

**EVALUACIÓN DE DOS MÉTODOS DE LABRANZA EN
LA DINÁMICA DE FLUJOS DE MASA Y ENERGÍA EN
UN PASTIZAL DEL NORESTE DE MÉXICO**

ARMANDO LÓPEZ SANTOS

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"



PROGRAMA DE GRADUADOS

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2009.

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

DIRECCIÓN DE POSTGRADO

PROGRAMA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

EVALUACIÓN DE DOS MÉTODOS DE LABRANZA EN LA
DINÁMICA DE FLUJOS DE MASA Y ENERGÍA EN UN PASTIZAL
DEL NORESTE DE MÉXICO

Por:

Armando López Santos
TESIS

Elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y Aprobada
como como requisito parcial para obtener el grado de:

**Doctor en Ciencias
En Ingeniería en Sistemas de Producción**

COMITÉ PARTICULAR DE ASESORÍA

Asesor Principal

Dr. Martín Cadena Zapata

Asesor

Dr. Alejandro Zermeño González

Asesor

Dr. Rubén López Cervantes

Asesor

Dr. Raúl Rodríguez García

Asesor

Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho

Asesor

Dr. Guillermo González Cervantes

Dr. Jerónimo Landeros Flores
DIRECTOR DE POSTGRADO

DEDICATORIA

La presente obra se la dedico a todas aquellas personas que directa e indirectamente me apoyaron para su realización.

De manera muy especial la dedico a mi esposa Sra. María de Lourdes Herrera Mendoza y a mis hijos: Gregorio Iván, Karlita, Ale, Armandito y mi pequeño nieto Ernesto.

A mis padres que afortunadamente cuento con ellos, a quien les debo buena parte del presente logro: Sr. José Carmen López Jurado y Sra. Maria Luisa Santos Salinas.

A mis queridos hermanos que siempre han estado para ayudarme y de quienes guardo bonitos recuerdos de varias etapas de nuestras vidas: A mis hermanitos Pepe y Raymundo y a mis hermanitas: Micaela, María del Carmen y Caty.

A mis estimados y muy queridos sobrinos, ellos son: José Luís, Erick Dante, Oswaldo, Eifel, Chuy, Angely, el tremendo Ángel y los pequeños pepito y Luisito.

También a unos sobrinos muy especiales que veo como a mis hijos: Mirna, Araceli, Rolo, Rafa y Patricia Monserrat.

Por último, no omito decir que comparto esta alegría con mis queridos Tíos donde quiera que se encuentren: Sr. Miguel Santos Salinas y esposa (†).

AGRADECIMIENTOS

Mi más profundo agradecimiento a las personas e instituciones que me apoyaron durante el entrenamiento del programa doctoral y en el proceso de la investigación que dio lugar a la preparación del presente documento.

De manera muy especial a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT); a mi centro de trabajo de donde partió el apoyo principal, a la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo; y al Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera del INIFAP, lugar donde se hicieron complementaciones interesantes a la segunda etapa de investigación.

Agradezco la confianza, apoyo y trato amigable dispensado en mi persona, a los muy estimados Dr. Martín Cadena Zapata, Dr. Alejandro Zermeño González, Dr. Rubén López Cervantes, Dr. Raúl Rodríguez García, Dr. Guillermo González Cervantes y Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho; quienes además conformaron mi Comité Particular de Asesoría.

Agradezco también a mis tesisas con quienes se realizaron parte del trabajo de investigación en 2006 y 2007, ellos son: Teodoro Hernández Hernández, Ismael Vargas Martínez, José Francisco Hernández Alvarado, y José Nivardo Galván Luna.

COMPENDIO

**EVALUACIÓN DE DOS MÉTODOS DE LABRANZA EN LA
DINÁMICA DE FLUJOS DE MASA Y ENERGÍA EN UN
PASTIZAL DEL NORESTE DE MÉXICO**

POR
ARMANDO LÓPEZ SANTOS

DOCTORADO
INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, JUNIO, 2009

Dr. Martín Cadena Zapata – Asesor

Palabras clave: *Balance energético, Flujo de CO₂, Ecosistemas de pastizal.*

Se evaluó el efecto de dos tipos de la labranza primaria, uno con multiarado (LM) y el otro con arado de discos (LAD), sobre el flujo energético y la dinámica del dióxido de carbono (CO₂) de la capa superior del suelo. Las parcelas del experimento se ubicaron en el Rancho “Los Ángeles”, Municipio de Saltillo, Coahuila, México (25° 6.650' N y 100° 59.413' O), donde el clima es del tipo BWhw(x')(e) y los suelos son de tipo Feozem lúvico (HI). Durante el otoño del 2006 y el verano del 2007, se hicieron las mediciones de flujos energéticos y CO₂, teniendo como referencia un área sin labranza (NL) con base en el método de la Covarianza Eddy. El flujo energético en los

tratamientos de labranza fue modificado en mayor medida por la influencia de los factores ambientales que ocurren durante los meses del año y de una estación a otra, particularmente por fluctuaciones de temperatura y la presencia de lluvias. Derivado de ello, los flujos de calor latente (LE) y en el suelo (G) experimentaron los mayores cambios comparados con la proporción de la energía que se convierte en calor sensible (H). En 2006 LM fue el tratamiento que mas energía emitió como LE, y LAD concentró más energía en el suelo. En 2007 LAD, comparado con LM y NL, fue el tratamiento que más energía emitió en forma de LE, por alcanzar hasta el 70 % de R_n , y al mismo tiempo mostró valores negativos de de G. Tanto LM como LAD se comportaron como fuentes de emisión de CO_2 sin asimilación alguna durante todo el periodo de medición. A partir de las tasas instantáneas se hizo una estimación de emisión de CO_2 para los dos tratamientos, los cuales alcanzaron valores en 2006 y 2007 de 1.307 y 1.258; y 4.605 y 2.371 g de $CO_2\ m^{-2}d^{-1}$, para LM y LAD, respectivamente.

ABSTRACT

**EVALUATION OF TWO METHODS OF TILLAGE ON THE DYNAMICS
MASS AND ENERGY FLOW IN GRASSLAND FROM MEXICO
NORTHEASTERN**

By

**ARMANDO LÓPEZ SANTOS
DOCTOR IN SCIENCE
ENGINEERING OF SYSTEMS OF PRODUCTION
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, JUNIO, 2009**

Dr. Martín Cadena Zapata – Asesor

It was evaluated the effect of two types of primary tillage, one with multiarado (LM) and the other with a disc plow (LAD), the energy flow and dynamics of carbon dioxide (CO₂) from the topsoil. The experiment plots were located in the Rancho "Los Angeles", Municipio de Saltillo, Coahuila, Mexico (25 ° 6650 "N and 100 ° 59,413 'W), where the climate is BWhw (x') (e) and soils Luvic Feozem are type (HI). During autumn 2006 and summer 2007, measurements were made of energy and CO₂ fluxes, taking as reference a no-till area (NL) based on the Eddy Covariance method. Energy flow in the tillage treatments was further modified by the influence of environmental factors that occur during the months of the year and season to season, particularly by temperature fluctuations and the presence of rain. Deriving from this, the latent heat fluxes (LE) and soil (G) experienced the biggest

changes compared with the proportion of energy that becomes sensible heat (H). In 2006, LM was the treatment more energy emitted as LE, and LAD focused more energy into the ground. In 2007, LAD, compared with LM and NL, was the most energy treatment delivered in the form of LE, to reach up to 70% of Rn, and also showed negative values of G. Both LM and LAD behaved as CO₂ emission sources without any assimilation throughout the measurement period. From instantaneous rates that an appreciation of CO₂ emissions for the two treatments, which reached values in 2006 and 2007 of 1.307 and 1.258, and 4.605 and 2.371 g CO₂ m⁻²d⁻¹ for LM and LAD respectively.

INDICE GENERAL

	Pág.
COMPENDIO	v
ABSTRACT	vii
INDICE GENERAL	ix
INDICE DE CUADROS	xii
INDICE DE FIGURAS	xiii
INDICE DE ANEXOS	xvi

CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Importancia y justificación	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Hipótesis	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Factores que modifican el comportamiento de flujos	4
2.1.1. Factor edáfico.....	5
2.1.1.1. Propiedades morfológicas.....	5
2.1.1.2. Propiedades térmicas.....	7
2.1.2. Factor biótico.....	8
2.1.3. Factores espacio-temporales	9
2.2. Laboreo mecánico del suelo y su relación con flujos de masa y energía.....	12
2.2.1. Laboreo mecánico.....	12
2.2.2. El efecto del laboreo del suelo sobre las propiedades físicas del suelo	13
2.2.3. Relación entre el flujo energético y la labranza.....	16
2.2.3.1. Flujo energético y balance de energía	16
2.2.3.2. Relación entre labranza y el balance de energético de energía en el perfil del suelo	18
2.3. Importancia de los pastizales	22
2.3.1. Los pastizales de México	23

2.4. Método de la covarianza Eddy para medir flujos de masa y energía entre superficies vegetales y la atmósfera.....	24
2.4.1. Principio general de la medición de las concentraciones en flujos de viento	25
2.4.2. Ecuaciones de flujo superficial.....	26
2.4.3. Flujo de calor en el suelo.....	28
2.5. Efecto de la labranza en la distribución de agua en el perfil del suelo...	31
2.6. Emisión de CO ₂ bajo diferentes sistemas de manejo del suelo	33
2.7. Pulsos de precipitación y flujo de carbón en ecosistemas áridos y semiáridos	44
III. MATERIALES Y MÉTODOS	46
3.1. Descripción general del sitio de estudio.....	46
3.1.1. Localización.....	46
3.1.2. Clima y fisiografía.....	46
3.1.3. Suelo y vegetación.....	46
3.2. Descripción de las parcelas experimentales.....	49
3.2.1. Características iniciales.....	50
3.2.1.1. Propiedades edáficas.....	50
3.2.1.3. Vegetación presente.....	51
3.3. Instrumentación y mediciones realizadas.....	53
3.3.1. Diseño general.....	53
3.3.2. Método de la Covarianza Eddy (CE): características y descripción	54
3.3.2.1. Generalidades.....	54
3.3.2.2. Ubicación de la Estación Micrometeorológica e instalación de sensores	56
3.3.3. Métodos de labranza evaluados.....	61
3.3.3.1. Arado de 3 discos.....	62
3.3.3.2. Multiarado.....	64
3.4. Variables medidas y evaluación de balances de flujo.....	65
3.5. Particularidades del método CE: sistematización, corrección y análisis de datos	66
3.5.1. Sistematización y correcciones	66
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
4.1. Efecto de la labranza en el comportamiento de H, LE y G.....	71
4.1.1. Comportamiento de flujo energético en el otoño del 2006.....	72
4.1.2. Comportamiento de flujo energético en el verano del 2007.....	77
4.1.3. Densidad de flujo energético diurno en 2006 y 2007.....	82
4.2. Relación la densidad de flujo energético teórico, lluvia y lámina de agua evaporada	87

4.3.	Flujo de dióxido de carbono, CO ₂	92
4.3.1.	Comportamiento dinámico del CO ₂	92
4.3.2.	Dinámica de flujo de CO ₂ en 2006.....	94
4.3.3.	Dinámica de flujo de CO ₂ en 2007.....	94
4.3.2.	Flujo neto estimado: escenarios de emisión de C-CO ₂ en 2006 y 2007	103
V.	CONCLUSIONES	107
VI.	LITERATURA CITADA	110
VII.	ANEXOS	123

INDICE DE CUADROS

Número y nombre de Cuadro	Pág.
Cuadro 2-1. Propiedades físicas y térmicas de los constituyentes del suelo	7
Cuadro 2-2. Tamaño, propiedad y función de los poros del suelo	14
Cuadro 2-3. Captura y liberación de CO ₂ , relacionado con algunas propiedades edáficas, tiempo máximo de duración, lugar donde se realizó la investigación y autor	36
Cuadro 2-4. Respiración del suelo (CO ₂ -C) reportado para bosques del Mediterráneo y Ecosistemas agrícolas	41
Cuadro 3-1. Propiedades físico-químicas más importantes de las parcelas experimentales	51
Cuadro 3-2. Lista florística en las parcelas de monitoreo	51
Cuadro 3-3. Periodo por año, ciclos de medición de inicio a fin por tratamiento, días transcurridos y suma de días transcurridos	54
Cuadro 3-4. Tipo, denominación y unidades de medida de cada una de las variables como parte del estudio	65
Cuadro 4-1. Promedios, máximos y mínimos de las mediciones instantáneas realizadas por tratamiento en el 2006	73
Cuadro 4-2. Promedios, máximos y mínimos de las mediciones instantáneas realizadas por tratamiento en el 2007	78
Cuadro 4-3. Comparación de los ciclos asimilación-liberación por año para cada tratamiento	104
Cuadro 4-4. Escenarios de emisión de C-CO ₂ por ciclo anual para cada tratamiento	106

INDICE DE FIGURAS

Número y nombre de figuras	Pág.
Figura 2-1. Formas en que se produce el flujo de calor, q (Wm^{-2}), en el suelo debido a los cambios de temperatura (ΔT).....	6
Figura 2-2. Promedio anual diario de la radiación de onda corta total en la superficie terrestre.....	10
Figura 2-3. Representación hipotética del CO_2 , originada por la contribución de diferentes procesos.....	12
Figura 2-4. Representación vectorial idealizada de los componentes del balance de energía para un ciclo diurno	16
Figura 2-5. Distribución de Suelos de Tipo Feozem.....	23
Figura 2-6. Representación de flujos de viento en un ecosistema	25
Figura 2-7. Marco conceptual de la forma en se miden los Eddy en un punto.....	26
Figura 2-8. Perfiles verticales ideales de temperatura virtual potencial y humedad específica representando todas las capas de la capa atmosférica límite	28
Figura 2-9. Representación esquemática de las condiciones de frontera para el análisis del flujo energético en el suelo	29
Figura 2-10. Respiración total (R_t); y contenido de humedad en el suelo	39
Figura 2-11. Respiración total (R_t), y del suelo (R_s) para el ciclo de cultivo de maíz.....	40
Figura 2-12. Mediciones bimensuales del contenido gravimétrico de humedad	43
Figura 3-1. Mapa de Suelos y Vegetación del Rancho Los Ángeles ..	48
Figura 3-2. Distribución de los tratamientos dentro del potrero no. 4 para el primer ciclo de medición en 2006	49
Figura 3-3. Comunidad vegetal encontrada en las parcelas experimentales.....	52

Figura 3-4. Estación Eddy e instrumentos principales	56
Figura 3-5. Orientación, dimensiones, ubicación general de la Estación Micrometeorológica Eddy	57
Figura 3-6. Flujos de viento horizontales sobre dos superficies	58
Figura 3-7. Instalación del sistema de medición de flujo de calor en el suelo.....	60
Figura 3-8. Laboreo del suelo por medio de LC y LV	61
Figura 3-9. Arado de 3 discos y parámetros técnicos de su funcionamiento en el suelo	63
Figura 3-10. Multiarado y parámetros técnicos de su funcionamiento en el suelo	64
Figura 3-11. Esquema de análisis y correcciones realizadas	67
Figura 4-1. Flujo de radiación neta (Rn), calor sensible (H), calor latente (LE) y calor en la superficie del suelo (G) en tres eventos ocurridos entre las 9:00 y las 7:40 h por tratamiento en 2006	75
Figura 4-2. Flujo de radiación neta (Rn), calor sensible (H), calor latente (LE) y calor en la superficie del suelo (G) en tres eventos ocurridos entre las 9:00 y las 7:40 h por tratamiento en 2007	80
Figura 4-3. Índices calculados con base en la densidad el flujo energético diurno (8:00-19:00 h) por tratamiento para 2006	83
Figura 4-4. Índices calculados con base en la densidad el flujo energético diurno (8:00-19:00 h) por tratamiento para 2007	84
Figura 4-5. Porcentajes de humedad relativa promedio para los meses de Mayo, Junio y Julio del 2007	85
Figura 4-6. Densidad de flujo estimada (a) y lluvia acumulada diaria (b) para cada tratamiento en 2006	89
Figura 4-7. Densidad de flujo estimada (a) y lluvia acumulada diaria (b) para cada tratamiento en 2007	91

Figura 4-8. Segmentos gráficos de la dinámica de flujo de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹), a partir de los valores instantáneos corregidos para 14 días (293-307) del 2006, para NL	97
Figura 4-9. Segmentos gráficos de la dinámica de flujo de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹), a partir de los valores instantáneos corregidos para 14 días (314-328) del 2006, para LM	98
Figura 4-10. Segmentos gráficos de la dinámica de flujo de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹), a partir de los valores instantáneos corregidos para 14 días (333-348) del 2006, para LAD	99
Figura 4-11. Segmentos gráficos de la dinámica de flujo de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹), a partir de los valores instantáneos corregidos para 14 días (142-154) del 2007, para NL	100
Figura 4-12. Segmentos gráficos de la dinámica de flujo de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹), a partir de los valores instantáneos corregidos para 14 días (159-177) del 2007 para LM	101
Figura 4-13. Segmentos gráficos de la dinámica de flujo de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹), a partir de los valores instantáneos corregidos para 14 días (177-195) del 2007 para LAD.....	102

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Impacto de la labranza en el flujo energético de un suelo arcilloso	124
Anexo 2. Flujos de CO ₂ y LE medidos con cámaras de intercambio de gas y sensores IR bajo condiciones de cielo abierto	125
Anexo 3. Mediciones morfomatemáticas de imágenes digitales mediante una plataforma Arc-View e IDRISI.	126
Anexo 4. Monitoring of CO ₂ flux and contribution for components in the soil-plant system in a grassland from northeastern Mexico.	127
Anexo 5. Changes into porosity of the soil by tillage effect at a clayish soil.	128

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Importancia y justificación

Los estudios más recientes indican que los cambios de uso del suelo y las actividades agrícolas contribuyen con un 34 % en las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI); de los que destacan emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en mayor proporción para el primero, y de metano (CH₄) para el segundo (Lokupitiya y Paustian, 2006; IPCC, 2007).

El laboreo mecánico del suelo, en cualquiera de sus formas, no siempre funciona como se espera (Conant et al., 2007). Su aplicación excesiva puede provocar deformaciones de la estructura, compactación de las capas subsuperficiales, y cambios en la disponibilidad de humedad en la zona radicular de las plantas cultivadas (González et al 2004a,b); además, se alteran procesos relacionados con los ciclos del carbono, C, lo que trae como consecuencia una disminución en el poder de agregación y en la respiración del suelo, con una mayor susceptibilidad a la erosión (Udawatta et al 2008a,b; Watts et al., 2009).

La magnitud del impacto de la labranza desde el punto de vista de la dinámica de flujos de masa en forma de dióxido de carbono, ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

y energía ($W \cdot m^{-2}$) sobre y bajo la superficie del suelo, bajo condiciones de cielo abierto en grandes extensiones en la actualidad presenta muchas interrogantes (Ham y Heilman, 2003; Hatfield et al., 2007).

1.2. Antecedentes

Ryu et al. (2008) en un pastizal de clima semiárido (T. media anual de $16.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y lluvias promedio de 565 mm), midieron durante 6 años (2001-2007) flujos energéticos con base en el método de la Covarianza Eddy, y encontraron que la variable con mayor consumo de Rn fue H, con valores cercanos al 67 %, mientras que LE en la estación seca (Julio-Septiembre) llegó hasta el 5 %. Además, se observó que sus valores se aproximan entre sí (para H y LE) durante la estación húmeda, como consecuencia de la lluvia; aunque en una escala mensual entre Enero y Abril, que coincide con la época de crecimiento LE llegó a ser mayor H con valores de hasta un 85 % de Rn.

Reikosky y Lindstrom, (1993) encontraron que al roturar el suelo con arado de vertedera se produce un repentino aumento de la presión parcial de oxígeno hasta la profundidad del arado, lo que genera una rápida oxidación de la materia orgánica que resulta en una pérdida de carbono del suelo de aproximadamente $2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, equivalente a 8 t de CO_2 .

Qi et al. (2007) mediante el uso de una cámara opaca de intercambio gaseoso estacionaria midieron sobre la superficie del suelo en el mes de Julio emisiones equivalentes a $6 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$.

Carlise et al. (2006) examinaron los mecanismos bajo los cuales se da el flujo inicial de CO_2 , y constataron que dicho flujo probablemente está más asociado al contenido de humedad que a la temperatura, factores que incluyen la infiltración por el efecto que ésta tiene sobre el desplazamiento de la atmósfera del suelo, liberando CO_2 acumulado en el espacio poroso.

1.3. Objetivos

1.3.1. Analizar el efecto de dos métodos de labranza primaria, con multiarado, LM, y con arado de discos, LAD, en la dinámica de flujo energético.

1.3.2. Evaluar los cambios en el comportamiento del ciclo asimilación-liberación de CO_2 como consecuencia de LM y LAD, comparado con NL, en la capa superior del suelo.

1.4. Hipótesis

- “La labranza con arado de discos (LAD) o con multiarado (LM) promueve cambios en el sentido del flujo de CO_2 , pasando de ser fuente de captura a fuente de liberación permanente.”

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Factores que modifican el comportamiento de flujos de masa y energía

El flujo de radiación neta, R_n , es el resultado del balance entre la radiación de onda corta (R_s) y radiación de onda larga (R_l) que ocurre en o cerca de la superficie; R_s se produce como insolación directa y como radiación difusa en el día bajo condiciones de cielo despejado, y puede estar afectada por la emisividad de la superficie o albedo; R_l , proviene de la atmósfera y en ausencia de nubes depende primeramente de la distribución de la temperatura, vapor de agua y del CO_2 (Arya, 1988); flujos que además de estar determinadas por su estructura y composición (físico-química y bioquímica), también están sujetas a la variabilidad climática asociada a las fluctuaciones de temperatura y precipitación.

Xu et al (2004) mencionan que de los factores bióticos y abióticos que influyen en el comportamiento de flujos (masa y energía), como son: composición y actividad de la comunidad microbial, calidad y cuantificación de plantas, los almacenes de carbón en el suelo la actividad fotosintética asociada al crecimiento; la humedad del suelo y la temperatura son los más importantes en regiones áridas y semiáridas. Incluso se sabe que pequeños eventos de

lluvia activan inmediatamente el almacén de carbono (C) del suelo que se expresan en mayor asimilación de CO₂. (Huxman et al., 2004).

Hay tres factores que se distinguen por su influencia en los flujos de masa y energía, que son discutidos en la literatura desde diferentes puntos de vista. En este caso se definen en: edáficos, bióticos y espacio-temporales. Cada uno de los cuales tiene las siguientes características.

2.1.1. Factor edáfico

De los factores edáficos que contribuyen o modifican las magnitudes de flujo de masa y energía, en la literatura (Baver et al., 1972; Gavande, 1986; Porta et al. 2003) se reportan dos tipos: los de orden morfológico y los que están asociados a las propiedades térmicas de los elemento que componen el suelo.

2.1.1.1. Propiedades morfológicas

En el suelo la transferencia de calor ocurre de diferentes formas, incluyendo la conducción a través de granos de suelo, líquido y gases; la transferencia de calor latente a través de los ciclos evaporación-condensación; transferencia de calor por medio de difusión líquida y convección, y radiación en los poros ocupados por gas. Las magnitudes relativas en términos de transferencia de calor depende de la composición del suelo, estructura, temperatura y contenido de humedad. Un diagrama simplificado de las

principales formas de transferencia de calor se muestra en la Figura 2-1 (Deru, 2003).

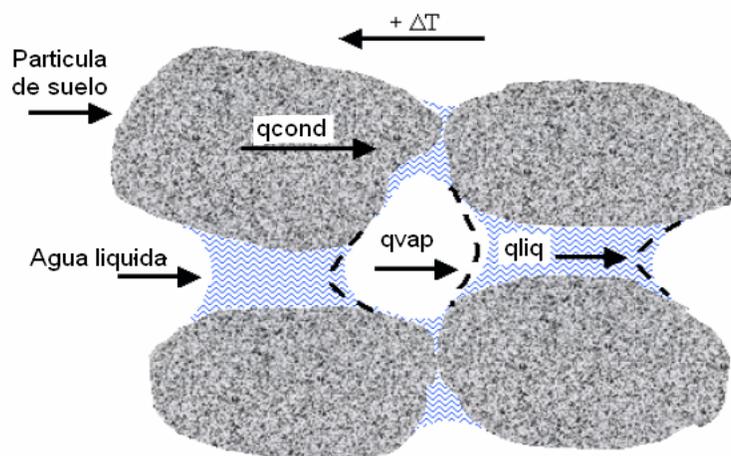


Figura 2-1. Formas en que se produce el flujo de calor, q ($W \cdot m^{-2}$), en el suelo debido a los cambios de temperatura (ΔT).

Para complementar lo anterior, Deru (2003), termina diciendo: "...la simple adición de los términos de transferencia no son estrictamente correctos, porque estos no están uniformemente distribuidos a lo largo del perfil del suelo."

De lo anterior, se deduce que el movimiento y el sentido del flujo de calor están determinados por las características de la matriz del suelo y de la fase predominante en un momento dado. Es decir, la presencia de aire en poros insaturados crea un importante camino para el intercambio de gas con la atmósfera. Este intercambio de gas, conocido como respiración, es crucial para el mantenimiento de raíces de plantas saludables y la actividad microbial (Gil, 2001; Ceron-Rincon y Melgarejo, 2005).

2.1.1.2. Propiedades térmicas

Las propiedades térmica del suelo (C_s) están determinadas por la capacidad calórica de los minerales, C_d s, y el contenido volumétrico del agua, θ . En cuyo caso, es común utilizar un valor de C_d s = 840 J·Kg⁻¹K⁻¹ y para el agua, C_w = 4190 J·Kg⁻¹K⁻¹ (Lopez-Santos et al., 2008).

Sin embargo, previamente Deru (2003) había propuesto los siguientes valores para los diferentes constituyentes del suelo, que se muestran en el Cuadro 2-1; los cuales están definidos como: conductividad térmica (K), densidad (ρ), capacidad de calor específico (C_p), y factor geométrico en la estimación de la conductividad térmica del suelo (ga).

Cuadro 2-1. Propiedades físicas y térmicas de los constituyentes del suelo

Constituyente del suelo	K (W/m·K)	ρ (Kg/m ³).	C_p (J/Kg· K)	ga
Cuarzo	Eq 1	2,650.0	731.5	0.144
Otros minerales	2.93	2,650.0	731.5	0.144
Material orgánico	0.25	1,300.0	1923.0	0.5
Agua	Eq 2	Eq 4	4180.0	n/a
Hielo	2.2	921.0	2040.0	0.144
Aire	Eq 3	1.2	1007.0	n/a

Fuente: Deru, 2003.p 131

Para las ecuaciones siguientes (1-4) las temperaturas deberán estar en °C

1. $K_{qtz} = 9.051 - 0.02659T$
2. $K_w = 0.5694 + 1.847 \times 10^{-3} T - 7.39 \times 10^{-6} T^2$
3. $K_a = 0.02417 + 7.596 \times 10^{-5} T$
4. $\rho_w = 1000 - 0.0477T - 0.0038T^2$

2.1.2. Factor biótico

El carbón orgánico disuelto (COD) es estratégicamente definido como el carbón orgánico que pasa a través de un filtro con tamaño de poro de 0.45 μm , y consiste en un amplio rango de moléculas, desde simples ácidos y azúcares, a sustancias húmicas de altos pesos moleculares. El COD es fuente de energía de organismos: alrededor del 10 % de COD débil o lábil se encuentra en corrientes de agua y lagos. Cuando es expuesta a la radiación ultravioleta las fracciones recalcitrantes se descomponen y se convierten en sustratos simples disponibles para las bacterias (Moore, 1997).

A escala global, el COD juega un rol en el ciclo del carbono, primeramente por medio de una gran cantidad (700 Pg) almacenado en los océanos, mientras que en el suelo, aguas subterráneas, y corrientes superficiales y lagos son 1.1, 8.0 y 1.1 Pg (1 Pg = 1×10^{15} g), respectivamente (Moore, 1997; Turcu et al., 2005).

En términos del flujo global la lluvia deposita alrededor de 0.1 Pg por año, principalmente de la Tundra y sistemas de bosques tropicales, y en una magnitud similar exporta partículas de carbón orgánico de la erosión. Estos flujos son pequeños comparados con los implicados en la fotosíntesis, la respiración y la emisiones fósiles. La exportación continental de COD es equivalente a un promedio de $2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ al año (Moore, 1997).

Estudios de corta duración revelan que la exportación por la lluvia puede ser mucho más grande que esta, comúnmente de 3 a 10 g COD m⁻² al año, así como por la liberación de la vegetación y de horizontes orgánicos de suelo en rangos de 1 a 50 g de COD por año. De modo que gran cantidad de COD producido en superficies terrestres es consumido microbiológicamente, fotodegradado, o precipitados en el suelo y sedimentados y transportados al océano. El uso de términos como fuente y sumidero podría ser temporal, de naturaleza transitoria, con mucho del COD producido finalmente regresa a la atmósfera como CO₂ (Moore, 1997).

Por tanto, el registro de las magnitudes que caracterizan el comportamiento de los flujos de CO₂, pueden variar 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: lluvia, humedad en el suelo, temperatura, presión barométrica, presencia de viento, etc. (Peters *et al*, 2001; Clark *et al*, 2001; y Massman and Lee, 2002; Oorts *et al.*, 2007).

2.1.3. Factores espacio-temporales

Jones (1992) plantea que la cantidad de radiación recibida en una superficie horizontal de la atmósfera superior es función de la latitud, la hora y el día del año, y que la máxima radiación (al medio día) comúnmente ronda entre 800 y 1000 W·m⁻² durante la estación de crecimiento, de modo que las regiones ubicadas en las latitudes medias reciben la mayor cantidad de energía.

Por ejemplo, para regiones ubicadas entre el Trópico de Cáncer (23.5°) y 35° de Latitud Norte, donde se conforman la mayor parte de las zonas de clima árido y semiárido, pueden llegar a recibir como máximo una radiación total de onda corta de hasta $23 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, y del Trópico de Cáncer al Ecuador esta varía desde 16.1 como mínima y una máxima de $20.7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ (Figura 2-2).

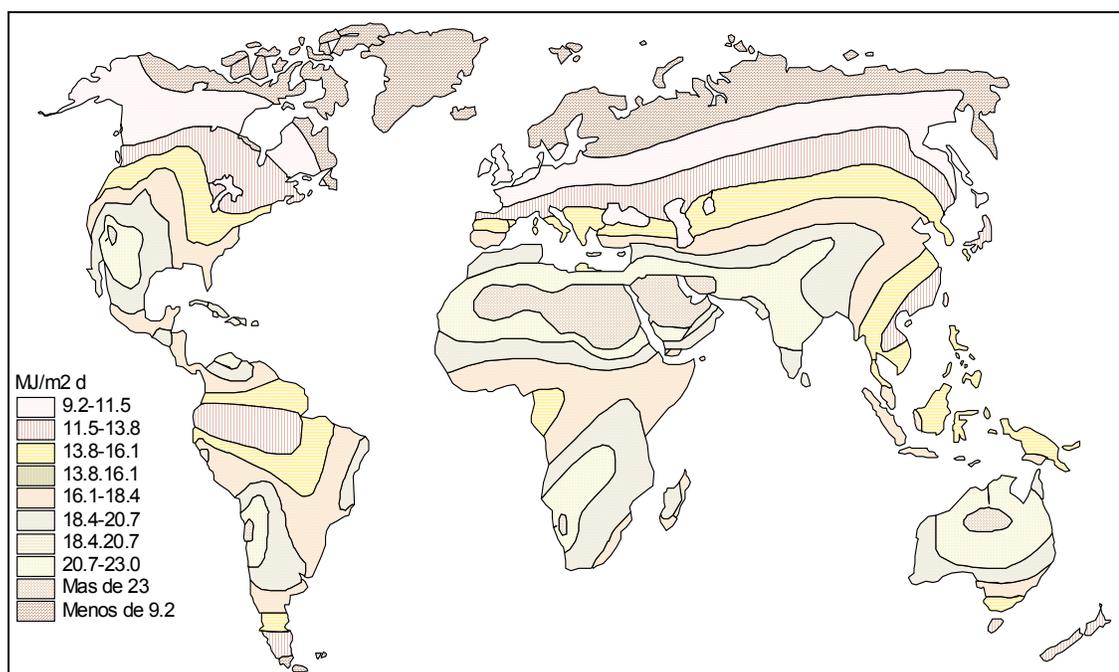


Figura 2-2. Promedio anual diario de la radiación de onda corta total en la superficie terrestre en Mega Joules por metro cuadrado por día, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, (Fuente: Jones, 1992).

Raich y Mora (2005) dicen que varios estudios proveen evidencia respecto a que los cambios estacionales en las tasas de respiración del suelo se correlacionan con los procesos de crecimiento de las plantas, principalmente con la temperatura.

Esos resultados, dicen (Raich y Mora, 2005) implican que la fotosíntesis del follaje conduce las tasas de respiración mediante el transporte de C dirigida a la raíz, y que comúnmente observa una correlación entre la temperatura y la respiración del suelo, y en menor medida el crecimiento de la planta se debe a las altas temperaturas; es decir, bajo estrés térmico la planta detiene sus procesos fisiológicos asociados a el intercambio con el medio ambiente como la fotosíntesis y respiración.

Agregan (Raich y Mora, 2005) además que en cultivos anuales hay una variedad de procesos de producción de CO₂ que solo ocurren en la estación de crecimiento; el inicio y fin de la estación de crecimiento podría generar patrones estacionales en la emisión de CO₂ que se correlacionan con la temperatura, incluso si la temperatura no tiene un efecto en la descomposición de la materia orgánica del suelo. Para ello, dichos autores emplean la Figura (2-3) que se muestra a continuación.

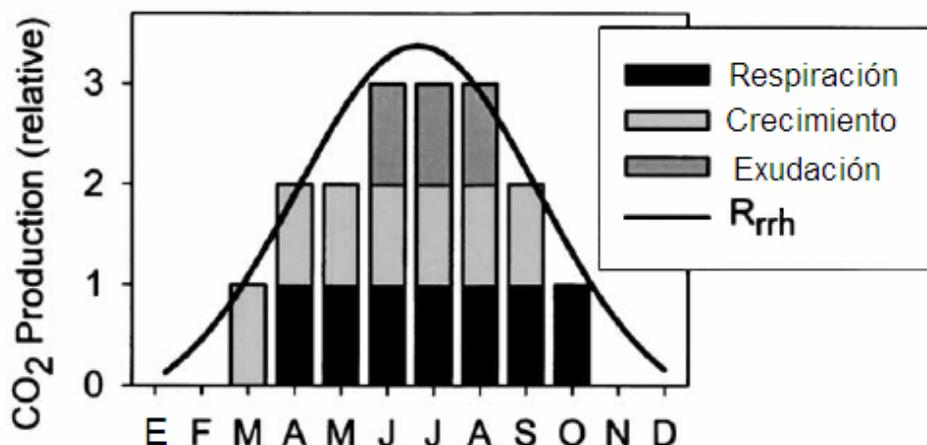


Figura 2-3. Representación hipotética del CO₂, originada por la contribución de diferentes procesos directos (crecimiento y respiración) o indirectos (respiración microbial de los exudados de la raíz) en la respiración de la rizosfera (R_{rrh}).

2.2. Laboreo mecánico del suelo y su relación con los flujos de masa y energía

2.2.1. Laboreo mecánico

La labranza tradicional con barbecho (LTB) es una de las labores primarias de preparación de la cama de siembra, que tiene como propósito principal la roturación de suelo e inversión de la capa arable, así como para eliminar malezas y enterrar residuos de cosecha (Hunt 1986). Bajo sistemas de labranza mecanizados, se utiliza comúnmente el arado de 3 ó 5 discos o el de rejas y vertedera, seguido por uno o dos pasos de rastra con el fin de disminuir el tamaño de los agregados hasta lograr una condición manejable, cuyos diámetros tendrán que estar en el rango de 0.5 a 6 mm (Navarro et al., 2000).

Una práctica de labranza no tradicional (LNC) alternativa a la anterior, se conoce como labranza vertical, también conocida como labranza de superficie, se basa en el uso de arados de de cinceles que tiene como característica fundamental que no voltea el suelo, pero hace una roturación y fragmentación vertical hasta profundidades de 35 a 40 cm., elimina capas subsuperficiales endurecidas que dificultan el desarrollo radicular y la infiltración de agua, colocando en la superficie los residuos de maleza y de cosecha con lo cual disminuye la evaporación (Camacho-Tamayo y Rodríguez, 2007).

Los efectos adversos del laboreo excesivo (Conant et al. 2007) como son: deformaciones de la estructura y cambios en las relaciones de humedad en la zona radicular de las plantas cultivadas (González et al 2004a,b), así como por el ataque a procesos relacionados con los ciclos del carbono, C, trae como consecuencia disminución en el poder de agregación, cambios en la respiración del suelo y una mayor susceptibilidad a la erosión (Udawatta et al 2008a,b).

2.2.2. El efecto del laboreo del suelo sobre las propiedades físicas del suelo

El efecto del laboreo del suelo sobre las propiedades físicas del suelo se ha documentado extensamente (González, 2004a,b; Osuna et al., 2005; Buj and Gisbert, 2007), permitiendo con ello, entre otras cosas, caracterizar su funcionamiento, como el que se muestra en el Cuadro 2-2, a partir de

propiedades porosimétricas tales como: tamaño, forma, continuidad y distribución a lo largo del perfil de penetración y exploración de las raíces (Henderson, 1979; Lal y Vandoren, 1990; Kay y Vanden, 2002; Udawtta, 2008b; González et al., 2004a,b).

Cuadro 2-2. Tamaño, propiedad y función de los poros del suelo.

Diámetro de poros en mm	Propiedad de poros	Funciones de los poros
<0.0002	Residual	Retienen agua que las plantas no pueden usar
0.0002-0.05	Almacenamiento	Retienen agua que las plantas pueden usar (<i>PPM=0.0002 mm; CC=0.05 mm; pero CC puede variar de 0.03 a 0.1 de diámetro equivalente a 10 a 33 kPa</i>)
>0.05	Transmisión	Permite que el agua drene y que entre el aire
>0.1 a 0.3	Enraizamiento	Permite que las raíces de las plantas penetren libremente (<i>Tamaño de las raíces: raíces seminales de cereales >0.1mm; extremo de raíces de no cereales (dicotiledóneas)>0.3 mm; barbas absorbentes 0.005 a 0.01 mm</i>)
0.5-3.5	Canal de lombrices	Permiten que el agua drene y que entre el aire
2-50	Nidos de hormigas y canales	Permiten que el agua drene y que entre el aire

Fuente: FAO, Hamblin, 1985.

Kung et al. (2005) dice que los suelos de modo natural tienen un espectro de poros con radio generalmente entre 10^{-3} y 10^{-7} m. Aunque para

algunas propiedades la distinción del efecto de las operaciones de labranza en términos de los cambios en la porosidad no siempre ha sido fácil demostrar estadísticamente (Singh et al., 1991; Eynard et al., 2004; Blanco-Canqui, et al. 2004); para el caso particular de las labores primarias como el barbecho, se esperaría que de manera inmediata únicamente afectara aquellos poros cuyo radio esté cerca a 10^{-3} m donde se ubican los macroporos localizados en la superficie del suelo (Volland-Tuduri et al., 2005).

Blanco-Canqui et al., (2004) estudiaron el efecto de la labranza y el tráfico de la maquinaria en suelos franco arenosos cultivados durante 13 años con maíz (*Zea mays L.*) y frijol soya (*Glycine max L.*), con tratamientos de no labranza (NL), arado de cincel (LV) y un arado de discos (LC), en condiciones de tráfico (CT) y no tráfico (NT) de la maquinaria, encontrando un efecto mínimo sobre la densidad aparente (D_a) del suelo dependiente del cultivo. Los resultados que reportan estos autores son los siguientes:

1. En NT para el cultivo de maíz los promedios fueron 1.50, 1.48 y 1.50 para LC, LV y NL, respectivamente; mientras que en el frijol soya, en esta misma condición los promedios fueron de 1.42, 1.42 y 1.40 Mg m^{-3} , para LC, LV y NL, respectivamente.

2. En CT para maíz los valores fueron de 1.56, 1.53 y 1.60 Mg m^{-3} para LC, LV y NL, respectivamente; mientras que en soya fue de 1.54, 1.57 y 1.53 Mg m^{-3} , también para LC, LV y NL, respectivamente.

2.2.3. Relación entre el flujo energético y la labranza

2.2.3.1. Flujo energético y balance de energía

La energía solar que llega a la superficie de la tierra y su fraccionamiento en los componentes indicados en la ecuación de balance energético (Ec. 2-1), ha sido teorizada por varios autores (Jones, 1992; Arya, 1988; Ham y Heilman, 2003; Hatfield et al., 2007). Con base en el principio de la conservación de la energía, las variables de flujo energético representadas bajo condiciones de frontera, para superficies de intercambio que pueden estar constituidas por aire y suelo o agua, en forma clásica son expresadas como a continuación se indica en la ecuación 2-1 y en la Figura 2-4.

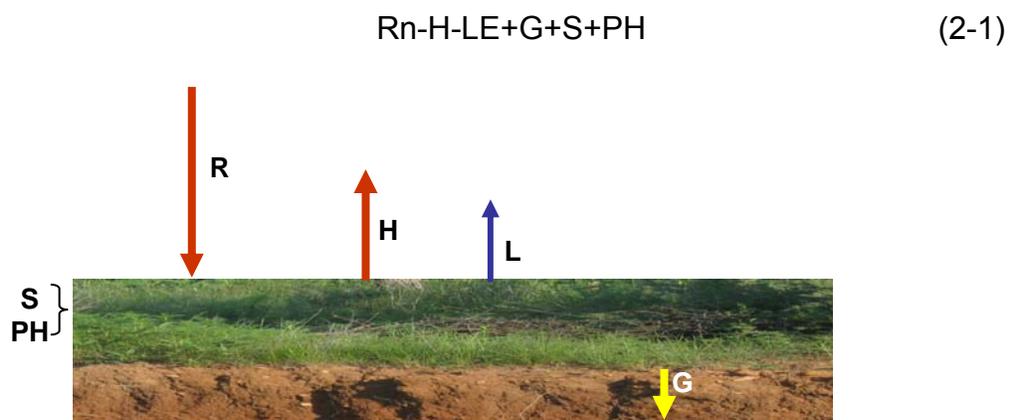


Figura 2-4. Representación vectorial idealizada de los componentes del balance de energía para un ciclo diurno.

