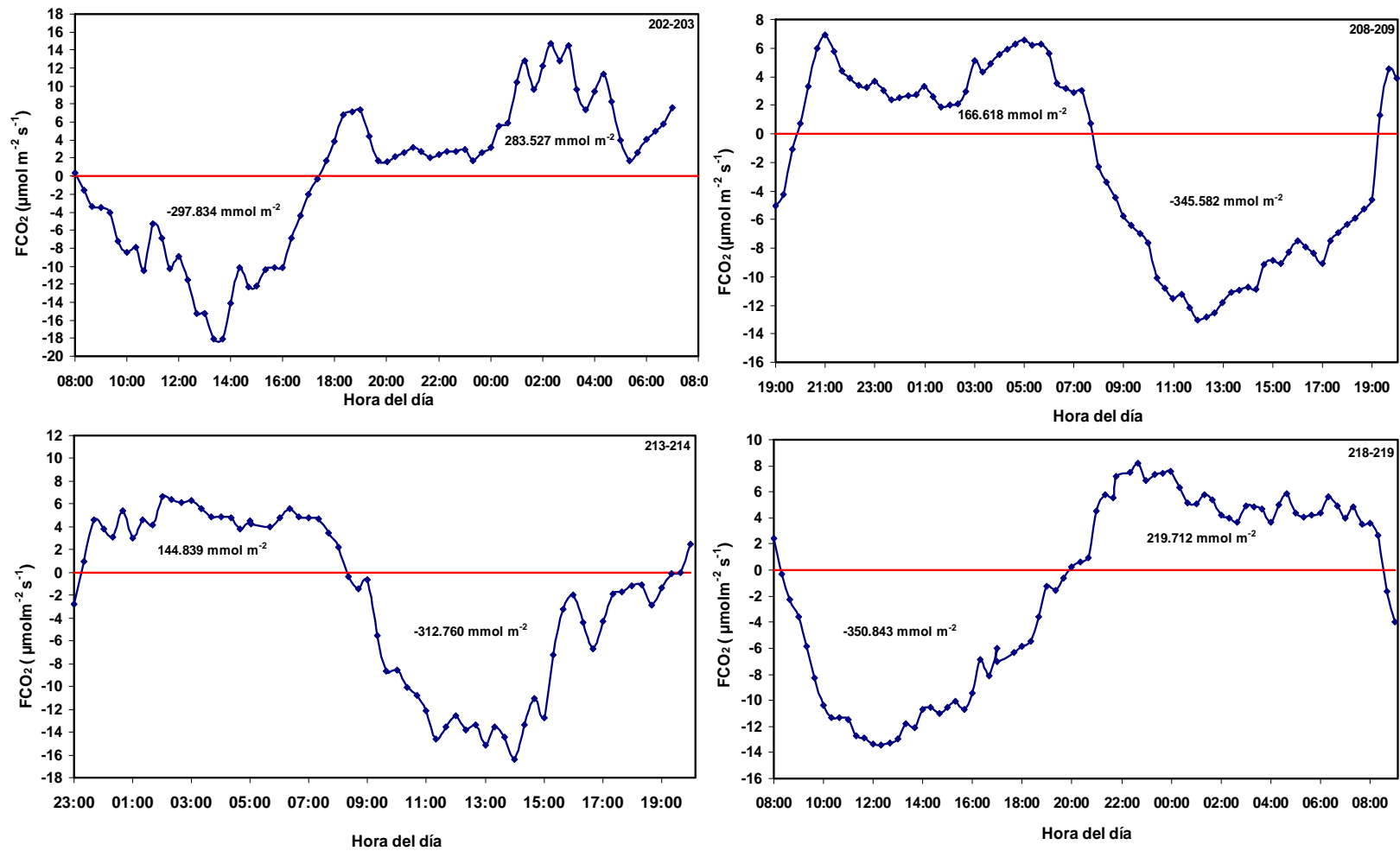


Figura 5.1. Dinámica del flujo de bióxido de carbono entre la superficie vegetal y la atmósfera, en varios días del verano de 2007 en un pastizal árido del noreste de México. Valores negativos indican que la dirección del flujo es de la atmósfera a la superficie suelo-vegetación, y positivos de la superficie a la atmósfera.

Para los ciclos de 24 h evaluados (Figura 5.1), el FCO₂ integrado fue mayor durante el día (valores negativos) que durante la noche (valores positivos); esto sugiere que la fijación de CO₂ por la superficie vegetal (fotosíntesis) fue mayor que la liberación (respiración nocturna). En el día 202 se dio el menor flujo integrado de CO₂ (-297.834 mmol m⁻²) y el pastizal dejó de asimilar CO₂ a las 17:20 hr, debido a que en este día se presentó nubosidad intermitente y valores muy bajos de radiación neta (Figura 5.2). Por el contrario, en el día 218 se observó el mayor flujo integrado de CO₂ (-350.843 mmol m⁻²) y la superficie vegetal asimió CO₂ hasta las 19:40 hr. Este día fue totalmente despejado con un valor mayor de radiación neta (Figura 5.2). Esto sugiere que la radiación es un factor dominante en la asimilación de CO₂ por el pastizal. Hew *et al.* (1969) también encontraron una relación directa entre la tasa de asimilación de CO₂ y la incidencia de radiación sobre diferentes cultivos como soya, girasol y melón durante la estación de verano.

La radiación neta (Rn) fue el término dominante de los componentes del balance de energía sobre la superficie vegetal (Figura 5.2). Durante las horas de mayor incidencia de radiación solar (11:00 a las 16:00), Rn se disipó principalmente en calor latente (LE), seguido por calor sensible (H) y calor en la superficie del suelo (G). El flujo de calor sensible y latente entre la superficie y la atmósfera, determinan la magnitud del cambio de fase del agua y el gradiente de temperatura entre la superficie vegetal y el aire (Varejao *et al.*, 1998; Chen y Dudhia, 2001).

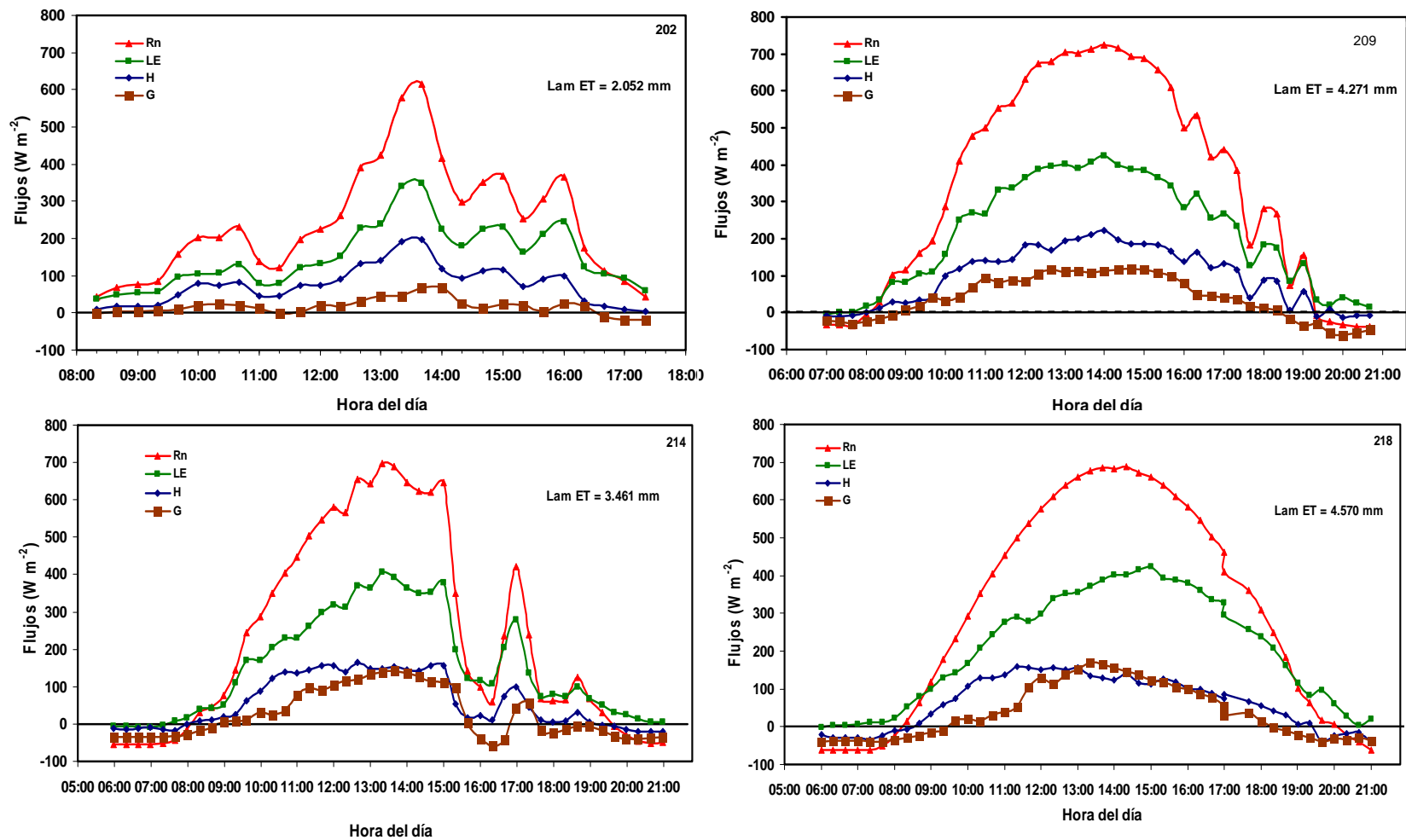


Figura 5.2. Dinámica del flujo de radiación neta (Rn), calor latente (LE), calor sensible (H) y calor en la superficie del suelo (G) en un pastizal árido del Noreste de México, en varios días del año del verano de 2007.