Donde, R_n es la Radiación neta; H es el flujo de calor sensible; LE es el flujo de calor latente; G es el flujo de calor en la superficie del suelo; S es el almacenamiento de energía por cambio de temperatura en el aire y el follaje del cultivo; PH es la energía captada por la planta en el proceso de fotosíntesis.

Jones (1992) define a R_n como el balance resultante entre la radiación solar incidente y la radiación terrestre emitida, de acuerdo con la siguiente relación (2-2).

$$R_n = (1 - \alpha_s)R_{sw\downarrow} + R_{lw\downarrow} - \epsilon\sigma T_s^4 \quad (2-2)$$

Donde, α_s es el albedo o índice de reflectividad de la superficie a la radiación solar incidente; $R_{sw\downarrow}$ es la radiación solar de onda corta incidente; $R_{lw\downarrow}$ es la radiación de onda larga emitida por la atmósfera e incidente sobre la superficie, ϵ es la emisividad de la superficie, σ es la constante de Stefan-Boltzman ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) y T_s es la temperatura de la superficie ($^{\circ}\text{K}$). El flujo de calor sensible (H) es función de la diferencia de temperatura entre la superficie y la atmósfera circundante. El flujo de calor latente (LE) se refiere a la tasa de evapotranspiración y es función de la disponibilidad de agua en el suelo y del déficit de presión de vapor de agua de la atmósfera, y está dado por el producto de la tasa de evaporación y el calor latente de vaporización, λE ($\lambda = 2.454 \text{ MJ}\cdot\text{Kg}^{-1}$ a $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

2.2.3.2. Relación entre labranza y el balance de energía en el perfil del suelo

A pesar de que las variables de flujo energético y su balance en los sistemas agroproductivos son afectadas por las prácticas de labranza, ha sido valorado marginalmente bajo un enfoque energético (Noborio et al., 1996; Drury et al., 1999).

Lo anterior, adquiere relevancia al considerar el reporte del IPCC (2007), sobre los cambios de temperatura en los sistemas físicos y biológicos entre 1970 y 2004, a nivel mundial, donde, por ejemplo se indican que en el Norte centro, Noroeste e incipientemente en el Noreste del territorio mexicano, dichos cambios se estiman entre 1 y 2 °C; fluctuación que ya se había advertido (UACH-CONAZA-SEDESOL-SAGARPA, 2004) como un factor que contribuye en marcadas irregularidades hídricas con una fuerte tendencia a la sequía y a la desertización, cuyos estragos se manifiestan más dramáticamente en las regiones agrícolas (García-Páez y Cruz-Medina, 2009).

Debido en parte a esto, en años recientes ha resurgido el interés en las mediciones de radiación y del balance de energía en el suelo y en el dosel de las plantas, pero pocas publicaciones se han enfocado al estudio sobre la relación entre las propiedades térmicas y las fracciones de volumen de las fases del suelo (Ham y Heilman, 2003; Ochsner et al., 2006; Ochsner et al., 2007; Hatfield et al., 2007; Sauer y Pinter, 2007).

El gradiente de temperatura del suelo es una forma de expresar G, en cuyo caso se ha encontrado que por ejemplo Drury et al. (1999) estudiaron el efecto del trébol rojo (*Trifolium pratense* L.) asperjado comparado entre la labranza convencional y la no labranza en la temperatura del suelo, el contenido de humedad y la emergencia de maíz (*Zea mays* L.). Sus resultados indican que en el tratamiento de no labranza sin la aplicación de trébol rojo la emergencia demoró de 3 a 4 días y el arraigo de plantas disminuyó en un 24%, sufriendo una disminución en el rendimiento de grano en un 13%, comparado con el tratamiento convencional de labranza.

Por su parte Lipiec et al. (2006) en un estudio realizado en un viñedo localizado en el N-W de Italia, altura 450 m, 20% de pendiente, con precipitación anual de 840 mm, inviernos fríos con nieve y veranos secos con lluvias, encontraron que variables involucradas en la estimación de G como la conductividad (K) y capacidad térmica (Cs), se incrementaron con el contenido de agua y la densidad de volumen, en tanto que la difusividad térmica (α) fue similar para los diferentes contenidos de humedad (entre saturado capacidad de campo).

Más recientemente Ochsner et al. (2007) evaluaron la magnitud de calor almacenado a una profundidad de referencia, con base en lo cual señalan que entre 5 y 10 cm es una profundidad adecuada; además, encontraron que durante la infiltración la temperatura del suelo fue disminuyendo, mientras que

la capacidad calórica se fue incrementando. De manera que los cambios en la capacidad calórica usualmente indican entrada o salida de agua.

Sin duda, aún hay mucho que hacer para mejorar la comprensión respecto a la dinámica de transferencia de agua, energía y gases traza de la superficie de la tierra. Por ejemplo, tradicionalmente se ha pensado que las propiedades térmicas del suelo están fuertemente afectadas por el contenido de agua (Θ) en el suelo, y por lo tanto, se asume que la habilidad para medir K y Θ , son una importante herramienta en el manejo del régimen de temperatura para la germinación, el desarrollo y productividad del cultivo (Elias et al., 2004; Lipiec et al., 2006).

Al respecto, en una perspectiva distinta, Ochsner et al., (2001) estudiaron la relación entre las mediciones térmicas del suelo y las fracciones líquida, sólida y gaseosa de cuatro suelos (Franco arenoso, Franco Arcilloso, Limo Arcilloso y Franco Limo-Arcilloso), cuyo contenido máximo de arcilla fue de 32 %, y encontraron un efecto dominante de la fracción gaseosa sobre las propiedades térmicas del suelo, mayor que para las fracciones líquidas y gaseosa.

En un trabajo más reciente reportado por Agnieszka (2006) comprobaron el manejo del suelo, por efecto de la labranza (convencional y de conservación),

y compactación tienen gran influencia en el régimen térmico del suelo y sus propiedades térmicas, por las siguientes causas:

- 1). La formación de agregados como resultado de procesos de hinchado y encogimiento que da como resultado en un incremento de puntos de contacto entre estos, un incremento en el área de contacto de partículas, siendo las rutas de flujo de calor;
- 2). Formación de películas de agua alrededor de las partículas alargan el área de contacto entre éstas y el área de la sección transversal, condicen con un incremento de calor. Desde los agregados con diferentes formas y tamaños podrían ser formados, estos afectar el movimiento de agua en el suelo y, consecuentemente sus propiedades térmicas;
- 3). La rugosidad del suelo y su disminución en el tratamiento convencional es la razón para una disminución entre la cantidad de materia orgánica, estabilidad de los agregados, alta evaporación y menor superficie de contacto la cual reduce el contacto con la atmósfera lo cual disminuye en realidad la conductividad y la difusividad;
- 4). Los tratamientos de labranza de conservación presentan alto contenido de humedad, como el principal factor con el cual concluye la habilidad del suelo a transportar y conducir calor, así como distribución

de plantas y raíces, su crecimiento, presencia e intensidad de actividades biológicas en el suelo;

5). Si la estructura del suelo tiene paja (mulch) y no es destruida anualmente, los macroporos formados por lombrices y raíces de plantas podrían proveer caminos para el flujo de agua. Además la capilaridad de poros persiste y la capacidad del suelo almacena agua es mayor que el arado afectando consecuentemente su comportamiento térmico.

2.3. Importancia de los pastizales

Los pastizales son un importante ecosistema terrestre porque cubren el 20 % de la superficie mundial y contienen más del 10 % del almacén de carbón global. En la actualidad hay una valoración creciente sobre este tipo de ecosistema debido a que se les considera como sumideros naturales de carbono (Stocker et al., 1997), y al mismo tiempo, también porque están sujetos a una presión permanente ante el aumento en la demanda de alimentos en el mundo, especialmente cereales y forrajes (FAO, 2002).

El interés particular que hay en la actualidad en este tipo de ecosistema es que no hay certeza respecto a como afectan los cambios en el uso del suelo, de pastizal a bosque (o agrícola) y vice versa, en los ciclos del agua y en la dinámica de CO₂ (Ryu et al., 2008).

2.3.2. Los pastizales de México

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. En general los suelos de Feozem, con casi el 10 % del total nacional con suelos de este tipo, donde se arraiga parte de los pastizales, generalmente son profundos, ricos en materias orgánicas y fértiles. Debido a esa característica los agricultores históricamente los han preferido para la siembra de cereales y forrajes, elevando con ello su susceptibilidad a la erosión (SEMARNAT, 2002; SIAP, 2007; CONAFOR, 2008).

La CONAFOR (2005) tiene establecido que, los suelos del tipo Fozem se distribuyen en gran variedad de climas y Regiones de México, en climas templados y húmedos, por lo que se encuentran recubriendo el Eje Neovolcánico Transversal y porciones de la Sierra Madre Occidental (Figura 2-5).

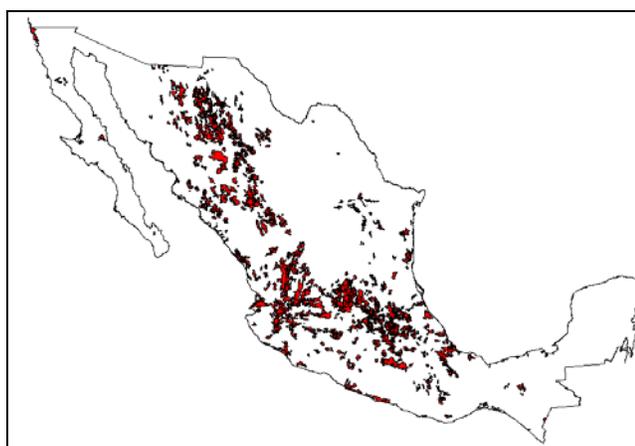


Figura 2-5. Distribución de Suelos de Tipo Feozem.

2.4. Método de la covarianza Eddy para medir flujos de masa y energía entre superficies vegetales y la atmósfera

En ecosistemas terrestres, los movimientos de CO₂, así como otras variables de flujo energético, pueden ser medidos básicamente por tres métodos: a) Covarianza Eddy, (CE); b) Relación Bowen, (RB); y c) 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 (Peters et al., 2001; Clark et al., 2001; y Massman and Lee, 2002).

El método de la Covarianza Eddy (CE) es un procedimiento reconocido por ser de los más directos, para medir y calcular mediante procedimientos matemáticos complejos, flujo de calor sensible sónico, momentos de flujo y otros escalares entre la atmósfera y las superficies de la tierra, mediante el uso de instrumentos tales como sensores de rápida respuesta escalar que puede ser representativa de grandes áreas. La CE tiene como fundamento la medición de flujos verticales del viento donde se producen movimientos horizontales y numerosos remolinos de distinto tamaño, como los mostrados en la Figura 2-6 (Lee et al., 2004; Burba y Anderson, 2005-2007).

En dicha figura (2-6) los remolinos tiene tres componentes dimensionales, 3D (x, y, z); por ejemplo, la superficie de un lago es una fuente

de agua relacionada con la atmósfera en el proceso de evaporación. Si lo opuesto es cierto, la superficie entonces es un sumidero (Burba y Anderson, 2005-2007).

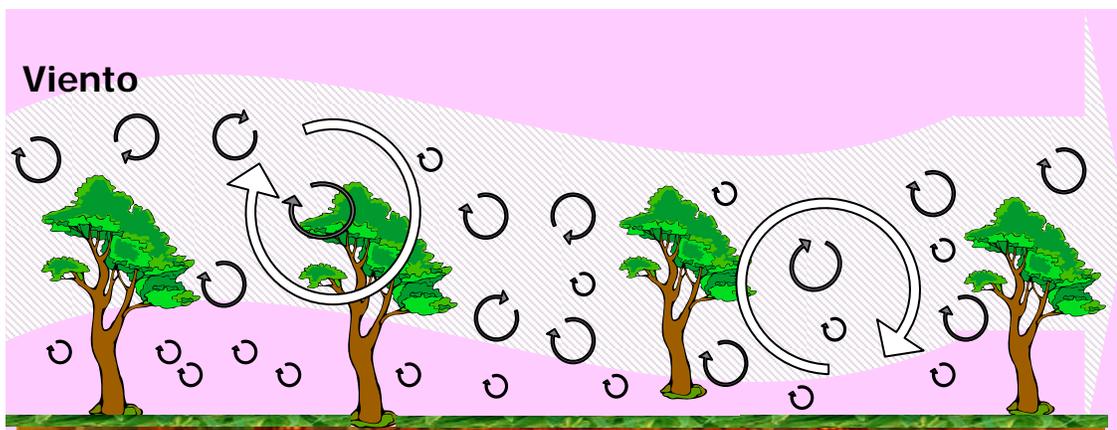


Figura 2-6. Representación de flujos de viento en un ecosistema. (Fuente: Burba y Anderson, Op cit. p 11).

2.4.1. Principio general de la medición de las concentraciones en flujos de viento

El principio general en la medición de los flujos de viento consiste en saber cuantas moléculas son transportadas en los remolinos que se desplazan hacia arriba y hacia abajo dentro de una capa de aire, con lo cual es posible calcular el flujo vertical en un punto dado; de manera que el flujo vertical puede ser presentado como una covarianza de la velocidad vertical del viento y concentración de la entidad de interés (Burba y Anderson, 2005-2007).

Es decir, suponiendo que la medición se realiza en un punto, bajo el esquema mostrado en la Figura 2-7, si el Eddy 1 mueve parcelas de aire c_1 hacia abajo con la velocidad w_1 después el Eddy 2 mueve la parcela c_2 arriba con la velocidad w_2 , cada parcela tiene concentración, temperatura, humedad y si se conoce ésta y la velocidad, es posible saber las características del flujo; por ejemplo, si en un momento se sabe que tres moléculas de CO_2 se mueven hacia arriba, y en el siguiente momento solo dos moléculas de CO_2 se mueven hacia abajo, entonces se deduce que el flujo neto bajo este tiempo movilizadas hacia arriba, y es igual a una molécula de CO_2 (Burba y Anderson, 2005-2007).

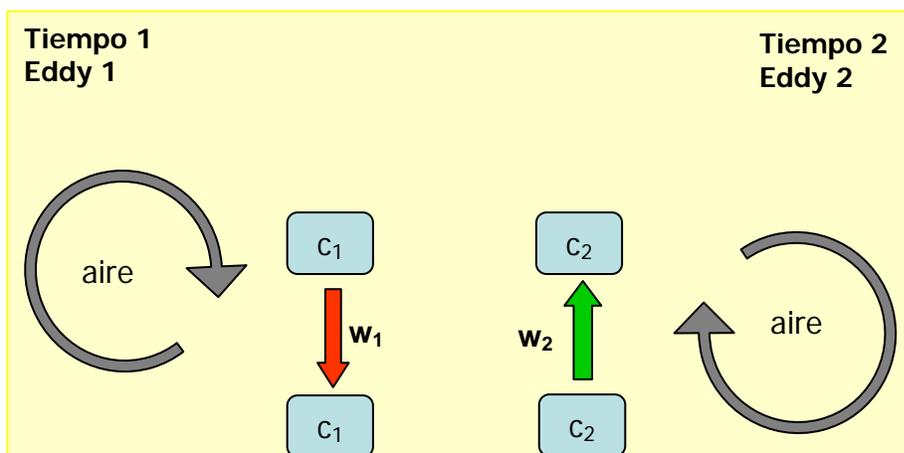


Figura 2-7. Marco conceptual de la forma en se miden los Eddy en un punto.

(Fuente: Burba y Anderson, Op cit. p 12).

2.4.2. Ecuaciones de flujo superficial

La capa superficial está comprendida de aproximadamente menos del 10 % de la capa atmosférica límite (CAL). Los flujos de vapor de agua y calor

dentro de esta capa ligeramente constantes con la altura cuando el siguiente criterio se cumple: la superficie tiene una homogeneidad horizontal; y la relación $z/h \ll 1$ z/z_{om} es verdadera, donde Z_{cfc} es la altura de la capa, h es la altura de la CAL, y z_{om} es la longitud de rugosidad de momento (Figura 2-8). De acuerdo a esto, los flujos de CO_2 , vapor de agua y calor dentro de la capa superficial pueden ser escritas de la siguiente forma:

$$FCO_2 = \overline{\rho' CO_2 \cdot w'} \quad (2-3)$$

$$LE = L_v \cdot \overline{\rho_{wv}' \cdot w'} \quad (2-4)$$

$$H = \rho_a \cdot C_p \cdot \overline{Ta' \cdot w'} \quad (2-5)$$

Donde FCO_2 es el flujo de CO_2 , $\rho' \cdot CO_2$ es la desviación instantánea de la densidad media de CO_2 ; w' es el promedio de la desviación instantánea de la velocidad vertical del viento; LE es el flujo de calor latente; L_v es el calor de vaporización; ρ_{wv}' es la desviación instantánea de la densidad de vapor de agua; H es el flujo de calor sensible, ρ_a es la densidad del aire; C_p es la capacidad calórica del aire a una presión constante; Ta' es la desviación instantánea de la temperatura media del aire (Massman et la 2004).

Las expresiones $\overline{\rho' CO_2 \cdot w'}$, $\overline{\rho_{wv}' \cdot w'}$, y $\overline{Ta' \cdot w'}$ son las covarianzas entre la velocidad del viento y la densidad de bióxido de carbono; la velocidad vertical

del viento y la densidad de vapor; y velocidad vertical del viento y la temperatura (Massman et la., 2004).

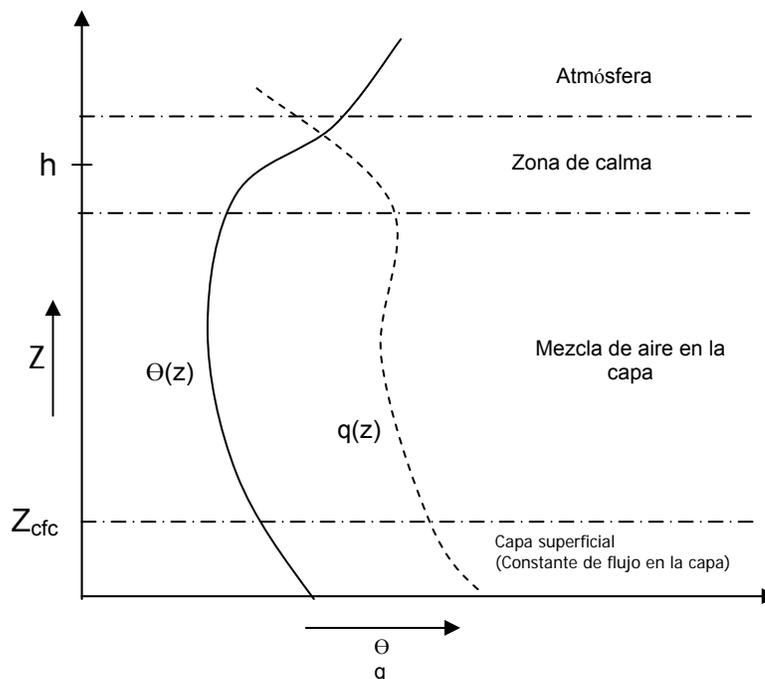


Figura 2-8. Perfiles verticales ideales de temperatura virtual potencial y humedad específica representando todas las capas de la capa atmosférica límite. (Fuente: Campbell Op cit. Pp 39-40).

2.4.3. Flujo de calor en el suelo

En particular, para explicar el comportamiento de la energía que fluye en el suelo, en este caso se recurre a la ley de conducción de calor o ley Fourier utilizada por varios autores (Oschner *et al.*, 2001; Deru, 2003; Ochsner *et al.*, 2007), en la cual, se establece que: "...el calor transmitido es directamente

proporcional al gradiente de temperatura a través de una masa (como una pared), e inversamente proporcional al espesor de la misma.”

Una interpretación de lo anterior, permite definir a G como el calor transmitido a través de la superficie K , especificada como conductividad térmica en $J \cdot Kg^{-1}K^{-1}$, el cual se asume con un valor constante de acuerdo a las características del suelo; y dT/dt representa al gradiente vertical de temperatura, cuya ecuación se presenta a continuación (2-6):

$$G = K \cdot dT/dt \quad (2-6)$$

Para aplicar la ecuación anterior, es necesario implantar condiciones de frontera para la masa de suelo. Para ello, en la Figura 2-9 se representa el comportamiento de G , que puede ser ascendente y descendente entre los límites $z=0$ y $z=D$. Cuando el valor de G es positivo significa que el suelo gana energía y por el contrario cuando presenta valores negativos se interpreta como pérdida de energía.

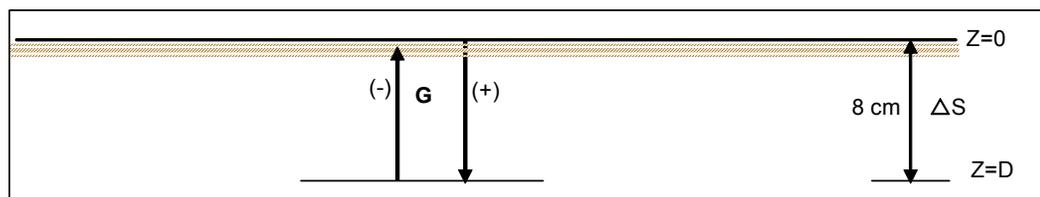


Figura 2-9. Representación esquemática de las condiciones de frontera para el análisis del flujo energético en el suelo

El almacenamiento de la energía en la capa de suelo a 8 cm de profundidad, definido en la Figura 2 como ΔS , está dado por la diferencia entre el flujo de calor en la superficie (G_0) y el flujo de calor a 8 cm (G_{D8}), cuya expresión algebraica se representa de la siguiente manera (2-7):

$$\Delta S = G_0 - G_{D8} \quad (2-7)$$

De acuerdo a lo propuesto por Ochsner *et al.*, (2007), esto significa que la energía que fluye, tanto en forma ascendente como descendente es igual a la integral en los límites $z=0$ hasta $z=D$, del gradiente vertical de energía que está afectado por el producto de la densidad aparente del suelo (Da), las propiedades térmicas del suelo (Cs) y los cambios de temperatura (T), como una función del espesor de la capa de suelo (dz), mismo que está representado en la siguiente ecuación (2-7):

$$\Delta S = \int_{z=0}^{z=D} \frac{\partial}{\partial t} [Da \cdot Cs \cdot T] dz \quad (2-7)$$

La solución analítica de la ecuación (2-7) se presenta a continuación (2-8):

$$\Delta S = (Da \cdot Cs \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}) \Delta z \quad (2-8)$$

Además de lo anterior, es importante hacer notar que C_s es una variable que está afectada por el contenido de agua en la capa de suelo; ΔT es la diferencia en la temperatura de un tiempo desde $t=0$ a $t=T$; Δz es la diferencia en profundidad del suelo desde $z=0$ hasta $z=D$ y Δt representa el tiempo que transcurre entre dos lecturas consecutivas de $t=0$ hasta $t=t$.

2.5. Efecto de la labranza en la distribución de agua en el perfil del suelo

En regiones de clima árido la labranza se asume como parte de una estrategia que busca disminuir la evaporación de la superficie del suelo e incrementar el almacenamiento de agua, que después será empleado por las plantas a través de su sistema radicular; aunque los beneficios de la misma sean difíciles de predecir (Pikul y Aase, 2003).

Desde el punto de vista físico, parte de las metas de la labranza en superficies de suelo, sujetas a la lluvia o la irrigación, podrían estar centradas en reducir la dureza y densidad aparente (D_a), incrementando su porosidad; puesto que la densidad aparente (D_a) está inversamente relacionada con la porosidad total (P_t). Propiedades sobre las cuales se determina la capacidad de aireación, así como su comportamiento hidrodinámico (Lampurlanés y Cantero-Martínez, 2003; Moroizumi y Horino, 2004).

Pikul y Aase (2003) encontraron que en un suelo franco arenoso arcilloso, tanto la práctica del subsoleo seguido por un barbecho (SS^+), como el

barbecho solamente (LC), con arado de discos aplicado a 0.3 m de profundidad, en el transcurso de tres días consecutivos los valores de la velocidad de infiltración y la infiltración acumulada tuvieron un comportamiento decreciente al pasar respectivamente de 37.8 mm h⁻¹ y 130.2 mm, a 3.8 mmh⁻¹ y 26.4 mm en SS⁺; y de 40.9 mmh⁻¹ y 127.3 mm a 11.4 mmh⁻¹ y 50 mm en LC.

Lo anterior, dicen dichos autores (Pikul y Aase, 2003), que si bien la infiltración fue mejorada por medio del subsoleo, lo cierto es que subsecuentemente la labranza destruyó la continuidad vertical de los canales de macroporos y redujo la infiltración en SS⁺ comparado con LC; coincidiendo en este sentido con Fuentes et al (2004), especialmente cuando se utiliza el arado de discos para el barbecho.

Sin embargo, también se observa que en el perfil 0-0.30 m el tratamiento sin labranza mostró el mayor contenido de humedad, pero en la profundidad 0-0.05 m el tratamiento donde se aplicó el barbecho solamente, LC, fue entre 0.11 y 0.15, mientras que el tratamiento testigo fue 0.1 a 0.125 (Pikul y Aase, 2003).

Moroizumi y Horino, (2004) bajo condiciones controladas en columnas de suelo, hicieron una comparación entre un tratamiento de labranza (LC), equivalente al barbecho con arado de discos, con otro sin labranza (NL) en un suelo de textura franco arenosa, y encontraron que mientras que el contenido gravimétrico de humedad a saturación, Θ_s fue de 0.718 y 0.635 para LC y NL,

respectivamente, la humedad residual, Θ_r fue semejante en ambos casos al llegar a 0.052.

Sin embargo, también mencionan (Moroizumi y Horino, 2004) que aunque en LC el suelo incrementa su capacidad de saturación, la humedad es retenida con menos fuerza que como se presenta en NL en el rango de 0.2 a 0.65, pero por debajo de este rango (<0.2) la capacidad de retención no cambió para ambos tratamientos.

2.6. Emisión de CO₂ bajo diferentes sistemas de manejo del suelo

La labranza convencional acelera la oxidación del carbono orgánico (CO) a CO₂, mediante el mejoramiento de la aireación, incremento del contacto de los residuos de cultivos, y a partir de la exposición de los agregados protegidos por la materia orgánica a la acción microbial (Curtin et al., 2000).

Los niveles de CO en el suelo, fundamentalmente está determinado por el balance entre las entradas y las salidas. La primera a partir de los residuos de plantas, raíces, y exudados de raíces; la segunda, por las pérdidas de materia orgánica debido a la descomposición, erosión y lixiviación (Six et al., 2006).

Bacterias y hongos generalmente comprende más del 90 % de la biomasa microbial total, y este es responsable de la mayor parte de la

descomposición de la materia orgánica del suelo. Desde que las comunidades microbiales son reguladores clave en la dinámica de la materia orgánica del suelo (MOS) y disponibilidad de nutrientes, los cambios en la función y composición es como respuesta a las diferentes prácticas de manejo del suelo, lo cual juega un rol importante en las tasas de pérdida de CO del suelo (McCulley and Burke, 2004; Six et al., 2006).

La relación de biomasa hongos:bacterias ha mostrado ser particularmente sensible a disturbios, con relaciones bajas asociadas a la intensificación del cultivo, incremento del la presión de pastoreo, y con el aumento de la fertilización nitrogenada (Six et al., 2006)

La emisión de dióxido de carbono (CO₂) del suelo, también conocido como respiración, es un término ampliamente utilizado como referencia de fertilidad física, química y biológica, puesto que del CO₂ atmosférico, el secuestro de C en los agroecosistemas está directamente relacionado con la dinámica de microbial y el balance entre la formación y degradación de la materia orgánica del suelo (Six et al., 2006).

Se ha documentado que el suelo contiene el almacén de carbón activo más grande de la Tierra, y que a través de la respiración contribuye en un flujo anual de CO₂ a la atmósfera que es 10 veces mayor que la combustión de combustibles fósiles (Andrew et al., 1999). La respiración como principal

componente del ciclo de carbono en el suelo es fácilmente alterado por el cambio climático. Sin embargo, aún no está completamente comprendido este fenómeno debido a que hay varios procesos que contribuyen en la respiración, especialmente la contribución de la raíz y la rizosfera (Rochette et al., 1999; Kuzyakov, 2002, Six et al., 2006).

Las emisiones de CO₂ en la superficie de suelos sin vegetación, proveen una valoración directa de corto tiempo sobre la dinámica del carbono en el mismo. Sin embargo, cuando las plantas están presentes la interpretación de la respiración total es complicada debido a la contribución de la raíz en la liberación de CO₂ (Rochette et al., 1999). Se ha estimado que la contribución de la rizosfera en la respiración total es de 40-50 % y el restante 50-60 % se explica por la descomposición microbial de los exudados de la raíz y otras rizodeposiciones (Andrews et al., 1999; Kuzyakov, 2002). Algunos de los trabajos más sobresalientes que relacionan las propiedades del suelo con la captura y liberación de CO₂ se muestran en el Cuadro 2-3.

Cuadro 2-3. Captura y liberación de CO₂, relacionado con algunas propiedades edáficas, tiempo máximo de duración, lugar donde se realizó la investigación y autor.

Especie/Sistema cultivo/asoc.	Propiedades edáficas				Captura de CO ₂	Tiempo máximo	Liberación de CO ₂	Tiempo máximo	Sitio/lugar	Año realizó/método de medición	Autor(es)
	Textura.	M.O. (%)	Humedad (θ _w).	pH							
Maíz, sistema convencional	Franco arcilloso	3.24-3.31	Max=0.41 Min=0.22.5 Med=0.35.	Ácido (5.4-6.3)	388 g C m ⁻²	148 d	158 g C m ⁻²	120 d	Ottawa, Can.	1996	Raich y Mora, 2005
Viñedo (Var Thomson sin semilla)	Franco arenoso Arena=49% Limo=34% Arcilla=17%	4.0 %	0.08-0.32	nd	nd	perenne	Max=10.0 Min= 0.4 Med= 4.5 (molCO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	nd	California, USA	1996/IRGA y δ ¹³ C	Carlise <i>et al.</i> , 2006
Maíz, en hileras (6.5 plantas m ⁻² y 0.75 m entre surcos)	Franco arcilloso (Fracciones sd)	3.24-3.31	Max=0.41 Min=0.22.5 Med=0.35.	Ácido (5.4-6.3)	3.3 a 1.4 g CO ₂ -C m ⁻² s ⁻¹	Al final del ciclo	2.0 a 6.0 g CO ₂ -C m ⁻² s ⁻¹	Primeros 100 d	Ontario, Can.	1997/CIG y δ ¹³ C	Rochette <i>et al.</i> , 1999
Maíz-Trigo, rotación. No labranza	Limo-arcilloso (Luvisol háplico)	19 %		Ácido (6.0)	5415 + 701 Kg C ha ⁻¹	2do tercio	1146 kg CO ₂ -C ha ⁻¹	1er tercio (Abr-Jun)	Boigneville, Francia	Abr-Jul, 03 (maíz) y Ago, 03 -Mar, 04 (trigo)	Oorts <i>et al.</i> , 2007.
Maíz-Trigo, rotación. Labranza convencional	"	"	"	"	3120 + 499 Kg C ha ⁻¹	2do tercio	1159 kg CO ₂ -C ha ⁻¹	1er tercio (Abr-Jun).	"	"	"

Nota:

Captura y liberación de CO₂, en los sistemas biológicos son el resultado de dos procesos recíprocos muy conocidos: fotosíntesis y respiración. Bajo un enfoque agroproductivo es más común hablar del resultado del proceso fotosintético como producción primaria neta (PPN). Es así que las magnitudes suelen darse en toneladas por hectárea, y es muy raro hablar de respiración bajo este mismo enfoque. Por ejemplo, Matsumoto *et al.*, (2002) reporta que un cultivo de maíz con adición de estiércol tuvo una captura de CO₂ equivalente a 4.2 ton ha⁻¹ de materia seca y una liberación de 10.5 ton ha⁻¹ en un tiempo de 63 días.

Raich y Mora (2005) utilizaron datos previamente publicados por Rochette et al en 1999, con base en los cuales emplearon un modelo basado en la medición de la temperatura del suelo, cuya expresión es la siguiente (2-6):

$$R_{\text{soil}} = R_{\text{soil}0} \times \exp(Q \times T_{\text{soil}}) \quad (2-6)$$

Donde, R_{soil} es la medición de la respiración in situ en $\text{g de C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; $R_{\text{soil}0}$ es la tasa de respiración cuando $T_{\text{soil}0} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$; y Q es el coeficiente de temperatura, cuyas unidades son $^\circ\text{C}^{-1}$. Los resultados indican que la raíz tuvo una contribución del 27 % de la respiración total del suelo para la fase de crecimiento acumulada de maíz cultivado en Ottawa, Canada.

Para ampliar la información mostrada la Tabla anterior (2-3), a continuación se detallan las características y resultados de dos de los casos más interesantes encontrados en la literatura revisada.

Caso 1:

Rochette et al., (1999) utilizaron mediciones del isótopo ^{13}C del CO_2 para separar de la respiración total (R_t) la respiración de la rizosfera (R_{rh}) y la respiración del suelo (R_s) en un cultivo de maíz bajo condiciones de la agricultura típica de Norte América, y compararon las estimaciones de R_{rh} obtenidas usando dicho isótopo con estimaciones obtenidas de una aproximación mediante la exclusión de la raíz.

Este trabajo se estableció en el Central Experimental Farm, ubicado en Ottawa, Ontario, Can. (45° 22' N, 75° 43' W, 79 m) del día 148 al 303 del año 1996. El suelo está clasificado como un Brandon loam, que corresponde a un franco arcilloso, mezclado con un Endoaquoll típico, donde se había cultivado trigo de invierno (*Triticum aestivum* L.) entre 1994 y 1995, seguido por 3 años consecutivos con forrajes perennes, lugar donde anteriormente no habían sido utilizado para maíz u otros cultivos C4.

Los resultados indican que las tasas emisión de CO₂ para el cultivo, definido como Rt, tuvieron un promedio durante todo el ciclo de 4 g de C m⁻² d⁻¹, y sus valores extremos fueron de entre 2 y 6 g de C m⁻² d⁻¹, observándose también que los valores más altos se asociaron al segundo tercio de desarrollo del cultivo, mientras que los más bajos fueron desde su máximo desarrollo en el tercer tercio, hasta el final del ciclo del cultivo.

Por otro lado, en la Figura 2-10 (a y b) se muestra la relación entre contenido de humedad en el suelo (θ_w) y el comportamiento del cultivo indica que cuando la humedad disminuye las tasas de emisión de CO₂, son mayores, fenómeno que se observa con mucho más claridad en el segundo tercio (2/3) del ciclo del cultivo. Por ejemplo, cuando θ_w se ubica entre 0.25 y 0.30, la liberación de CO₂ muestra una tendencia ascendente que va de 4 a 5 g de C m⁻² d⁻¹.

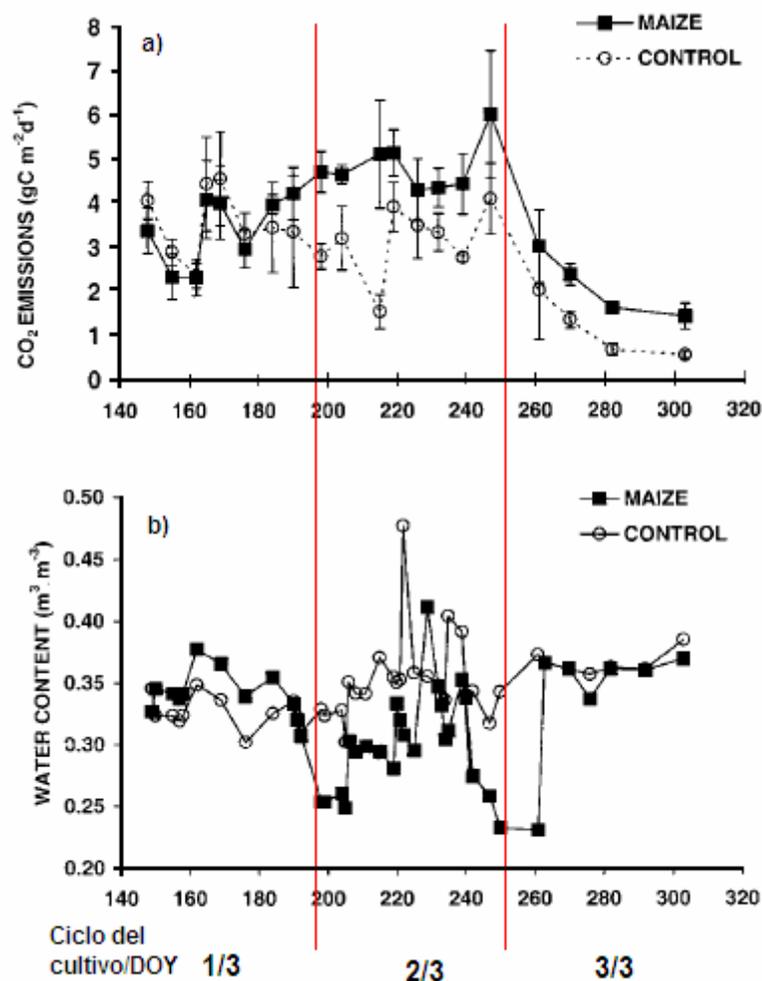


Figura 2-10. a) Respiración total (Rt); y b) contenido de humedad en el suelo para el cultivo de maíz y el tratamiento control para el ciclo del cultivo dividido en 3 tercios. (Fuente: Rochette op cit.).

Finalmente, como puede verse en la Figura 2-11, R_s presenta un comportamiento con valores decrecientes que van de 3.5 a 2.2 g de C m⁻² d⁻¹ que no se distingue de R_t en los primeros 30 días ciclo del cultivo, pero hacia el final del primer tercio R_s muestra diferencias con respecto a R_t que van desde 0.5 hasta más de 1.5 g de C m⁻² d⁻¹. Hasta el final del segundo tercio con un

máximo de $3 \text{ g de C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Para el tercer tercio Rs tiene un comportamiento decreciente hasta llegar a una magnitud de poco más de $1 \text{ g de C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y muy cercano a Rt.

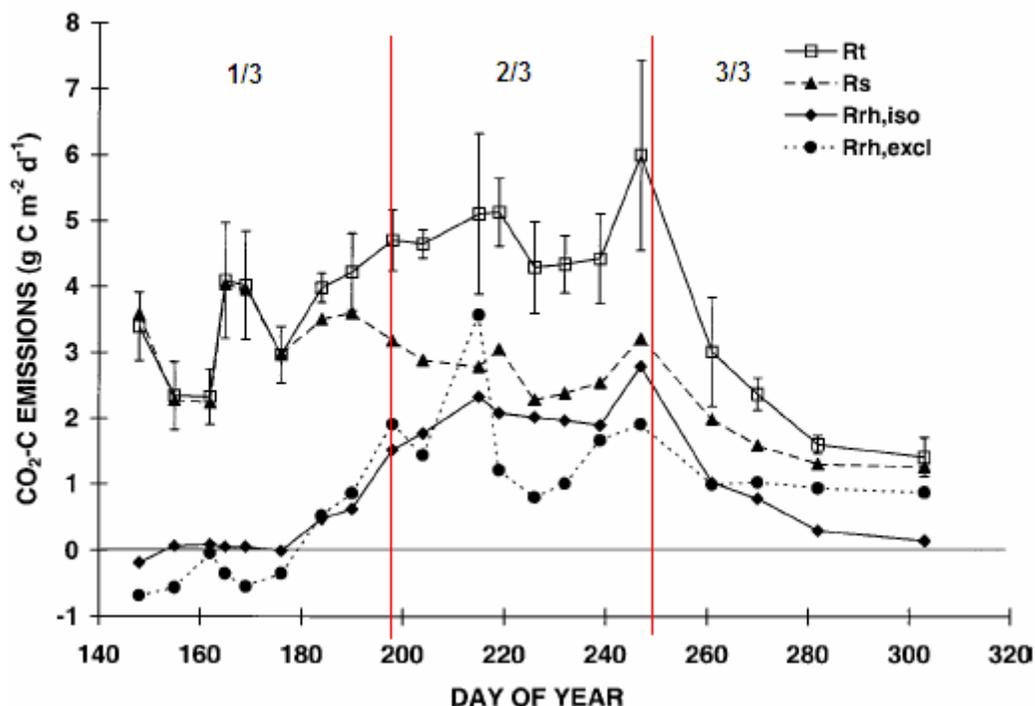


Figura 2-11. Respiración total (Rt), y del suelo (Rs) para el ciclo de cultivo de maíz dividido en 3 tercios. (Fuente: Rochette op cit.).

Caso 2:

Carlise et al., (2006), realizaron mediciones netas de flujo de CO_2 del suelo, concentración de CO_2 , y el $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 con la profundidad de tres sitios adyacentes que fueron convertidos de bosque de Quercus (Oak woodlands) a viñedos desde hace 30 años. Con base en esto, demostraron que la conversión

de bosque a viñedos incrementa la proporción de C respirado de fuentes de C más recalcitrantes existentes en el suelo.

La referencia que estos autores tienen para comparar las mediciones realizadas se muestran en el Cuadro 2-4.

Cuadro 2-4. Respiración del suelo (CO₂-C) reportado para bosques del Mediterráneo y Ecosistemas agrícolas.

Ecosistema	Sitio	Respiración del suelo (CO ₂ -C). Mg C ha ⁻¹ año ⁻¹	Referencia.
Eucaliptos savanna	Australia	14.3	Cheng et al. (2003)
Quercus ilex (woodlands)	España	1.8 – 3.4	Piñol et al. (1995)
Quercus ilex (woodlands)	Francia	3.8 -5.8	Raich and Shleinger (1992)
Bosque (Pinus halepensis)	Israel	4.5	J. Grünzweig
Viñedo (Var Thomson)	California	3.6 -6.2	Williams (1996)

Fuente: Carlise *et al.*, (2006)

Este trabajo se realizó en el Valle de Napa en California, EUA. Lugar donde desde hace 30 años se desplazó la vegetación nativa compuesta principalmente por bosque de Quercus (*Q. lobata* Née e híbridos de *Q. lobata*) y pastos anuales y arbustos C3, para el establecimiento de Viñedos.

Para ello, la respiración de suelo se hizo con infrared gas analyser (Model LI-6400/6400-09; LI-COR, Lincoln, NE). Los flujos de medidos fueron corregidos por presión de vapor, temperatura del suelo, y temperatura en la cámara. La humedad gravimétrica del suelo fue determinada enseguida de cada medición de flujo. La mediciones se realizaron por espacio de 12:00 a 14:00 h cada 2 y 3 semanas de Octubre 2002 a Diciembre del 2003.