También se observó que con cielo despejado (valores mayores de R_n), la lámina de agua evapotranspirada (Lam ET) por el pastizal fue mayor (Figura 5.2), alcanzando valores de 4.5 mm d^{-1} , aunque la tasa de evapotranspiración (ET) depende del área foliar, temperatura del aire, velocidad del viento, contenido de humedad del suelo y otras condiciones climáticas (Baldocchi, 1994; Morecroft y Roberts, 1999), ya que Bremer *et al.* (2001) encontraron tasas de ET de 6.1 mm d^{-1} en una pradera natural dominada por especies de pastos C_4 en el noroeste de Kansas, EE. UU., durante el periodo de lluvias (mayo a octubre).

Durante la noche (de las 21 hr del día anterior a las 6 hr del día siguiente), R_n , H y G son negativos, mientras que LE es aproximadamente cero (Figura 5.3). Nuevamente, R_n es el término dominante del balance de energía sobre la superficie. Valores negativos de R_n y H implican que la superficie pierde energía. Esto se debe a que durante la noche, el aire se enfría más rápido que la superficie. Mientras que valores negativos de G representan un flujo de calor desde el interior hacia la superficie del suelo, debido a que por la noche el perfil del suelo permanece más caliente que la superficie. Los pequeños valores negativos de LE indican la ocurrencia de rocío sobre la superficie. El cual se puede originar a partir de varias fuentes como el aire, el suelo y la misma planta. La primer fuente puede ser considerada como una adición del balance hidráulico del agua puesto que este término es la única fuente que se origina de las reservas de agua atmosférica (Fritschen y Doraiswamy, 1973). Éste es un flujo de vapor de agua que puede ser del aire a la superficie y del suelo al dosel,

además depende de la velocidad del viento, temperatura absoluta, estabilidad atmosférica, humedad relativa, de las características del suelo y la nubosidad. Altas tasas de rocío son normalmente 0.06 mm h^{-1} sobre el dosel o suelo desnudo, aunque bajo condiciones de suelo y aire saturado, las tasas de formación de rocío pueden llegar a $0.07\text{-}0.09 \text{ mm h}^{-1}$ (Garratt y Segal, 1988).

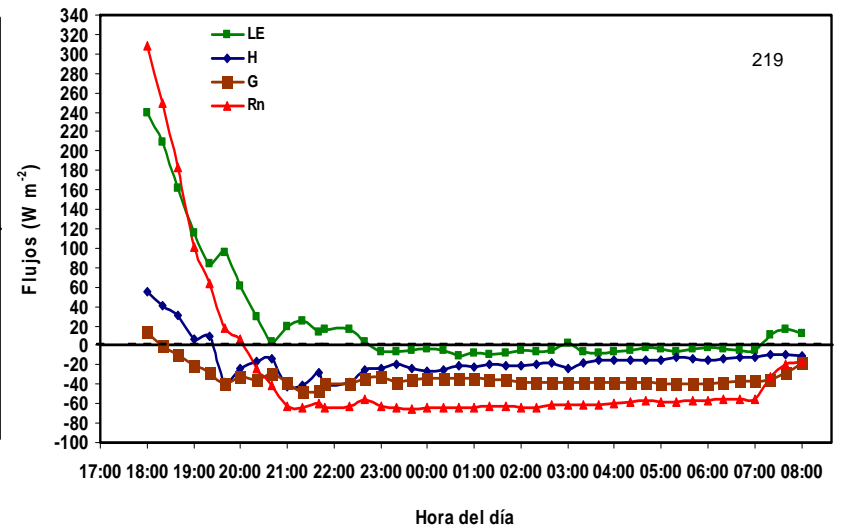
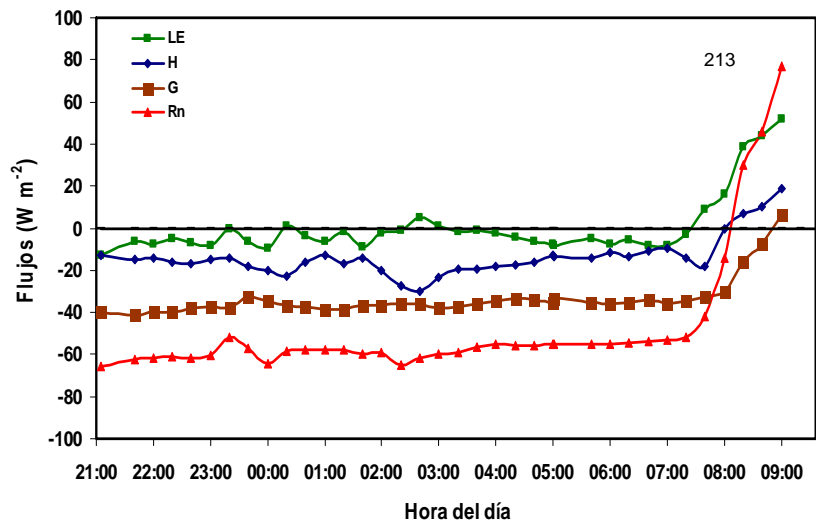
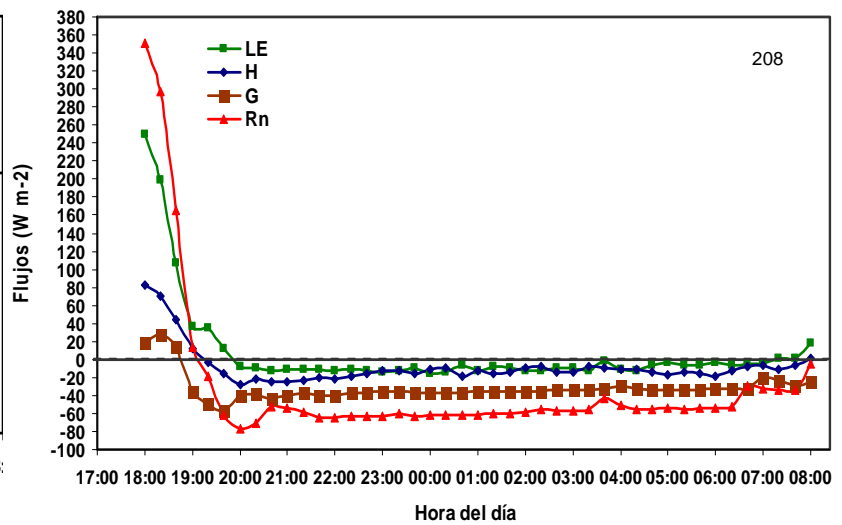
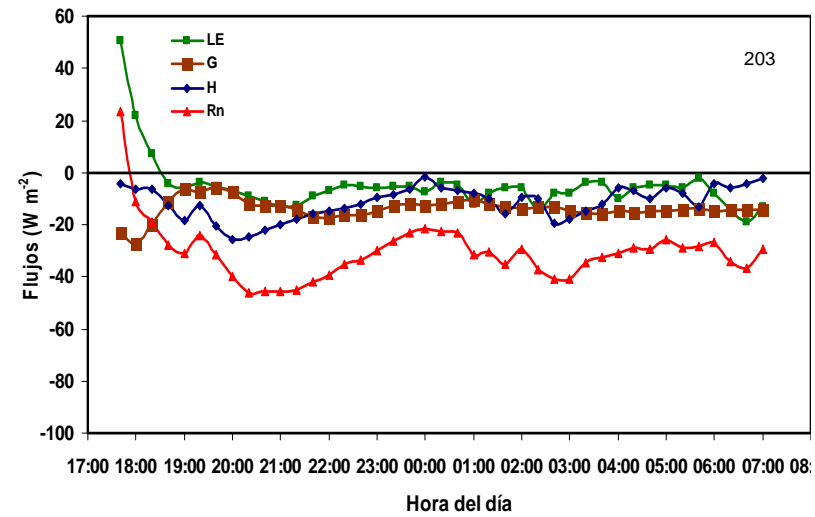


Figura 5.3. Dinámica del flujo de radiación neta (Rn), calor latente (LE), calor sensible (H) y calor en la superficie del suelo (G) en un pastizal árido del Noreste de México, observados en diferentes noches del año del verano de 2007.

Distribución de los flujos y eficiencia fotosintética

En el Cuadro 5.1 se muestra la forma en que la radiación neta (R_n) se disipó en flujo de calor latente (LE), calor sensible (H) y calor en la superficie del suelo (G). Para cielo despejado se observó una mayor proporción de disipación de R_n en LE y G, y una menor disipación en H que para cielo con nubosidad. La menor disipación de R_n en G se presentó con nubosidad intermitente a lo largo del día. En promedio, para las diferentes condiciones atmosféricas, 61.4 por ciento de R_n se disipó en LE, 26.4 por ciento en H y 12.3 por ciento en G, indicando que la evapotranspiración es el principal mecanismo de disipación de la radiación neta sobre la superficie vegetal. Mientras que Jaramillo y Escobar (1987) mostraron que 67 por ciento de R_n se disipó en LE, 30 por ciento H y 3 por ciento en G en una plantación de *Coffea arabica* L.