Los resultados indican que las mediciones de flujo de CO₂ disminuyen un 20 % por la tarde y en la mañana durante la estación activa de crecimiento, con tasas que llegan a alrededor de 11:00 y 15:00 h. En diciembre del 2002 el área recibió 510 mm de lluvia los sitios fueron inaccesibles durante el intervalos de medición programado. Una vez que se obtuvieron las mediciones de flujo anual CO₂-C se calculó la pérdida anual de C mediante la integración de las tasas de flujo de cada sitio, considerando los flujos nocturnos. Esto permitió estimar el valora anual de pérdida de C.

Como puede verse en la Figura 2-12 (a y b), la respiración del suelo se incrementó en los sitios de bosque y en los viñedos, inmediatamente después de la primera precipitación, seguido de la estación seca (Noviembre de 2002 y 2003). Después el incremento abrupto en el flujo de CO₂ seguido de la primera lluvia de verano, subsecuentemente las tasas de flujo durante la estación húmeda declinaron a niveles todavía superiores a las observadas en la temporada previa.

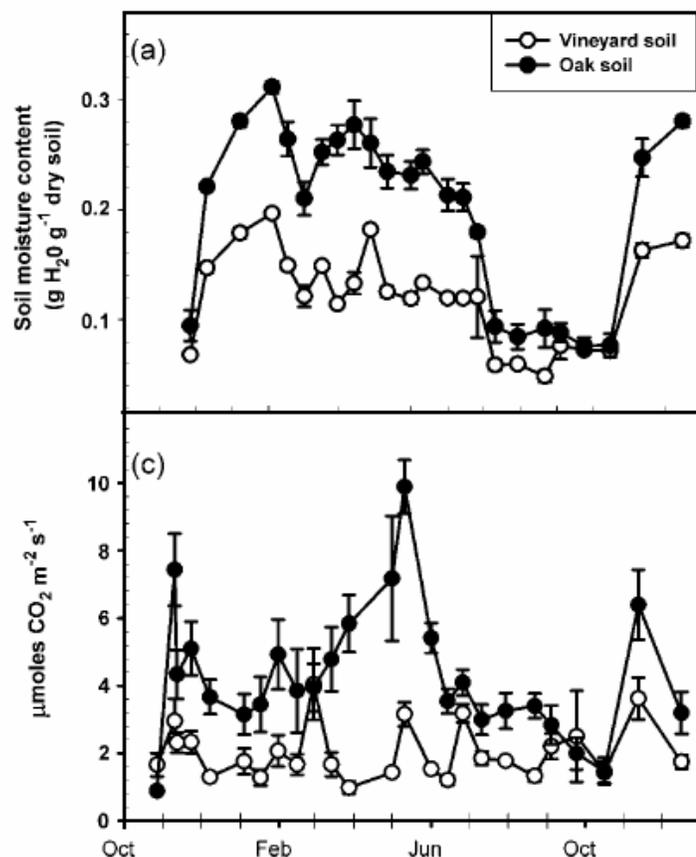


Figura 2-12. Mediciones bimensuales del contenido gravimétrico de humedad (a), y flujo de CO_2 del suelo (b). Los puntos representan valores promedio y las barras verticales indican el error estándar. El contenido de humedad fue medido a 20 cm de profundidad.

Por último, para explicar el comportamiento observado en este caso, los autores (Carlise et al., 2006) dicen que varios estudios han examinado los mecanismos bajo los cuales se da este flujo inicial de CO_2 y este probablemente esté más asociado al contenido de humedad que a la temperatura. Estos factores incluyen la infiltración que tiene un efecto sobre el

desplazamiento de la atmósfera del suelo, liberando CO₂ acumulado en el espacio poroso.

2.7. Pulsos de precipitación y flujo de carbón en ecosistemas áridos y semiáridos

En las regiones áridas y semiáridas de Norte América se ha observado que pequeños eventos de lluvia, o pulsos de precipitación, promueven en forma inmediata la actividad biológica. Pero la duración de la actividad fisiológica en el ecosistema está en función del incremento del tamaño del pulso, los cuales, son poco frecuentes en estas regiones (Human et al., 2004). Sin embargo, aún hay muchas preguntas sobre la respuesta de dichos ecosistemas a los pulsos de lluvia (Goldstein et al., 2000; Xu et al., 2004; Polley et al., 2008; Ryu et al., 2008).

Los flujos de CO₂ estimado por estos autores (Polley et al., 2008) para praderas sujetas a pastoreo y sin pastoreo entre 1997 y 2001, considerando la temperatura y el índice de área foliar (IAF) tuvieron flujos diurnos promedio de -0.1146 y -0.126 g·CO₂ m⁻²s⁻¹; mientras que para los nocturnos reportan promedios de 0.0656 y 0.0828 g·CO₂ m⁻²s⁻¹, para las praderas en pastoreo y sin pastoreo, respectivamente.

Sin embargo, Xu et al (2004) dicen que el pastizal en estado de senescencia durante el verano cambia la fuente de respiración del ecosistema

de una forma autotrófica a heterotrófica para bacterias y hongos. Durante el verano la respiración procesada en una tasa baja fue del orden de 0.1 a 0.3 g de $C \cdot m^{-2} d^{-1}$, pero durante los eventos de lluvia se observó una estimulación en la respiración heterotrófica la ser de 60 a 80 veces mayor que el promedio, con valores que llegaron a poco mas de 7 g $Cm^{-2}d^{-1}$, para volver a valores inferiores de 2 g $Cm^{-2}d^{-1}$ al cabo de 15 días después de la lluvia; lo cual, no podría ser explicado por medio de la humedad promedio del suelo y la temperatura.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción general del sitio de estudio

3.1.1. Localización

El Rancho “Los Ángeles” es un predio se encuentra al sur del municipio de Saltillo, Coah., México, dedicado a la ganadería bovina en pastoreo de la raza Charolais, con una superficie total de poco más de 6700 has. Se localiza en el noreste mexicano (25° 6.650' N y 100° 59.413 O).

3.1.2. Clima y fisiografía

Para este lugar se ha establecido que el clima [BWhw(x')(e)] es semiárido, con una precipitación media anual de 350 mm, distribuida en dos periodos: la primera de mayo a septiembre con el 80 al 90 por ciento del total de la lluvia; y el segundo, estimado como el periodo seco por tener entre el 10 y 20 restante (García, 1975). Además, se caracteriza por topoformas con plegamientos que se identifican al norte como “Sierra Leona” con una altura máxima de 2850 m y al sur la “Sierra Los Ángeles” con 2400 m, condición que da lugar a la existencia de valles que se encuentran a una altura media de 2100 m (INEGI, 1976).

3.1.3. Suelo y vegetación

Los suelos del lugar están formados principalmente por suelos del tipo Luvisol en un 40% de la superficie total, cuya característica principal es que son profundos, con un horizonte superficial de color oscuro y ricos en materia orgánica (Figura 3-1).

La vegetación tiene una distribución que se relaciona con las características topográficas, edáficas y microclimáticas del lugar, ya que, en las laderas de la sierra predomina la vegetación de matorral rosetófilo espinoso y en las partes altas de esta misma predominan las especies de pino (*Pinus sp.*) con matorral inerme; mientras que en los potreros dominados con pastizal mediano abierto, cuya composición primordial es gramíneas de los géneros: *Aristida*, *Buchloe*, *Boteloua*, *Mulenbergia*, *Steria* e *Stipia* (Mellado s/f), que comparten nichos con herbáceas principalmente de familias de las *Laminaceas*, *Chenopodaceas*, *Euphobaceas* y *Asteraceas*.

3.2. Descripción de las parcelas experimentales

Las mediciones de flujo de masa y energía se realizaron en una superficie de 35 has del potrero 4, localizado justamente en el centro del Rancho (Figura 3-1), que corresponden a un suelo de pastizal convertido a uso agrícola desde hace poco más de 25 años; el cual, fue laborado en el Otoño, 2006 y Verano del 2007, después de que había permanecido por cinco años consecutivos en descanso.

Dentro de dicho potrero (No. 4) se utilizaron 3 parcelas en cada uno de los dos años considerados. Cada parcela comprendió una superficie de 3.6 ha cuyas longitudes fueron: 180 m, dirección N-S y 200 m en dirección E-O, como se muestra en la Figura 3-2.

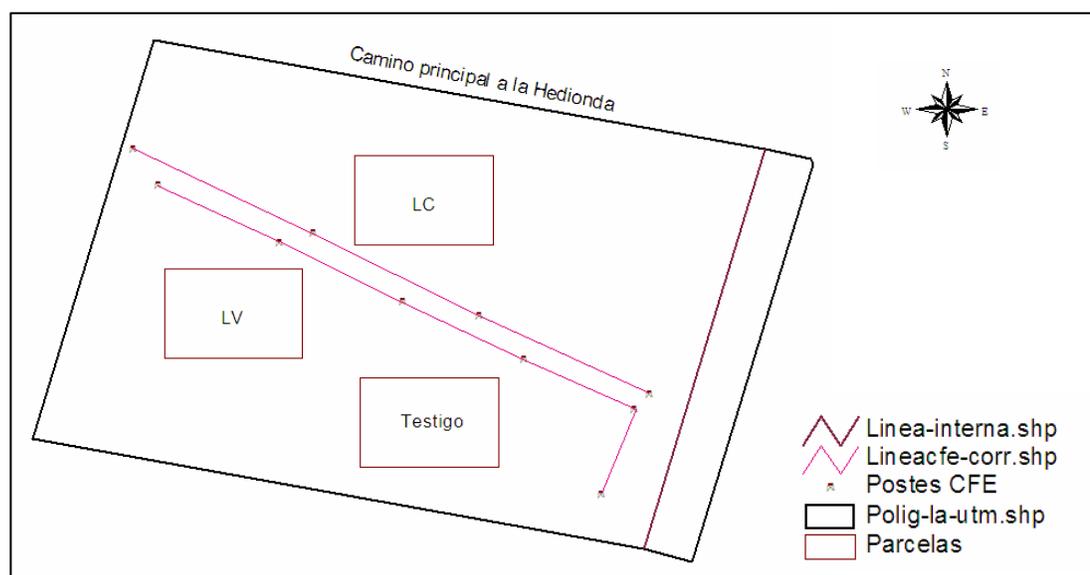


Figura 3-2: Distribución de los tratamientos dentro del potrero no. 4 para el primer ciclo de medición en 2006. (Sin escala)

3.2.1. Características iniciales

Para definir las características iniciales del lugar, durante los meses de Marzo y Abril del 2006, se hicieron muestreos de suelo en las parcelas programadas para establecer el experimento, acompañados de estudios agrológicos para las profundidades 0-30 y 30-60 cm. Asimismo, durante el monitoreo de flujos de masa y energía, tanto para 2006 como para 2007, también se hicieron mediciones de la vegetación presente y sobre los cambios en la densidad aparente. Los resultados en ambos casos se describen a continuación.

3.2.1.1. Propiedades edáficas

Los análisis de laboratorio y campo más sobresalientes como son: textura arcillosa, > 40 %, (Hidrómetro de Boyoucos); pH >8, (potenciómetro:); color en la superficie del suelo seco (Tablas Munsell: 10YR 5/2); y contenido de carbonatos totales >37 % (Volumetría de neutralización) confirman que el tipo de suelo corresponde a un Feozem lúvico (HI) (INEGI, 1976; FAO-ISRIC-ISSS-AISS-IBG, 1994), cuya información a las profundidades 0-30 y 30-60 está contenida en el Cuadro 3-1.

Los datos mostrados en el Cuadro (3-1), son coincidentes con las características de suelo analizadas y clasificados con base en el triángulo de texturas, ya que en la literatura se reporta (Narro, 1994) que para la clase

textural denominada: “Arcilla en agregados” la densidad aparente, se encuentra en el rango de 900 a 1100 kg m⁻³.

Cuadro 3-1. Propiedades físico-químicas más importantes de las parcelas experimentales.

Prof. (cm)	pH	CE (ds/m)	% Arcilla	% Limo	% Arena	Da (g/g)	Clase textural	% Nitrógeno	% M.O	% Carb totales
0-30	8.28	2.1	44	24	32	0.9	Arcilla	0.21	4.24	37.28
30-60	8.31	0.509	58	28	14	1.1	Arcilla	0.14	2.8	37.77

Fuente: Laboratorio de Calidad de Agua y Suelo del Dpto. de Riego y Drenaje, UAAAN.

3.2.1.3. Vegetación presente

La composición de la vegetación dentro de cada parcela para determinar porcentajes de cobertura se hizo con base en los métodos de intercepción en línea y del cuadrado, propuestos por Franco et al (1995). Las especies más importantes se presentan en el Cuadro 3-2 y en la Figura 3-3.

Cuadro 3-2. Lista florística en las parcelas de monitoreo.

Familia	Nombre técnico	Nombre común
Laminacea	<i>Salvia reflexa Hornem</i>	Chia
Brassicaceae	<i>Eruca sativa Mill.</i>	Nabo silvestre
Asteraceae	<i>Parthenium hysterophorus L.</i>	Cicuitilla anual, altamisa
Laminacea	<i>Marrubium vulgare L.</i>	Manrubio
Asteraceae	<i>Helianthus laciniatus Gray</i>	Polocotillo
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia furcillata H.B.K.</i>	Hierba del coyote
Laminaceae	<i>Brickellia laciniata Gray</i>	Jarilla
Chenopodiaceae	<i>Eurotia lanata (Pursh) Moq.</i>	Gordura de invierno

De esa lista mostrada en el Cuadro 3-2, se observó que las más persistentes aún después de aplicada la operación de labranza, como se muestra en la Figura 3-5 (a, b, c, d) fueron: el Manrubio (*Marrubium vulgare* L.) y el Polocotillo (*Helianthus laciniatus* Gray). La primera por estar asociada primordialmente al cambio de uso de suelo y la segunda por invadir áreas de pastizal con evidencia de sobrepastoreo (Mellado, s/f).



Figura 3-3. Comunidad vegetal encontrada en las parcelas experimentales (al centro) y lista de especies identificadas: (a) *Salvia reflexa* Hornem.; (b) *Eruca sativa* Mill.; (c) *Parthenium hysterophorus* L.; (d) *Manrubium vulgare* L.; (e) *Helianthus laciniatus* Gray; (f) *Euphorbia furcillata* H.B.K; (g) *Brickellia laciniata* Gray; (h) *Eurotia lanata* (Pursh) Moq.

Lo anterior, se confirmó en campo ya que en los sitios de monitoreo, excepcionalmente las gramíneas no aparecieron como especies dominantes; esto, debido a que, según información recabada mediante entrevistas a informantes claves (encargados, responsables técnicos y directivos), este sitio, por sus características climáticas ya descritas, se ha dedicado desde hace más de 20 años al uso agrícola con siembras de forrajes de invierno como avena (*Avena sativa*) y cebada (*Hordeum vulgare* L.).

3.3. Instrumentación y mediciones realizadas

3.3.1. Diseño general

Como se indica en el Cuadro 3-3, la toma de datos se realizó en dos periodos que coincidieron con las estaciones de Otoño-Invierno (O-I) para 2006 y la estación de Primavera-Verano (P-V) en 2007; en ambos periodos, se definieron ciclos de medición con una duración promedio de 3 semanas para cada tratamiento, para un total de 59 y 69 días respectivamente.

El primer periodo comprendió del 26 de Octubre (dda, 293) al 18 de Diciembre (dda, 352) del 2006; en tanto que el segundo periodo fue del 22 de Mayo (dda, 142) al 26 de Junio (dda, 211) del 2007. Como se indica en el Cuadro (3-3) los ciclos de medición inician en cada tratamiento una vez realizada la operación de labranza y finalizan el mismo día que se instala la Estación micrometeorológica con los componentes que se describen más adelante.

Cuadro 3-3. Periodo por año, ciclos de medición de inicio a fin por tratamiento, días transcurridos y suma de días transcurridos.

Año	Tratamiento	Ciclos de medición		Días transcurridos x trat.
		Inicio	Fin	
		-----dda-----		
2006	NL	293	314	21
	LV	314	332	18
	LC	332	352	20
			Suma	59
2007	NL	142	159	17
	LV	159	177	18
	LC	177	211	34
			Suma	69

Asimismo, en el 2007 se realizó un muestro de suelo para determinar cambios en la porosidad edáfica como consecuencia de la labranza.

3.3.2. Método de la Covarianza Eddy (CE): características y descripción

3.3.2.1. Generalidades

Como ya se mencionó anteriormente, el método CE por ser un procedimiento para medir en forma simultanea e independientemente intercambio flujos de masa y energía entre superficies vegetales y/o el suelo

con la atmósfera, en los ciclos de O-I de 2006 y P-V de 2007 se instaló una Estación Micrometeorológica Eddy en el sitio antes descrito.

Dicha Estación permitió determinar el comportamiento para ambos tipos de flujo. Primero, fueron los de tipo energético en $W \cdot m^{-2}$, previstos en la Ecuación 2-1, se midieron: Radiación neta, R_n ; flujo de calor sensible, H ; flujo de calor latente, LE ; y flujo de calor en el suelo, G . En tanto que para el flujo de masa se consideró solamente el dióxido de carbono, CO_2 en $\mu mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$.

Las características generales de los componentes más importantes se ilustran en la Figura 3-4, donde aparece en primer lugar la Estación Eddy (A) y cuatro de sus componentes más importantes empleados. Estos son: (B) medidor de bióxido de carbono y vapor de agua (Open path gas analyser: modelo LI-7500, LI-COR, al frente) y anemómetro sónico tridimensional (3-D Sonic: modelo CSAT3, Campbell, Sci., Inc. atrás del Open path); (C) radiómetro neto (modelo NR-LITE, Keep and Zonen Inc.); (D) sistema de platos para medir el flujo de calor en el suelo (modelo HFT3, REBS Inc.) y dos juegos de termopares para medir temperatura del suelo de cuatro puntas (modelo TCAV, Campbell, Sci., Inc); y (E) sensor para medir temperatura del aire y vapor de agua (modelo HMP45C, Vaisala, Inc.).

Otros instrumentos que no aparecen en la imagen, pero que también fueron utilizados en la estación, son: un sensor para medir velocidad y dirección

del viento (modelo 03001-5, R.M Young Inc.), un pluviógrafo electrónico para medir los eventos de lluvia (modelo TE525, Texas Instruments, Inc.). Además, se emplearon dos registradores electrónicos de datos (modelo 23X y CR7, Campbell, Sci., Inc), y dos paneles solares de 64 W y uno de 20 W, que suministraron la energía requerida para el funcionamiento del sistema.

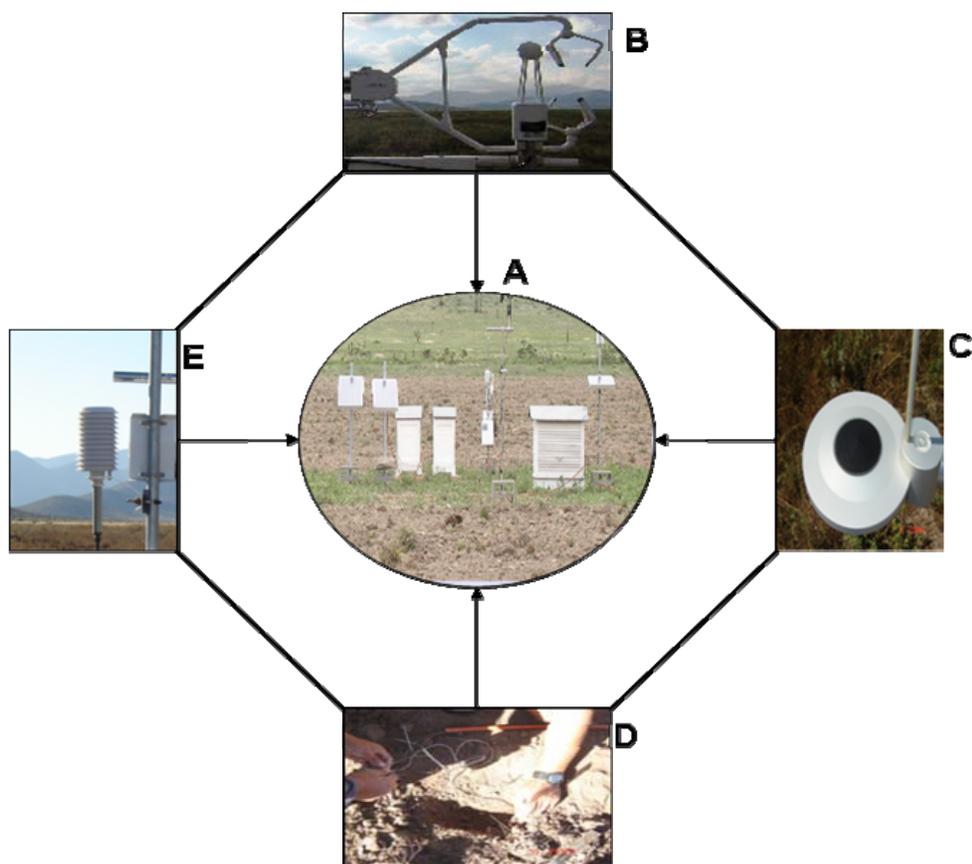


Figura 3-4. Estación Eddy e instrumentos principales.

3.3.2.2. Ubicación de la Estación Micrometeorológica e instalación de sensores

Previo a la instalación de la Estación Eddy y los sensores ya descritos, se hizo una consulta con los lugareños sobre la dominancia de los vientos, y se encontró que la mayoría de las veces provienen del Norte. Con base en ello, se resolvió que la misma quedaría instalada al término de cada operación de labranza, definida como tratamiento, en una superficie de 100 m^2 , 25 m adentro de la parcela desde la parte sur como se muestra en la Figura 3-5.

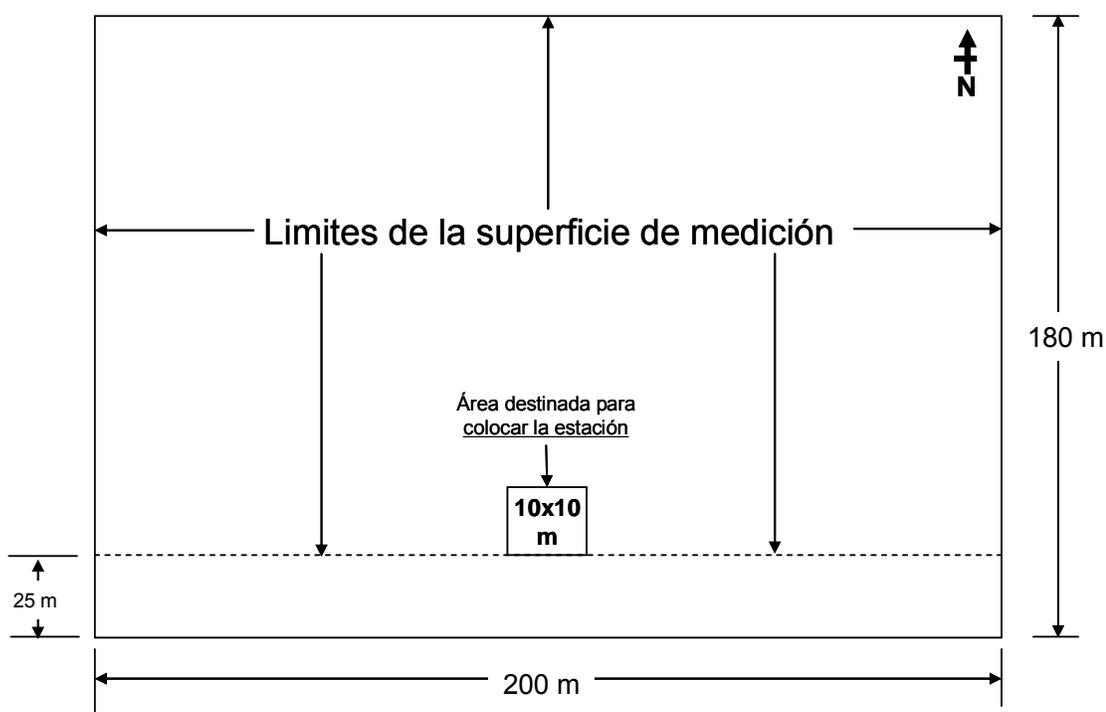


Figura 3-5. Orientación, dimensiones, ubicación general de la Estación Micrometeorológica Eddy (área $10 \times 10 \text{ m}$) y definición de los límites de la superficie de medición de flujos superficiales. (Sin escala)

De acuerdo a la metodología propuesta por Lee et al., (2004) la medición de los flujos superficiales que cumplen con las ecuaciones ya descritas (2-3, 2-4

y 2-5), se realizó mediante el uso del 3D-sonic y el Open Path gas analyzer. Para ello, ambos sensores fueron orientados a 0° con un ángulo de dominio para ambos sensores de 180° con respecto al Norte verdadero, condición bajo la cual, se excluyó a los vientos provenientes de la parte sur de la parcela; es decir, si se considera el ángulo de abertura en el sentido de las manecillas del reloj, entonces las mediciones de flujo válidos estarán dentro de los cuadrantes NE de 0 a 90° y NW de 180 a 360° .

Además de la orientación de dichos sensores, también se definieron dos variables importantes como se muestra en la Figura 3-6: Primero, la distancia horizontal (x_f) sobre la cual se consideró representativo de la superficie de medición; y segundo, la distancia vertical (δ) que equivale a la altura a la que son colocados.

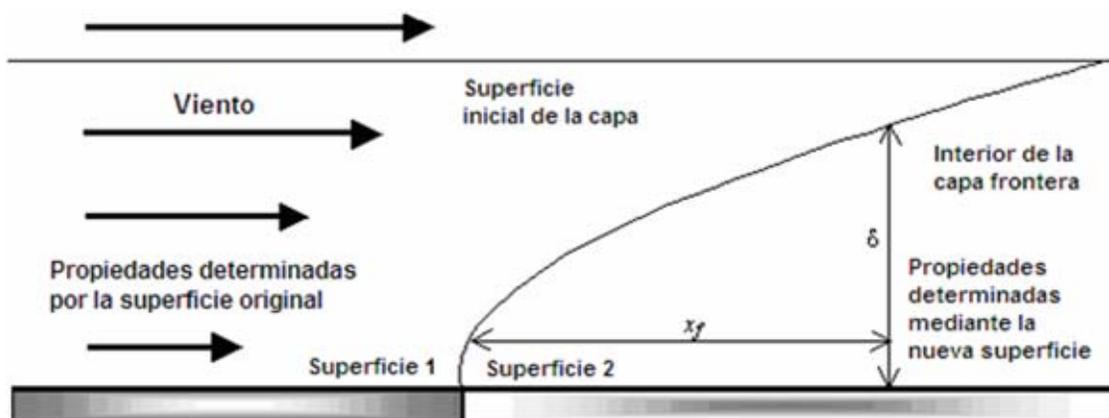


Figura 3-6. Flujos de viento horizontales sobre dos superficies (1 y 2) y crecimiento de la capa frontera definidos por sus distancias horizontal (x_f) y vertical (δ).

Las variables x_f y δ fueron determinadas con las siguientes fórmulas empíricas que se deducen de los manuales de operación de ambos sensores Open Path (Campbell, 2006):

$$X_f = (A_v * 100) + 100 \quad (3-1)$$

$$\delta = X_f / 100 \quad (3-2)$$

Donde X_f , es la distancia horizontal en metros desde la ubicación del los sensores; A_v , es la altura promedio de la superficie de medición de la vegetación; 100, valores constantes. Como resultado de ello, la altura fue de 1.6 m.

Por otro lado el radiómetro instrumento clave en las mediciones de flujo energético, fue colocado con una orientación inversa al caso anterior. Es decir, se puso a 0° al sur verdadero y a la misma altura que en el caso anterior. Evitando interferencia o efecto de sombra por el resto del equipo instalado.

Para medir flujo de calor en el suelo, como ya se mencionó anteriormente se utilizaron dos juegos de termopares de cuatro puntas y un plato de flujo de calor cada uno para representar dos condiciones de suelo: protegido con vegetación y suelo desnudo.

La Figura 3-7 ilustra la manera como fueron instalados los sensores para medir temperatura y flujo de calor en el suelo, como a continuación se indica: (a) Como primer paso se procedió a cavar un hoyo en el suelo de no más de 10 cm de profundidad; (b) el primer termopar se coloca a 2 cm de profundidad; y (c) el segundo a 8 cm; (d) posteriormente se coloca el plato de flujo de calor con la marca hacia arriba (punto blanco en la imagen). Una vez realizado esto, se tapó cuidadosamente para evitar que se movieran los sensores.



Figura 3-7. Instalación del sistema de medición de flujo de calor en el suelo.

3.3.3. Métodos de labranza evaluados

Los tratamientos consistieron en el laboreo mecánico del suelo por parcela mediante el empleo de un multiarado (LM) y un arado reversible de tres discos, comúnmente empleado en la zona de estudio (LAD). Para LM se utilizó tractor NEWHOLLAND modelo 6810 de 95 HP, y para LAD se usó un tractor John Deree, modelo 3200 de 84 HP. Ambos, fueron calibrados para trabajar a 0.25 m de profundidad, como se muestra en la Figura 3-8. El testigo fue el tratamiento de no labranza, NL.



Figura 3-8. Laboreo del suelo por medio de LAD (a) y LM (c), y efecto sobre la rugosidad de la superficie del suelo y la vegetación ilustrada en (b) y (d), respectivamente.

El laboreo del suelo con el arado de discos mostrado en la Figura 3-8 (a1), es una acción mediante la cual primordialmente se rompe y voltea el suelo, causando cambios evidentes, tanto a nivel de su estructura como en la parte biótica. Parte de lo observado en este caso tiene que ver con: esponjamiento inmediato del suelo, enterrado de la parte aérea de las plantas y exposición del sistema radicular a la acción de los factores ambientales (Fuentes et al., 2004).

El laboreo con el multiarado mostrado en la Figura 3-8 (c1) es una acción que rotura el suelo tanto en forma vertical como horizontal sin invertir su perfil, produciendo una rugosidad de la superficie compuesta por surcos y bordos. La forma particular de ataque sobre el suelo hace que la vegetación, planta y raíces queden en la superficie, generando con ello un efecto de protección al efecto de la lluvia y otros factores ambientales como la evaporación (Martínez-Gamiño y Jasso-Chavarría, 2006).

La descripción y características técnicas de ambos implementos de labranza utilizados se describen a continuación:

3.3.3.1. Arado de 3 discos

El arado de 3 discos es un implemento que está compuesto por un bastidor sobre el cual están montados tres discos de acero cóncavos de 60 pulgadas de diámetro, los cuales cuentan cada uno con un dispositivo limpiador

del suelo que se pudiera quedar pegado cuando se realiza la operación de labranza, y en la parte posterior tiene una rueda guía. Cuenta además con tres puntos de conexión al tractor, dos en los extremos para la nivelación y el del centro para accionar el levante (Figura 3-9a).

La identificación de los parámetros técnicos de esta operación están ilustradas en la Figura 3-9b. Al inicio, el implemento fue calibrado para trabajar a una profundidad promedio de 0-25 m; el ángulo de ataque horizontal y vertical fue de 45 y 35°, respectivamente; el área de disturbio (A_d) corresponde aproximadamente al 50 % del ancho de trabajo (A_t).

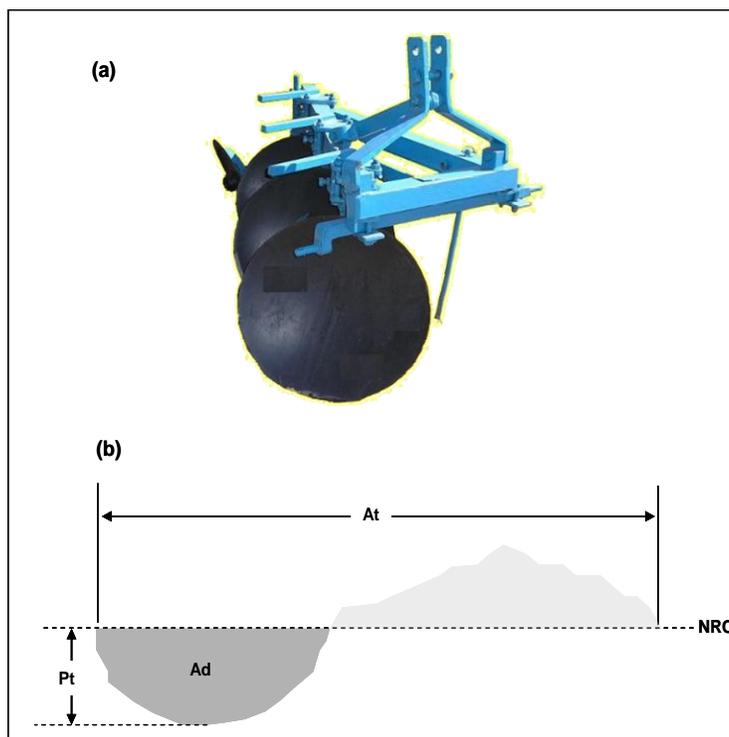


Figura 3-9: Arado de 3 discos (a), y parámetros técnicos de su funcionamiento en el suelo (b): A_t , ancho de trabajo; NRO, nivel de referencia original; A_d , área disturbada; P_t , profundidad de trabajo.

3.3.3.2. Multiarado

El multiarado mostrado en la Figura 3-10a, es una combinación de varios implementos agrícolas. Presenta un timón tipo subsuelo, pero con la punta de un arado “ranchero”. Las aletas posteriores permite trozar las raíces y por su diseño roturar el perfil del suelo en forma horizontal; además, cuenta con un control de profundidad con dos ruedas y tornillos de sinfín colocados en los extremos del implemento (Martínez-Gamiño y Jasso-Chavarría, 2006).

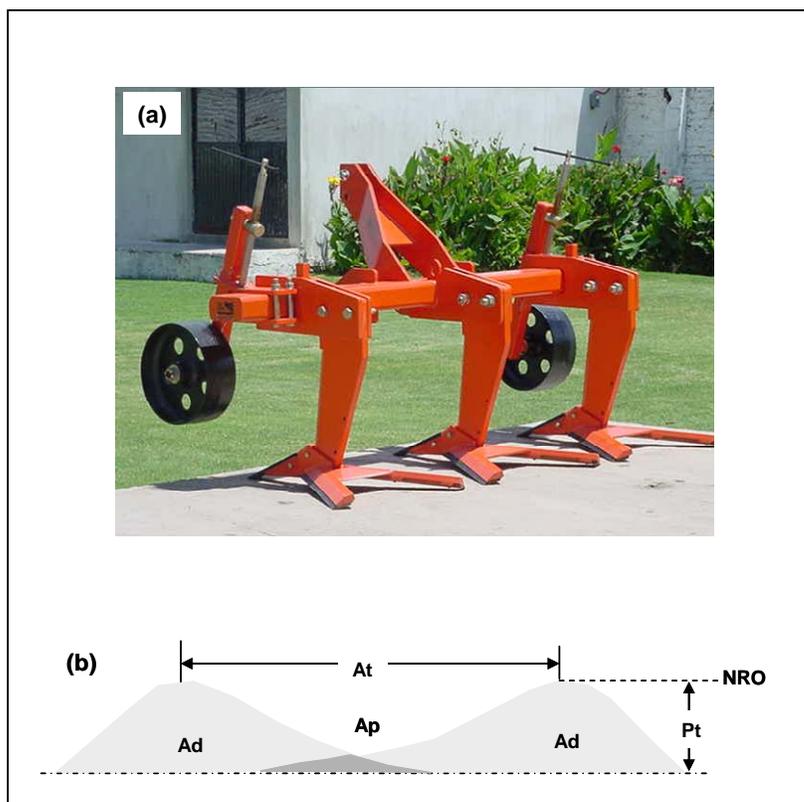


Figura 3-10. Multiarado (a), y parámetros técnicos de su funcionamiento en el suelo (b): At , ancho de trabajo; NRO, nivel de referencia original; Ad , área disturbada; Pt , profundidad de trabajo; y Ad , área de préstamo.

La ilustración de los parámetros técnicos de esta operación que se presentan en la Figura 3-10b, en el que el ancho de trabajo (A_t) es de 0.75 m dentro del cual se identifica el área de préstamo (A_p), donde se produce un valle o surco, y un área disturbada (A_d), donde se conforma el bordo, cuya altura promedio fue de 0.15 m. La profundidad de trabajo (P_t) a la que fue calibrado el implemento, como en el caso anterior, fue de 0.25.

3.4. Variables medidas y evaluación de balances de flujo

En el Cuadro 3-4 se muestra una relación de las variables medidas mediante los sensores provistos en la Estación Eddy, antes descritos, así como las variables edáficas implicadas la porosidad y la rugosidad del suelo como resultado de las operaciones de labranza.

Cuadro 3-4. Tipo, denominación y unidades de medida de cada una de las variables como parte del estudio.

Tipo de variable	Denominación.
Relacionada con la ecuación del balance energético	Radiación neta, R_n Flujo de calor sensible, H Flujo de calor latente, LE Flujo de calor en el suelo, G
Relacionada con la dinámica de CO_2	Dióxido de carbono
Relacionadas al estado del tiempo	Lluvia Temperatura ambiente. Temperatura del suelo Humedad en el suelo Humedad relativa Presión barométrica Velocidad del viento Dirección del viento.

Continúa cuadro 3-4...

Tipo de variable	Denominación.
Relacionada con las propiedades edáficas: estructura	Cambios en la densidad aparente Área de poros Forma de poros Distribución de poros

3.5. Particularidades del método CE: sistematización, corrección y análisis de datos

3.5.1. Sistematización y correcciones

De antemano es importante mencionar que la frecuencia en las mediciones ejecutadas, para las variables de flujo de masa y energía, por los sensores fue establecida a 10 Hz, (10 lecturas por segundo) con promedios cada 20 minutos.

La información captada por los sensores fue almacenada por los registradores electrónicos, los cuales, tenían precargados los programas que calcular los promedios y sus covarianzas. De tal forma que esto permitió realizar transferencias de datos a una computadora portátil en periodos de 10 a 15 días.

La secuencia para la sistematización y las correcciones realizadas, para vapor de agua y bióxido de carbono por efectos de densidad (Webb et al., 1980; Baldocchi, 1994), se esquematizan a continuación en la Figura 3-11 y se explican en los siguientes cuatro pasos:

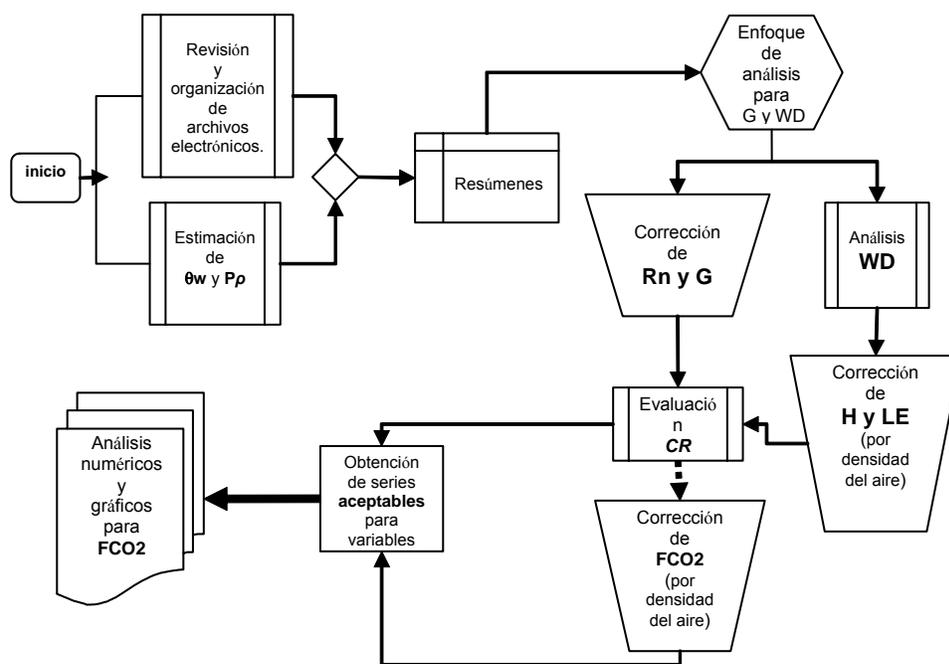


Figura 3-11. Esquema de análisis y correcciones realizadas.

Paso 1:

Con base en lo anterior se procede a determinar los flujos energéticos, con excepción de R_n , bajo y sobre la superficie del suelo en $W \cdot m^{-2}$. El primero, representado por el flujo de calor en la capa edáfica (G) a 8 cm de profundidad y el segundo por el par que corresponde al calor sensible (H) y calor latente o vapor de agua (LE), los cuales como ya se indicó son medidos hasta una altura igual al 10 % de la distancia horizontal de la superficie de interés. Las ecuaciones involucradas en este caso se describen de siguiente manera:

(a). La estimación de G se realiza con base en la solución analítica mostrada en el apartado anterior (2.4.2), quedando la expresión para su solución numérica de la siguiente forma (3-3):

$$G = G_{D8} + \left[\frac{(Cds + \theta_w \cdot Cw) \cdot pd \cdot \Delta T \cdot \Delta z}{\Delta t} \right] \quad (3-3)$$

Donde, G_{D8} es el flujo de calor, medido con el sensor a 8 cm de profundidad de la superficie del suelo; Cds es la capacidad calórica de los minerales ($840 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$); θ_w es el contenido volumétrico del agua medido en diferentes momentos (kg/kg); Cw es la capacidad calórica del agua ($4190 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$); ΔT es el cambio de la temperatura promediada por los sensores, desde 2 hasta 6 cm de profundidad en $^{\circ}\text{C}$; Δz es la profundidad a la que el plato de flujo de calor es colocado, cuyo valor en la ecuación es de 0.08 m; y Δt es una variación del tiempo en segundos.

(b) Para la estimación los flujos de energía, calor latente (LE) y calor sensible (H) la ecuaciones (2-4) ya mostradas en el capítulo anterior aplican exactamente igual, excepto para la determinación de H (Ec. 2-5), considerando lo propuesto por Ham y Heilman (2003), quedando de la siguiente forma (3-4):

$$H = \rho_a \cdot C\rho \cdot \overline{T^l \cdot w^l} - 0.51 \cdot Ta \frac{[\rho_a \cdot C\rho]}{\lambda} LE \quad (3-4)$$

Donde, ρ_a es la densidad del aire ($\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$); C_p es la capacidad calórica del aire ($\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$); λ es el calor de vaporización del agua ($\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}$); T_a es la temperatura del aire (K). El producto $\overline{T'w'}$ (indicado originalmente como: $\overline{w'T_s}$) representa la covarianza entre la velocidad vertical del viento U'_z (w) y la temperatura sónica T' (T_s). La barra horizontal representa el promedio de un segmento de tiempo. En este caso, como ya se indicó anteriormente fue de 20 min.