Cuadro 5.1. Valores diarios (8:00 a 20:00) de la fracción de la radiación neta (Rn) disipada en calor latente (LE), calor sensible (H), y calor en la superficie del suelo (G), en diferentes condiciones climáticas en un pastizal árido del noreste de México; y la eficiencia del uso del agua y de la radiación por la superficie suelo-vegetación.

Día	Condición	$\frac{LE}{Rn}$	$\frac{H}{Rn}$	$\frac{G}{Rn}$	Eficiencia del uso del agua mmolCO ₂ /L H ₂ O por m ² de superficie	Eficiencia fotosintética mmolCO ₂ /MJ J por m ² de superficie
202	Nubosidad durante el día	0.618	0.311	0.071	145.14	36.76
209	Parcialmente despejado	0.588	0.280	0.135	80.92	19.52
214	Nubosidad desde las 16:00	0.618	0.245	0.137	90.36	22.87
218	Totalmente despejado	0.631	0.221	0.148	48.17	12.46

En la Figura 5.2 se muestra que en condiciones de cielo totalmente despejado se tuvieron los valores mayores de asimilación de CO₂ por la superficie vegetal (-350.84 mmol m⁻²), con relación a la asimilación diurna en cielo con nubosidad durante el día (-297.83 mmol m⁻²). Sin embargo, la eficiencia del uso del agua por la superficie vegetal, expresada en mmol CO₂ L⁻¹ agua evapotranspirada por m² de superficie en cielo con nubosidad durante el día fue mayor (145.14), que en condiciones de cielo totalmente despejado (48.17). De igual forma, la eficiencia del uso de la radiación por la superficie vegetal, expresada en mmol de CO₂ MJ⁻¹ radiación por m² también es mayor en condiciones de nubosidad durante el día (36.76) que con cielo totalmente despejado (12.46). Esto probablemente se debió a que las altas dosis de

radiación absorbida por la vegetación con cielo despejado afectaron la tasa de fotosíntesis de las plantas por un efecto térmico. Esto coincide con los resultados de Borjigidai *et al.* (2006), Hikosaka *et al.* (2006), Cunningham y Read (2002) que mencionan una reducción de la fotosíntesis por diferentes tipos de plantas debido a que la eficiencia de la carboxilación disminuye con altas temperaturas.

En promedio, para las diferentes condiciones climáticas prevalecientes durante el estudio, la eficiencia del uso del agua por el pastizal fue 91.15 mmol CO₂ L⁻¹ de agua evapotranspirada por m² de superficie, y la eficiencia del uso de la radiación fue de 22.90 mmol de CO₂ MJ⁻¹ de radiación por m². En un pasto de la especie *Lolium perenne* L (cobertura total del suelo) Emmerich (2007) reportó valores máximos de eficiencia del uso del agua de 167 mmol CO₂ L⁻¹ de agua, mientras que en una pradera de pastos C₄ Schapendonk *et al.* (1997) observaron valores máximos de eficiencia del uso de la radiación de 63 mmol CO₂ MJ⁻¹

V. CONCLUSIONES

Se concluye que el pastizal tiene altas tasas de asimilación de CO₂ para las condiciones climáticas y geográficas.

La eficiencia del uso del agua y de la radiación por la superficie vegetal es mayor en condiciones de cielo con nubosidad durante el día.

La radiación neta es el principal factor determinante en el flujo de energía sobre la superficie vegetal.

VI. RESUMEN

Se utilizó el método de la covarianza eddy para medir los flujos de bióxido de carbono (CO_2) y energía en un pastizal árido del noreste de México, para evaluar el potencial de secuestro de carbono por la superficie vegetal y la distribución de los flujos de energía. Se observó que el pastizal tiene alto potencial de secuestro de carbono, ya que se obtuvieron tasas máximas de asimilación de CO_2 de $18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. La asimilación de CO_2 por la superficie durante el día (fotosíntesis) fue mayor que la liberación durante la noche (respiración nocturna), indicando una retención neta de carbono por la superficie. La asimilación de CO_2 fue mayor con cielo despejado, pero la eficiencia del uso del agua y de la radiación por la superficie fue mayor en días nublados. La radiación neta (R_n) sobre la superficie se disipó principalmente en flujo de calor latente (LE), flujo de calor sensible (H) y en menor proporción en flujo de calor en el suelo (G), indicando la importancia de la evapotranspiración para la disipación de la radiación absorbida por la superficie vegetal. Mediante el manejo adecuado de los pastizales se puede reducir la concentración de CO_2 en la atmósfera, ya que con el uso de esta técnica se puede cuantificar el secuestro de carbono por las plantas.

Palabras clave: Covarianza Eddy, pastizal, secuestro de carbono, flujo de CO_2 , balance de energía.

VII. LITERATURA CITADA

- Andreae, M.O., and D.S. Schimel. 1990. Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. Ed. Wiley and Sons, p. 263-280.
- Arredondo V., D. 1981. Componentes de la vegetación del rancho demostrativo "Los Ángeles". Tesis. Licenciatura. UAAAN. 180 p.
- Arriaga M. O. and M.E. Barkworth. 2006. *Amelichloa*: A new genus in the stipeae (Poaceae). SIDA 22 (1): 145-149.
- Baldocchi, D.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. *Agric. Forest Meteorol.* 67: 291-321.
- Boone, R.D., K.J. Nadelhoffer, J.D. Canary and P.J. Kaye. 1998. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature* 396: 570–572.
- Borjigidai, A., K. Hikosaka, T. Hirose, T. Hasegawa, M. Okada and K. Kobayashi. 2006. Seasonal changes in temperature dependence of photosynthetic rate in rice under a free-air CO₂ enrichment. *Annals Bot.* 97: 549–557.
- Bremer, J.D., M.L. Auen, M.J. Ham and E.C. Owensby. 2001. Evapotranspiration in a prairie ecosystem: Effects of grazing by cattle. *Agron. J.* 93:338–348.
- Cao-Mingkui, K. Gregson, S. Marshal and M.K. Cao. 1998. Global methane emission from wetlands and its sensitivity to climate change. *Atmospheric Environ.* 32(19): 3293-3299.
- Carson, D.J. 1996. Modeling climatic change: achievements and prospects. *Forests and Climate Commonwealth For. Rev.* 75(1): 12-18.
- Chattopadhyay, N., M. Hulme and M. Y. Leclerc. 1997. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. Conference of Agricultural and Forest Meteorology, Beijing China, 87: 1, 55-73.

- Chen, F., and J. Dudhia. 2001. Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system Part I: model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Rev.* 129: 569–585.
- Ciesla, W. M. 1996. Cambio climático, bosques y ordenación forestal. Una visión de conjunto. FAO. Estudio FAO Montes 126. Roma, Italia. 146 p.
- Clark, D.A., S. Brown, W.D. Kiclighter, Q.J. Chambers, R. J. Thomlinson and J. Ni. 2001. Measuring Net Primary Production in Forest: Concepts and Field Methods. *Ecological Society of America. Ecological Applications*, 11(2): 356-370.
- Clayton, W.D., K.T. Harman and H. Williamson. 2002. World Grass Species: Descriptions, Identification, and Information Retrieval. <http://www.kew.org/data/grasses-db.html>. [accessed 08 November 2007; 15:30 GMT]
- Cortes J., B. Quian, X. Hong and B.D. Quian. 1998. Regional climate change in Portugal: precipitation variability associated with large-scale atmospheric circulation. *Inter. J. of Climatology*, 18 (6): 619-635.
- Cunningham, S.C., and J. Read. 2002. Comparison of temperate and tropical rainforest tree species: photosynthetic responses to growth temperature. *Oecology* 133: 112–119.
- Dan, L., J.J. Ji and Y.P. Li. 2005. Climatic and biological simulations in a two-way coupled atmosphere-biosphere model (CABM). *Global and Planetary Change* 47: 153–169.
- D'Atri, P. 2007. Pastizales del mundo. Novedades de Biodiversidad en América Latina N° 160. IPS (Inter Press Service) e IFEJ (Federación Internacional de Periodistas Ambientales). www.produccion-animal.com.ar.
- Dhakhwa, G.B., and C.L. Campbell. 1998. Potential effects of differential day-night warming in global climate change on crop production. *Climate Change* 40: 647-667.
- Dugas, W. A., R. A. Hicks and R.P. Gibbens. 1996. Structure and function of C₃ and C₄ Chihuahuan desert plant communities. Energy balance components. *Journal of Arid Environments* 43:63–79.
- Dugas, W.A., M.L. Heuer and H.S. Mayeux. 1999. Carbon dioxide fluxes over bermudagrass, native prairie and sorghum. *Agric. Forest Meteorol.* 93: 121–139.
- Emmerich, E.W. 2007. Ecosystem water use efficiency in a semiarid shrubland and grassland community. *Rangeland Ecol. Manag.* 60:464–470.