Paso 2:

De manera simultánea a los cálculos anteriores, se corrige el flujo de dióxido de carbono (FCO_2) de acuerdo a lo establecido anteriormente (Ec. 2-3), y se corrige, como ya se mencionó, de acuerdo a los cambios en la presión barométrica y por la densidad de aire ocurrida durante el tiempo transcurrido de medición.

Paso 3:

Una vez corregidas las variables energéticas antes expuestas para G , H y LE , los datos encontrados en rangos aceptables de viento, se determina CR , de acuerdo a la siguiente ecuación (3-5):

$$BE = \frac{Rn - G}{H - LE} \quad (3-5)$$

En este caso, es importante mencionar que los valores instantáneos medidos con el analizador de bióxido de carbono y vapor de agua en el aire,

complementado con un anemómetro sónico tridimensional, son validos solo cuando han sido corregidos por densidad del aire del lugar y corresponden a valores de clausura entre 0.7 y alrededor de la unidad (Ham y Heilman, 2003).

Paso 4:

La última parte del proceso comprendió el análisis numérico y gráfico de los FCO₂, aclarando de antemano que éste como flujo de masa en $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, es independiente de los cálculos implicados en la ecuación (3-5), sin embargo, se emplean como referencia las series de datos dentro de rangos que cumplen con el criterio antes indicado para *CR*.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los cambios en dinámica de flujo energético (H, LE y G), y en el ciclo asimilación-liberación de CO₂, como consecuencia de dos métodos de labranza primaria, con multiarado, LM, y con arado de discos, LAD, teniendo como referencia un área sin labranza, NL, se analizan, evalúan y valoran, con base en datos recabados en dos épocas del año: otoño del 2006 y verano del 2007.

Primero, se examina para cada tratamiento de labranza (NL, LM y LAD) la forma en que se divide Rn en sus variables de respuesta principales: flujo de calor en el suelo, G; flujo de calor sensible, H; y flujo de calor latente, LE, así como la lámina de pérdida de agua en forma de vapor; segundo, de las tasas instantáneas medidas de CO₂ se estiman las magnitudes que caracterizan a cada tratamiento de labranza; y tercero, se determina la importancia del impacto de la labranza en el suelo como sumidero de carbono.

4.1. Efecto de la labranza en el comportamiento de H, LE y G

El flujo de radiación neta, Rn, es el resultado del balance entre la radiación de onda corta (Rs) y radiación de onda larga (RI) que ocurre en o cerca de la superficie; Rs se puede producir como insolación directa y como radiación difusa en el día bajo condiciones de cielo despejado, y es afectada

por la emisividad de la superficie o albedo; R_l , proviene de la atmósfera y en ausencia de nubes depende primeramente de la distribución de la temperatura, vapor de agua y del CO_2 (Arya, 1988; Jones, 1992).

Por lo tanto, la labranza primaria al alterar las características originales de la superficie (de la cubierta del suelo), donde incide la energía, independientemente si esta es por ejemplo directa o difusa, es de esperarse cambios en el comportamiento en las variables de respuesta de la ecuación de flujo energético ($R_n=H+LE+G$).

Para determinar la magnitud de dichos cambios, a continuación se analiza lo ocurrido en las dos épocas del año estudiadas (otoño, 2006 y verano, 2007).

4.1.1. Comportamiento de flujo energético en el otoño del 2006

En el otoño del 2006, R_n tuvo un comportamiento decreciente de acuerdo al desarrollo de la época del año, al pasar sus promedios de 237 en NL a 211 en LM y $129 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ en LAD. Es decir, R_n en promedio tuvo una incidencia 1.1 y 1.8 veces mayor que los dos tratamientos de labranza evaluados (Cuadro 4-1).

Como consecuencia de los tratamientos de labranza, evidentemente R_n tiene una distribución para sus variables de respuesta diferente a la forma como

ocurrió en NL, con alteraciones de H que llegan a ser hasta 1.5 y 1.1 veces mayores en LM y LAD, respectivamente; en tanto que las magnitudes de LE disminuyen en un 50 % en LM comparado con NL.

Cuadro 4-1. Promedios, máximos y mínimos de las mediciones instantáneas realizadas por tratamiento en el 2006.

Trat.	Variable	Media	Max	Min
-----W·m ⁻² -----				
NL	Rn	237	572	-69
	H	92	256	-29
	LE	68	157	-3
	G	31	152	-60
LM	Rn	211	458	-50
	H	124	284	-23
	LE	30	158	-26
	G	29	81	-33
LAD	Rn	129	494	-92
	H	56	217	-31
	LE	36	240	-15
	G	23	126	-74

Lo anterior significa que la presencia de la vegetación de la época de otoño, que coincidió para NL del 26 de Octubre al 10 de Noviembre del 2006, tuvo un rol marginal en la atenuación de H y G, marcando con ello el inicio de la etapa de senescencia, puesto que el promedio para LE durante los 21 días que duraron las mediciones en este tratamiento es 1.3 veces menor que H; lo cual es consistente con lo reportado en la literatura en cuanto a las tendencias observadas en vegetación anual y condiciones de manejo del suelo semejantes (Agnieszka, 2006; Ryu et al., 2008).

Para complementar lo anterior, en la Figuras 4-1 se muestra el comportamiento del flujo energético para R_n , H , LE y G , considerando los promedios de las mediciones instantáneas de tres días elegidos al azar: dos días con cielo nublado (a y c) y uno con cielo despejado (b), de cuyo análisis se desprende lo siguiente:

Para NL (Figura 4-1a) R_n máxima es de $287 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y ocurre a las 11:40 h, en tanto que LE tuvo un valor máximo de $109 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ hasta las 14:00 h, siendo LE en este caso 1.4 y casi 2 veces mayor que H y G , con ocurrencias a las 12:40 y 13:00 h, respectivamente.

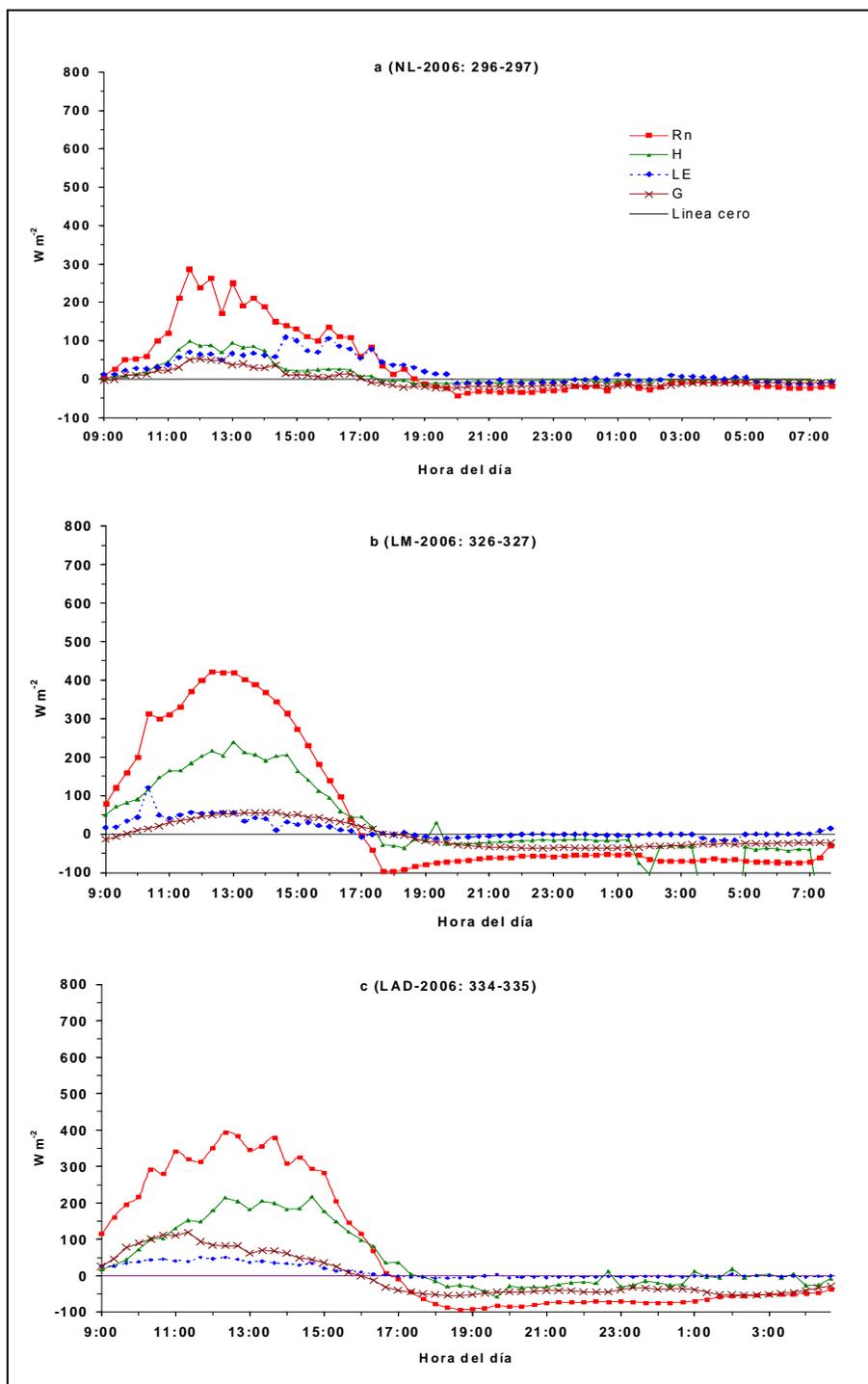


Figura 4-1. Flujo de radiación neta (R_n), calor sensible (H), calor latente (LE) y calor en la superficie del suelo (G) en tres eventos ocurridos entre las 9:00 y las 7:40 h por tratamiento en 2006: (a) No labranza; (b) labranza con multiarado; y (c) labranza con arado de discos.

En LM (Figura 4-1b) R_n máxima fue de $420 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y ocurre a las 13:00 h, mientras que H alcanza una máxima de $239 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, magnitud casi dos veces y 4.34 veces mayor que LE y G , cuyas ocurrencias fueron a las 10:20 y 13:40 h, respectivamente. Los promedios estimados en este caso fueron de 211, 124, 30 y $29 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ para R_n , H , LE y G , respectivamente.

La operación de labranza con multiarado se realizó el 10 de Noviembre, 2006, implicando con ello además de la rotura del suelo, como lo describen Martínez-Gamiño y Jasso-Chavarría (2006), cambios en la rugosidad superficial mediante la formación de surcos y bordos, además de que la acción mecánica del implemento hizo que la vegetación removida con todo y raíz quedara sobre la superficie del suelo. Debido a ello, LM se confirma como una práctica labranza-conservacionista en el sentido de que la protección del suelo hace que LE sea mucho menor que H , y que este se aproxime al promedio general anual reportado por otros autores para épocas de sequía (Baldocchi, 1994; Ryu et al., 2008).

En LAD (Figura 4-1c) R_n máxima fue de $394 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y su ocurrencia se da a las 12:20 h, en tanto que para H su valor máximo es de $217 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a las 14:40 h, siendo 4.34 y 1.82 veces mayor que LE y G , respectivamente. Los promedios estimados fueron de 129, 56, 36 y $23 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ para R_n , H , LE y G , respectivamente.

El laboreo con arado de discos (LAD) se realizó el 28 de Noviembre. De acuerdo a lo descrito por Fuentes et al. (2004) LAD es una acción con la cual se rotura y voltea el suelo, se incorpora y mezclan en el perfil del suelo raíces y plantas.

En este caso, debe considerarse la época del año en que se realizó, ya que la mayor parte de las plantas, con excepción de *Eurotia lanata* (Pursh) Moq, por ser de invierno ya habían terminado su ciclo anual de crecimiento. Por lo que H sigue siendo más importante que LE y H; aunque con menos energía disponible en la superficie, en esta condición de manejo la única aportación razonablemente sería como resultado de la evaporación del suelo.

Es decir, los cambios en el comportamiento de flujo energético si bien están determinados por la labranza aplicada, también están fuertemente influenciados por los factores ambientales, ya que se dieron en época de sequía y hacia la temporada del año más fría con temperaturas del aire con una tendencia hacia la baja. Las temperaturas inicialmente fueron de de 14.3 °C con máximas y mínimas de 21.8 y 10.4 °C, respectivamente, y finalizan con promedios de alrededor de 7.5 °C con máximas y mínimas de 18.9 y -7.4 °C.

4.1.2. Comportamiento de flujo energético en el verano del 2007

En 2007, como ya se ha indicado la característica principal fue la presencia de lluvias distribuidas en la mayor parte del tiempo que se llevó a

cabo la medición en los diferentes tratamientos, lo cual hace más complicado detectar el efecto de los tratamientos. Sin embargo, algunas de las características más sobresalientes se describen a continuación:

En el verano del 2007 Rn tuvo un comportamiento ascendente conforme a la época del año. Según se puede ver en el Cuadro 4-2, los promedios para Rn cambian de 294 en NL a 326 en LM y 308 $W \cdot m^{-2}$ en LAD, con máximos que confirman dicha tendencia.

Cuadro 4-2. Promedios, máximos y mínimos de las mediciones instantáneas realizadas por tratamiento en el 2007.

Trat.	Variable	Media	Max	Min
----- $W \cdot m^{-2}$ -----				
NL	Rn	294	751	-140
	H	93	303	-43
	LE	100	476	-25
	G	43	130	-120
LM	Rn	326	767	-134
	H	139	398	-9
	LE	86	468	-200
	G	37	145	-104
LAD	Rn	308	780	-120
	H	113	370	-66
	LE	92	313	-99
	G	42	130	-50

Como consecuencia de los tratamientos de labranza, evidentemente Rn tiene una distribución diferente a la forma como ocurrió en NL, con alteraciones de H que llegan a ser hasta 1.35 y 1.16 veces mayores en LM y LAD,

respectivamente; en tanto que las magnitudes de LE comparado con NL disminuyen en un 22 y 12 % en LM y LAD respectivamente.

Para complementar lo anterior, en la Figuras 4-2 se muestra el comportamiento del flujo energético para R_n , H , LE y G , considerando los promedios de las mediciones instantáneas de tres días elegidos al azar: uno bajo condiciones de cielo despejado (a) y dos con cielo nublado (b y c), de cuyo análisis se desprende lo siguiente:

En NL (Figura 4-2a) R_n máxima fue de $558 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y ocurrió a las 14:00 h, en tanto que para H fue de $242 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, siendo 1.47 y 1.86 mayor que LE y G para tiempos de ocurrencia máximos a las 13:20 y 13:40 h, respectivamente. Los promedios estimados en este caso fueron de 294, 93, 100 y $42 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ para R_n , H , LE y G , respectivamente.

Para interpretar adecuadamente el comportamiento descrito anteriormente, es necesario considerar lo siguiente: 1) El 22 de Mayo, cuando se instaló el equipo el suelo estaba casi desnudo, pues la cobertura estimada en ese momento no rebasaba el 15 % de la superficie total destinada para este tratamiento, debido a que este correspondió a la parte final de la época de sequía; 2) La temporada de lluvias comienza el 25 de Mayo (145) y hasta el 4 de Junio se registró un acumulado de 52.3 mm.

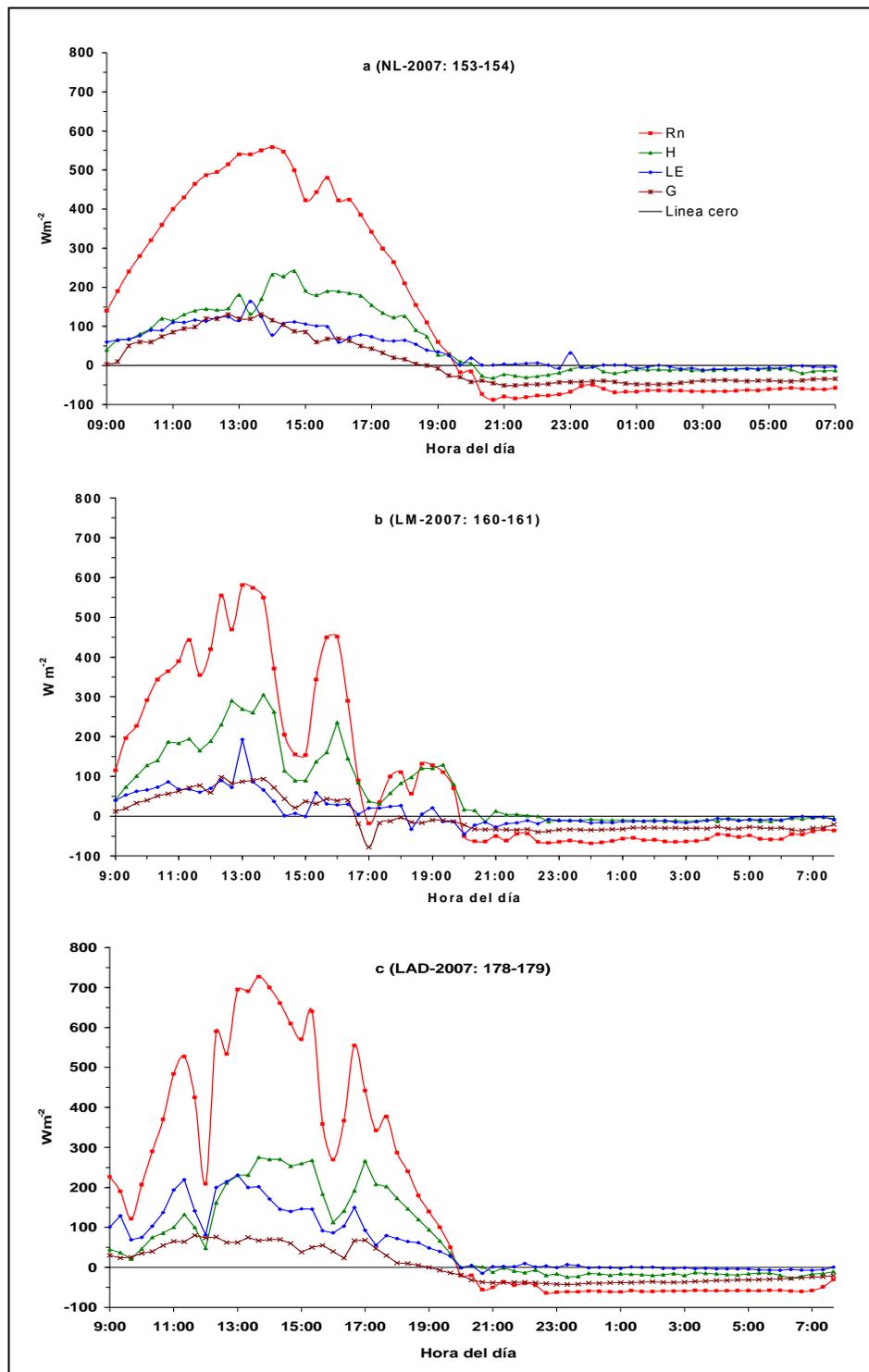


Figura 4-2. Flujo de radiación neta (Rn), calor sensible (H), calor latente (LE) y calor en la superficie del suelo (G) en tres eventos ocurridos entre las 9:00 y las 7:40 h por tratamiento en 2007: (a) No labranza; (b) labranza con multiarado; y (c) labranza con arado de discos.

Por lo tanto, la vegetación inicialmente tuvo un rol marginal en la atenuación de H y G, pero una vez que ocurrieron los pulsos de lluvia la presencia de la vegetación y la activación de los microorganismos del suelo provocaron que la magnitud de LE se elevara por encima de H; lo cual es consistente con lo reportado en la literatura en cuanto a las tendencias observadas en vegetación anual y condiciones de manejo del suelo semejantes (Huxman et al., 2004; Polley et al., 2008; Ryu et al., 2008).

Para LM (Figura 4-2b) R_n máxima fue de $581 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y su ocurrencia se dio a las 13:00 h, mientras que H fue de $305 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a las 13:40 h, siendo 1.58 y 3.11 veces mayor que LE y G. Los promedios estimados fueron de 325, 139, 86 y $37 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ para R_n , H, LE y G, respectivamente.

A diferencia de lo ocurrido en el ciclo anteriormente descrito (LM, 2006), en este caso las mediciones se realizaron bajo una condición de humedad persistentemente mayor en cuanto a intensidad y duración de la lluvia, pues entre el 17 y 24 de Junio (168-174) se registró un total de 64.3 mm. De manera que si la labranza favorece la infiltración vertical del agua de lluvia, entonces habría una pérdida de calor del perfil de suelo de acuerdo a lo establecido por Ochsner et al. (2007) no estimada en este caso. Pero lo que si parece evidente es que comparado con H hay una menor emisión de energía en forma de LE.

Por último en LAD (Figura 4-2c) R_n máxima fue de $727 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y ocurrió a las 13:40 h, en tanto que H fue de $267 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a las 15:20 h, siendo 1.15 y 3.92 mayor que LE y G , respectivamente. Sin embargo, los promedios estimados fueron de 307, 113, 92 y $41 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ para R_n , H , LE y G , respectivamente.

Los datos anteriores indican que en LAD hubo una mayor emisión de energía en forma de vapor de agua o LE . Esto probablemente se debe a dos circunstancias: primero, a la forma en que se modifica el perfil de suelo en este tipo de labranza; y segundo a la racha de lluvia que continuó desde el 26 de Junio hasta el 17 de Julio (177-198), cuyo registro indica un total de 68.6 mm.

4.1.3. Densidad de flujo energético diurno en 2006 y 2007

La densidad de flujo, es la suma de las mediciones instantáneas para segmentos de tiempo de las 8:00 a las 19:00 h para dos semanas consecutivas por tratamiento en 2006 y 2007. Al relacionar las diferentes magnitudes que producen dichas sumatorias para H , LE y G con respecto a R_n se confirman las tendencias de flujo energético anteriormente discutidos (4.1.1. y 4.1.2.), como se muestra en la Figuras 4-6a y 4-7a, y su análisis es el siguiente:

En el otoño del 2006 R_n pasa de 9.65 a 1.08 y $0.77 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ en NL, LM y LAD, respectivamente. La proporción en que dicha energía se distribuye en H , LE y G , por tratamiento está representada en la Figura 4-3.

De acuerdo a ello, LE y G fueron las variables que más alteraciones tuvieron; es decir, la relación LE/Rn tiene una afectación evidente al pasar de 0.27 en NL a 0.5 y 0.13 en LM y LAD, respectivamente; mientras que G/Rn en LAD tiene un índice de 0.31, valor mucho más alto comparado con 0.1 y 0.09 de LM y NL, respectivamente. Por último, H/Rn oscila entre 0.41 en NL con cambios un poco menores pasa de 0.2 en LM a 0.37 en LAD.

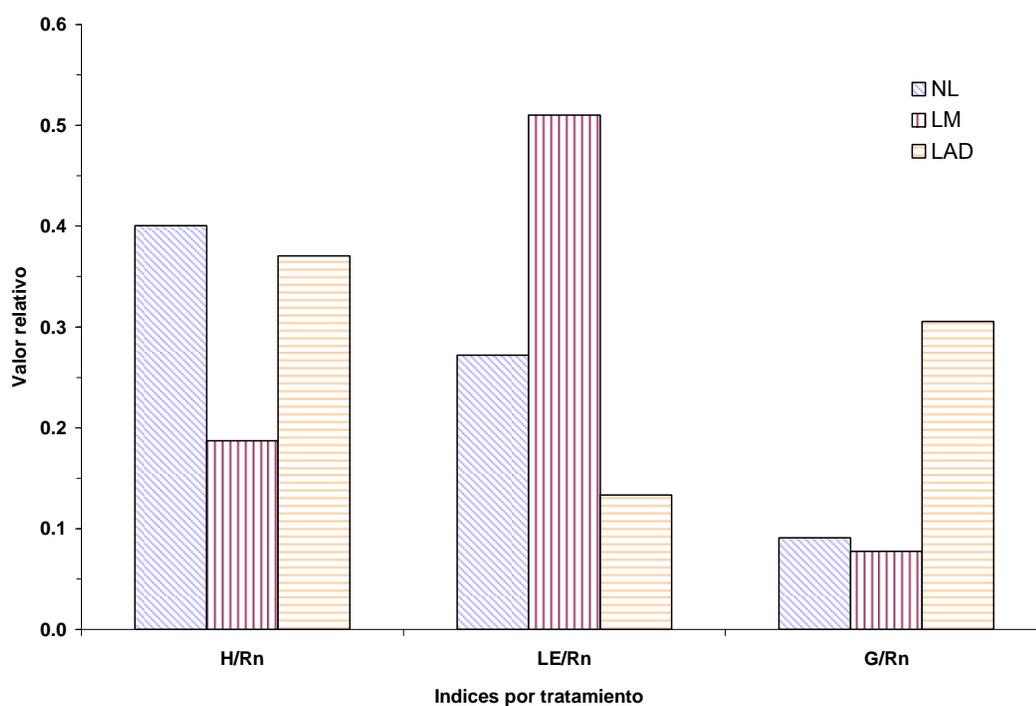


Figura 4-3. Índices calculados con base en la densidad el flujo energético diario (8:00-19:00 h) por tratamiento para 2006.

Por otro lado, en el verano del 2007 Rn alcanza $4.13 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ en NL y cambia a 1.54 y $2.61 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ LM y LAD, respectivamente. La proporción en

que dicha energía se distribuye en H, LE y G, por tratamiento y está representada en la Figura 4-4.

En este caso, nuevamente aparecen LE y G como las variables que mas cambios presentan; ya que, mientras LE/Rn pasa de 0.17 en NL a 0.25 en LM y 0.71 en LAD, G/Rn es de 0.14, 0.12 y 0, para NL, LM y LAD, respectivamente. Por último, H/Rn fluctúa entre 0.45 y 0.14. De acuerdo a esto, es evidente que LAD es el método de labranza que mayores cambios produce en la densidad de flujo energético, cambios que por cierto se ven muy favorecidos por las condiciones del tiempo, como se explica mas adelante.

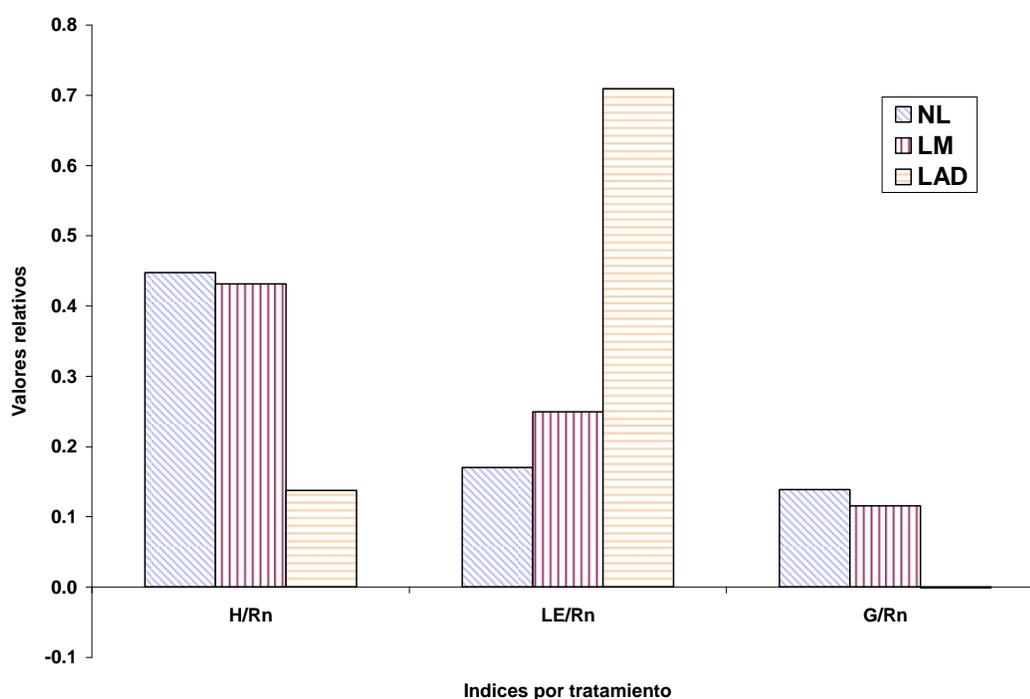


Figura 4-4. Índices calculados con base en la densidad el flujo energético diario (8:00-19:00 h) por tratamiento para 2007.

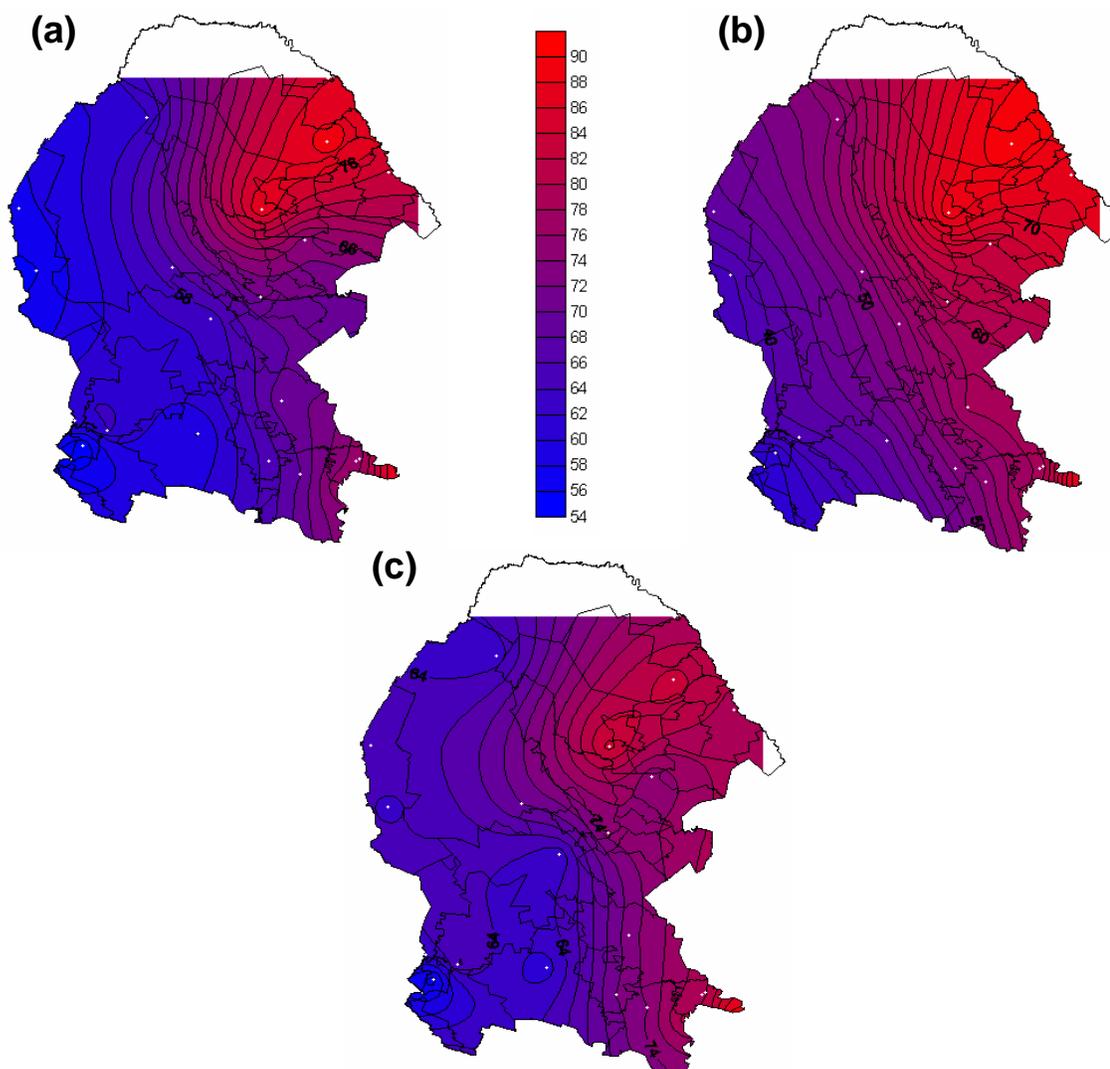


Figura 4-5. Porcentajes de humedad relativa promedio para los meses de Mayo (a), Junio (b) y Julio (c) del 2007 (Fuente: INIFAP-Coah.)

Respecto a lo anterior, varios autores (Kim y Verma, 1990; Goldstein et al., 2000; Garatuzza et al., 2001; Ryu et al., 2008) encontraron cambios en proporción semejante para H y LE, y coinciden en que dichos cambios son atribuibles a la variabilidad climática estacional que gobierna la fenología de las superficies vegetales sujetas a medición y a la disponibilidad de humedad en el

suelo. En este caso, esta propiedad fue justamente afectada por la acción de la labranza según el estudio de porosidad realizado para los mismos sitios donde se realizaron las mediciones de flujo de masa y energía en 2007, pues se encontró que LAD es la operación de laboreo que mas cambios produce al menos a 0.05 m de profundidad en la estructura del suelo, particularmente a poros con diámetros alrededor de 10^{-3} m, como lo señala Kung et al., (2005) cuando se refiere a la labranza como en este caso; por lo se esperaría un impacto proporcional a procesos asociados al mismo como el movimiento de agua en el suelo y la difusión gaseosa.

Por último, con respecto al flujo de calor en el suelo expresado como G/R_n , mostrados en las Figuras 4-3 y 4-4, para flujos diurnos normalmente representan almacenamiento de energía en la capa superior de suelo (a 0.08 m), por el contrario valores negativos indican pérdida de la misma. Está establecido que dicha energía puede disiparse ya sea como H, LE o ambas (Ochsner et al., 2006; Ochsner et al., 2007).

De acuerdo a ello, es importante resaltar que G en 2006 tuvo un comportamiento ascendente y en 2007 se expresa en forma descendente. Es decir, en 2006 para NL y LM el suelo mantiene un almacenamiento equivalente al 9 % de R_n , para concluir esta etapa en LAD con el 31 % de R_n ; y en 2007 NL inicia con 14 % de R_n , disminuye a 12 y 0 %, respectivamente para LM y LAD,

tendencia que se debe fundamentalmente al incremento de la humedad en el suelo debido a la lluvia y a la disminución de la temperatura promedio.

López-Santos et al. (2008) al analizar los valores instantáneos absolutos de 2006 señala que LAD es una práctica que contribuye en la retención y almacenamiento de la energía en la capa de suelo, mientras que LM influye negativamente en este fenómeno. Sin embargo, para 2007 el momento observado para LAD se caracteriza por tener una menor capacidad de almacenamiento de la energía del suelo, llegando incluso a ser negativa para cinco días consecutivos (178-182) como se observa en la Figura 4-7a.

4.2. Relación la densidad de flujo energético teórico, lluvia y lámina de agua evaporada

Con el propósito de analizar la influencia de la lluvia y la labranza en el comportamiento de las variables de flujo energético, y en particular sobre la emisión de vapor de agua, en esta parte se incluyen las mediciones diurnas para 14 días por tratamiento.

Para ello, se procesaron valores integrados de LE en $W \cdot m^{-2}$ para ser expresados en términos de lámina de agua evaporada, tomando como base la constante de vaporización ($L_v = 2.42 \times 10^6$) utilizada con el mismo fin por varios autores (Jones, 1992; Baldocchi, 1994; Deru, 2003).

Para el ciclo del 2006 se registró una lluvia acumulada de 16.7 mm, de la cual, la mayor parte se presentó durante la medición realizada en NL; posteriormente se registra alrededor del 1 % en LM; y finaliza en LAD con el 26 %. La evaporación total estimada en mm por tratamiento y sus promedios diarios fue: 16.9 ($1.1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$), 6.9 ($0.5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$) y 5.2 ($0.3 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$), para NL, LM y LAD, respectivamente (Figura 4-6).

Los promedios dan una idea del comportamiento general sobre la dinámica de flujo de agua en forma de vapor, pero no permiten distinguir el efecto de la labranza y sus momentos críticos, puesto que su magnitud depende del área foliar, temperatura del aire, velocidad del viento, contenido de humedad en el suelo y otras condiciones climáticas (Baldocchi, 1994; Baldocchi et al., 2001).

Domínguez (2005) dice que los efectos críticos más importantes de la labranza sobre el suelo se manifiestan en los primeros diez días después de haberla aplicado. De acuerdo a ello, en la Figura 4-6a se observa que H, LE y G presentan una tendencia a aproximarse entre sí las variables en ambos tratamientos de labranza; aunque en LM el flujo de vapor de agua llega a ser mayor que H para los días del 314 al 318.

Por su parte LAD, aunque con menos disponibilidad de energía para evaporar el agua, al final del ciclo tiene una mayor aportación a la atmósfera

que LM. Esto probablemente se debe a que durante ese lapso se presentó una lluvia de 4.6 mm, permitiendo con ello un déficit de humedad menor que el observado para LM.

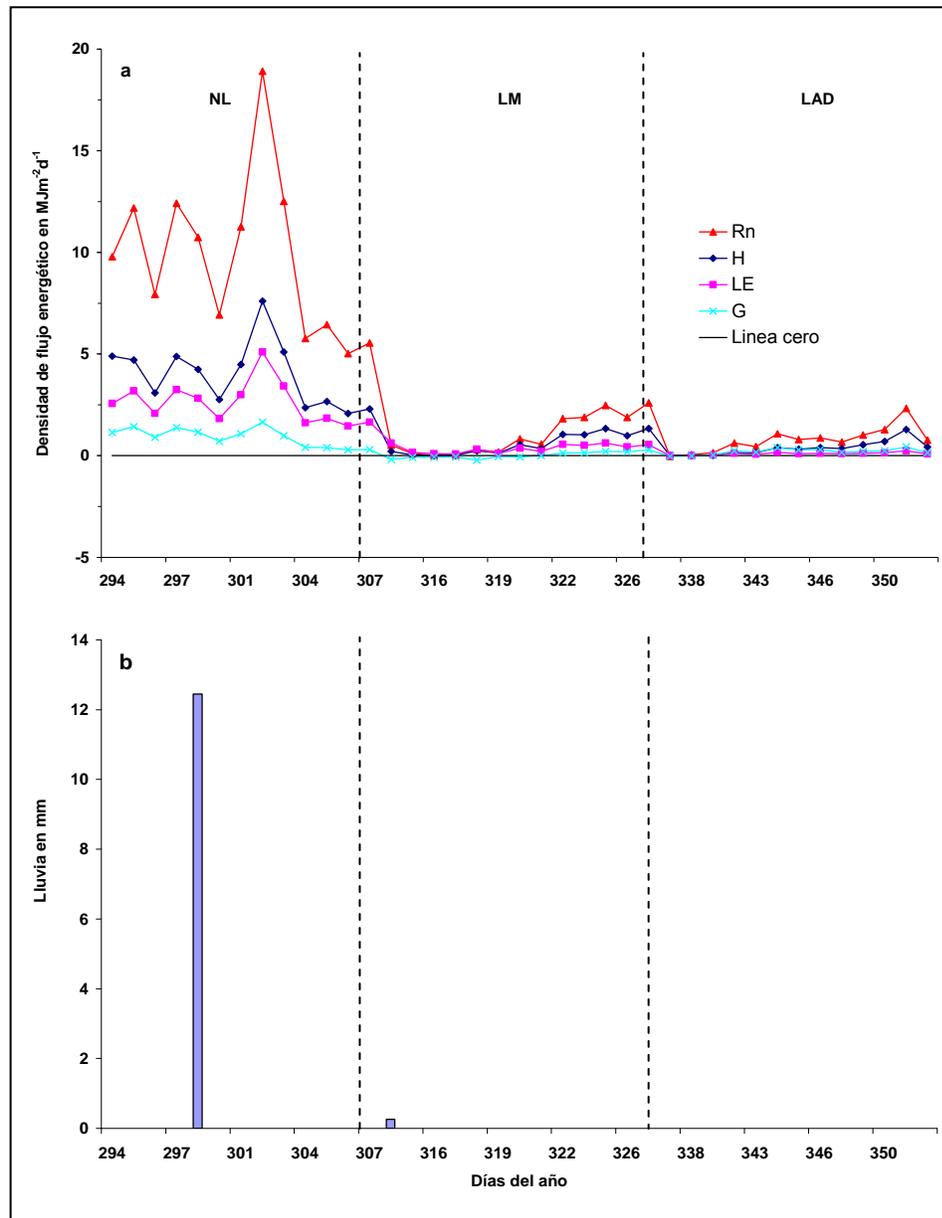


Figura 4-6. Densidad de flujo estimada (a) y lluvia acumulada diaria (b) para cada tratamiento en 2006.

Para el ciclo del 2007 se registró una lluvia acumulada de 185.2 mm, lluvia que tuvo una distribución muy semejante entre cada uno de los tratamientos al ser de 28, 35 y 37 % para NL, LM y LAD, respectivamente (Figura 4-7). La evaporación total estimada en mm por tratamiento y sus promedios diarios en ese mismo orden fue: 3.7 ($0.2 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$), 29 ($3.4 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$) y 27.5 ($1.8 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$), para NL, LM y LAD.

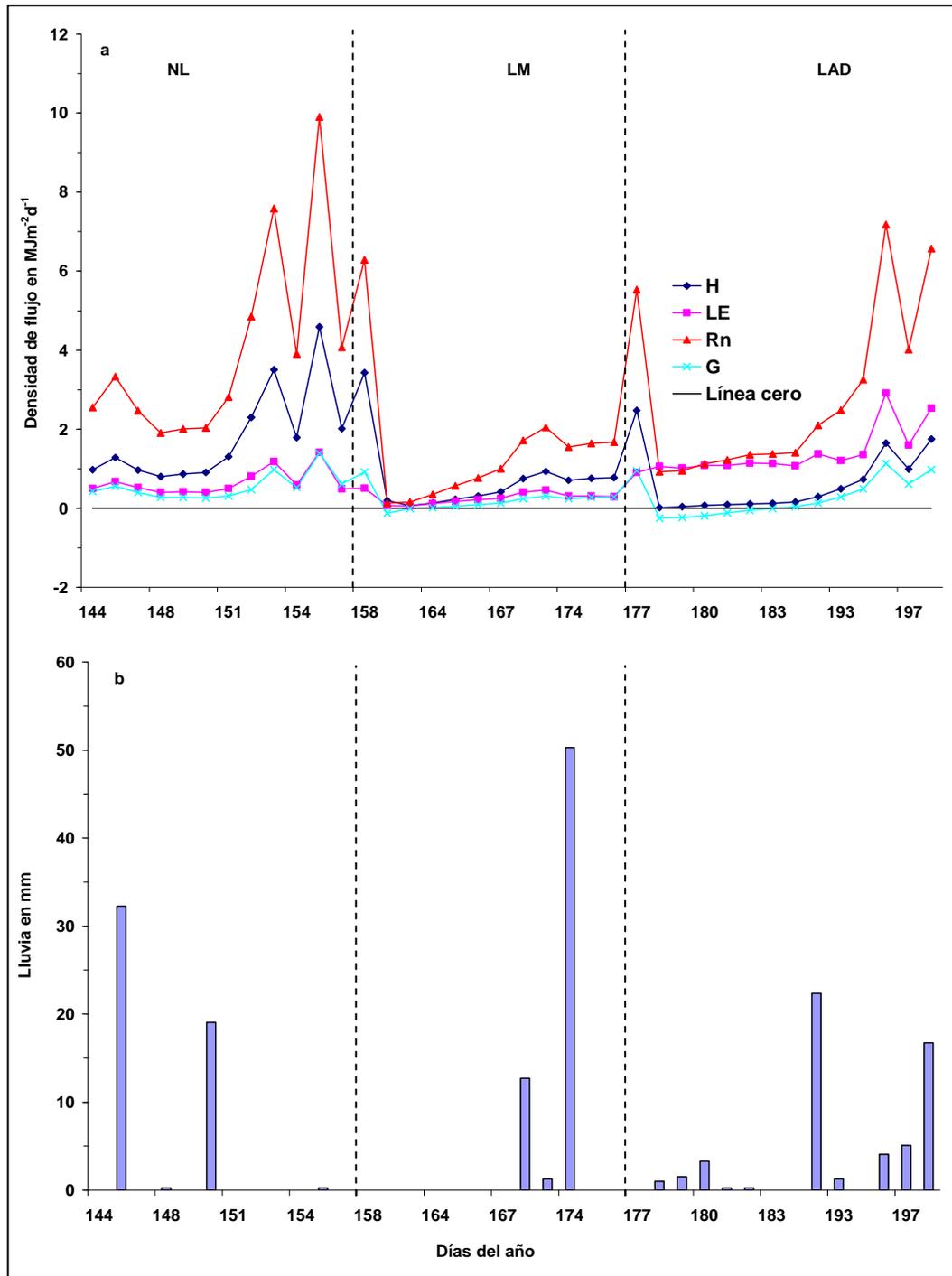


Figura 4-7. Densidad de flujo estimada (a) y lluvia acumulada diaria (b) para cada tratamiento en 2007.

Al igual que en el caso anterior (otoño, 2006) el comportamiento de flujo energético presenta la misma tendencia en cuanto a la manera en que se aproximan sus valores entre tratamientos, llegando incluso a ser mayor LE que H por mucho mas tiempo que en 2006. El periodo en $LE > H$ corresponde a los días del 178 al 198, el cual corresponde al tiempo que se hicieron las mediciones en LAD (Figura 4-7).

El comportamiento del flujo de vapor en LM que es mucho mayor hacia el final del ciclo de medición, en el tercer tercio (3/3) tiene una explicación probable si se considera que por el tipo de labranza ya mostrado gráficamente (Figura 3-8d), permite que el agua de lluvia se mantenga en la superficie los surcos, mismos que se forman por el tipo de implemento utilizado como ya se dijo, de tal manera que dicha exposición del espejo del agua a la acción de la radiación solar contribuye en el incremento de la evaporación.

4.3. Flujo de dióxido de carbono, CO₂

El presente análisis se divide en dos partes: 1) en términos del comportamiento dinámico del CO₂ a lo largo de los dos ciclos de medición; y 2) en términos del flujo neto estimado por unidad experimental para 2006 y 2007.

4.3.1. Comportamiento dinámico del CO₂

En las Figuras de la 4-8 a la 4-13, se muestran los segmentos gráficos de la dinámica de flujo de CO₂ en $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, a partir de los valores instantáneos

corregidos para 42 días (*dda*), tanto para el 2006 como el 2007. Los *dda* están indicados entre las líneas verticales punteadas y los tratamientos muestran dos grupos de siete *dda* representados en pares gráficos en forma continua. Además de esto, es importante mencionar lo siguiente:

- 1) Que las gráficas muestran interrupciones debido a que solamente están representados valores corregidos;
- 2) Los *dda* no consecutivos no constituyen un error sino más bien se trata de días con datos perdidos por condiciones climáticas diversas inherentes al método de medición empleado; y
- 3) Valores positivos indican liberación de CO₂ y los negativos asimilación.

En las Figuras 4-8 (a y b) 4-11 (a y b) de modo general se observa un comportamiento similar al inicio de cada ciclo de medición correspondiente al tratamiento NL, caracterizado por su forma típica de asimilación diurna y liberación nocturna de CO₂.

El primero, como resultado fundamental del proceso fotosintético que realizan los organismos autotrofos (plantas superiores y microorganismos), y el segundo, como el producto de respiración que comprende a la planta (parte aérea y raíces) y la acción de los microorganismos que actúan en la descomposición de la materia orgánica del suelo (Scow, 1999; Pumpanen et al.,

2003); procesos que dependen fundamentalmente de la temperatura y la disponibilidad de agua (Mandigan et al., 2004).

Sin embargo, para los tratamientos LM y LAD muestran una tendencia a la liberación, la cual es exacerbada por la presencia de lluvias, como las ocurridas en 2007 cuya intensidad fue de alrededor de $8 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ en los tres tratamientos, alcanzando un máximo de casi $17 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ en LAD. La descripción por año de medición es la siguiente:

4.3.1.1. Dinámica de flujo de CO₂ en 2006

Según se indica en la Figura 8 (a, b) la dinámica del CO₂ en 2006 para NL registra tasas promedio de -1.290 y $1.153 \text{ } \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, de asimilación y liberación, respectivamente. Los promedios de los valores máximos y mínimos de asimilación fueron de 1.929 y $0.269 \text{ } \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en tanto que los de emisión tuvieron como máximo 1.616 y como mínimo $0.618 \text{ } \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

De la misma manera en las Figuras 9 (c, d) y 10 (e, f) se observa que para LM y LAD en 2006 las tasas liberación, aunque decreciente, se mantuvieron día y noche en ambos casos, al pasar de 0.707 a $0.681 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en LM y LAD, respectivamente.

4.3.1.2. Dinámica de flujo de CO₂ en 2007

La dinámica de CO₂ para el 2007 para tasas diurnas registradas para NL entre las 8:20 y las 19:00 h promediaron $-1.634 \mu\text{mol de CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, con extremos máximo y mínimo de -2.391 y $-0.668 \mu\text{mol de CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. Mientras que para las nocturnas de las 19:20 a la 8:00 la tasa promedio fue de $0.737 \mu\text{mol de CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, en este caso, con extremos máximo y mínimo de 2.351 y $0.011 \mu\text{mol de CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente.

Aunque también se observaron excepciones en la dinámica antes descrita para NL, debido a la presencia de asimilación nocturna como los eventos ocurridos en los días 142, 143 y 144 con tasas promedio de -0.470 (19:40-2:20), -0.608 (20:40-1:00) y -0.273 (4:00-7:20) $\mu\text{mol de CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente.

Comportamiento aparentemente contradictorio con el ciclo de captura-liberación antes mencionado; sin embargo, esto es posible bajo condiciones críticas de humedad en el suelo y altas temperaturas (Hsiao y Jackson, 1999; Lüttge, 2004) como los contenidos gravimétricos (Θ) de humedad registrados en estos mismos días que fueron cuatro veces inferiores a la más alta registrada en este sitio ($0.14275 / 0.03625 = 4$).

Además de lo anterior, es importante mencionar que algunas especies tienen la capacidad de cambiar temporalmente sus hábitos metabólicos, debido a ciertas condiciones de salinidad o presión de agua, equiparable al proceso CAM (metabolismo del ácido crasuláceo), característico de ciertas especies de

plantas de algunas familias como: Cactaceae, Agavaceae, Lilaceae, y Crassulaceae, entre otras (Lüttge, 2004; Lira, 2007).

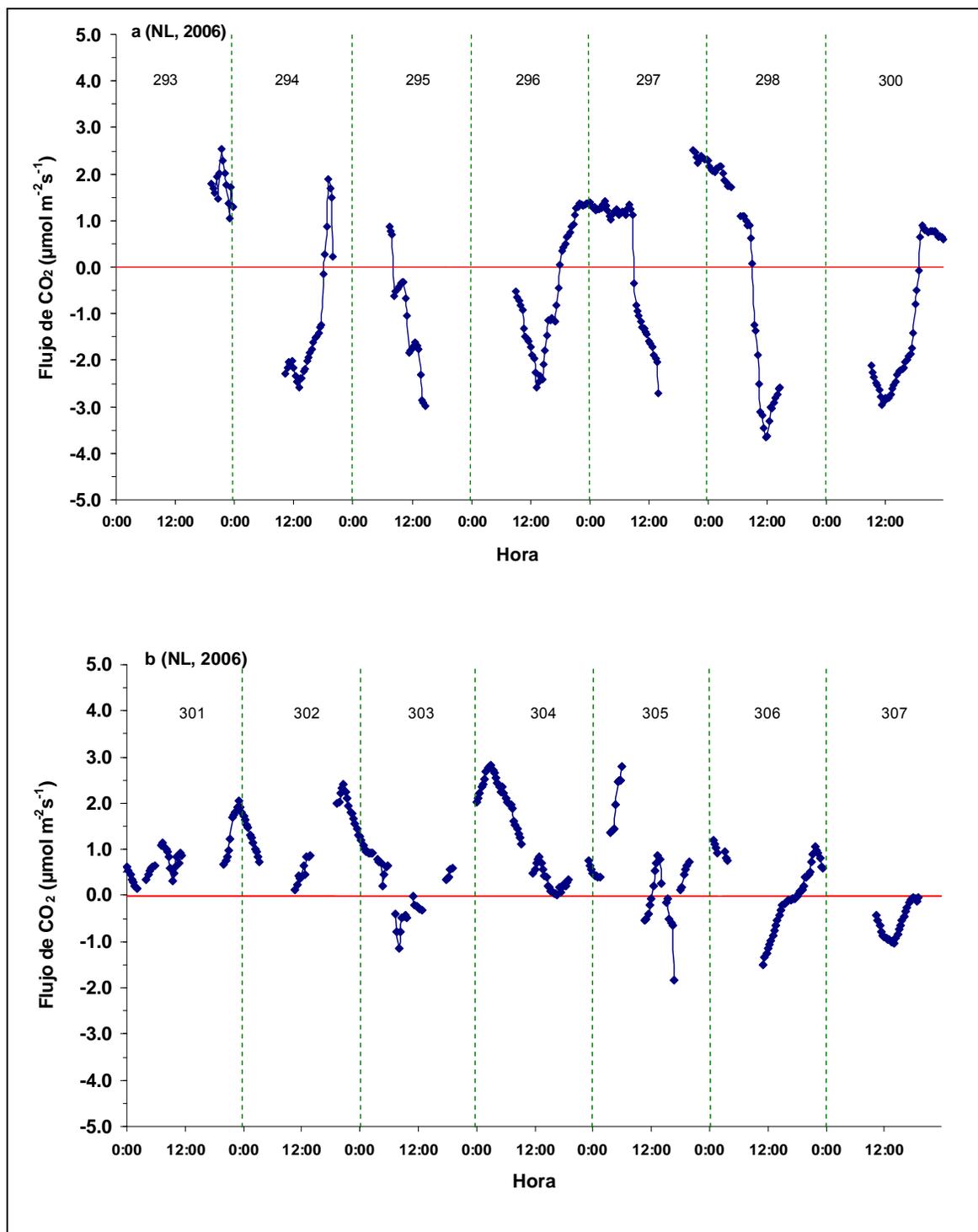


Figura 4-8. Segmentos gráficos de la dinámica de flujo de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), a partir de los valores instantáneos corregidos para 14 días (293-307) del 2006 para NL. Los *dda* están indicados entre las líneas verticales punteadas.

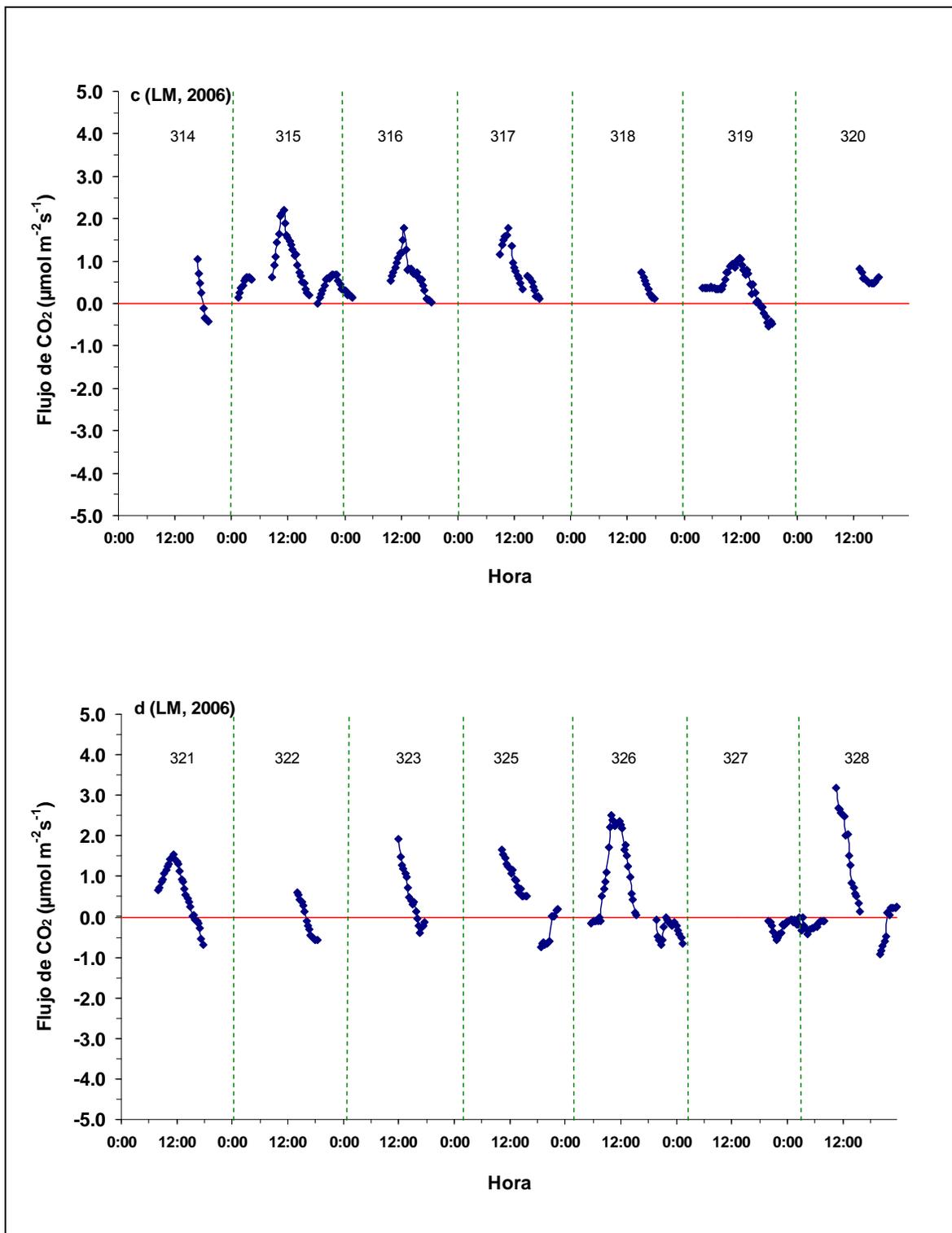


Figura 4-9. Segmentos gráficos de la dinámica de flujo de CO₂ (µmol m⁻² s⁻¹), a partir de los valores instantáneos corregidos para 14 días (314-328) del 2006 para LM. Los *dda* están indicados entre las líneas verticales punteadas.

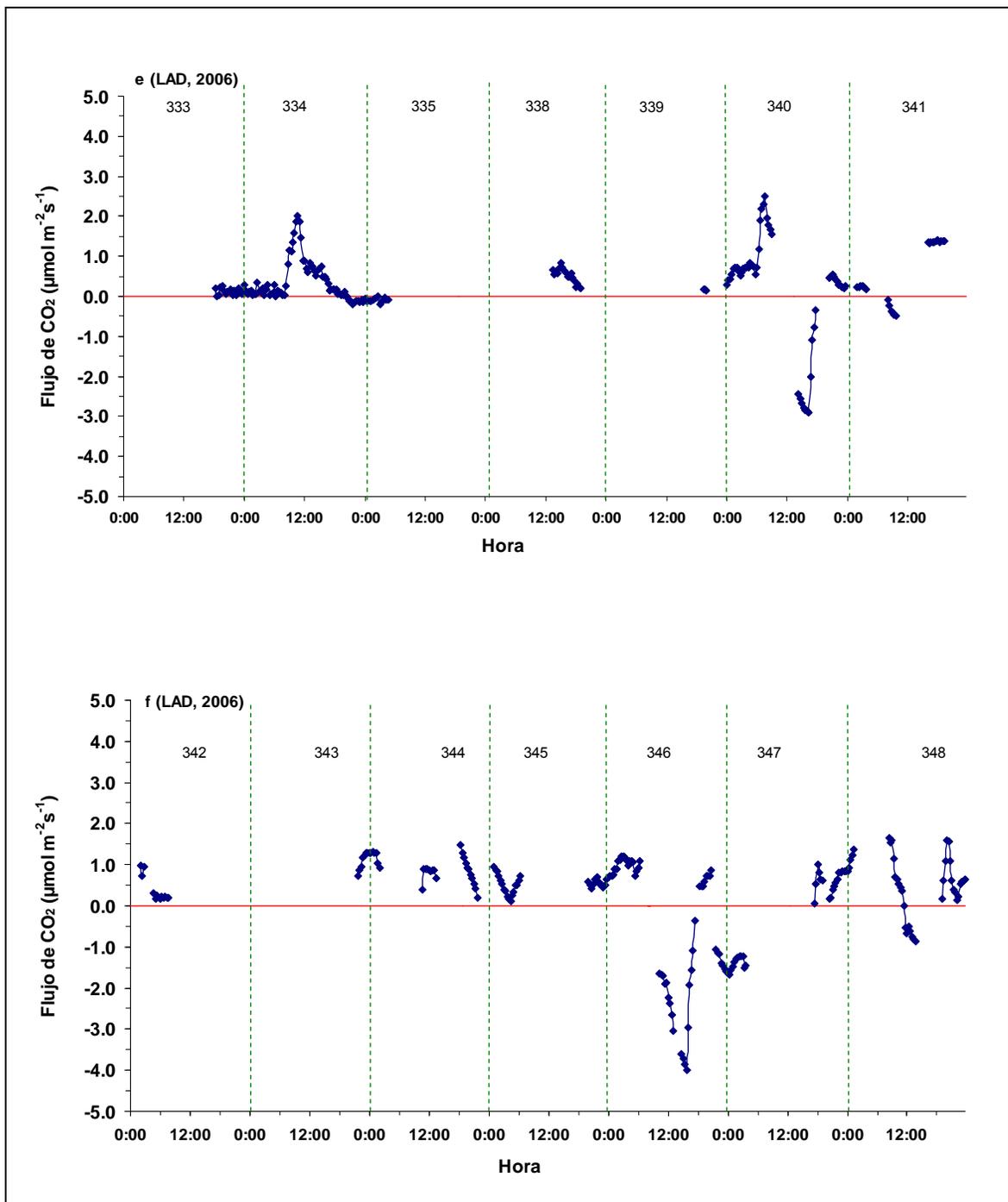


Figura 4-10. Segmentos gráficos de la dinámica de flujo de CO₂ (µmol m⁻²s⁻¹), a partir de los valores instantáneos corregidos para 14 días (333-348) del 2006 para LAD. Los *dda* están indicados entre las líneas verticales punteadas.

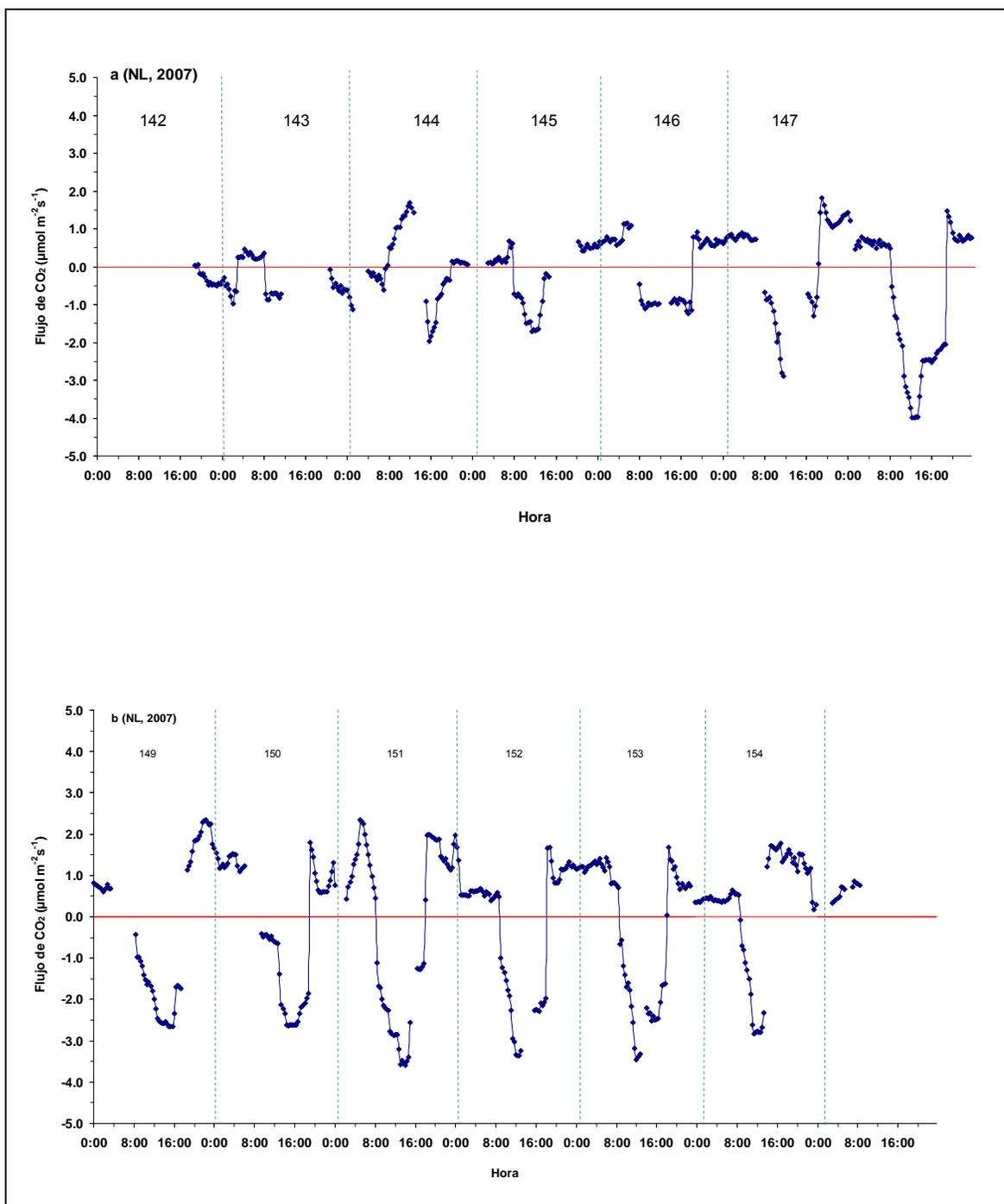


Figura 4-11. Segmentos gráficos de la dinámica de flujo de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), a partir de los valores instantáneos corregidos para 14 días (142-154) del 2007 para NL. Los *dda* están indicados entre las líneas verticales punteadas.

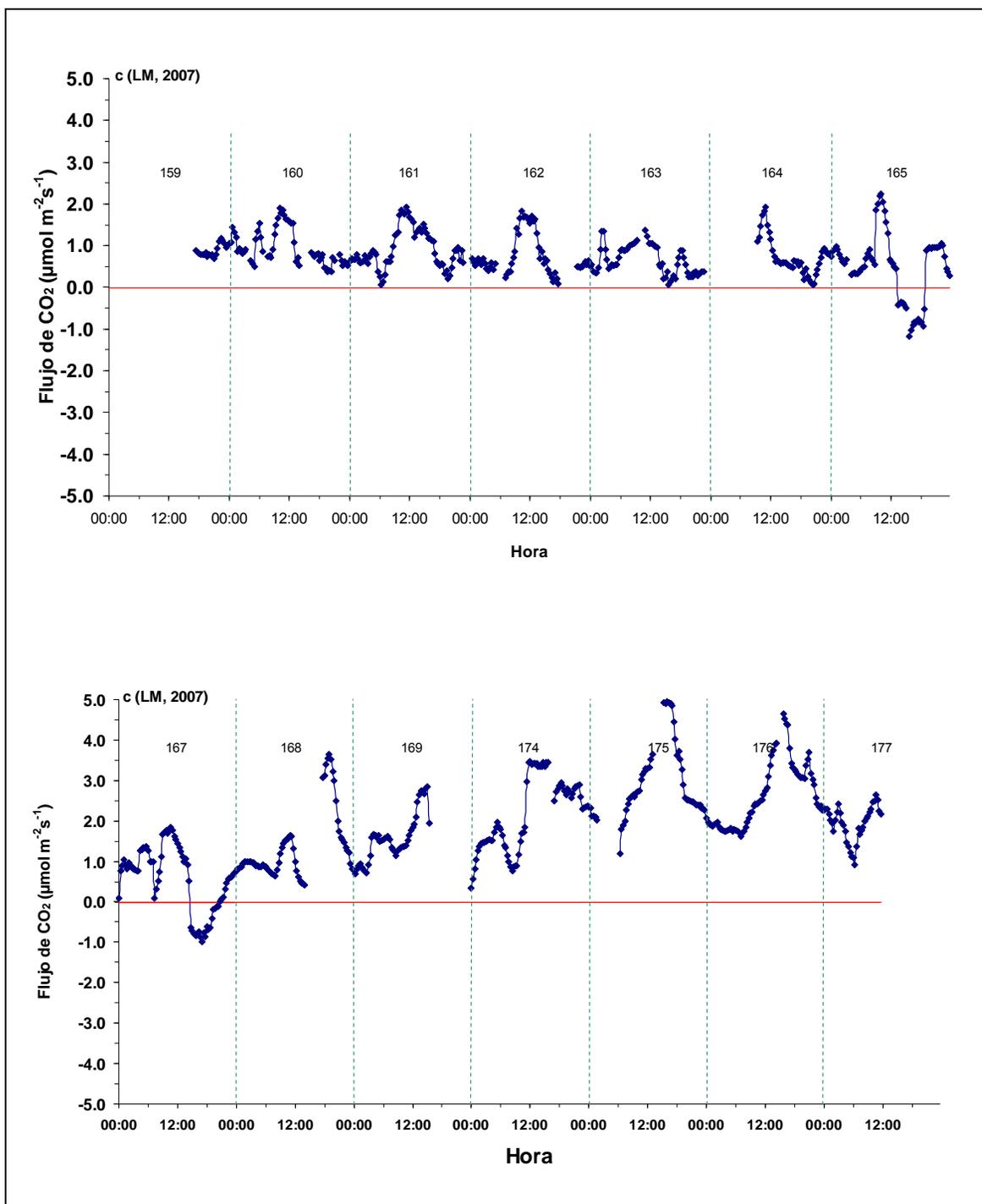


Figura 4-12. Segmentos gráficos de la dinámica de flujo de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), a partir de los valores instantáneos corregidos para 14 días (159-177) del 2007 para LM. Los *dda* están indicados entre las líneas verticales punteadas.

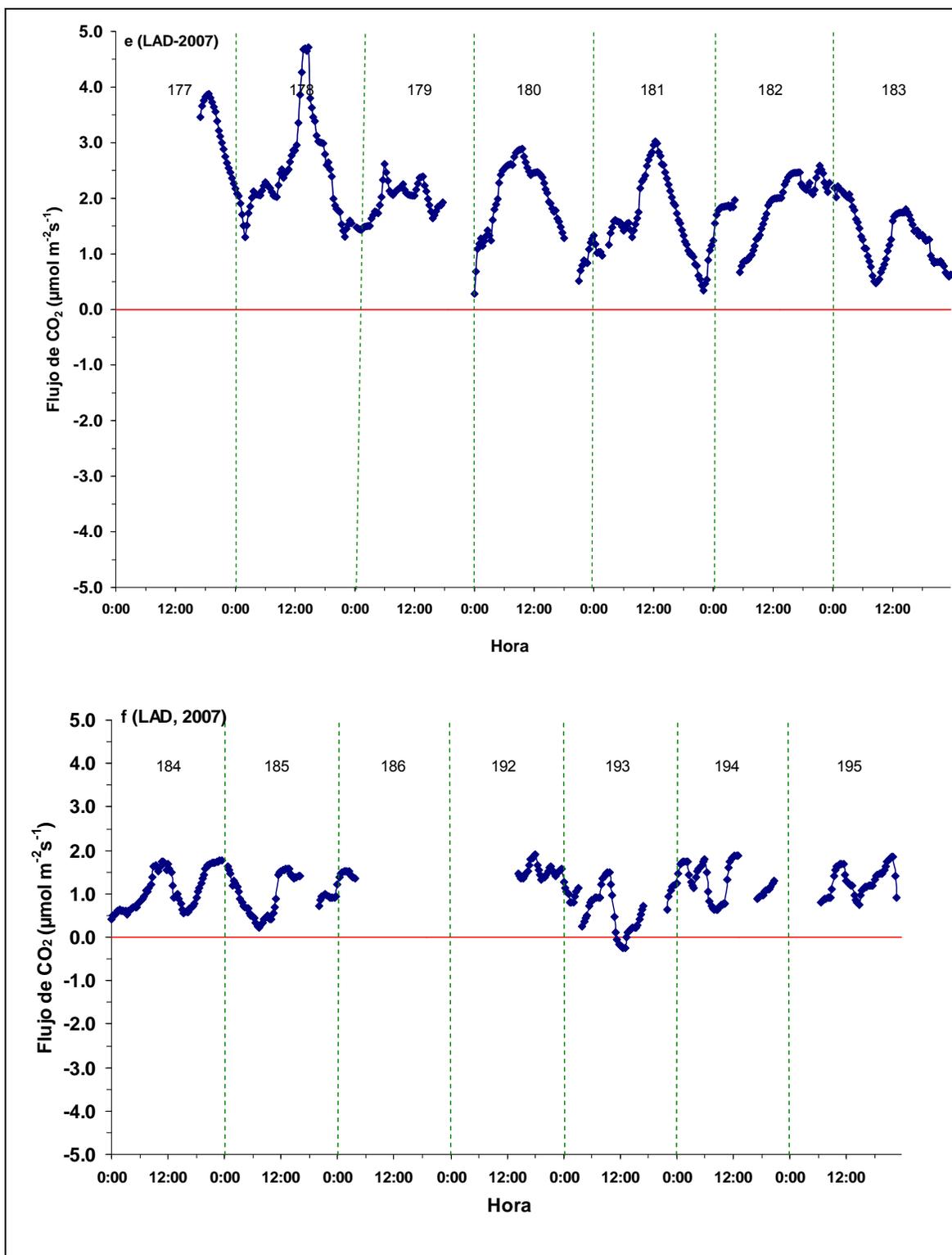


Figura 4-13. Segmentos gráficos de la dinámica de flujo de CO₂ (µmol m⁻²s⁻¹), a partir de los valores instantáneos corregidos para 14 días (177-195) del 2007 para LAD. Los *dda* están indicados entre las líneas verticales punteadas.

Lo anterior es consistente con lo reportado por Xu et al (2007) cuando menciona que el pastizal en estado de senescencia durante el verano cambia la fuente de respiración del ecosistema de una forma autotrófica a heterotrófica para bacterias y hongos. Durante el verano la respiración procesada en una tasa baja fue del orden de 0.1 a 0.3 g de C·m⁻²d⁻¹, pero durante los eventos de lluvia se observó una estimulación en la respiración heterotrófica al ser de 60 a 80 veces mayor que el promedio.

4.3.2. Flujo neto estimado: escenarios de emisión de C-CO₂ en 2006 y 2007

Con los datos hasta aquí analizados no hay manera de determinar el flujo neto de CO₂, debido a que los segmentos de medición no corresponden a días completos; sin embargo, bajo un escenario donde se consideren los promedios antes mencionados, tanto para 2006 como para 2007, se confirma que NL se comporta como fuente de captura de CO₂ debido a que los valores en ambos casos la asimilación respectivamente es mayor 1.1 y 2.2 veces que la liberación, mientras que LM y LAD se mantienen como fuentes de emisión con valores que oscilan entre 0.681 y 1.387 μmolCO₂m⁻²d⁻¹ (Cuadro 4-3).

Con base en dicha información (Cuadro 4-3) y considerando 11.6 h por día, para los periodos evaluados, NL tendría un captura y liberación equivalente respectivamente para 2006 de 2.383 y 2.131 g CO₂ m⁻²d⁻¹, y en 2007 de 3.019

y $0.954 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$; valores, estos últimos cercanos a los reportados por otros autores cuando midieron la respiración del suelo en el mes de Julio ($6 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$) mediante el uso de una cámara opaca de intercambio gaseoso estacionaria (Qi et al., 2007).

Cuadro 4-3. Comparación de los ciclos asimilación-liberación por año para cada tratamiento.

Año/Trat.	-----Asimilación-----			-----Liberación-----		
	Max.	Min.	Prom.	Max.	Min.	Prom.
----- $\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ -----						
Otoño, 2006						
NL	1.929	0.269	1.290	1.616	0.618	1.153
LM				1.244	0.187	0.707
LAD				1.119	0.338	0.681
Verano, 2007						
NL	3.985	0.082	1.634	2.351	0.011	0.737
LM				2.244	0.524	1.296
LAD				2.112	0.664	1.387

Nota: Hay que recordar que para la dinámica de asimilación de CO_2 gráficamente se representa con valores negativos. Para efecto del presente análisis se consideran los valores absolutos que sea consistente con la terminología de máximo y mínimo.

Aunado a lo anterior, el impacto de la labranza en el suelo se observa con más claridad cuando se calculan las magnitudes de carbono orgánico que son emitidos en cada tratamiento. Según se puede ver en el Cuadro 4-4 LM contribuye en una mayor pérdida que LAD, llegando a ser 1.9 veces mayor el primero ($12.4/6.4=1.9$) en el verano del 2007.

Una probable explicación del fenómeno antes descrito es que si la labranza acelera la oxidación del carbono orgánico (CO) a CO₂, mediante una mayor entrada de aire a la capa de suelo, proceso que es regulado naturalmente por la temperatura y el contenido de humedad (Curtin et al., 2000) se debe a dos circunstancias:

Primero, el movimiento de suelo en ambos casos produce una presión parcial de aire sobre la atmósfera de suelo (Reikosky y Lindstrom, (1993); en este caso, es evidente que en LM hubo mayor entrada de aire comparado con LAD, pues los valores de D_a inicial y final a 0.10 m de profundidad así lo indican.

Segundo, los niveles de CO en el suelo, fundamentalmente está determinado por el balance entre las entradas y las salidas. La primera a partir de los residuos de plantas, raíces, y exudados de raíces; la segunda, por las pérdidas de materia orgánica debido a la descomposición, erosión y lixiviación (Six et al., 2006). En este caso, aunque no se midió la biomasa (para determinar la aportación al suelo) presente antes de la labranza, es importante considerar que mientras en LM la vegetación queda en la superficie en LAD la vegetación es mezclada en el perfil del suelo. Todo parece indicar que la condición en que quedó la vegetación en LM favoreció una oxidación del CO más acelerada.

Por último, las comunidades microbianas son reguladoras clave en la dinámica de la materia orgánica del suelo (MOS) y la disponibilidad de nutrientes, los cambios en su función y composición es una respuesta a las diferentes prácticas de manejo del suelo, lo cual juega un papel importante en las tasas de pérdida de CO del suelo (McCulley and Burke, 2004; Six et al., 2006); en este caso, LM favorece más la acción de hongos, y LM la de bacterias que actúan sobre la materia orgánica recalcitrante, la cual es responsable de los procesos de agregación del suelo.

Cuadro 4-4. Escenarios de emisión de C-CO₂ por ciclo anual para cada tratamiento.

Trat./Año	gCO ₂ m ⁻² d ⁻¹	gCm ⁻² d ⁻¹	Kg de C ha ⁻¹
2006			
NL	2.131	0.575	
LM	1.307	0.352	3.53
LAD	1.258	0.339	3.40
2007			
NL	0.954	0.25	
LM	4.605	1.24	12.4
LAD	2.371	0.64	6.40

V. CONCLUSIONES

Como consecuencia de los dos métodos de labranza empleados (LM y LAD) sobre las propiedades de la superficie donde incide la energía, tanto la directa como la difusa, hubo cambios en el comportamiento en las variables de respuesta de la ecuación de flujo energético, así como en la dinámica de dióxido de carbono, en ambos ciclos de medición: otoño del 2006 y verano del 2007.

El flujo energético en cada estación del año fue modificado en mayor medida por los gradientes de los factores ambientales que se presentaron en los cambios de estación, particularmente la temperatura y la lluvia. Derivado de ello, los flujos de calor latente (LE) y en el suelo (G) experimentaron los mayores cambios comparados con la proporción de la energía que se convierte en calor sensible (H).

En 2006 LM fue el tratamiento que mas energía emitió como LE, y LAD concentró más energía en el suelo. Es decir, en ésta época del año (otoño) mientras que LM facilita la pérdida de agua en forma de vapor, LAD favorece el almacenamiento de la energía en el suelo; este último, es un aspecto

fundamental considerando la tendencia decreciente de la temperatura, incluso por debajo del punto de congelación.

En 2007 LAD, comparado con LM y NL, fue el tratamiento que más energía emitió en forma de LE y al mismo tiempo mostró valores negativos de G; incluso LE tuvo una proporción mucho mayor a la que se esperaría bajo condiciones naturales o sin disturbio por la labranza. Comportamiento que al mismo tiempo se transfiere al suelo y lo convierte en fuente de emisión de calor a la atmósfera.

Por otro lado, el comportamiento del CO₂ para NL corresponde al funcionamiento bruto del sistema, por ejemplo, para el caso de la respiración (emisión de CO₂) en este caso implica la suma de las aportaciones de microorganismos y la planta (raíz y parte aérea); mientras que para LM y LAD, las mediciones corresponden a la respiración del suelo.

De acuerdo a las tasas de emisión de CO₂ y su equivalente de pérdida de C orgánico del suelo, LM podría ser una práctica de labranza primaria riesgosa comparada con LAD, si esta no se acompaña por un sistema de manejo de residuos para incrementar la fertilidad del suelo.

Por último, es importante señalar que si bien la presente investigación esta centrada en un lapso de tiempo muy corto y que podría faltar hacerlo sobre

un ciclo de cultivo completo, los resultados son relevantes en cuanto a las magnitudes de captura y liberación de CO₂, así como los factores de estrés que provocan cambios en la dinámica de funcionamiento del sistema suelo-planta, tanto los de orden natural como los inducidos por la maquinaria.

VI. LITERATURA CITADA

- Agnieska D. D. 2006. Thermal properties in Luvisols under conventional and conservation tillage treatment. Thesis dissertation Dr. Aus dem Institut Pflanzenernährung and Bodenkunde der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. P 7.
- Andrews J. A., K. G. Harrison, R. Matamala and W. H. Schlesinger. 1999. Separation of root respiration total soil respiration using carbon-13 labeling during free-air carbon dioxide enrichment (FACE). Soil Sci. Soc. Am. J. 63: 1429-1435.
- Arya S. P. 1988. Introduction to micrometeorology. Department of Marine, Earth and Atmospheric Science; College of Physical and Mathematical Science; North Carolina State University; Raleigh, North Carolina. 1ra ed. Ed. ACDEMIC PRESS, INC. 307p
- 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 efficiency. Agricultural and Forest Meteorology, 67: 291-321.
- Baldocchi D., E. Falge, L. Gu, R. Olson, D. Hollinger, S. Running, P. Anthoni, Ch. Bernhofer et al., 2001. Fuxnet: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. Bulletin of the American Meteorological Society. 82: 2415-2434

- Baver, L. D., Gardner, W. H. y Gardner, W. R. 1972. Física de Suelos. Ed. UTEHA. 1ra. Ed. en Español 1980.
- Blanco-Canqui H., C.J. Gantzer, S.A. Anderson, and E. E. Alberts. 2004. Tillage and crop influences on physical properties for Epiqualf. Soil Sci. Am. J. 68: 567-576.
- Buj O., and J. Gisbert. 2007. Cuantificación de la porosidad en areniscas mediante análisis digital de imágenes. Facultad de Ciencias de la Tierra, Departamento de Petrología y Geoquímica. Geogaceta (41): 35-38.
- Burba G. and Anderson D. 2005-2007. Introduction to The Eddy Covariance Method: General Guidelines, and Conventional Workflow. LI-COR Biosciences: 4467 Superior Steet P.O. Box 4425, Lincoln Nebraska 68504, USA. Revisado (13/04/09) *In:* http://www.licor.com/env/PDF/EddyCovariance_readonly.pdf
- Camacho-Tamayo J. y A. G. Rodríguez. 2007. Evaluación de implementos de labranza a diferentes velocidades de operación y contenidos de agua en el suelo. Agricultura Técnica (Chile). 67 (1): 60-67.
- Campbell Scientific, Inc. 2004-2006. Instruction manual Open Path Eddy Covariance System, Operator's Manual: CSAT3, LI-7500, and KH20. Revisado (13/04/09) *In* <http://www.campbellsci.com/documents/manual/opecsystem.pdf>
- Carlise E. A., Steenwerth K. L. y Smart D. R. 2006. Effects of land use on soil respiration: conversion of oak woodland to vineyards. J. Environ. Qual. 35: 1396-1404.