- Espinosa F. J. y J. Sarukhán. 1997. Manual de malezas del Valle de México. Claves, descripciones e ilustraciones. Universidad Nacional Autónoma de México y Fondo de Cultura Económica, México, D. F.
- Fisher, M. J., I.M. Rao, C.E. Ayarza, C.E. Lascano, J.I. Sanz, R.J. Thomas and R.R. Vera. 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 31: 236-238.
- Flanagan, L.B., L.A. Wever and P.J. Carlson. 2002. Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Global Change Biol.* 8: 599-615.
- Fredeen, L.A., J. T. Randerson, N.M. Holbrook and C. B. Field. 1997. Elevated atmospheric CO₂ increases water availability in a water-limited grassland ecosystem. *Journal of the American Water Resources Association* 33 (5): 1033-1039.
- Fritschen, L. J. and P. Doraiswamy. 1973. Dew: an addition to the hydrologic of douglas fir. *Water Resources Research* 9: 891-894.
- García E. 1981. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. 3a. ed. Inst. de geografía, UNAM, México, D.F. 217 p.
- Garratt, J. R. and M. Segal. 1988. On the contribution of atmospheric moisture to dew formation. *Boundary Layer Meteorology* 45 (3): 209-236.
- Gay, C. y J. Martínez. 1995. Mitigation of emissions of greenhouse gases in Mexico. *Interciencia* 20(6): 336-342.
- Gay, C. 2000. El Cambio climático, el problema global más importante del futuro. *Gaceta UNAM*, Noviembre 13. No. 3411: 12-13.
- 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. *Am. Soc. Agron.* 95: 1393-1403.
- Ham, J. M. and A.K. Knapp. 1998. Fluxes of CO₂, water vapor and energy from a prairie ecosystem during the seasonal transition from carbon sink to carbon source. *Agric. Forest Meteorol.* 89: 1-14.
- Hew, C.S., G. Krotkov and D.T. Canvin. 1969. Effects of temperature on photosynthesis and CO₂ evolution in light and darkness by green leaves. *Plant Physiol.* 44: 671-677.
- Hikosaka, K., K. Ishikawa, A. Borjigidai, O. Muller and Y. Onoda. 2006. Temperature acclimation of photosynthesis: mechanisms involved in the

- changes in temperature dependence of photosynthetic rate. *J. Exp. Bot.* 57(2): 291–302.
- Houghton, R. 2001. Counting terrestrial sources and sinks of carbon. *Climatic Change* 48, 525-534.
- Hunt, J. E., F. M. Kelliher, T. M. McSeveny and J. N. Byers. 2002. Evaporation and carbon dioxide exchange between the atmosphere and a tussock grassland during a summer drought. *Agric. Forest Meteorol.* 111(1): 65-82.
- INEGI. 2007. Conjunto nacional del uso del suelo y vegetación. Serie III. (<http://www.inegi.gob.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Contenidos/estadisticas/2007/ambiente07.pdf> fecha de consulta 2 de junio de 2008).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1992. *Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment.* Cambridge University Press. Cambridge, Inglaterra.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1995. *Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment.* Cambridge University Press. Cambridge, Inglaterra.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- Jaramillo A. y E. Escobar. 1987. Balance de energía en *Coffea arábica* L. Cenicafé (Colombia) 34(4):115-126.
- 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.
- Koster, R. D., P.A. Dirmeyer, A.N. Hahmann, R. Ljpelaar and L. Tyahla. 2002. Comparing the degree of land–atmosphere interaction in four atmospheric general circulation models. *J. Hydrometeorol.* 3: 363–375.
- 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.
- Lauenroth, W.K. and T.M. Smith. 1996. Application of patch models to examine regional sensitivity to climate change. *Climate Change* 34(2): 155-160.

- Levine S. J. 1992. *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*. MIT Press. 569 pp.
- Li, S. G., J. Asanuma, W. Eugster, A. Kotani, J. J. Liu, T. Urano, T. Oikawa, G. Davaa, D. Oyunbaatar and M. Sugita. 2005. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Global Change Biol.* 11: 1941–1955.
- Lira S.R. 1994. *Fisiología vegetal*. Primera edición Editorial Trillas. 141. p.
- López D.U. 1994. Análisis y perspectivas del mejoramiento genético de los forrajes. XI Congreso Latinoamericano de Genética y XV Congreso de Fitogenética. Monterrey, N.L. 25-30 de Septiembre.
- Manzano P. 2006. Los pastizales del Norte de México: una perspectiva para su conservación. USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-40.
- Masera O. 1995. Carbon mitigation scenarios for Mexican forests: methodological considerations and results. *Interciencia* 20(6): 388-395.
- Massman W. J. and X. Lee. 2002. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agriculture and Forest Meteorology* (113): 121-144.
- McMichael, A.J. and A. Haines. 1997. Global climate change: the potential effect on health. *British Medical Journal, Clinical Research edition*. 315: 805-809.
- McVaugh, R., 1983. Gramineae. En: Anderson W. R. (ed.). *Flora Novogaliciana. A descriptive account of the vascular plants of Western Mexico*, Vol. 14. The University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan.
- Miranda A. C., H. S. Miranda, J. Lloyd, J. Grace, R. J. Francey, J. A. McIntyre, P. Meir, P. Riggan, R. Lockwood and J. Brass. 1997. Fluxes of carbon, water and energy over Brazilian cerrado: an analysis using eddy covariance and stable isotopes. *Plant, Cell and Environ.* 20, 315–328.
- Morecroft, M.D. and J.M. Roberts. 1999. Photosynthesis and stomatal conductance of mature canopy oak (*Quercus robur*) and sycamore (*Acer pseudoplatanus*) trees throughout the growing season. *Functional Ecol.* 12: 332-342.
- Mosier, A., D. Schimel, D. Valentin, K. Bronson and W. Parton. 1991. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature* 350: 330-332.