- Ceron-Rincon y Melgarejo, 2005. Enzimas del suelo: indicadores de salud y calidad. *Acta Biológica Colombiana*, Vol. 10 No. 1: 1-18
- Clark, D. A., Brown, S., Kiclighter, W. D.; Chambers, Q. J.; Thomlinson, R. J. and Ni, J. 2001. Measuring Net Primary Production in Forest: Concepts and Field Methods. *Ecological Society of America. Ecological Applications*, 11(2): 356-370.
- CONAFOR, 2008. Suelos mexicanos, diversidad que distingue, reportaje sobre suelos (II parte). *Revista electrónica de la Comisión Nacional Forestal* 04 de marzo de 2008
- Conant R., M. Easter, K. Paustian, A. Swan and S. Williams, 2007. Impacts of periodic tillage on soil C stocks: a synthesis. *Soil Tillage Research* 95: 1-10.
- Deru, M. 2003. A model for ground-coupled heat and moisture transfer from buildings, Technical Report. National Renewable Energy Laboratory, NREL. Golden Colorado, USA.
- Dominguez L. R., 2005. Evaluación de sistemas de labranza para la conservación de humedad y energía en zonas semiáridas. Tesis de Maestría en Ciencias. Programa de Posgrado en Ingeniería de Sistemas Agrícolas. UAAAN. Buenavista, Coahuila, México.
- Drury C. F., Ch. Sh. Tan., T. W. Wwlacky, T. O. Olaya, A. S. Hamill, and S. E. Weaver 1999. Red clover and tillage influence on soil temperature, water content, and corn emergence. *Agron. J.* 91: 101-108.

- Eynard A., T. E. Schumacher, M. J. Lindstrom, and D. D. Malo. 2004. Porosity and pore-size distribution in cultivated Ustolls and Usters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68 (6): 1927-1934.
- FAO, 2002. Agricultura Mundial: hacia los años 2015/2030, Informe resumido en español de "World agriculture: towards 2015/2030". Cap. Perspectivas por sectores principales, Producción de cultivos *In:* <http://www.fao.org/docrep/004/Y3557S/y3557s00.HTM>
- Fuentes P. J., Flury M., and Bezdicsek F. D. 2004. Hydraulic properties in a silt loam soil under natural prairie, conventional till, and no-till. *Soil.Sci. Am. J.* 68: 1679-1688.
- Garatuza J. P., G. S, García y Ch. J. Watts. 2001. Medición y modelación de los flujos de energía y vapor en un bosque de mezquite. ITSON-DIEP. Vol. 10 (Jul-Dic): 29-38.
- García-Páez F. y Cruz-Medina I. R. 2009. Variabilidad de la Precipitación Pluvial en la Región Pacífico Norte de México. *Agrociencia* 43: 1-9.
- Gavande S. A. 1986. Física de Suelo, principios y aplicaciones. 5º Reimpresión. Ed. LIMUSA, S.A. de C.V. México. p 116-120, 215.
- Gil, R. (2001). El Comportamiento Físico-Funcional De Los Suelos. Instituto De Suelos. INTA Castelar. Mafredi, Cordoba, Argentina.
- Goldstein A. H., N.E. Hultman, J.M. Fracheboud, M.R. Bauer, J.A. Panek. M. Xu, Y. Qi, A.B. Guenther et al. 2000. Effects of climate variability on the carbon dioxide, water, and sensible heat fluxes above a ponderosa pine

plantation in the Sierra Nevada (CA). *Agricultural and Forest Meteorology* 101: 113-129.

González, C. G., I. Sánchez-Cohen, y D. García-Arellano. 2004a. Relaciones entre el manejo del huerto de nogal y la porosidad del suelo. *Terra Latino*. (22): 279-287.

González, C. G., I. Sánchez-Cohen, y J. P. Rossingol. 2004b. Morfología de poros de circulación preferencial del agua en el suelo mediante técnicas de análisis de imagen. Caso de una cuenca del norte de México. *Ing. Hidráulica Méx.* XIX (3): 15-23.

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

Hatfield J.; Prueger J. y Kustas W., 2007. Spatial and temporal variation of energy and fluxes in central Iowa. *American Society of Agronomy. Special Submissions. Volume 99: 285 – 296.*

Henderson, DW. 1979. Soil management in semiarid environments. In: *Crop productivity in arid and semiarid environments*. Hall A.E. (ed). *Ecol. Studies Springer Verlong* (35): 224-237. Revisado (02/11/08) en <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v23n2/v23n2a07.pdf> Kay, B.D. and Vanden Bygaart, A.J. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.* 66: 107-118. Revisado (29/02/08) en

http://www.inta.gov.ar/parana/info/documentos/suelos/indicadores_cal/30222_060810_poro.htm

- Hunt D. 1986. Maquinaria Agrícola: Rendimiento económico, costos, operaciones, potencia y selección de equipo. Manual de laboratorio y de trabajo. Trad. Farm Power and Machinery Management. 1º reimp. En Español. Ed. LIMUSA. México, D.F. Pp 435.
- Huxman T. E., K. A. Snyder, D. Tissue, A. J. Leffler, K. Olge, W. T. Pockman, D. R. Sanquist, D. L. Potts and S. Schwinning. 2004. Precipitation pulse and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecologia* 141: 254-268.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Climate change impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report.
- Jones, H. G. 1992. Plants and Microclimate, a quantitative approach to environmental plant physiology. Second ed. Ed. CAMBRIDGE. 429p.
- Kay y Vanden, 2002 Singh, P., R. S. Kanwar, and M. L. Thompson. 1990. Measurement and characterization of macropores by using AUTOCAD and automatic image analysis. *J. Environ Qual.* (20): 289-294.
- Kim J. and Verma Sh. 1990. Components of surface energy balance in a temperate grassland ecosystem. *Boundary-Layer Meteorology* 51: 401-417.
- Kung K. J., M. Hanke, C.S. Helling, E. J. Klavivko, T. J. Gish, T.S. Steenhuis, and D. B. Jaynes. 2005. Quantifying pore-size spectrum of macropore-type preferential pathways. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69 (4): 1196-1208.

- Kuzyakov Y. 2002. Separating Microbial Respiration of Exudates from Root Respiration in non-sterile soils: a comparison of four Methods. *Soil Biology & Biochemistry* 2002; 34: 1621-1631.
- Lal, R. y Vandoren, D.M. 1990. Influence of 25 years of continuous corn production by three tillage methods on water infiltration for two soils in Ohio. *Soil Tillage Res.* (16): 71-84.
- Lampurlanés J. and Cantero-Martínez, C. 2003. Soil Bula and Penetration Resistente under different tillage and crop management system and their relationship with root growth. *Agron. J.* 95: 526-536.
- Lee X., W. Massman, and Law B.E. 2004. *Handbook of micrometeorology. A guide for surface flux measurement and analysis.* Kluwer Academic Press, Dordrech, 250 p.
- Lipiec J., B. Usowicz and A. Ferro. 2006. Management Effects of Sloping Vineyard on Thermal Properties of Soil. *International Soil Tillage Research Organization, 17th Triennial Conference.* Kiel, Germany.
- Lokupitiya E. and K. Paustian. 2006. Agriculture soil greenhouse gas emissions: a review of national inventory methods. *J. Environ. Qual.* 35: 1413-1427.
- Lopez-Santos A., A. Zermeño-González, M. Cadena-Zapata, J. A. Gil-Marín, E. Conrnejo-Oviedo y M. S. Ríos-Camey. 2008. Impacto de la labranza en el flujo energético de un suelo arcilloso. *Terra Latinoamericana* 26 (3): 203-213.

- López-Santos y Gil-Marín, 2008. Flujos de CO₂ y LE medidos con cámaras de intercambio de gas y sensores de IR bajo condiciones de cielo abierto. Revista Chapingo, Serie Zonas Áridas. 7 (1): 1-5.
- Martínez-Gamiño M. A. y C. Jasso-Chavarría, 2006. El multiarado, una herramienta en la agricultura de conservación en el Altiplano y Zona media de San Luis Potosí. SAGARPA-INIFAP-CIRNE, Fundación PRODUCE. Desplegable para productores No 22.
- Massman W. J. y Lee, X. 2002. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. Agriculture and Forest Meteorology (113): 121-144.
- Matsumoto N., K. Paisancharoen and T. Hakamata. 2002. Carbon sequestration in maize field with cow dung application and no-tillage cultivation in Northeast Thailand. 17th WCSS. August, 2002, Thailand.
- Moore T. R. 1997. Dissolved organic carbon: sources, sinks, and fluxes and role in the soil carbon cycle. SOIL PROCESS AND THE CARBON CYCLE, ADVANCES IN SOIL SCIENCE. Book edited by Rattan L, J. M. Kimble, R. F. Follett and B. A. Steward. CRC-PRESS. Chapter 19 Pp 281-291.
- Moroizumi T. and H. Horino. 2004. Tillage effects on subsurface drainage. Soil Sci. Soc. Am. J. 68: 1138-1144.
- Narro, E. 1994. Física de Suelos Con Enfoque Agrícola. 1ra ed. Ed. TRILLAS-UAAAN. Impreso en México, D.F. p 50.

- Navarro B. A., B. S. Figueroa, V. M. Ch. Ordaz, y F. V. C. González. 2000. Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol. *Terra* vol. 18 (1): 61-69.
- Noborio K, K. J. McInnes, and J. L. Heilman. 1996. Measurements of soil water content, heat capacity, and thermal conductivity with a single TDR probe 1. *Soil Science*. 161(1):22-28.
- Ochsner T. E., R. Horton and Ren T. 2001. A new perspective on soil thermal properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1641-1647.
- Ochsner T. E., T. J. Sauer and R. Horton 2006. Field test of the heat flux plate method and some alternatives. *Agron. J.* 98: 1005-1014.
- Ochsner T. E., T. J. Sauer and R. Horton. 2007. Soil heat storage measurements in energy balance studies. *Agron. J.* 99: 311-319.
- Oorts K., Mercky R., Gréhan E., Labreuche J. 2007. Determinants of annual fluxes of CO₂ and N₂O in long-term no tillage and conventional tillage systems in northern France. *Soil & Tillage Research* 95: 133-148.
- Osuna, C. E. S., S. B. Figueroa, C. Oleschko, D. M. de L. Flores, M. R Martínez, y C. F. V. González. 2005. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia* 40: 27-38.
- PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY, 1996a. An introduction to weed management for conservation tillage system. College of Agricultural Sciences, Pennsylvania State University Conservation Tillage Series, number two.

- PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY, 1996b. Economics of conservation tillage. College of Agricultural Sciences, Pennsylvania State University Conservation Tillage Series, number six.
- Peters, G.; Fischer, B. and Munser, H. 2001. Eddy Covariance Measurements with Closed-Path Optical Humidity Sensors: A feasible Concept? Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, American Meteorological Society. (18) 503-514.
- Pikul L. J. and Aase K. 2003. Water infiltration and storage affected by subsoiling and subsequent tillage. Soil Sci. Am. J. 67: 859-866.
- Polley H. W., A. B. Frank, J. Sanabrial and R. Phillips. 2008. Interannual variability in carbon dioxide fluxes and flux-climate relationships on grazed and ungrazed northern mixed-grass prairie. Global Change 14: 1-13.
- Porta J., M. López-Acevedo, C. Roquero. 2003. Edafología, para la agricultura y el medio ambiente. 3º ed. Ed. MUNDI-PRENSA. Impreso en España.
- Raich J. W. y Mora G. 2005. Estimating root plus rhizosphere contributions to soil respiration in annual Croplands. Soil Sci. Soc. Am. J. 69: 634-639.
- Rochette P., L. B. Flanagan, E.G. Grogan. 1999. Separating Soil Respiration into Plant and Soil Components Using Analyses of the natural Abundance of Carbon-13. Soil Sci. Soc. Am. J. 1999; 63: 1207-1213.
- Ryu Y., D. D. Baldocchi, S. Ma, and T. Hehn. 2008. Interannual variability of evaporation and energy exchange over an annual grassland in California.

Journal of Geophysical Research. Vol. 113 DO9104. Revisado (12/05/09)

In: http://nature.berkeley.edu/~yryu/papers/RYU2008_JGR.pdf

Sauer T. J. and P. J. Pinter. 2007. Introduction to the symposium in radiation and energy balance measurements systems. Agron. J. 99: 238-239.

Scow, M. K. 1999. Chapter 11: Soil Microbial Communities and Carbon Flow in Agroecosystems . Ed. Academic Press, Editado por Jakson, L. E. Carolina University, USA. Pp 367-413.

SEMARNAT, 2002. Compendio de Estadísticas Ambientales, 2002. Superficie, tipo de uso y vegetación por entidad federativa. México, D.F., 2003.

SIAP. 2007. Sistema Integral de Información Agroalimentaria y Pesquera. <http://www.siap.sagarpa.gob.mx/>.

Singh P., S. R. Kanwar, and L. T. Thompson. 1991. Macropore characterization for two tillage systems using resin-impregnation technique. Soil Sci. Soc. Am. J. (55): 1674-1679.

Singh P., S. R. Kanwar, and L. T. Thompson. 1991. Macropore characterization for two tillage systems using resin-impregnation technique. Soil Sci. Soc. Am. J. (55): 1674-1679. Osuna, C. E. S., S. B. Figueroa, C. Oleschko, D. M. de L. Flores, M. R Martínez, y C. F. V. González. 2005. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. Agrociencia 40: 27-38.

Singh, P., R. S. Kanwar, and M. L. Thompson. 1990. Measurement and characterization of macropores by using AUTOCAD and automatic image analysis. J. Environ Qual. (20): 289-294.

- Six J., S. D. Frey, R. K. Thiet and K.M. Batten. 2006. Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 555-569.
- Stocker R., P. W. Leadley and Ch. Körner. 1997. Carbon and water fluxes in calcareous grassland under elevated CO₂. *Functional Ecology* 11: 222-230.
- UACH-CONAZA-SEDESOL-SAGARPA, 2004. Escenarios climatológicos de la República Mexicana ante el cambio climático. Publicado por Universidad Autónoma Chapingo, CONAZA, Dirección de Vinculación y Transferencia de Tecnología, SEDESOL y SAGARPA.
- Udawatta R. P., C. J. Gantzer, S. H. Anderson, and H. E. Garrett. 2008b. Agroforestry and grass buffer effects on pore characteristics measured by high-resolution X-ray computed tomography. *SSSAJ* 72 (2): 295-304.
- Udawatta Ranjith P, Anderson Stephen H, Gantzer Clark J, y Garret Harold E. 2008a. Influence of Praire Restoration on CT-measured Soil Pore Characteristics. *J. Environ. Qual.* 37: 219-228.
- Volland-Tuduri N., A. Bruand, M. Brossard, L. C. Balbino, M. I. De O. Lopes and E. M. De Sousa. 2005. Mass proportion of microaggregates and bulk density in a Brazilian clayey oxisol. *Soil Sci. Am. J.* 69: 1559-1564.
- 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.

Curtin D., H. Wang, F. Selles, B. G. McConkey, and C. A. Campbell. 2000. Tillage effects on carbon fluxes in continuous wheat and fallow-wheat rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 2080-2086.

McCulley R. L. and I. C. Burke. 2004. Microbial community composition across the Great Plains: landscape versus regional variability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 106-115.

Fuente: INIFAP-Coah. 2009. Mapas dinámicos. Lab. Nacional de Modelaje y

Sensores Remotos. Revisado (15/05/09) In:

<http://clima.inifap.gob.mx/redclima>

VII. ANEXOS

A continuación se presenta una relación de los títulos de trabajos publicados, que se derivaron de la investigación realizada por el autor y que se integra como parte de la presente obra.

Título de la obra	Tipo de contribución	Datos generales de publicación
1. Impacto de la labranza en el flujo energético de un suelo arcilloso.	Artículo	Terra Latinoamericana (2008; Vol. 26, 3: 203-213)
2. Flujos de CO ₂ y LE medidos con cámaras de intercambio de gas y sensores IR bajo condiciones de cielo abierto.	Notas de investigación	Revista Chapingo, serie Zonas Áridas, (2008; Vol. 7, 1: 1-5).
3. Mediciones morfomatemáticas de imágenes digitales mediante una plataforma Arc-View e IDRISI.	Artículo publicado en memoria de evento nacional	Memoria: XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola, 2008.
4. Monitoring of CO ₂ flux and contribution for components in the soil-plant system in a grassland from northeastern Mexico.	Artículo publicado en memoria de evento internacional	Memoria: XIIIth World Water Congress, 2008.
5. Changes into porosity of the soil by tillage effect at a clayish soil.	Artículo publicado en memoria de evento internacional	Memoria: 18th Triennial Conference, "Sustainable Agriculture", 2009.

Anexo 1:

Título: Impacto de la labranza en el flujo energético de un suelo arcilloso.

Datos de la publicación:

Publicado en la categoría de artículo científico en la Revista Terra Latinoamericana, volumen 26 (Jul-Sep., 2008) número 3: 203-213.

Para ver obra haga clic aquí



Liga en página Web:

<http://portal.chapingo.mx/terra/?module=resumenes&volumen=26&numero=3>

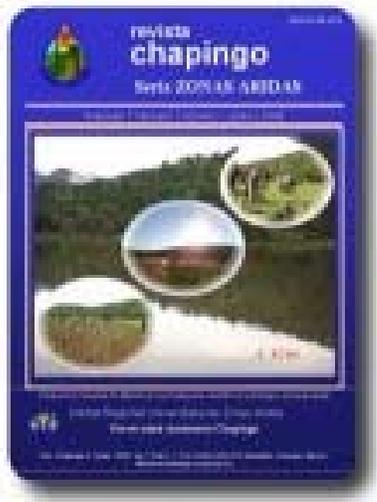
Anexo 2:

Título: Flujos de CO₂ y LE medidos con cámaras de intercambio de gas y sensores IR bajo condiciones de cielo abierto.

Datos de la publicación:

Publicado en la categoría de notas de investigación en Revista Chapingo, serie Zonas Áridas, volumen 7, (Ene-Jun., 2008) número 1: 1-5.

Para ver obra haga clic aquí



Liga en página Web:

http://www.chapingo.uruza.edu.mx/index.php?module=pagemaster&PAGE_user_op=view_page&PAGE_id=143&MMN_position=92:60

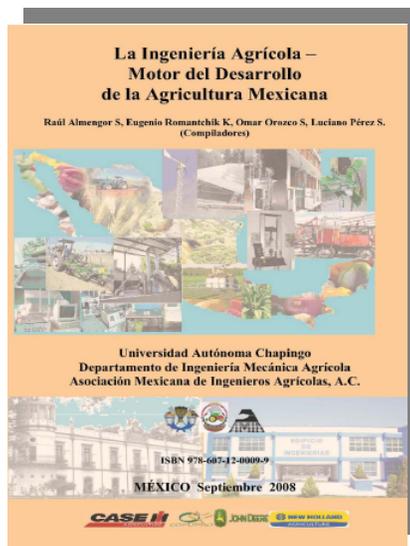
Anexo 3:

Título: Mediciones morfomatemáticas de imágenes digitales mediante una plataforma Arc-View e IDRISI.

Datos de la publicación:

Publicado en la categoría de artículo en extenso en la memoria del XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola celebrado en el Departamento de Maquinaria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo en Septiembre, 2008.

Para ver obra haga clic aquí



Anexo 4:

Título: Monitoring of CO₂ flux and contribution for components in the soil-plant system in a grassland from northeastern Mexico.

Datos de la publicación:

Publicado en la categoría de artículo en extenso en la memoria del XIIIth World Water Congress celebrado en Montpellier, Francia del 1 al 4 de Septiembre, 2008.

Para ver obra haga clic aquí



13th IWRA World Water Congress 2008
1-4 September, Montpellier, France

**Liga en página Web:**

http://www.worldwatercongress2008.org/index.php?menusection=&page=abstract_list&PHPSESSID=2eac0cd5cb4127fa4978c2725a42142e

Anexo 5:

Título: **Changes into porosity of the soil by tillage effect at a clayish soil.**

Datos de la publicación:

Publicado como abstract y en la categoría de artículo en extenso en la memoria del 18th Triennial Conference, "Sustainable Agriculture". Disponible en CD (ISBN: 978-975F-483-823-7)

Para ver obra haga clic aquí



Liga en página Web:

No disponible

IMPACTO DE LA LABRANZA EN EL FLUJO ENERGÉTICO DE UN SUELO ARCILLOSO

Impact of Tillage on the Energy Flux of a Clayish Soil

Armando López Santos^{1‡}, Alejandro Zermeño González², Martín Cadena Zapata³, José A. Gil Marín⁴, Eladio Cornejo Oviedo⁵ y Mario S. Ríos Camey⁴

RESUMEN

Pese a que las prácticas de labranza tienen un efecto directo sobre el flujo de calor en el suelo (G), éstas no se han valorado debidamente. De los componentes del balance de energía [$BE = (H + LE) / (Rn-G)$], G es una variable que expresa la cantidad de energía que puede ser liberada o almacenada en el suelo, y la diferencia $Rn-G$ representa la energía disponible en la superficie que puede transformarse en flujo de vapor de agua (LE) y en flujo de calor sensible (H). La evaluación de G, para suelo desnudo (Gbsup) y cubierto con vegetación (Gvsup), forma parte de un estudio basado en el método eddy covariance, efectuado en el 2006 (octubre-diciembre), en el rancho “Los Ángeles”, municipio de Saltillo, Coah., México, donde el clima es del tipo BWhw(x')(e) y los suelos del lugar son del tipo Feozem lúvico (HI). El efecto de la labranza convencional (LC) y labranza vertical (LV) se comparó con un suelo no disturbado (NL). Los resultados del análisis estadístico indican diferencias altamente significativas ($\alpha = 0.01$) entre los diferentes tipos de labranza. En particular, se observó que LV disminuyó entre 20 y 38%, tanto la magnitud del flujo energético en la superficie, como la capacidad absoluta de retener y almacenar energía en la capa de suelo a 8 cm de profundidad, comportamiento que también es representado mediante un modelo de regresión lineal para Gbsup y Gvsup.

Palabras clave: flujo de calor en el suelo, métodos micrometeorológicos, prácticas de labranza.

¹ URUZA-Universidad Autónoma Chapingo. Bermejillo, Durango, México.

[‡] Autor responsable (alopez@chapingo.uruza.edu.mx)

² Departamento de Riego y Drenaje, ³ Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, ⁴ Programa ISP, ⁵ Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Recibido: julio de 2007. Aceptado: mayo de 2008.
Publicado en Terra Latinoamericana 26: 203-213.

SUMMARY

Although tillage practices have a direct impact on soil heat flux (G), they have not been properly valued. G is a parameter of the energy balance components [$BE = (H + LE) / (Rn-G)$] that indicate the amount of energy that can be released or stored in the soil. The subtraction $Rn-G$ represents the energy available on the surface that can be transformed into water flux vapor (LS) and perceptible heat flux (H). The evaluation of G, for bare soil (Gbsup) and soil covered with vegetation (Gvsup), is part of a study based on the eddy covariance method, that started in 2006 (October-December), at the ranch “Los Angeles” in Saltillo, Coahuila, Mexico, where climate type is BWhw(x')(e) and the soils are classed as Luvic Feozem (HI). The effect of conventional tillage by disc plowing (CT) and vertical tillage (VT) was compared with a non-disturbed soil (NT). The results of the statistical analysis suggest highly significant differences ($\alpha = 0.01$) between types of tillage. In particular, it was noted that VT decreased from 20 to 38% both the magnitude of the energy flow at the surface and the absolute ability to retain and store energy in the soil layer at a depth of 8 cm. This behavior is also represented by a linear regression model for Gbsup and Gvsup.

Index words: soil heat flux, micrometeorological methods, tillage practices.

INTRODUCCIÓN

A pesar de que el flujo de calor en el suelo (G) es una variable afectada por las prácticas de labranza, éste se ha valorado marginalmente bajo un enfoque energético (Noborio *et al.*, 1996; Drury *et al.*, 1999). La capacidad calórica (Cs) y la conductividad térmica (K) determinan cuánto se calienta o enfría un suelo con los cambios de flujo de calor mediante conducción, convección y radiación (Ochsner *et al.*, 2001).

Lo anterior adquiere relevancia al considerar el reporte del 'Intergovernmental Panel on Climate Change' (IPCC, 2007), sobre los cambios de temperatura en los sistemas físicos y biológicos entre 1970 y 2004, en el mundo. En este reporte se indica que en el norte centro, noroeste e incipientemente en el noreste del territorio mexicano, dichos cambios se estiman entre 1 y 2 °C; fluctuación que ya se había advertido (UACH-CONAZA-SEDESOL-SAGARPA, 2004) como un factor que contribuye en marcadas irregularidades hídricas con una fuerte tendencia a la sequía y a la desertización, cuyos estragos se manifiestan más dramáticamente en las regiones agrícolas. Debido en parte a esto, en años recientes ha resurgido el interés en las mediciones de radiación y el balance de energía en el suelo y en el dosel de las plantas, pero pocas publicaciones se han enfocado al estudio sobre la relación entre las propiedades térmicas y las fracciones de volumen de las fases del suelo (Ham y Heilman, 2003; Ochsner *et al.*, 2006; 2007; Hatfield *et al.*, 2007; Sauer y Pinter, 2007).

Sin duda, aún hay mucho que hacer para mejorar la comprensión respecto a la dinámica de transferencia de agua, energía y gases traza de la superficie de la tierra. Por ejemplo, tradicionalmente se ha pensado que las propiedades térmicas del suelo están fuertemente afectadas por el contenido de agua (θ) en el suelo y, por lo tanto, se asume que la habilidad para medir K y θ es una importante herramienta en el manejo del régimen de temperatura para la germinación, el desarrollo y la productividad del cultivo (Elias *et al.*, 2004; Lipiec *et al.*, 2006).

Al respecto, en una perspectiva distinta, Ochsner *et al.* (2001) estudiaron la relación entre las mediciones térmicas del suelo y las fracciones líquida, sólida y gaseosa de cuatro suelos (franco arenoso, franco arcilloso, limo arcilloso y franco limo-arcilloso), cuyo contenido máximo de arcilla fue de 32%. Dichos autores encontraron un efecto dominante de la fracción gaseosa sobre la líquida y sólida.

La evaluación de G en condiciones de suelo desnudo (G_{sup}) y cubierto con vegetación (G_{vsup}) forma parte de un estudio basado en el método eddy covariance, el cual está orientado, entre otras cosas, a la búsqueda del manejo sustentable del suelo. Con base en lo anterior, para efectos del presente trabajo, G es evaluado en términos de su comportamiento por efecto de la labranza vertical (LV) y la labranza convencional (LC); partiendo del hecho de que LV es una práctica que consiste en

el empleo de una herramienta que utiliza brazos o flejes equipados con puntas para aflojar el suelo sin invertirlo, en tanto que LC implica el uso de un arado de discos que tiene como característica principal que éste invierte la capa de suelo trabajado. En general, la profundidad de operación de ambos implementos es entre 25 y 30 cm (Cadena-Zapata *et al.*, 2004).

Los objetivos particulares de la presente investigación fueron: i) explicar el comportamiento del flujo de calor en el suelo (G) bajo dos sistemas de labranza, vertical (LV) y convencional (LC), en un suelo arcilloso del noreste de México; y ii) evaluar el impacto de estos dos sistemas de labranza en el comportamiento del flujo energético en el suelo, comparándolo en una condición de suelo no disturbado (NL).

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se condujo en el otoño de 2006 en el rancho "Los Ángeles", municipio de Saltillo, Coah., México (25° 6.650' N y 100° 59.413 O), con una altitud promedio de 2100 m. El clima del lugar, de acuerdo con García (1975), es [BWhw(x')(e)] semiárido, con invierno fresco, con temperatura media anual que fluctúa entre 18 y 22 °C, con lluvias promedio anual de 450 a 550 mm, distribuidas primordialmente en verano e invierno.

Por otro lado, con base en el estudio de digitalización realizado, a partir de la referencia cartográfica del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 1976) y corroboraciones de campo, se encontró que la vegetación tiene una distribución que se relaciona con las características topográficas del lugar. Por ejemplo, en la planicie dominada por suelo aluviales predominan los pastizales naturales combinados con matorral inerme; en las laderas de la sierra predomina la vegetación de matorral rosetófilo espinoso asociado con Izotal; y, por último, en las partes altas de la sierra predomina la vegetación de pino con matorral inerme. Asimismo, se encontró que de los grupos definidos por la World Reference Base (FAO-ISRIC-ISSS-AISS-IBG, 1994) los Luvisoles ocupan en las planicies 40% de la superficie total y se caracterizan por ser profundos, con un horizonte superficial de color oscuro y rico en materia orgánica (MO), y los Leptosoles 60% de la superficie restante, los cuales se encuentran en la serranía compuesta por laderas y mesetas, con presencia de afloramiento rocoso y una capa delgada de suelo;

éstos son los más susceptibles a la erosión y, además, en la parte alta de la sierra se encuentran suelos forestales de formación *in situ* ricos en MO y humus.

El método eddy covariance permite la estimación del balance de energía en la superficie en condiciones de advección significativas y la confiabilidad de sus mediciones se establece a partir de la evaluación de los componentes más importantes en términos energéticos (Kizer y Elliott, 1991; Clark *et al.*, 2001). Por lo que, debido a que las magnitudes tan pequeñas que alcanza la energía almacenada en la capa de aire entre la superficie del suelo y el dosel de la planta (S) y la energía requerida en el proceso fotosintético (PH), en la ecuación del balance de energía ($R_n = H + LE + G + S + PH$), S y PH se eliminan, quedando dicha evaluación de la siguiente manera:

$$[R_n - G] = [H + LE] \quad (1)$$

Los dos componentes de la izquierda indicados por $[R_n - G]$ representan la energía disponible en la superficie del suelo, la cual se transforma, de acuerdo con la ley de la conservación de la energía, en los dos componentes de la derecha $[H + LE]$, que es la energía en la capa de aire que se localiza sobre la superficie del suelo. Ham y Heilman (2003) emplearon el balance energético (BE) para indicar la precisión de las mediciones, el cual debe ser casi igual a la unidad; incluso estos autores señalan que valores de 0.7 a 0.82 pueden indicar buenas índices para la ecuación:

$$BE = [R_n - G] / [H + LE] \quad (2)$$

De tal manera que si BE se ajusta bajo el criterio de que $[R_n - G]$ es un término muy confiable comparado con $[H + LE]$ y que, además de esto, G es una variable que se mide continua e independiente de las condiciones de advección prevalencias sobre la superficie, entonces es válido analizar, de manera independiente,

el comportamiento de G, ya sea para mejorar la comprensión sobre la dinámica de transferencia de agua, energía y gases traza de la superficie de la tierra, o simplemente para evitar errores de estimación en la medición del balance de energía (Massman y Lee, 2002; Ochsner *et al.*, 2007).

En particular, para explicar el comportamiento de la energía que fluye en el suelo, en este caso, se recurre a la ley de conducción de calor o ley Fourier, utilizada por varios autores (Ochsner *et al.*, 2001; 2007; Deru, 2003), en la cual se establece que “el calor transmitido es directamente proporcional al salto de temperatura a través de una masa (como una pared), e inversamente proporcional al espesor de la misma.”

Una interpretación de lo anterior permite definir a G como el calor transmitido a través de la superficie λ , especificada como conductividad térmica ($m^2 s^{-1}$), el cual se asume con un valor constante de acuerdo con las características del suelo; y $\Delta T / \Delta z$ representa al gradiente vertical de temperatura, cuya ecuación se presenta a continuación:

$$G = \lambda \cdot \Delta T / \Delta z \quad (3)$$

Para aplicar la ecuación anterior es necesario implantar condiciones de frontera para la masa de suelo. Para ello, en la Figura 1 se representa el comportamiento de G, que puede ser ascendente y descendente entre los límites $z = 0$ y $z = D$. Cuando el valor de G es positivo, esto significa que el suelo gana energía y, por el contrario, cuando presenta valores negativos se interpreta como pérdida de energía.

El almacenamiento de la energía en la capa de suelo a 8 cm de profundidad, definido en la Figura 1 como ΔS , está dado por la diferencia entre el flujo de calor en la superficie (G_0) y el flujo de calor a 8 cm (G_{D8}), cuya expresión algebraica se representa de la siguiente manera:

$$\Delta S = G_0 - G_{D8} \quad (4)$$

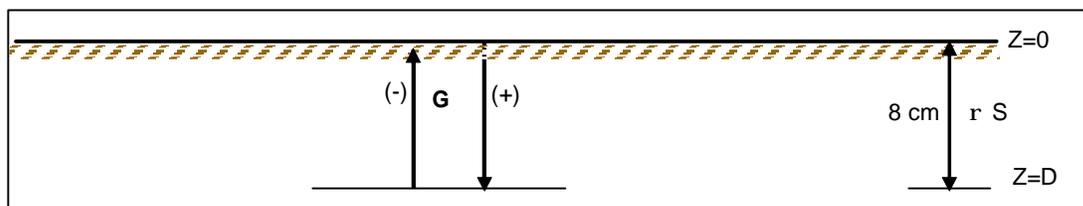


Figura 1. Representación esquemática de las condiciones de frontera para el análisis del flujo energético en el suelo.

G_{D8} es una magnitud que se obtiene por medio de los sensores; sin embargo, para poder calcular G_0 es necesario determinar analíticamente ΔS . De acuerdo con lo propuesto por Ochsner *et al.* (2007), esto significa que la energía que fluye tanto en forma ascendente como descendente es igual a la integral en los límites $z = 0$ hasta $z = D$, del gradiente vertical de energía que está afectado por el producto de la densidad aparente del suelo (Da), las propiedades térmicas del suelo (Cs) y los cambios de temperatura (T), como una función del espesor de la capa de suelo (dz), mismo que está representado en la ecuación:

$$r S = \int_{z=0}^{z=D} \frac{\partial}{\partial t} \left[Da \cdot Cs \cdot T \right] dz \quad (5)$$

La solución analítica de la Ecuación 5 se presenta a continuación:

$$\Delta S = (Da \cdot Cs \cdot \Delta T \Delta z) / \Delta t \quad (6)$$

Además de lo anterior, es importante hacer notar que Cs es una variable que está afectada por el contenido de agua en la capa de suelo; ΔT es la diferencia en la temperatura de un tiempo desde $t = 0$ a $t = T$; Δz es la diferencia en profundidad del suelo desde $z = 0$ hasta $z = D$ y Δt representa el tiempo que transcurre entre dos lecturas consecutivas de $t = 0$ hasta $t = t$.

Además del criterio de confiabilidad anteriormente expuesto, respecto a las mediciones de G y R_n , es importante señalar que éstas se realizaron en una fracción de 35 ha. Ahí se definieron tres parcelas de 2.4 ha cada una, las cuales mostraron características edáficas y de vegetación similar, cada una con una longitud de 120 m en su dirección N-S y 200 m en dirección E-O, donde se estudiaron los horizontes de diagnóstico en las profundidades 0-30 y 30-60 cm. Los análisis de laboratorio y campo más sobresalientes son: textura arcillosa, > 40% (hidrómetro de Bouyoucos); pH > 8 (potenciómetro); color en la superficie del suelo seco 10YR 5/2 (tablas Munsell) y contenido de carbonatos totales > 37% (volumetría de neutralización); y tomando como base la metodología de identificación del INEGI (2001), se deduce que el tipo de suelo corresponde a un Feozem lúvico (Hl) (INEGI 1976; FAO-ISRIC-ISSS-AISS-IBG, 1994).

Longitud del Estudio y Variables de Respuesta Medidas y Estimadas

Las mediciones se realizaron entre los días del año (DDA) 293 y 352 de 2006. Para NL éstas se hicieron durante 21 días, abarcando los DDA del 293 al 314; para continuar con el tratamiento LV por espacio de 18 días entre los DDA 314 al 332; y concluir con LC con una duración de 27 días comprendiendo los DDA del 332 al 352. R_n y G , por ser parte de un estudio de balance energético, fueron medidas en $W m^{-2}$. Para R_n se utilizó un radiómetro neto (modelo NR-LITE, Kipp & Zonen) y G se midió para dos condiciones de suelo: protegido con vegetación (G_{vsup}) y desnudo (G_{bsup}); cada sistema incluyó un plato para medir flujo de calor (modelo HFT3, REBS, Inc.), colocado a 8 cm de profundidad y, de manera contigua, dos termopares de cuatro puntas para medir temperatura del suelo, en °C (modelo TCAV, Campbell Scientific), que se instalaron a 2 y 6 cm de profundidad.

Además, para medir el contenido de humedad se tomaron muestras de suelo a 5 cm de profundidad con una barrena Veihmeyer, para diferentes DDA y su contenido volumétrico (θ_w) fue estimado por gravimetría (299-314, $\theta_w = 0.1876$; 325, $\theta_w = 0.1886$; 332, $\theta_w = 0.1001$; 339, $\theta_w = 0.1088$; y 352, $\theta_w = 0.1459$); y la densidad aparente del suelo (Da) se midió utilizando una barrena de núcleos, cuyos valores para NL, LV y LC fueron 900, 916 y 1000 $kg m^{-3}$, respectivamente.

Variables Medidas y Estimadas

Con base en estos datos y considerando un valor estándar de la capacidad calórica de los minerales ($C_d = 840 J kg^{-1} K^{-1}$) y la capacidad calórica del agua ($C_w = 4190 J kg^{-1} K^{-1}$) como constantes en la estimación del flujo de calor en la superficie, tanto para G_{vsup} , como para G_{bsup} , se sustituye la Ecuación 6 en la 4, quedando de la siguiente manera:

$$G_{s_x} = G_{D8} + \frac{[(C_d + \theta_w \cdot C_w) Da \cdot \Delta T \cdot \Delta z]}{\Delta t} \quad (7)$$

donde: G_{s_x} puede ser G_{vsup} o G_{bsup} , en $W m^{-2}$; G_{D8} es el flujo de calor medido con el sensor a 8 cm de profundidad, también en $W m^{-2}$; ΔT es el cambio de la temperatura promediada por los sensores desde 2 hasta 6 cm de profundidad, en °C; Δz es la profundidad a la que el plato de flujo de calor es colocado, cuyo valor en

la ecuación es de 0.08 m; y Δt es una variación del tiempo en segundos (20 x 60).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Selección de Datos con Base en Días Típicos

Para disminuir la variabilidad de los datos relativos a R_n y G se optó por seleccionar días típicos de la época de otoño, que corresponden a cielos despejados, en los que se distinguen dos periodos para R_n : el primero, con una máxima de 573 $W m^{-2}$ y, el segundo, de 442 $W m^{-2}$. De tal manera que de los 66 días que comprendió la medición, se dejaron sólo 24 de los 30 días que presentaron esta misma condición. En ese sentido, los DDA seleccionados para cada tratamiento fueron de 8 para cada uno, cuya distribución se muestra en las Figuras 2a,b y 3.

Después de definir la longitud para el análisis estadístico, se hizo una evaluación de normalidad con los valores absolutos, para disminuir dispersión y poder utilizar la forma $x^{1/2}$, de las variables de respuesta ya indicadas (G_{v8cm} , G_{b8cm} , G_{vsup} y G_{bsup}), así como los valores positivos de R_n . Los resultados de dicha prueba indican que la variable transformada en la forma ya indicada (raíz de x), presenta una distribución normal con un nivel de significancia estadística de 0.01. Posteriormente, con los valores absolutos de las variables estudiadas se hizo una prueba de comparación de medias por el método TTEST (Rebolledo-Robles, 2002; SAS Institute, 2006), el cual se basa en asumir que las varianzas de dos grupos de datos son iguales ($\sigma^2 = \sigma^2$). Esta prueba se estableció considerando únicamente como fuente de variación a los tratamientos y un nivel de significancia estadística de 0.01.

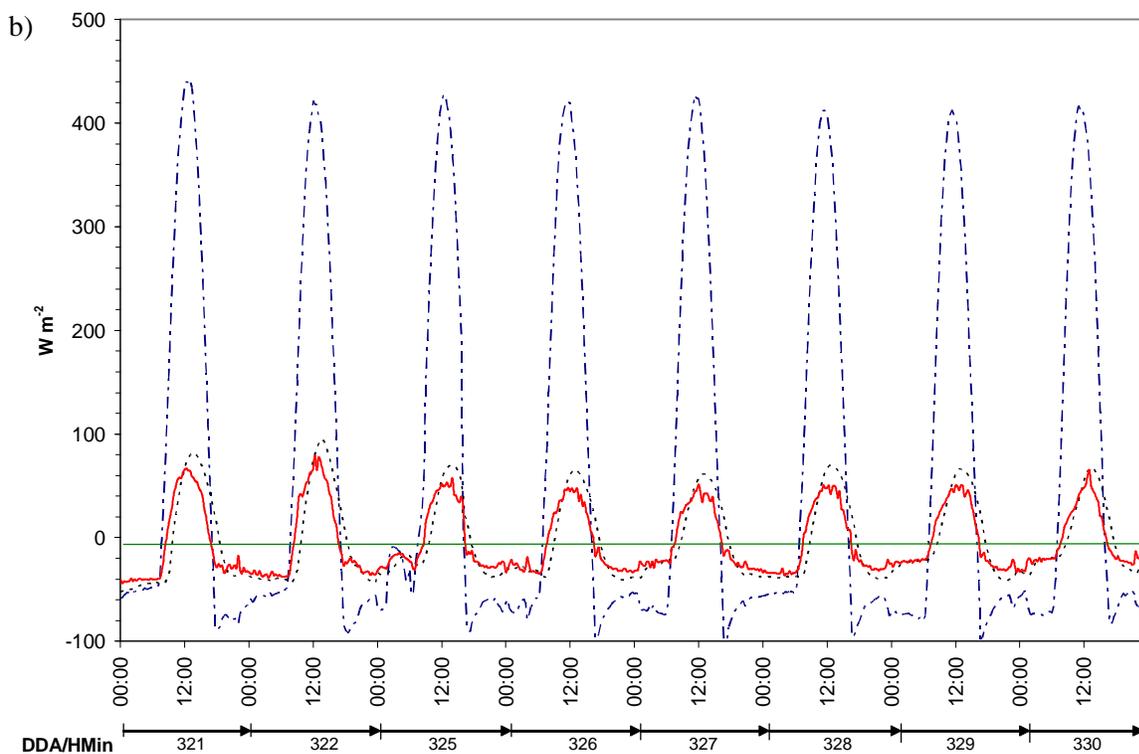
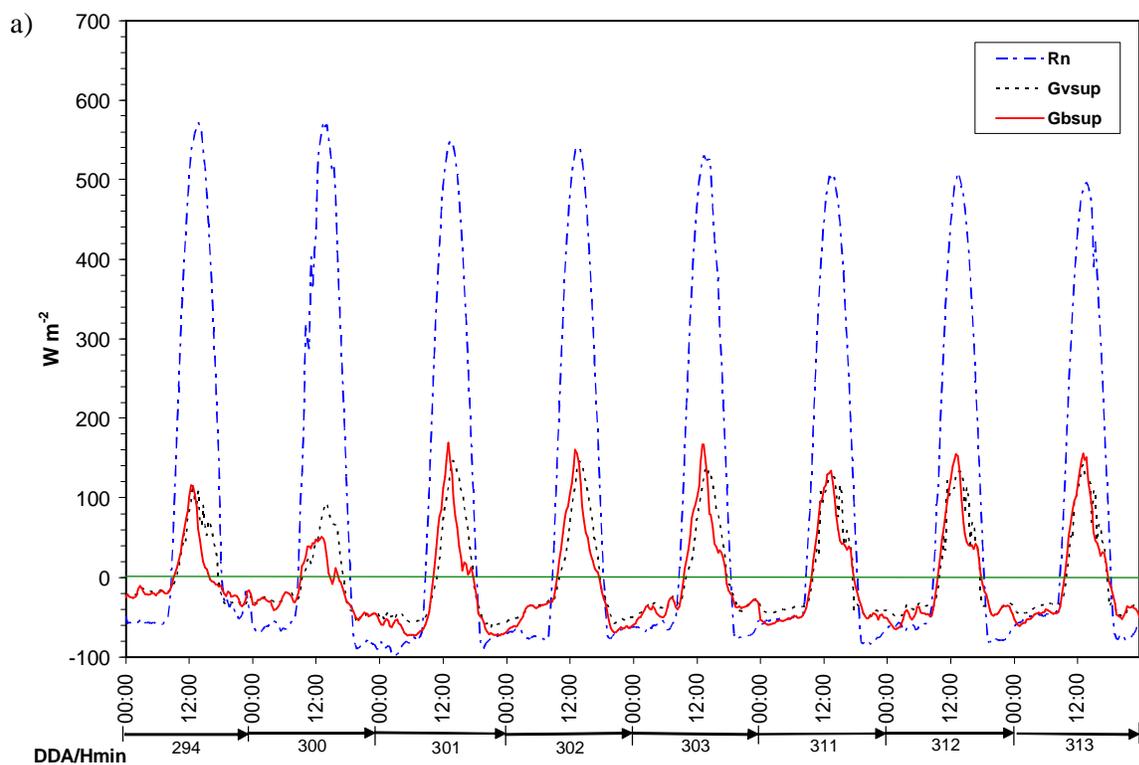
Comportamiento de R_n y G

El comportamiento de R_n y G_{D8} para cada tratamiento proviene de los valores instantáneos obtenidos directamente por los sensores ya descritos. Las Figuras 2, 3, 4 y 5 ilustran el comportamiento de R_n y G_x , mediante una línea discontinua para la primera, así como para G_{vsup} con una línea punteada y G_{bsup} con una línea continua. Este fenómeno, por lo tanto, corresponde a los cambios energéticos en la capa de suelo en el espesor definido a 8 cm, mismos que son calculados para la superficie con base en la Ecuación 7, cuya descripción es la siguiente:

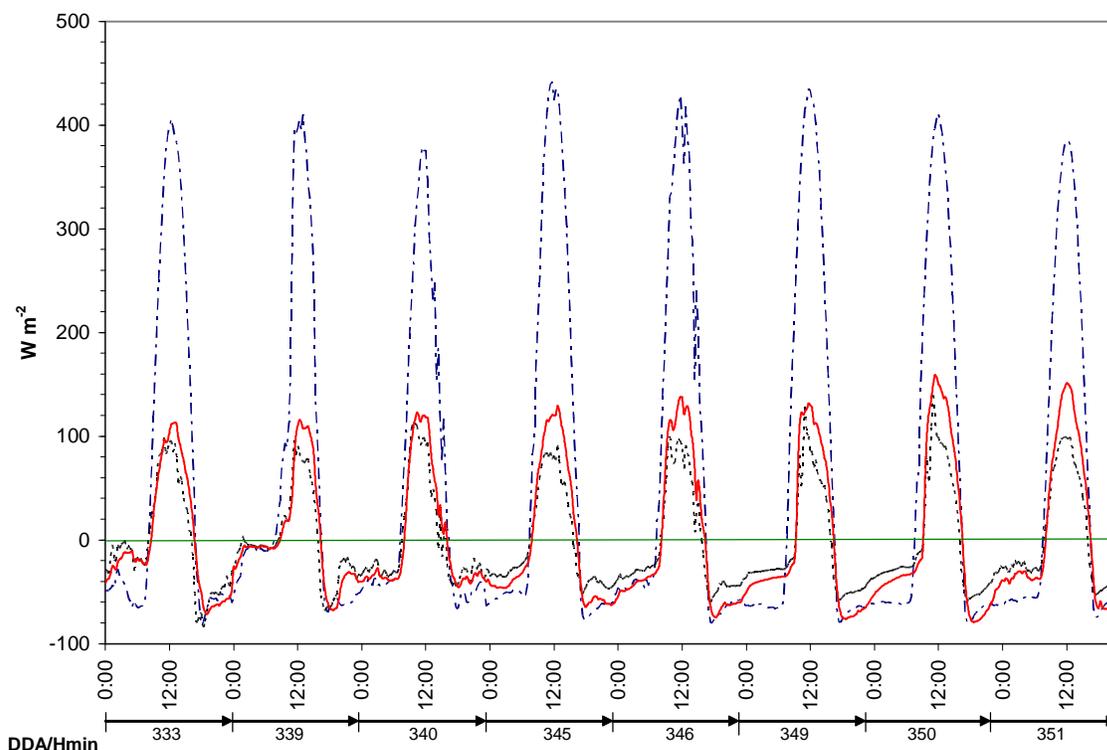
1) En las condiciones del tratamiento NL (Figura 2a), cuando R_n se encuentra en un intervalo entre -98 y 572 $W m^{-2}$ y su valor promedio es de 98 $W m^{-2}$, el comportamiento del flujo energético para ambas condiciones de suelo tiende a ser diferente; aunque, para G_{bsup} es evidente una mayor sensibilidad que en el suelo que está protegido con vegetación (G_{vsup}). Es decir, mientras que G_{bsup} alcanza sus valores máximos a las 13:00 h en G_{vsup} ocurre alrededor de las 14:00 h, debido a que cuando el mínimo y el máximo de G_{bsup} están entre -73 y 169 $W m^{-2}$, para G_{vsup} el rango está entre -64 y 146 $W m^{-2}$, lo cual representa una diferencia de 20 y 9 $W m^{-2}$ para el máximo y el mínimo, respectivamente.

2) Para el tratamiento LV (Figura 2b), cuando el intervalo de R_n está entre -98 y 442 y su promedio es de 73 $W m^{-2}$, G_x muestra un comportamiento con fluctuaciones marcadas y opuesto a lo ocurrido con el NL, tanto en los tiempos de ocurrencia como para los valores máximos de flujo energético. Aunque la ocurrencia de los valores máximos para ambas condiciones de suelo se adelanta aproximadamente una hora, las fluctuaciones sólo se presentan para G_{bsup} mediante cambios repentinos en el sentido en las curvas, tanto para valores diurnos como nocturnos. Los promedios mínimos y máximos también contrastan con NL; entre ambas condiciones, por ejemplo, cuando en G_{bsup} están entre -25 y 22 $W m^{-2}$, en G_{vsup} el intervalo es de -53 y 95 $W m^{-2}$, lo cual representa una diferencia de 73 y 28 $W m^{-2}$ para el máximo y el mínimo, respectivamente.

3) Para LC (Figura 3), cuando el intervalo de R_n está entre -83 y 442 y su promedio fue de 60 $W m^{-2}$ (igual al que se registró en LV), se observa que tiene un comportamiento muy parecido a NL y, por lo tanto, opuesto a LV. Es importante notar que los intervalos entre las variables observadas son más grandes, esto posiblemente debido a una mayor sensibilidad de G_{bsup} al efecto de la radiación, pues sus valores máximos están entre 100 y 160 $W m^{-2}$, seguido de G_{vsup} en el que los valores máximos están entre 90 y 140 $W m^{-2}$, cuyo tiempo de ocurrencia máxima en ambos se da alrededor de las 12:00 h. Además, hay que agregar que los promedios mínimos y máximos también contrastan con el tratamiento anterior, entre ambas condiciones; por ejemplo, cuando en G_{bsup} está entre -79 y 159 $W m^{-2}$ para G_{vup} el intervalo es de -84 y 139 $W m^{-2}$, lo cual representa una diferencia de 20 y 5 $W m^{-2}$, para el máximo y el mínimo, respectivamente.



Figuras 2. Radiación neta (Rn) y flujo de calor en suelo desnudo (Gbsup) y protegido con vegetación (Gvsup) en la superficie para 24 días típicos de otoño que corresponden a (a) suelo no disturbado (NL), (b) labranza vertical (LV).



Figuras 3. Radiación neta (Rn) y flujo de calor en suelo desnudo (Gbsup) y protegido con vegetación (Gvsup) en la superficie para 24 días típicos de otoño que corresponden a labranza convencional (LC).

Evaluación de Impacto

Para complementar la descripción anterior, en la Figura 4 se presenta una comparación de los coeficientes de variación asociados a los tratamientos, tanto para G_x como para G_{D8} . Esta comparación permite observar que la variabilidad en LC es menor que en LV, incluso contrasta Gbsup en el tratamiento LC por insignificante (0.01%). Del mismo modo, es importante señalar que el flujo energético a 8 cm de profundidad en ambos casos (Gv8cm y Gb8cm) presenta las variabilidades más altas por ser de 26.6 y 35.0%, respectivamente. En otras palabras, este comportamiento indica que LV produce una mayor variabilidad en el flujo de calor en el suelo que LC. Esto puede deberse a que el implemento provoca un incremento en el volumen de suelo y una disminución en el contenido de humedad, lo cual es consistente con lo mencionado por Ochsner *et al.* (2001).

Asimismo, los resultados del TTEST de las tres comparaciones al nivel de significancia estadística de 0.01 indica que entre el NL y LV la diferencia es altamente significativa para los valores absolutos de las cuatro

variables estudiadas; en la segunda comparación realizada entre NL y LC se observan diferencias significativas para las variables Gv8cm y Gvsup; y por último, para la comparación realizada entre LV y LC se detectaron diferencias para las variables Gb8cm, Gvsup y Gbsup. Esto significa que el suelo desnudo, si bien gana calor rápidamente, no es capaz de retenerlo o almacenarlo por mucho tiempo, pues al analizar los valores integrados G_x , en términos reales, disminuye su capacidad de almacenar energía en 40 y 60% con respecto a LC y NL, respectivamente; comportamiento que se aproxima a lo reportado por Ochsner *et al.* (2007).

Para aclarar lo anterior, en el Cuadro 1 se muestran las magnitudes absolutas promedio diarias que caracterizan el comportamiento de la energía, en $kW m^{-2}$, que teóricamente es almacenada en la capa de suelo a 8 cm de profundidad ($\Delta S = G_x - G_{D8}$), siendo el mismo tipo de suelo bajo los dos sistemas de labranza empleados con respecto a NL; los índices G_x/R_n que representan la proporción en que Rn es convertida a G_x ; así como la diferencia $R_n - G_x$, que representa la energía disponible en la superficie del suelo que podría ser convertida a

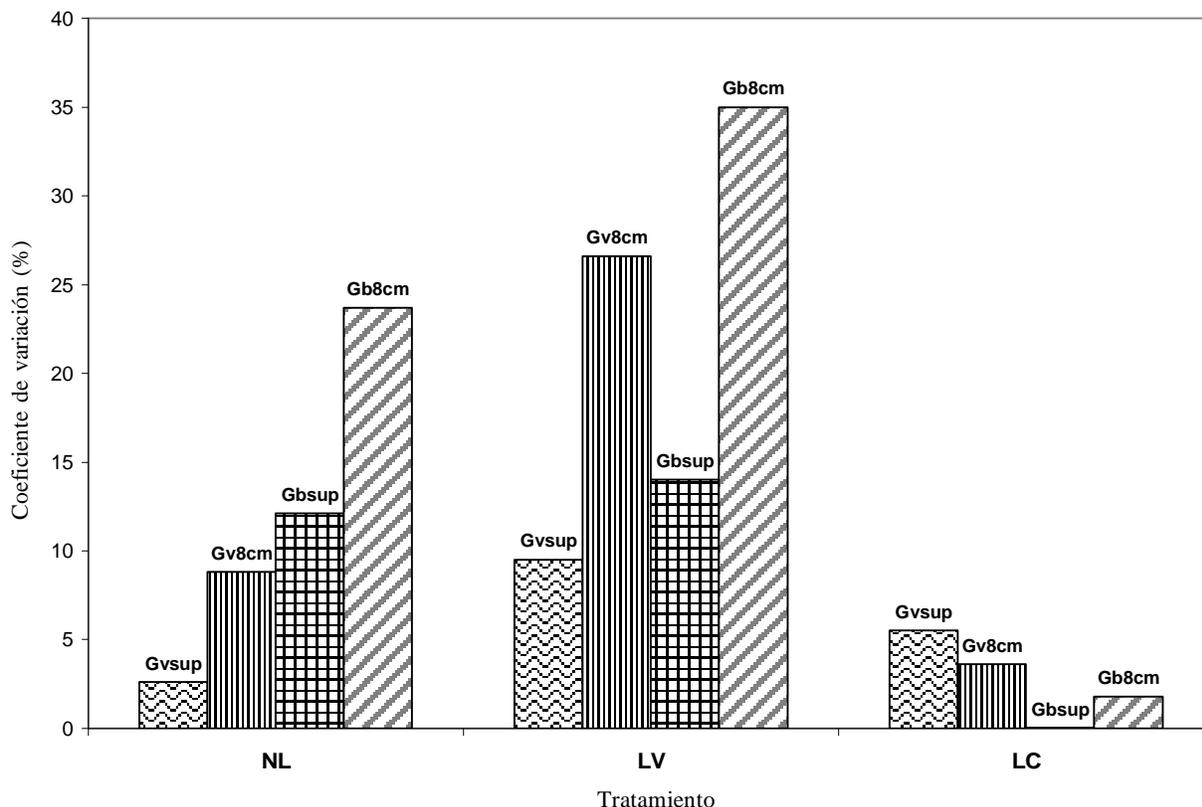


Figura 4. Comparación gráfica del coeficiente de variación asociado a suelo no disturbado (NL), labranza vertical (LV) y labranza convencional (LC) respecto al flujo de calor en suelo desnudo en la superficie (Gbsup), suelo desnudo a 8 cm de profundidad (Gb8cm), suelo protegido con vegetación en la superficie (Gvsup) y suelo protegido con vegetación a 8 cm de profundidad (Gv8cm).

LE y/o H, como quedó establecido inicialmente (Kizer y Elliott, 1991; Clark *et al.*, 2001; Massman y Lee, 2002; Ham y Heilman, 2003; Ochsner *et al.*, 2007).

En el Cuadro 1 se observa que, aunque para LV la magnitud de Rn es 19 kW m⁻², más grande que LC y más próxima a NL, sus índices son menores en ambos casos; además, el suelo en esa condición de manejo no es capaz de almacenar más de 37 kW m⁻², que trae como consecuencia una mayor disponibilidad de energía en la superficie.

Se ha comentado con anterioridad que las prácticas de labranza ejercen cambios importantes en el suelo, si bien algunos benéficos, otros podrían ser perjudiciales, pero de las propiedades del suelo que más son afectadas es la porosidad por efecto de los cambios en la densidad aparente que, en términos físicos, representa la forma en que las partículas de suelo son reempacadas en el mismo volumen de suelo (Moroizumi Y Horimo, 2002; Cadena-Zapata *et al.*, 2004; Udawatta *et al.*, 2008); de manera específica, la profundidad y el ancho de trabajo,

Cuadro 1. Índices Gx/Rn y magnitudes absolutas promedio diarias de los valores integrados de la energía en kW m² para Rn, DSx, y Rn-G.

Tratamiento	Rn	ΔSveg	Gveg/Rn	Rn-Gvsup	ΔSbar	Gbar/Rn	Rn-Gbsup
----- kW m ⁻² -----							
Suelo no disturbado	249	60	0.16	164	43	0.14	167
Labranza vertical	200	37	0.13	126	34	0.12	127
Labranza convencional	181	52	0.20	107	53	0.29	95

Gx/Rn = índice que relaciona el flujo energético en el suelo protegido con vegetación o suelo desnudo y la radiación neta; ΔSveg = energía almacenada en la capa de suelo protegido con vegetación; Gveg/Rn = índice que relaciona el flujo energético en el suelo protegido con vegetación y la radiación neta; ΔSbar = energía almacenada en la capa de suelo desnudo; Gbsup = flujo de energía en la superficie de suelo desnudo.

así como el modo de ataque de los implementos contribuyen en los cambios en distribución, forma y continuidad de poros, procesos que han sido discutidos en función de los diferentes sistemas de manejo del suelo (González-Cervantes *et al.*, 2004a;b).

Desde el punto de vista energético, lo anterior indica que LC es una práctica que contribuye en la retención y el almacenamiento de la energía en la capa del suelo estudiada, mientras que LV influye negativamente en este fenómeno. Se estima que su magnitud representa 15 y 25% para G_{vsup} y G_{bsup} , respectivamente. Esto significa que, en LV, la energía proveniente del sol como longitud de onda corta y longitud de onda larga tendrá menos atenuación en la superficie del suelo, lo cual contribuirá de acuerdo con la ley de la conservación de la energía, en el flujo de calor latente y flujo de calor sensible (Ochsner *et al.*, 2001; 2007; Deru, 2003; Prunty y Bell, 2005), que se expresan en mayores índices de aridez, reportado con anterioridad sobre todo para regiones del noreste de México, que corresponden justamente a la zona donde se realizó el presente estudio (UACH-CONAZA-SEDESOL-SAGARPA, 2004).

Análisis de Regresión

También es importante mencionar que en el análisis de regresión donde se definieron como variables dependientes a G_{vsup} y G_{bsup} y los valores positivos de R_n en el intervalo de 0.12 hasta 573 W m⁻², como variable independiente, pese a que se observaron tendencias lineales semejantes como se muestran en las Figuras 5a y b. Desde el punto de vista estadístico (Little y Hills, 1987), los variables obtenidos de este análisis confirman que el flujo de calor en el suelo desnudo es menos predecible que cuando se encuentra protegido con vegetación. Basta observar los valores de R^2 ($G_{vsup} = 0.644$ y $G_{bsup} = 0.494$), así como sus coeficientes de correlación que son + 0.8 y + 0.7, respectivamente. Esto, probablemente se debió a que el suelo desnudo se calentó y se enfrió mucho más rápido que el suelo protegido con vegetación. La alta sensibilidad del suelo desnudo, bajo el efecto de la radiación, teóricamente se debió a la pérdida acelerada de la humedad por la eliminación de la vegetación realizada por las operaciones de labranza, lo cual coincide con lo mencionado por Ham y Heilman (2003) y Ochsner *et al.* (2007).

CONCLUSIONES

- Al comparar los valores instantáneos a 8 cm de profundidad (G_{D8}) y los estimados para la superficie (G_{s_x}) para ambas condiciones de suelo (cubierto con vegetación y suelo desnudo), entre el suelo no disturbado (NL) y los dos tratamientos de labranza, labranza vertical (LV) y labranza convencional (LC), se distinguen modificaciones en las magnitudes y los tiempos de ocurrencia de G , donde se detectaron dos características fundamentales: i) entre NL y LC hay un comportamiento muy parecido, pero muy diferente con respecto a LV; y ii) la acción directa de los implementos de labranza sobre la cubierta vegetal modifica el comportamiento de flujo de calor disminuyendo o incrementando su sensibilidad al efecto de la radiación neta (R_n) sobre la superficie.
- La labranza produce modificaciones en las relaciones de flujo de calor en el suelo, lo cual, aunado a los efectos del cambio climático, en particular por el incremento de la temperatura en las regiones más secas de México, debe ser valorado debidamente, no sólo porque el flujo de calor en el suelo es uno de los componentes más importantes del balance de energía, sino porque se relaciona con procesos físicos, químicos y biológicos que se verifican en la capa del suelo.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido posible gracias al apoyo otorgado por la UAAAN y el CONACYT. Especialmente la División de Ingeniería por medio de los Departamentos de Ingeniería Mecánica Agrícola, Riego y Drenaje y Suelos. Se agradece también a los Ingenieros Teodoro Hernández Hernández e Ismael Vargas Martínez, con quienes se realizó buena parte de la investigación en esta etapa, así como a los responsables del rancho "Los Ángeles", por su notable participación y las facilidades otorgadas.

LITERATURA CITADA

- Cadena-Zapata, M., T. Gaytán-Muñoz y A. Zermeño-González. 2004. Desempeño de implementos en términos de consumo de energía y calidad de trabajo. *Revista Agraria-Nueva Época* 1(3): 12-17.
- Clark, D. A., S. Brown, D. W. Kicklighter, J. Q. Chambers, J. R. Thomlinson, and J. Ni. 2001. Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. *Ecol. Applic.* 11: 356-370.

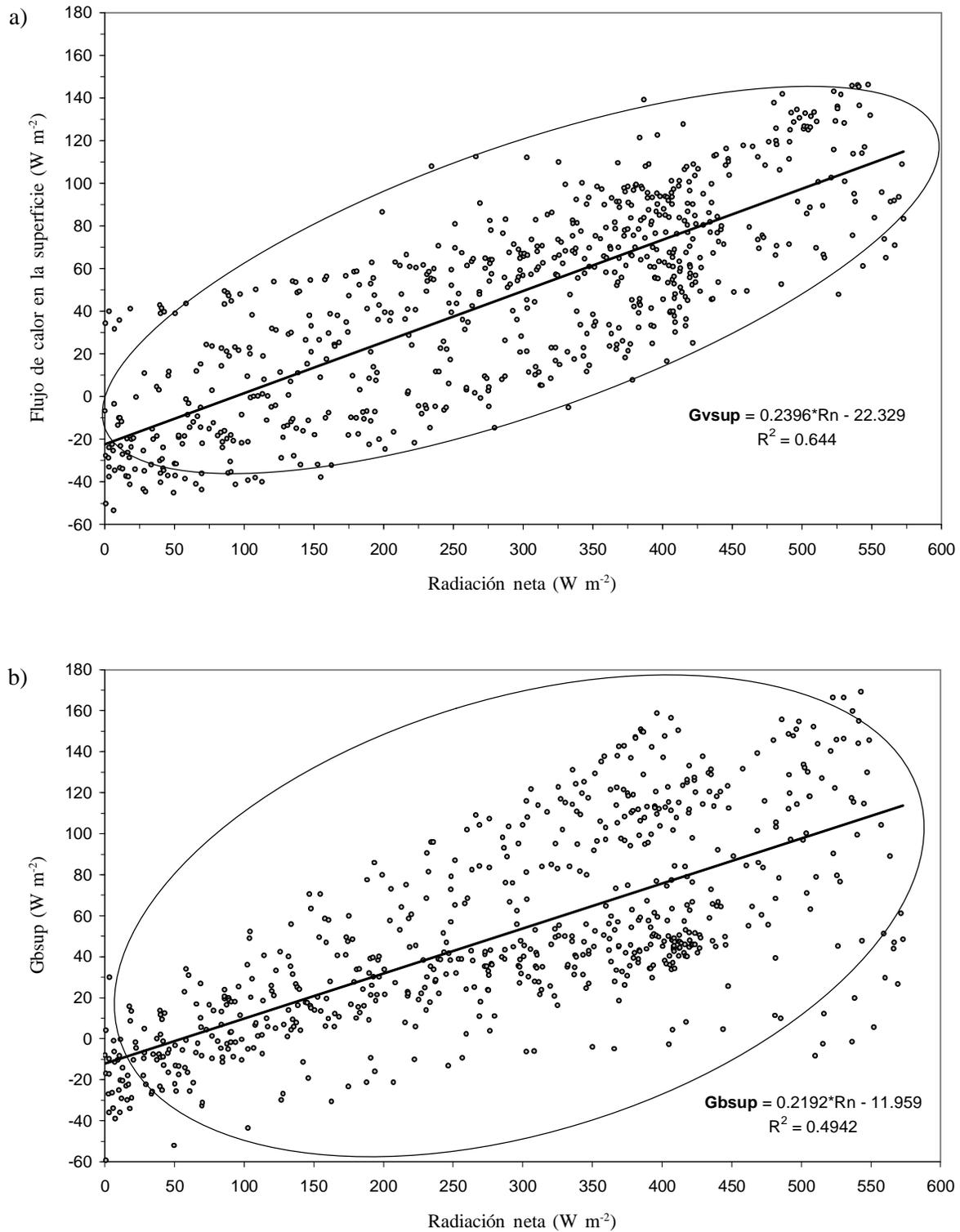


Figura 5. Modelos de regresión que relacionan el flujo energético en la superficie del suelo protegido con vegetación (a) y flujo de energético en la superficie del suelo desnudo (b).

- Deru, M. 2003. A model for ground-coupled heat and moisture transfer from buildings. Technical report. National Renewable Energy Laboratory. Golden Colorado, CO, USA.
- Drury, C. F., Ch. Sh. Tan, T. W. Welacky, T. O. Oloya, A. S. Hamill, and S. E. Weaver. 1999. Red clover and tillage influence on soil temperature, water content, and corn emergence. *Agron. J.* 91: 101-108.
- Elias, E. A., R. Cichota, H. H. Torriani, and Q. de Jong van Lier. 2004. Analytical soil-temperature model: correction for temporal variation of daily amplitude. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 784-788.
- FAO-ISRIC-ISSS-AISS-IBG. 1994. World reference base for soil resources. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.
- García, E. 1975. Climas Coahuila y Nuevo León, precipitación y probabilidad de lluvia en la República Mexicana y su evolución. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. México, D. F.
- González-Cervantes, G., I. Sánchez-Cohen y D. García-Arellano. 2004a. Relaciones entre el manejo del huerto de nogal y la porosidad del suelo. *Terra Latinoamericana* 22: 279-287.
- González-Cervantes, G., I. Sánchez-Cohen y J. P. Rossignol. 2004b. Morfología de poros de circulación preferencial del agua en el suelo mediante técnicas de análisis de imagen. Caso de una cuenca del norte de México. *Ingeniería Hidráulica en México* 19: 15-23.
- Ham, J. M. and J. L. Heilman. 2003. Experimental test of density and energy-balance corrections on carbon dioxide flux as measured using open-path eddy covariance. *Agron. J.* 95: 1393-1403.
- Hatfield, J. L., J. H. Prueger, and W. P. Kustas. 2007. Spatial and temporal variation of energy and carbon fluxes in Central Iowa. *Agron. J.* 99: 285-296.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1976. Cartografía de los temas: edafológica, geológica, topográfica y vegetación y uso del suelo. Cubrimiento: Agua Nueva (G14-C43) y Huachichil (G14-C44). Escala 1:50 000. Subdirección de Geografía/INEGI. México, D. F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2001. Base de datos geográficos, diccionario de datos edafológicos (alfanumérico). http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/normatividad/diccio/edaf_alf.pdf (Consulta: abril 24, 2007).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Climate change 2007: climate change impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. 4th Assessment report. Geneva, Switzerland.
- Kizer, M. A. and R. L. Elliott. 1991. Eddy correlation systems for measuring evapotranspiration. *Trans. ASAE* 34: 387-392.
- Lipiec, J., B. Usowicz, and A. Ferrero. 2006. Management effects of sloping vineyard on thermal properties of soil. International Soil Tillage Research Organization. 17th Triennial Conference. Kiel, Germany
- Little, T. M. and F. J. Hills. 1987. Statistical methods in agricultural research. Séptima reimpression en español. Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura. Trillas. Méxicio, D. F.
- Massman, W. J. and X. Lee. 2002. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agric. For. Meteorol.* 113: 121-144.
- Moroizumi, T. and H. Horino. 2002. The effects of tillage on soil temperature and soil water. *Soil Sci.* 167: 548-559.
- Noborio, K., K. J. McInnes, and J. L. Heilman. 1996. Measurements of soil water content, heat capacity, and thermal conductivity with a single TDR probe 1. *Soil Sci.* 161: 22-28.
- Ochsner, T. E., R. Horton, and T. Ren. 2001. A new perspective on soil thermal properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1641-1647.
- Ochsner, T. E., T. J. Sauer, and R. Horton. 2006. Field test of the heat flux plate method and some alternatives. *Agron. J.* 98: 1005-1014.
- Ochsner, T. E., T. J. Sauer, and R. Horton. 2007. Soil heat storage measurements in energy balance studies. *Agron. J.* 99: 311-319.
- Prunty, L. and J. Bell. 2005. Soil temperature change over time during infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 766-775.
- Rebolledo-Robles, H. H. 2002. Manual SAS por computadora: análisis estadístico de datos experimentales. Trillas. México, D. F.
- SAS Institute. 2006. User's guide. Release 0.13. Statistics. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Sauer, T. J. and P. J. Pinter. 2007. Introduction to the symposium "Progress in radiation and energy balance measurement systems". *Agron. J.* 99: 238-239.
- UACH-CONAZA-SEDESOL-SAGARPA. 2004. Escenarios climatológicos de la República Mexicana ante el cambio climático. Universidad Autónoma Chapingo, CONAZA, Dirección de Vinculación y Transferencia de Tecnología, SEDESOL y SAGARPA. México, D. F.
- Udawatta, R. P., S. H. Anderson, C. J. Gantzer, and H. E. Garrett. 2008. Influence of prairie restoration on CT-measured soil pore characteristics. *J. Environ. Qual.* 37: 219-228.



ISSN:0186-3231

revista chapingo

Serie ZONAS ARIDAS

Volumen 7 Número 1 (Enero – Junio) 2008



Publicación semestral de difusión de la investigación científica y tecnológica en zonas áridas



Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas
Universidad Autónoma Chapingo

Rev. Chapingo Z. Aridas. 2008. Vol. 7 Núm 1: 1-132 ISSN:0-186-3231 Bermejillo, Durango. México.
<http://www.chapingo.uruza.edu.mx>

DIRECTORIO DE LA UACH

DR. AURELIANO PEÑA LOMELI
Rector

DR. MARCOS PORTILLO V.
Director General Académico

DR. HÉCTOR LOZOYA SALDAÑA
Director General de Investigación y
Postgrado

DR. JESUS MA. GARZA LOPEZ
Director General Administrativo

M.C. IGNACIO MIRANDA
VELASQUEZ
Director General de Patronato
Universitario

M.I. MARTIN SOTO ESCOBAR
Director General de Difusión Cultural y
Servicios

Jefe del Depto. de Publicaciones

M.C. JAIME RUVALCABALIMON
Director de la División de Ciencias
Económico-Administrativas

M.C. ANGELLEYVA OVALLE
Director de la División de Ciencias
Forestales

ING. VICTOR M. MENDOZA C.
Director de Fitotecnía

DR. LUIS R. GARCIA CHAVEZ
Director de Ingeniería Agroindustrial

M.C. RENE MARTINEZ ELIZONDO
Director de Irrigación

M.C. ALVARO LLAMAS GLZ.
Director de Ingeniería Mecánica Agrícola

M.C. JUAN A. CRUZ RODRIGUEZ
Director de Agroecología

DR. JUAN F. SOLIS AGUILAR
Director de Parasitología Agrícola

M.C. ELEAZAR AGUIRRE M.
Director de Preparatoria Agrícola

DR. JOSE A. CASTELLANOS S.
Director de Sociología Rural

M.C. JOSE A. MALDONADO E.
Director de Suelos

ING. JOSE JAIME GARCIA HDZ.
Director de Zonas Áridas

DR. CARLOS MARCO ALVAREZ
Director de Zootecnia

DR. ALEJANDRO F. BARRIENTOS P.
Coordinador de Revistas Institucionales

DR. ADOLFO RODRIGUEZ CANTO
Coord. Comité Universitario Publicaciones

CONSEJO EDITORIAL

M.C. José Ruiz Torres
Editor en Jefe

Dr. Rafael Castro Franco
Dr. Ricardo Trejo Calzada
Dr. Aurelio Pedroza S.
Editores Adjuntos

Lic. Saúl Flores Alvarez
Editor de Estilo

M.Sc. Buenaventura Reyes Ch
Editor Lengua Inglesa

M.C. José Manuel Cisneros V.
Editor Web
www.chapingo.uruza.edu.mx

Dr. César Alberto Meza H.
Dr. Arnoldo Flores Hernández
M.C. Manuel de J. Azpícueta
Dr. Armando González Palma
M.C. José R. Hernández S.

**Comité Asesor Editorial
Interno URUZA-UACH**

Dr. Ignacio Sánchez Cohen
M.C. Leopoldo Moreno Díaz
**Asesor Editorial Externo
CENID-RASPA. INIFAP**

Dr. Angel Lagarda M.
Dr. Jesús E. Cantú Brito
Dr. Arturo Palomo Gil
**Asesor Editorial Externo
UAAAN-UL**

Dr. Uriel Figueroa V.
Dr. Gregorio Núñez H.
**Asesor Editorial Externo
INIFAP-LAGUNA**

Dr. Jeffrey Stone
Dr. Jeff Herrick
USDA-ARS
Dra. Alba Yadira Corral A.
Applied Sciences Laboratory
Sta. Teresa, N.M.
Asesor Internacional

Nuestra Portada: Actividades realizadas por los alumnos del Propedéutico I y II Ciclo 2008-2009, en el Rancho "Chorreños", en el Estado de Durango.

Revista Chapingo (ISSN 0186-3231), es una publicación periódica con arbitraje que difunde información científica y tecnológica, desde 1927. A partir de 1994, se publica en las siguientes series: Horticultura, Ingeniería Agrícola, Zootecnia (1995), Ciencias Forestales (1995), Ingeniería Agropecuaria (1998) y Zonas Áridas (2000).

La Revista Chapingo Serie Zonas Áridas es una publicación semestral con arbitraje que difunde información científica y tecnológica relacionada al mejor uso y manejo de los recursos naturales de zonas áridas y semiáridas. Las formas de publicación son: artículos por invitación o proposición, notas científicas en español, inglés de investigadores y/o profesores de Instituciones Nacionales e Internacionales. Publicación dos números por volumen por año. Envío de trabajos y solicitud de suscripción a Revista Chapingo: Serie Zonas Áridas. Apartado Postal 8 Bermejillo, Dgo., 35230. MEXICO. Tels. 01(872)7760160, 7760043, Internet: <http://chapingo.uruza.edu.mx>

Se permite la reproducción parcial o total de los artículos mencionando nombre del autor y de la Revista Chapingo Serie Zonas Áridas. Los artículos expresan las opiniones de sus autores y no el punto de vista de la Revista Chapingo, ni de la Universidad Autónoma Chapingo.

revista

Chapingo

Serie: ZONAS ARIDAS

Publicación semestral de difusión de la investigación científica y tecnológica en zonas áridas

Vol. VII Núm. 1 (Enero-Junio) 2008

Contenido

- | v | Editorial |
|-------|--|
| 1-5 | FLUJOS DE CO ₂ Y LE MEDIDOS CON CAMARAS DE INTERCAMBIO DE GAS Y SENSORES DE IR BAJO CONDICIONES DE CIELO ABIERTO
A. López Santos y J. A. Gil Marín |
| 7-14 | RESPUESTA DEL NOGAL PECANERO (<i>Carya illinoensis</i> K. Koch) A LAS APLICACIONES FOLIARES DE NUTRIMENTOS
G. Vargas Piedra y J. G. Arreola Avila |
| 15-19 | COMPORTAMIENTO REPRODUCTIVO DE LA LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA (<i>Eisenia fetida</i>) EN DIFERENTES SUSTRATOS
J.A. Ortiz Mejiaz, J.S. Rodríguez López, J.G. Arreola Ávila, J.S. Méndez Rivera, E. Santamaría César y J.M. Cisneros Vázquez |
| 21-27 | DINAMICA POBLACIONAL DE LAS PRINCIPALES PLAGAS DE NOPAL OPUNTIA SPP. EN LA ZONA SEMIÁRIDA DE QUERETARO
A. Vargas Mendoza, A. Flores Hernández y J.F. Basaldua Suárez |
| 29-35 | MICRONUTRIMENTOS SOLUBLES EN VERMICOMPOSTA
L.Y. Rivera Olivares, L.i. Trejo Téllez, F.C. Gómez Merino, M. Ramírez Gómez, J.S. Méndez Rivera y J.M. Cisneros Vázquez |
| 37-45 | PROPUESTA DE DESARROLLO ECOTURISTICO EN "EL OCOTILLO" MUNICIPIO DE VIESCA, COAHUILA
J. Hernández Carrizal, A. González Palma, J.L. Blando Navarrete |
| 47-56 | EVALUACION DE INSECTICIDAS ALTERNATIVOS PARA EL CONTROL DE PARATRIOZA (<i>Bactericera cockerelli</i> B. y L.)(HOMOPTERA: TRIOZIDAE) EN EL CULTIVO DE CHILE JALAPEÑO (<i>Capsicum annum</i> L.)
M. Ramírez Gómez, E. Santamaría César, J.S. Méndez Rivera, J.L. Rios Flores, J.R. Hernández Salgado, J.G. Pedro Mendez |

- 57-64 EFECTO DEL DESPUNTE EN VERDE EN LA PRODUCCION DE REBROTOS LATERALES EN BROTES DE NOGAL PECANERO (*Carya illinoensis* K. Koch)
P. López Simancas, J. Arreola Avila**
- 65-72 EFECTO DEL POLIMERO AQUASTOCK(R) EN LA CAPACIDAD DE RETENCION DE HUMEDAD DEL SUELO Y SU EFECTO EN EL RENDIMIENTO DE LA ACELGA (*Beta vulgaris var cycla*)
I. de J. Gutiérrez Castañeda, I. Sánchez Cohen, J. Cueto Wong, R. Trucios Caciano, R. Trejo C. y A. Flores Hernández**
- 73-82 EVALUACION DE FERTILIZANTES SOBRE LA AVENA FORRAJERA
D. Trujano San Luis, A. González Palma, J. Jaimes Jaimes, J.A. Cueto Wong, y J.R. Hernández Salgado**
- 83-90 SUPLEMENTACION DE BETACAROTENO, ACTIVIDAD OVARICA Y NIVELES SERICOS DEL FACTOR DE CRECIMIENTO A INSULINA TIPO 1 EN CABRAS BAJO FOTOPERIODO CRECIENTE
C.A. Meza Herrera y G. Amaya García**
- 91-105 EVALUACION DE LA EFICIENCIA PRODUCTIVA Y REPRODUCTIVA DE VAQUILLAS HOLSTEIN FRIESIAN IMPORTADAS A LA COMARCA LAGUNERA, MEXICO
M. Velázquez Martínez y J.R. Hernández Salgado**
- 107-113 SUPLEMENTACION DE AMINOACIDOS EXCITADORES, ACTIVIDAD OVARICA Y NIVELES SERICOS DEL FACTOR DE CRECIMIENTO ANALOGO A INSULINA-1 EN CABRAS BAJO FOTOPERIODOS CRECIENTES
C.A. Meza Herrera, J.E. Valle Moysen y H. Salinas**
- 115-124 GANADERIZACION DEL PATRON AGRICOLA Y SU IMPACTO EN EL EMPLEO RURAL EN LA AGRICULTURA BAJO RIEGO POR GRAVEDAD EN LA COMARCA LAGUNERA, MEXICO DE 1990 A 2005
J.L. Rios Flores, M. Torres Moreno, S. Flores Alvarez, J.L. Blando Navarrete y R.G. Rojas Calderón**
- 125-132 CRECIMIENTO PRE Y POSDESTETE EN CABRAS BOER x BOER Y BOER x NUBIA EN EL ALTIPLANO MEXICANO
C.A. Meza Herrera, J.M. Medina Rosales y A. Gómez González**

revista

Chapingo

Serie: ZONAS ARIDAS

Publicación semestral de difusión de la investigación científica y tecnológica en zonas áridas
Vol. VII Núm. 1 (Enero-Junio) 2008

Contents

- | | |
|-------|---|
| v | Editorial |
| 1-5 | CO ₂ AND LE FLUXES MEASURED WITH INTERCHANGE GAS CHAMBER AND IR SENSORS UNDER OUTDOOR CONDITIONS
A. López Santos y J. A. Gil Marín |
| 7-14 | PECAN TREE RESPONSE (<i>Carya illinoensis</i> K. Koch) TO FOLIAR NUTRIENTS APPLICATIONS
G. Vargas Piedra y J. G. Arreola Avila |
| 15-19 | RED CALIFORNIAN WORM (<i>Eisenia fetida</i>) REPRODUCTIVE BEHAVIOR UNDER DIFFERENT SUBSTRATES
J.A. Ortiz Mejiaz, J.S. Rodríguez López, J.G. Arreola Ávila, J.S. Méndez Rivera, E. Santamaría César y J.M. Cisneros Vázquez |
| 21-27 | POPULATION DYNAMICS OF MAJOR PESTES IN PRICKLY PEAR (<i>Opuntia</i> sp) AT QUERÉTARO ARID LANDS
A. Vargas Mendoza, A. Flores Hernández y J.F. Basaldua Suárez |
| 29-35 | SOLUBLE MICRONUTRIENTS IN VERMICOMPOST
L.Y. Rivera Olivares, L.I. Trejo Téllez, F.C. Gómez Merino, M. Ramírez Gómez, J.S. Méndez Rivera y J.M. Cisneros Vázquez |
| 37-45 | ECOTURISTIC PROYECT IN "EL OCOTILLO", VIESCA, COAHUILA, MEXICO. A PROPOSAL
J. Hernández Carrizal, A. González Palma, J.L. Blando Navarrete |
| 47-56 | ALTERNATIVE INSECTICIDES EVALUATION FOR PARATRIOZA (<i>Bactericera cockerelli</i> B. y L.) CONTROL IN A JALAPENO PEPPER (<i>Capsicum annum</i> L.) CULTIVAR
M. Ramírez Gómez, E. Santamaría César, J.S. Méndez Rivera, J.L. Rios Flores, J.R. Hernández Salgado, J.G. Pedro Mendez |

- 57-64* FRESH TIP PRUNING EFFECT ON LATERAL SPROUTING PRODUCTION OF PECAN TREES (*Carya illinoensis* K. Koch) SHOOTS
P. López Simancas, J. Arreola Avila
- 65-72* EFFECT OF AQUASTOCK POLYMER UPON SOIL WATER RETENTION CAPACITY AND ITS EFFECT ON ACELGA YIELD
I. de J. Gutiérrez Castañeda, I. Sánchez Cohen, J. Cueto Wong, R. Trucios Caciano, R. Trejo C. y A. Flores Hernández
- 73-82* ORGANIC, CHEMICAL AND COMBINED FERTILIZERS EVALUATION ON FORAGE OATS QUALITY AND YIELD
D. Trujano San Luis, A. González Palma, J. Jaimes Jaimes, J.A. Cueto Wong, y J.R. Hernández Salgado
- 83-90* BETA CAROTENE SUPPLEMENTATION, OVARIAN ACTIVITY AND SERICEDUS LEVELS OF INSULIN TYPE 1 GROWTH FACTOR IN GOATS UNDER INCREASED PHOTOPERIOD
C.A. Meza Herrera y G. Amaya García
- 91-105* PRODUCTIVE AND REPRODUCTIVE EFFICIENCY EVALUATION OF HOLSTEIN-FRIESIAN IMPORTED HEIFERS TO THE COMARCA LAGUNERA, MEXICO
M. Velázquez Martínez y J.R. Hernández Salgado
- 107-113* EXCITATORY AMINO ACID SUPPLEMENTATION, TOTAL OVARIAN ACTIVITY AS WELL AS SERUM CONCENTRATIONS OF INSULIN-LIKE GROWTH FACTOR-1 (iGF-1) IN ADULT GOATS UNDER INCREASED PHOTOPERIODS
C.A. Meza Herrera, J.E. Valle Moysen y H. Salinas
- 115-124* FARMING TO LIVESTOCK PRODUCTION PATTERN SHIFT AND ITS IMPACT ON RURAL EMPLOYMENT UNDER GRAVITY IRRIGATION AGRICULTURE IN THE COMARCA LAGUNERA, MÉXICO, FROM 1990-2005
J.L. Rios Flores, M. Torres Moreno, S. Flores Alvarez, J.L. Blando Navarrete y R.G. Rojas Calderón
- 125-132* PRE AND POST WEANING (Boer x Boer and Boer x Nubian) GOATS GROWTH IN THE MEXICAN PLATEAU
C.A. Meza Herrera, J.M. Medina Rosales y A. Gómez González

La escritura como herramienta de investigación

Saúl Flores Alvarez

Durante la mayor parte de nuestra existencia estamos comunicándonos verbalmente y para ello empleamos el lenguaje hablado o escrito en diferentes niveles, con el propósito de producir una respuesta por parte de una persona o grupo de personas.