- Neal, D.L., R.L. Hubbard and C.E. Conrad. 1969. A magnetic point frame. *Journal of Range Management* 22 (3): 202:203.
- Ordóñez A. 1998. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias. UNAM. México D.F.
- Ordoñez A. y O. Maser. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7(1): 3-12.
- Peters G., B. Fischer and H. Münster. 2001. Eddy Covariance Measurements with Closed-Path Optical Humidity Sensors: A feasible Concepts? *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 18 (4): 503-514.
- Polley, H. W., H. B. Johnson and J.D. Derner. 2002. Soil- and plant-water dynamics in a C₃/C₄ grassland exposed to a subambient to superambient CO₂ gradient. *Global Change Biology* 8: 1118–1129.
- Ponton, S.S., B. Flanagan, P. Alstad, G. Johnson, K. Morgenstern, N. Kljun, T. Black and G. Barr. 2006. Comparison of ecosystem water-use efficiency among Douglas-fir forest, aspen forest and grassland using eddy covariance and carbon isotope techniques *Global Change Biology* 12 (2): 294-310.
- Prueger, J.H., T. J. Sauer and J. L. Hatfield, 1998. Turbulence Flux Estimates of Sensible and Latent Heat Near Shelterbelts During Low wind Condition. *Transactions of ASEA* 4(6): 1643-1650.
- Rayment, M.B., and P.G. Jarvis. 2000. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry* 32 (1): 35-45.
- Rzedowski, G. C. y J. Rzedowski. 2001. Flora fanerogámica del Valle de México. 2a ed. Instituto de Ecología y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro, Michoacán, México.
- Schapendonk, A.H., P. Dijkstra, J. Groenwold, C.S. Pot and S. Van de Geijn. 1997. Carbon balance and water use efficiency of frequently cut *Lolium perenne* L. swards at elevated CO₂. *Global Change Biol.* 3 (3): 207–216.
- Shukla, J. and Y. Mintz. 1982. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate. *Science* 215, 1498–1501.
- Small, E.E. and S. Kurc. 2001. The influence of soil moisture on the surface energy balance in semiarid environments. Technical completion report. New Mexico Water Resources Research In cooperation with the Department of Earth and Environmental Science New Mexico Tech. 26 p.

- Smith, J.B. 1996. Standardized estimates of climate change damages for the United States. *Climate Change* 32(3): 313-326.
- Stocks, B.J., M.A. Fosberg, T.J. Lynham, L. Mearns, B.M. Wotton, Q. Yang, J.Z. Jin, K. Lawrence, G.R. Hartley, J.A. Mason and D.W. Mckenney. 1998. Climate change and forest fire potential in Russian and Canadian boreal forests. *Climate Change* 38: 1-13.
- Suyker, A.E. and S.B. Verma. 2001. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie. *Global Change Biol.* 7: 179–289.
- Tappeiner, U. and A. Cernusca. 1996. Microclimate and fluxes of water vapour, sensible heat and carbon dioxide in structurally differing subalpine plant communities in the Central Caucasus. *Plant, Cell and Environ.* 19: 403-417.
- Varejao, M.A., S.H. Franchito and V.B. Rao. 1998. A coupled biosphere–atmosphere climate model suitable for studies of climatic change due to land surface alterations. *J. Climate* 11: 1749–1767.
- Vázquez, A.R. 1973. Plan inicial de manejo de agostaderos en el rancho demostrativo “Los Ángeles”. Tesis licenciatura UAAAN. 93 p.
- Verma, S.B. 1990. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. *Remote Sensing Rev.* 5:99-115.
- Villaseñor J. L. y F. J. Espinosa. 1998. Catálogo de malezas de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Consejo Nacional Consultivo Fitosanitario y Fondo de Cultura Económica, México, D. F.
- Villers, R. L., and V. Trejo. 1997. Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. *Climate Research* 9:87-93.
- 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.
- Wittwer, S.H. 1998. The changing global environment and world crop production. *J. of Crop Production* 1: 291:299.
- Zermeño G. A. 2001. Métodos micrometeorológicos para medir flujos de calor y vapor de agua entre los cultivos y la atmósfera. XIII Semana Internacional de Agronomía. 5-7 de septiembre. Gómez Palacio Durango, México. p 53-57.