Circuitos de Comunicación

En el sistema de comunicación de la ciencia y tecnología, se da un núcleo comunicativo y a partir de este se irradia y amplía la comunicación a circuitos cada vez más extensos en auditorio. En el núcleo se presupone que la relación es entre pares, iguales o colegas que comparten un marco común de referencia y de discurso y que comunican sus intentos, avances, fracasos, postulados, resultados parciales o finales de sus hallazgos o descubrimientos para los cuales buscan estímulo, crítica, cooperación o reconocimiento de la comunidad científica a la cual se consideran pertenecer.

El motivo de la necesidad de dar a conocer los esfuerzos y los resultados, además de ser ya una norma tradicional del sistema, tiene un carácter grupal que pone de manifiesto por una parte, el grado de relación del investigador con la sociedad y por otra, la concepción de su función social frente a su actividad misma. La necesidad de investigar se establece a través del modelo "intercambio y reconocimiento" o participación-recompensa-reconocimiento.

La revista científica

El artículo científico es el medio de publicación mayormente utilizado por los investigadores en el campo de las ciencias exactas y naturales. La publicación del trabajo científico en revistas, tiene la ventaja de asegurar una mayor y rápida difusión entre el público especializado, que es el que interesa al emisor en el núcleo del proceso de la comunicación científica y técnica.

El propósito de esta reflexión es presentar algunos elementos que permitan evaluar la tendencia de las contribuciones publicadas.

Revista Chapingo Zonas Aridas

Como proyecto base se utilizó el elaborado por: Almaguer Vargas, Gustavo. 1995. Proyecto: política editorial universitaria. UACH. Dirección de Difusión Cultural. Depto. de Publicaciones. Chapingo. México. 51 p.

El diseño gráfico, formato y corrección, ha estado a cargo de Clelia Morán López.

Internet

Las obras trascendentes, la información y los resultados de investigación tradicionalmente eran difundidas a través de impresos en papel.

Actualmente el acceso a la información está basada en tecnologías Web en revistas electrónicas (e-revista). Esta herramienta de difusión es indispensable para estar al día sobre lo que se realiza en investigación.

La difusión de revistas científicas en formato electrónico han tenido una creciente demanda y su presencia en internet permite a los lectores el acceso a artículos de su interés. Bajo esta nueva tecnología la Revista Chapingo Serie Zonas Aridas (Semestral) es difundida desde Julio 28 del 2004, bajo la supervisión del M.C. José Manuel Cisneros Vázquez, Editor Web y Coordinador del Centro de Cómputo URUZA-UACH. Puede ser accesada dentro de la página web de URUZA: www.chapingo.uruza.edu.mx; disponible desde Vol 1, hasta Vol. 6(1), once números (2000-2007). La contribución de los artículos científicos a publicar son enviados por e-mail: cmoranl@chapingo.uruza.edu.mx o bien en la forma tradicional de correo postal: URUZA-Rev. Chapingo Zonas Aridas, Apartado Postal 8. Bermejillo, Dgo., C.P. 35230. Durango, México.

Autores y Coautores

A la fecha la Revista Chapingo Serie Zonas Aridas, se han editado once números en seis volúmenes (1-6(1)), que se integraron con 140 artículos, que tratan de 34 temas entre cultivos y especies. Los autores y coautores representan a 37 Instituciones de enseñanza e investigación, nacionales e internacionales.

Características

Los artículos de autor único son escasos y alta la participación de varios autores ($R=2.5-3.8$). En cuanto al idioma predomina el idioma español, siendo casi nulo en idioma inglés. Respecto a la procedencia por país, predomina México. El título de la Revista Chapingo Zonas Aridas, no está indizada en los repertorios bibliográficos especializados.

FLUJOS DE CO₂ Y LE MEDIDOS CON CÁMARAS DE INTERCAMBIO DE GAS Y SENSORES DE IR BAJO CONDICIONES DE CIELO ABIERTO

CO₂ AND LE FLUXES MEASURED WITH INTERCHANGE GAS CHAMBER AND IR SENSORS UNDER OUTDOOR CONDITIONS

¹ A. López Santos y ²J. A. Gil Marín

¹ Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la UACH, Bermejillo, Dgo. México (alopez@chapingo.uruz.edu.mx); ² Programa de Postgrado en Ingeniería en Sistemas de Producción, UAAAN. Buenavista Saltillo, Coah. México

RESUMEN. En principio, las cámaras de intercambio de gases (CIG) han sido utilizadas ampliamente para medir flujos de dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua (LE), principales componentes de la respiración del suelo, y con la aparición posterior de sensores de rayos infrarrojos (IR), complementados con termopares y más recientemente con los anemómetros sónicos para medir estos mismos flujos, se llegó a pensar que eran dos métodos alternativos por tratarse de instrumentos cuyo funcionamiento están basados en principios diferentes. Sin embargo, resultados de investigaciones recientes han mostrado que ambos instrumentos se complementan bastante bien, no por su diseño o las magnitudes que registran o por sus características de funcionamiento, sino debido a las condiciones de advección bajo las cuales funcionan. Es decir, mientras que las CIG funcionan en condiciones de calma los sensores IR requieren condiciones de viento significativas.

Palabras clave: Flujos de masa y energía, liberación de CO₂ y vapor de agua

SUMMARY. Gas interchange chambers (CIG) have been used extensively to measure carbon dioxide flux (CO₂) and water vapor (LE), the main components of soil respiration, and later on with infrared ray sensors (IR), supplemented with thermocouples, and more recently with sonic anemometers to measure the same fluxes. It was believed that they were two alternative methods since the instruments operation are based on different principles. Nevertheless, recent research results have shown that both apparatus are well complemented, not because of their design or the magnitudes they register, or for their performance features, rather due to the advection conditions under which they perform. to sum it up, while CIG works under still conditions, IR sensors require significant wind movement.

Key words: Energy and mass flux, Water vapor and CO₂ release.

INTRODUCCIÓN

El monitoreo y cuantificación del dióxido de Carbono (CO₂) y vapor de agua (LE), que se liberan a la atmósfera en los sistemas agroproductivos, es una necesidad creciente ante los retos actuales del calentamiento global. Para el caso del CO₂, se sabe que en la última década los cambios de uso del suelo y silvícolas han contribuido de manera significativa en las emisiones de

este gas a la atmósfera, con emisiones netas para 1990 de 444.5 millones de toneladas métricas (PNUMA-SEMARNAT, 2004). En tanto que para LE, debido al incremento de los índices de aridez que en fecha reciente se ha estimado en poco más del 61 % del territorio nacional presenta déficit de humedad de moderado a severo durante todo el año (UACH-CONAZA, 2004).

Lo anterior, adquiere relevancia al considerar el reporte del IPCC (2007), sobre los cambios en los sistemas

físicos y biológicos y de temperatura entre 1970 y 2004, a nivel mundial, donde, por ejemplo: se indica que en el norte, centro y noroeste del territorio mexicano, dichos cambios se estiman entre 1 y 2 °C. Por tal motivo, en años recientes ha resurgido el interés en las mediciones de radiación y del balance de energía en el suelo y en el dosel de las plantas (Sauer y Pinter, 2007).

Por lo tanto, una investigación de actualidad requiere una mejor comprensión y entendimiento de la producción primaria neta (PPN) en los bosques del mundo, ecosistemas que juegan el rol principal de distribución de carbón global, (Clark *et al.* 2001); exigencia que se ve reflejada en la declaración de metas de la AmeriFlux network, que establece lo siguiente: (1) Comprender los factores y procesos que regulan el intercambio de CO₂, incluyendo procesos del suelo, estructura de la vegetación, fisiología y etapa de sucesión; y (2) Determinar la retroalimentación principal que puede afectar el futuro de la biosfera, de tal manera que responda a los cambios en el clima, contaminación del aire, y concentraciones de CO₂ (Massman y Lee, 2002).

El objetivo de la revisión bibliográfica es identificar, de acuerdo a reportes científicos el efecto de las cámaras de gas en la magnitud de los flujos de CO₂ y LE con relación a los mismos flujos en condiciones de cielo abierto.

COMPONENTES DEL BALANCE DE RADIACIÓN

En ecosistemas terrestres, los movimientos de CO₂ y LE pueden ser medidos básicamente por tres métodos: a) Covarianza Eddy, (EC); b) Relación Bowen, (RB); y c) Sistemas de cámaras de intercambio gaseoso, abiertas o cerradas (CIGO o CIGA). Los dos primeros, provistos de sensores IR capaces de medir el calor sensible (H) y gradientes atmosféricos (RB) o flujos verticales turbulentos, ambos, obviamente bajo condiciones de cielo abierto (Cambell, 2007); en tanto que el tercero, que pueden funcionar como cámaras abiertas o cerradas, cuantifica la concentración de CO₂ y LE, por diferencia de la masa atrapada en la cámara, y en este caso es indispensable un estado de presión y viento en calma (LI-COR Biosc, 2007).

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).

De los componentes del balance de energía, CO₂ y LE, son variables de flujo e intercambio de masa y energía

asociadas al funcionamiento de los ecosistemas, fundamentalmente en su parte biológica. Casi todo el CO₂ fijado en la fotosíntesis es eventualmente regresado a la atmósfera en forma de CO₂ por medio de la respiración, aunque el lapso de tiempo entre la fijación de un átomo de carbono y su liberación en la respiración puede variar grandemente dependiendo de su destino y al ser determinado por medio de su localización y partición dentro del organismo fotosintético y la red trófica (Schnyder *et al.*, 2003).

Cuando estos se encuentran en la atmósfera, su importancia se multiplica debido a la capacidad que tienen para atrapar la radiación de onda larga, Rlw-, generando con ello el conocido efecto invernadero (López, 2006). Efecto que se magnifica por la presencia de otros elementos contaminantes en la atmósfera (IPCC, 2001).

Mientras las concentraciones de gas de efecto invernadero con CO₂ continua incrementándose debido a actividades antropogénicas, actualmente no se entienden los grandes efectos sobre la distribución del carbón en el mundo (Clark *et al.*, 2001). Fenómeno, del que también se advierte una redistribución de la humedad y consecuentemente cambios en los flujos de vapor de agua (Peters *et al.*, 2001).

Prototipos empleados en cada método

El instrumental que se presenta en las Figuras 1a, 1b, 1c y 1d, evidentemente tiene diferencias importantes en términos de su diseño y capacidad para detectar el flujo de O₂-CO₂ y LE. Por ejemplo: la cámara portátil para medir la respiración del suelo o los flujos de intercambio de O₂-CO₂ entre el suelo y la atmósfera, además de estar limitada por su tamaño al registro de 60 cm², deja fuera a la parte aérea de la planta, a diferencia de los sistemas 2D y 3D Open Path Analyser, que tienen la capacidad de registrar la respiración del sistema suelo-planta de grandes áreas.

Sin embargo, aunque mucho se han criticado el uso de las cámaras, ya sea abiertas o cerradas, debido a que son afectadas por la temperatura, radiación y las condiciones de no viento dentro de estas, al parecer son sumamente útiles para separar los componentes de la respiración (Balog *et al.*, 2005); pues en los métodos (EC y BR), las mediciones de CO₂ representan la suma de una variedad de procesos donde se incluyen la respiración de la raíz, la oxidación heterotrófica de los organismos de la materia orgánica del suelo y de la parte aérea de la vegetación (James y Mora, 2005).

A manera de ilustración a continuación se presentan solo algunos prototipos del instrumental de diferentes marcas y modelos que se emplean en las mediciones de flujo de LE y CO₂.

Método: Eddy Covariance



Figura 1a: 2D-Open Path Gas Analyzer

Método: Open-close Chamber



Figura 1b: Cámara portátil, modelo: LCA-4



Figura 1c: 3D- Open Path Gas Analyzer



Figura 1d: Cámara automática para medir CO₂

RESULTADOS DE COMPARACIONES CRUZADAS

La complementación entre el uso de los instrumentos (Figura 1), ha sido demostrada en diversos trabajos de investigación, por ello a continuación se presenta algunos resultados sobre comparaciones entre los métodos CE y las CIG.

Balog *et al.* (2005), utilizaron las técnicas CE y CIG para la medición de flujos de CO₂ en diferentes ecosistemas de pastizal con el propósito de comparar los resultados entre los dos métodos. El periodo del estudio cubrió los años 2003 y 2004, cuando las condiciones de sustentabilidad fueron diferentes. Las

mediciones con la CIG se hicieron durante nueve campañas en dos años. Este autor reporta que los patrones de flujo diarios de CO₂ fueron en el mismo rango, pero, dice: "...en algunos casos los flujos de CIG fueron más altos (i.e. siguiendo la notación convencional significa que es más negativo) que CE."

La Figura 2, presenta la relación entre los dos diferentes métodos basado en flujos de CO₂, promedio de media hora. La dispersión es grande, pero mientras la técnica CE obtuvo muestras de áreas de pastizal más grandes de diferentes direcciones, el CIG fue midiendo exactamente la misma parcela a través del estudio.

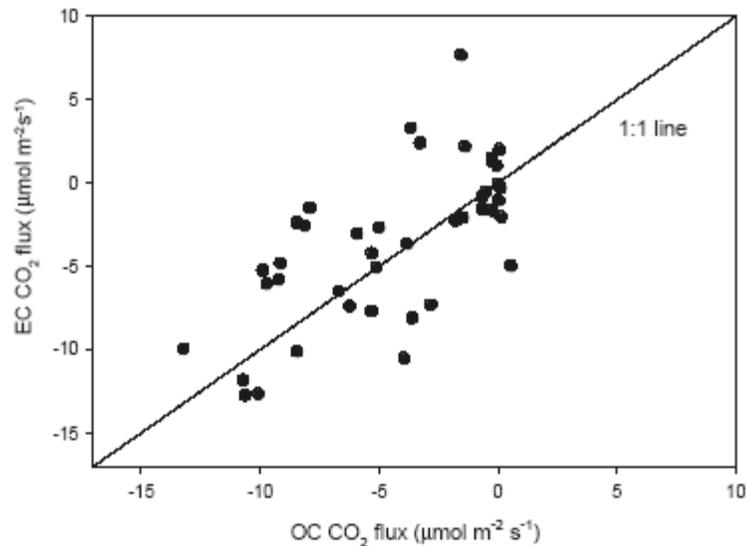


Figura 2. Flujos de CO₂ medidos (promedios de hora y media) por medio de dos técnicas diferentes. La línea muestra una relación 1:1. La captura de CO₂ se muestra con valores negativos.

Balog *et al.* (2005) señala que: "...en comparación con CE el sistema CIG proporcionó una buena herramienta para las mediciones de intercambio de gas en el pastizal."

Benson *et al.* (s.f.), justificó el uso de cámaras automatizada para medir flujo de CO₂ debido a que en el método convencional CE, dice el autor: "...hay pérdida de información cuando las condiciones de viento son estables o cuando la velocidad del viento es muy baja, particularmente por la noche..."

Para ello, hizo una medición comparada de ambos métodos: CE y CIG, cuyos sensores IR se instalaron a 60 m de distancia entre ambos, de lo cual, entre otros concluye lo siguiente:

1. Las mediciones de la respiración con la cámara automatizada presentaron un patrón robusto que fue cercanamente correlacionado con la temperatura del aire. Esto sugiere que una gran parte de la respiración de la pradera ocurre en la superficie y/o a poca profundidad del suelo;
2. La respiración disminuye y los patrones diurnos se vuelven menos pronunciados sobre la vegetación senil;
3. Los métodos CE y CIG podrían coincidir cuando la fotosíntesis = 0, ahora el flujo nocturno obtenido del EC fue consistentemente más bajo

que el medido mediante la CIG. Sin embargo, el CE podría estar desestimando la contribución del flujo nocturno de la respiración neta del ecosistema en el balance total de carbón del ecosistema.

Por otro lado, Drewitt *et al.* (s.f.), compararon el resultado de los dos diferentes métodos de medición (CE y CIG) de intercambio de CO₂ en el piso del un bosque de 50 años de edad (en el año 2000), en el Douglar-Fir que es parte de la Red Ameriflux. Un sistema de seis cámaras automatizadas se puso a funcionar continuamente en el sitio por un periodo de 8 meses, desde el inicio de la primavera hasta finales del verano del año 2000. En Septiembre y Octubre del mismo año, el flujo de CO₂ fue medido mediante el método CE sobre el suelo forestal.

Los resultados indican que los flujos de CO₂ medidos durante los dos meses de comparación fueron variables entre las seis cámaras. El promedio de flujo más bajo de una cámara del periodo fue: 4.6 ± 0.6 (S.D.) mmol m² s⁻², mientras el promedio más alto de otra cámara fue: 10.8 ± 2.0 mmol m² s⁻². El promedio de flujo de los dos meses de las seis cámaras fue de 7.3 ± 1.2 mmol m² s⁻².

Respecto al comparativo entre los dos sistemas de medición (CE y CIG), los resultados obtenidos por Drewitt *et al.* (s.f.) indican coincidencias en diversos trabajos, los cuales se realizaron en diferentes tiempos y lugares.

(Balog *et al.*, 2005; Lavigne *et al.*, 1997; Dugas *et al.*, 19991; Dore *et al.*, 2003)

CONCLUSIONES

Entre CE y CIG, obviamente hay diferencias significativas en cuanto a su diseño, lo cual, les da una capacidad diferente para registrar el comportamiento de los flujos de CO₂ y LE. Sin embargo, al parecer lejos de ser métodos alternativos en la medición de dichos flujos, más bien deben ser considerados como métodos complementarios, si el objetivo es diferenciar el origen de los flujos, especialmente el relativo a la respiración.

El monitoreo y cuantificación de los flujos de masa y energía que se verifican entre la superficie del suelo y la atmósfera contribuye de manera importante en la comprensión del ciclo del carbono en los sistemas agroproductivos y las potencialidades para la captura de CO₂.

LITERATURA CITADA

- Balogh, J.; Foti, S.; Nagy, Z.; Czobel, S.; Pintér, K.; Peli, E. R. y Tuba, Z. 2005. Comparison of carbon dioxide fluxes over sandy grassland vegetation as measured by the eddy-covariance technique and by open system chamber. Prodedings of the 8th Hungarian Congress on Plant Physiology and 6th Hungarian Conference on Photosynthesis. Vol. 49(1-2): 143-145
- Benson, E; Ham, J.; Owensby, C. Auen, L. and Caldwell, F. (s.f.) A New Automated Chamber System for Measuring Ecosystem Respiration: Comparison with Hanheld Chambers and Eddy Covariance Towers. Published by the Dept. of Agronomy Kansas State University, Manhattan, Kansas 66506. *In:* <http://www.aznet.ksu.edu/envphys/Research/researchada.htm> Revisado (01/30/07)
- Cambell, Sci. 2007. Campbell Scientific for data loggers, sensors & automatic weather stations and more. *In:* <http://www.campbellsci.co.uk/index.cfm?id=184> Revisado (09/08/07)
- Clark, D. A., Brown; S., Kiclighter, W. D.; Chambers, Q. J.; Thomlinson, R. J. y Ni, J. 2001. Measuring Net Primary Production in Forest: Concepts and Field Methods. Ecological Society of America. Ecological Applications, 11(2): 356-370
- Dore, S.; Hymus, G. J.; Jhonson, D. P.; Hinkle, C.R.; Valentns, R.; y Drake, B. G. 2003. Cross Validation of Open-Top chamber and Eddy Covariance Measurements of Ecosystem CO₂ Exchange in Florida Scrub-Oak Ecosystem. Global Change Biology. Vol. 9 (1): 84
- Drewitt, G.; Humphrey, E. R. ; Black, T.A.; Ethier, G.; Nestic, Z.; Morgenstern, K. y Novak, M. (s.f.). Eddy Covariance and Chamber Measurements of Carbon Dioxide Fluxes from the Forest Floor of a Closed-Canopy Douglas-Fir Forest. University of British Columbia, Vancouver, Can. and University of Victoria, Victoria, BC, Canada.
- Dugas, W. A.; Frischen, L. J.; Gay, L. W.; Held, A.A. y Matthias, A. D. 1991. Bowen Ratio, Eddy Correlation and Portable Chamber Measurements of Sensible and latent Heat Flux Over irrigated Spring Wheat. Agricultural and Forest Meteorology AFMEEB, Vol. 56 (1/2): 1-20
- IPCC, 2001. Climate Change, 2001, the scientific basis. *In:* http://www.grida.no /climate/ipcc_tar/wg1/ Revisado (06/12/06)
- James, W. y Mora, G. 2005. Estimating Root Plus Rhizosphere Contributions to Soil Respiration in Annual Croplands. Published in Soil Sci. Am. J. 69:634-639
- Lavigne, M. B.; Ryan, M. G.; Anderson, D. E.; Baldocchi, D. D.; Crill, P. M.; Fitzjarrald, D. R.; Goulden, M. L.; Gower, S. T.; Massheder, J. M.; McCaughey, J. H.; Rayment, M. y Striegl, R. G. 1997. Comparing nocturnal eddy covariance measurements to estimates of ecosystem respiration made by scaling chamber measurements at six coniferous boreal sites. American Geophysical Union. Journal of Geophysical Research, Vol. 102 (D24): 28977-28986
- LICOR-Biosciences, 2007. Soil CO₂ Flux Measurements: Using the LI-8100 System to Collect Air Samples for Estimating Soil Trace Gas Flux. *In:* <http://www.licor.com/env/Products/li8100/documents/AirSampling.pdf> Revisado (09/08/07)
- López S., A. 2006. Relación entre el Cambio Climático y la Erosión del Suelo. Ensayo. UACH. (Inédito)
- Massman W. J. y Lee, X. 2002. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. Agriculture and Forest Meteorology 113: 121-144
- Peters, G.; Fischer, B. y Munser, H. 2001. Eddy Covariance Measurements with Closed-Path Optical Humidity Sensors: A feasible Concepts? Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, American Meteorological Society. 18: 503-514
- PNUMA-SEMARNAT, 2004. El Cambio Climático en América Latina y El Caribe (Versión Preliminar). <http://www.pnuma.org/CambioClimatico/CAMBIO%20CLIMATICO-web.pdf> Revisado (05/07/07)
- Sauer T. J. y P. J. Pinter. 2007. Introduction to the Symposium in Radiation and Energy Balance Measurements Systems. Agron. J. 99: 238-239
- Schnyder, H.; Schaufele, M.; Lostcher, M.; y Gebbing, T. 2003. Disentangling CO₂ fluxes: direct measurements of mesocosm-scale natural abundance ¹³CO₂/¹²CO₂ gas exchange, ¹³C discrimination, and labeling of CO₂ exchange fluz componenets in controlled environments. Published in Plant, Cell and Environment 26: 1863-1874
- UACH-CONAZA-SEDESOL-SAGARPA, 2004. Escenarios Climatológicos de la República Mexicana ante el Cambio Climático. Universidad Autónoma Chapingo, CONAZA, Dirección de Vinculación y Transferencia de Tecnología, SEDESOL y SAGARPA.

ABREVIATURAS USADAS

ADN	Acido desoxirribonucleico	M	Molar
alt.	Altitud	m	Metro
AM	Antes meridiano	m ²	Metro cuadrado
antilog	Antilogaritmo	m ³	Metro cúbico
aprox	Aproximadamente	max.	Máxima
ARN	Acido Ribonucleico	mg	Miligramo
atm	Atmósfera	ml	Mililitro
C	Grados centígrados (Celsius)	μ	Micra
F	Grados fahrenheit	mm	Milímetro
Ca.	Cerca (aprox.)	mm ²	Milímetro cuadrado
CE	Concentrado emulsificable	min.	Minuto (s)
cm	Centímetro (s)	MO	Materia orgánica
cm ²	Centímetro cuadrado	MS	Materia seca
cm ³ ,cc	Centímetro cúbico	msnm	Metros sobre el nivel del mar
coef.	Coficiente	NDT	Nutrientes digestibles totales
conc.	Concentrado	No.	Número
cv.	Cultivar (es)	oz	Onza(s)
db	Decibel	PC	Proteína cruda
EB	Energía bruta	PF	Peso fresco
e.g.	Por ejemplo	pH	Concentración de iones hidrógeno
p.ej.	Por ejemplo	PH	Polvo humectable
etc.	Etcétera	p.mol.	Peso molecular
a	Femenino	ppm	Partes por millon
g	Gramo (s)	Prom.	Promedio
gal	Galón (es)	Pulg.	Pulgada (s)
gf	Grado de fluidéz	resp.	Respectivamente
g	Grano (s)	RMS	Rendimiento materia seca
h	Hora (s)	RPC	Rendimiento proteína cruda
ha	Hectárea(s)	RPN	Relación proteína neta
hr	Humedad relativa	SCP	Proteína unicelular
i.a.	Ingrediente activo	seg.	Segundo(s)
IAF	Indice de area foliar	Sp.	Especie
IC	Indice de cosecha	Spp.	Especies
i.e.	Es decir	ton.	Tonelada(s)
kcal	Kilocaloría (s)	temp.	Temperatura
kg	Kilogramo(s)	TFH	Tasa de formación de hojas
Kg/ha	Kilogramo por hectárea	UI	Unidad internacional
Kg.ha ⁻¹	Kilogramo por hectárea	UPN	Utilización proteínica neta
km	Kilómetro (s)	Var.	Variedad(es)
kw	Kilowatt (s)	VB	Valor biológico
l	Litro	Vol	volúmen
lat	Latitud (L)	Vpm	Volúmen por millón
lb	Libra(s)	w	Watt
LD50	Dosis letal media		
Long.	Longitud		
'	Masculino		

INDICE DE AUTORES

AUTHOR INDEX

Vol. 7, Núm. 1 2008

Amaya García, Germán	83
Arreola Ávila, Jesús Guadalupe	7, 15, 57
Basaldúa Suárez, José Francisco	21
Blando Navarrete, José Luis	37, 115
Cisneros Vázquez, José Manuel	15, 29
Cueto Wong, José Antonio	65, 73
Flores Álvarez, Saúl	v, 115
Flores Hernández, Arnoldo	21, 65
Gil Marín, José Alexander	1
Gómez González, A.	125
Gómez Merino, Fernando C.	29
González Palma, Armando	37, 73
Gutiérrez Castañeda, Iván de Jesús	65
Hernández Carrizal, Julieta	37
Hernández Salgado, José Ramón	47, 73, 91
Jaimes Jaimes, Jaime	73
López Santos, Armando	1
López Simancas, Pedro	57
Medina Rosales, Juan Manuel	125
Méndez Rivera, José Santana	15, 29, 47
Meza Herrera, César Alberto	83, 107, 125
Ortiz Mejiaz, José Alberto	15
Pedro Méndez, José Guadalupe	47
Ramírez Gómez, Manuel	29, 47
Ríos Flores, José Luis	47, 115
Rivera Olivares, Laura Yolanda	29
Rodríguez López, J. Santos	15
Rojas Calderón, Román Gerardo	115
Salinas González, Homero	107
Sánchez Cohen, Ignacio	65
Santamaría César, Enrique	15, 47
Torres Moreno, Miriam	115
Trejo Calzada, Ricardo	65
Trejo Téllez, Libia Iris	29
Trucios Caciano, Ramón	65
Trujano San Luis, David	73
Valle Moysen, José Efrén	107
Vargas Mendoza, Alberto	21
Vargas Piedra, Gonzalo	7
Velázquez Martínez, Mauricio	91

La edición de este número estuvo a cargo de la Coordinación Editorial de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas-UACH. DISEÑO DE PORTADA Y TRABAJO DE TIPOGRAFIA: *Clelia Morán López*. Junio, 2008. Versión electrónica: *M. C. José M. Cisneros*
V. <http://www.chapingo.uruza.edu.mx>

MEDICIONES MORFOMATEMÁTICAS DE IMÁGENES DIGITALES MEDIANTE UNA PLATAFORMA ARC-VIEW E IDRISI

¹López-Santos Armando, ²González-Cervantes Guillermo, ³Cadena-Zapata Martín, ³López-Cervantes Rubén y ³Zárate-Lupercio Alejandro
1 URUZA, U. A. Chapingo. Dom. conocido, Ciudad Bermejillo, Dgo. AP # 8, CP 35230 Teléfonos: (872) 776-0160 y 90 Fax (872) 776-0043. Correo electrónico: alopez@chapingo.uruza.edu.mx y armando.lopezsantos@gmail.com; 2 CENID-RASPA-INIFAP. AP 225-3 Z1, Gómez Palacio, Dgo. México, CP 35071. Tels: (871) 719-1076 y 77 y Fax: (871)719-1134; 3 UAAAN. Dom. Conocido Buenavista Saltillo, Coah. México.

RESUMEN

En años recientes ha aumentado el uso de imágenes digitales para hacer mediciones precisas que ayudan a realizar mejores inferencias en la investigación científica. Sin embargo, los programas de cómputo para procesar las imágenes no siempre son accesibles. Para medir el porcentaje de las cubiertas de pastos, morfología de sistemas radiculares, y particularmente para la estructura del suelo, se ha usado programas que ayudan a mejorar la visualización y administración de las imágenes, pero muy pocos con capacidad para mediciones integradas a bases de datos. Image Pro Plus® (Plataforma 1) es un programa especializado que reúne esas características, pero por su alto costo es de difícil acceso. Por ello, en el presente documento se presenta como alternativa el uso combinado de Arc-View® e IDRISI® (Plataforma 2). Son programas comúnmente usados en Sistemas de Información Geográfica (GIS), pero con modificaciones en el manejo de la escala se esperaría que resultados en estudios de estructura de suelo y otras de semejante naturaleza fueran equiparables con la Plataforma 1. Usando mediciones realizadas sobre el área de poros de muestras de suelo inalteradas, desde ambas plataformas sobre la misma imagen, al ser comparadas estadísticamente (Tukey-Kramer) no presentaron diferencia significativa para 60% de los casos estudiados.

Palabras clave: *Análisis de imagen, imagen digital, SIG, Image Pro Plus.*



INTRODUCCIÓN

En la investigación, se ha recurrido a inspecciones visuales para hacer clasificaciones y estimaciones que consideradas relevantes, se usan para hacer inferencias que podrían ser cuestionables (Costa *et al.*, 2000; Karcher y Richarson, 2005). En muestras alteradas e inalteradas, las inspecciones de laboratorio y campo, para estudios de raíz, estructura y microestructura del suelo, pueden llegar a ser tediosas e inexactas (Costa *et al.*, 2000; Osuna *et al.*, 2005). Se ha desarrollado técnicas de análisis de imágenes digitales que medir objetivamente características representadas en píxeles asociadas al objeto de interés, mejorando la exactitud, precisión y la certeza de sus inferencias (Ingram y Leers, 2001; Mezaris *et al.*, 2004; Karcher y Richarson, 2005; Peth *et al.*, 2008; Luo *et al.*, 2008).

Las técnicas avanzadas para el análisis de imagen, como herramientas de apoyo en la investigación para la medicina, la medicina forense, la biología y la física de suelos (González *et al.*, 2004a, b; Buj y Gisbert, 2007), son Visilog® e Image Pro-Plus. Ambos programas tienen aplicaciones complejas de las imágenes, pero su principal atributo se basa en la segmentación de la imagen, potenciando los análisis visuales para realizar mediciones morfomatemáticas (Mezaris *et al.*, 2004; Angulo y Serra, 2005; Rodríguez, 2005; NOESIS 2007; Image Pro-Plus, 2007).

Image Pro Plus (de Media Cybernetics, Inc) es un programa costoso, de uso muy exclusivo e individualizado, ya que usa una llave física que mediante su colocación en el puerto paralelo de la computadora donde se conecta la impresora, permite su funcionamiento. Por esta razón, no es de uso común en medios académicos.

Para análisis de imagen Singh *et al.* (1990), combinaron el uso de un analizador automático de imagen y AUTOCAD para el estudio de macroporos, en suelos sometidos a diferentes prácticas de labranza. Gutiérrez *et al.* (1999) usaron el IDRISI 4.1, pero solo como un recurso para mejorar la visualización, sin capitalizarlo con



mediciones puntuales y análisis morfomatemáticas. Se deduce que no pudieron cuantificar forma, tamaño y distribución de los poros de muestras inalteradas de suelo, pese a haber preparado dichas muestras de acuerdo a las técnicas propuestas por Fitzpatrick y Gudmundson (1978) para eliminar la humedad natural, y la de Singh et al., (1991) que implica la impregnación de la muestra de suelo con resina epóxica, con lo cual es posible seccionarla sin alterar su estructura original.

El uso y manejo de imágenes rasterizadas en IDRISI no difiere del de otras plataformas como Image Pro Plus. Aunque en este caso, sus aplicaciones están asociadas a Sistemas de Información Geográfica (GIS) con escalas macro, cuya unidad fundamental en el Sistema Internacional es el metro y su funcionamiento puede estar asociado a sensores de percepción remota (Novoa y Herrera, 2002; Fox y Sabbagh, 2002; Chang *et al.*, 2003).

Es posible hacer análisis gráficos, morfológicos y matemáticas similares a los generados en la Plataforma 1 a partir de un manejo eficiente de la escala, usando Arc-View e IDRISI, cuyas licencias son de bajo costo, de fácil accesos y amplio uso en el medio académico. Por tanto, el presente estudio tiene dos objetivos: 1) comparar gráfica, numérica y estadísticamente los resultados de ambas plataformas; 2) desarrollar una secuencia metodológica como aproximación alternativa a las plataformas Visilog e Image Pro-Plus, para la porosidad del suelo y evaluar su aplicación a otros campos, por ejemplo la exploración del patrón radicular.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó a finales del 2007, en el laboratorio de Análisis de Imagen del CENID-RASPA del INIFAP, Gómez Palacio, Durango. Para el proceso de análisis se usó una computadora de escritorio y una portátil. En la primera se instaló previamente la Plataforma 1, compuesta por los programas que funcionan en el ambiente de Image Pro Plus 4.5; en la segunda se instaló la Plataforma 2, compuesta



por los programas Arc-View GIS 3.3 (ESRI, Inc) e IDRISI Klimanjaro 14.0 (Clark Labs, Clark University).

Definición del campo de aplicación y preparación de las imágenes

Por ser un tema de gran interés en la investigación de la física de suelos, se usaron imágenes de muestras inalteradas, obtenidas de tres sitios sometidos a diversos tratamientos de labraza en el rancho Los Ángeles municipio de Saltillo, Coahuila, México (25° 6.650' N y 100° 59.413 O). Las muestras fueron extraídas mediante cubos de cartón rígidos de 0.15 m³, y encapsuladas con una película de parafina para evitar su alteración por efecto de la manipulación al momento de ser transportadas. En el laboratorio se eliminó la humedad por el método de fase de vapor propuesta por Fitzpatrick y Gudmunson (1978), con lo cual fue posible mantener el suelo en estado húmedo (como en el campo), sin alterar su microestructura natural, acción que fue complementada con la adición de resina epóxica de acuerdo a la técnica propuesta por Singh et al., (1991). Razón por la cual ha sido ampliamente usada en estudios de estructura y porosidad del suelo (Singh et al., 1990; Singh et al., 1991; González, 2004a,b; Osuna et al., 2005; Buj O., and J. Gisbert. 2007).

Una vez solidificados los cubos impregnados con resina, se realizaron cortes paralelos con respecto al nivel suelo, con lo cual fue posible representar las profundidades a 0.05 y 0.10 m. Las muestras fueron pulidas con una lijadora de banda industrial con graduaciones de 40 hasta 400, hasta tener una textura muy suave al tacto.

Las muestras pulidas se pasaron a una sesión de fotografía en el Laboratorio de Imagen del CENID-RASPA-INIFAP, usando una Cámara OLYMPUS (Mod. C4040), con Zoom 7.5x de 4.1 MP y dos lámparas que emiten rayos UV en una longitud de onda 254-365 NM (Mineralight Lamp), con las cuales se iluminó al tomar la fotografía. Se



definió una escala bidimensional en un formato rectangular (M1) cuyas unidades equivalentes y factores de conversión se indican en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Equivalencias de la imagen para la conversión de unidades de medición en la escala M1.

Eje	Equivalencias de unidades		Factores de conversión	
	mm	pixeles	pixeles/mm	mm/pixeles
X	125	2272	18.176	0.0550176
Y	90	1704	18.933	0.0528169

Así, el factor de conversión para obtener las mediciones en las unidades bidimensionales deseadas será el producto $X \cdot Y$. Además es importante mencionar que según la escala indicada en el Cuadro 1, la imagen digital en términos reales representa 50 % de la superficie total de la muestra de suelo.

Análisis estadístico

De las imágenes obtenidas para microestructura y porosidad del suelo, se seleccionó al azar un grupo de cinco (22, 10, 9, 8 y 3). Cada una fue sometida a todo el proceso de análisis en ambas plataformas, hasta obtener imágenes binarias. Esto es, comenzando con las inspecciones visuales hasta conseguir la mejor representación de la estructura y porosidad del suelo, para generar las mediciones de área y perímetro de poros que fueron guardadas y concentradas en tablas de Excel.

Las imágenes binarias de ambas plataformas fueron comparadas visualmente, y las mediciones se agruparon en una tabla de Excel para hacer contrastes apareados en términos de los rangos de tamaño para macro ($>10 \text{ mm}^2$), meso ($2-10 \text{ mm}^2$) y



microporos ($<2\text{mm}^2$) y su porcentaje con respecto a la superficie total de la imagen. Considerando que las bases de datos tenían diferente longitud, se empleó el PROC GLM (SAS, Institute, 2006), por el método Tukey-Kramer, para probar la similitud entre las bases de datos generadas desde cada plataforma (Rebolledo-Robles, 2002). Además, la media, desviación estándar y las diferencias entre medias fueron determinadas con PROC MEANS de SAS. Las diferencias estadísticas fueron significativas con $p \leq 0.01$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A diferencia de la plataforma 1 con Image Pro Plus, el principal atributo de las aplicaciones de la plataforma 2, Arc-View e IDRISI en estudios del territorio es que se asocian a SIG, los cuales constituyen un sistema asistido por computadora para la adquisición, almacenamiento, análisis y visualización de datos geográficos. La adquisición puede estar conformada por imágenes, mapas con sistemas digitalizados y tablas de datos estadísticos que pueden actualizarse interactivamente, y los productos pueden estar representados por gráficas como histogramas, mapas categorizados y reportes estadísticos (IDRISI, 2004; USGS, 2008). En forma análoga, ambas plataformas usadas en este estudio adquieren, almacenan, analizan y visualizan datos y producen información estadística y gráfica con un sistema que divide la imagen en una rejilla o cuadrícula de pequeñas regiones llamadas elementos pictóricos o píxeles (Image Pro Plus, 2001; IDRISI, 2004; USGS, 2008). En la computadora la imagen es representada por estas imágenes llamadas raster o matriciales que forman los diferentes elementos por la agrupación de píxeles que poseen un mismo valor numérico que se asocia y representa por un color y tono determinado; es decir, en la rejilla digital o mapa de bites cada píxel es identificado mediante su posición en la rejilla con un número referenciado en su renglón (x) y columna (y) (Image Pro Plus, 2001).



La preparación de la imagen para su interpretación visual y morfomatemática, en ambas plataformas, se hace por la manipulación de sus propiedades, mediante un proceso de segmentación. Para Cheng et al. (s/f) esto consiste en la homogenización de píxeles conectados para formar regiones y subregiones en el área de la imagen; aspecto clave en las operaciones de cuantificación y uso posterior de las bases de datos (Peth et al., 2008; Luo et al., 2008). Desde luego, cada plataforma tiene rutinas de procesamiento diferentes que serán comentadas brevemente. Las diferencias sobresalientes observadas durante la presente investigación, están relacionadas con: 1) el proceso de transformación de la imagen mediante la modificación de sus valores para resaltar la información contenida en el objeto meta; 2) la búsqueda de la convergencia de las unidades de medición; y 3) el ajuste de la escala.

En el primer caso, la plataforma 2 exige que la imagen digitalizada en cualquiera de los formatos comúnmente empleados (JPEG, TIFF, BMP, ETC.), esté representada en formato raster. Para obtener las mediciones puntuales de los objetos meta es necesario transformarlas en imágenes vectoriales (polígonos, líneas y puntos); en este caso solo se recurrió a polígonos. La ventaja de una imagen rasterizada es su alto poder analítico, mientras que sus pares vectoriales tienen una gran capacidad para almacenar información (IDRISI, 2004; USGS, 2008).

En el segundo y tercer caso, en el proceso de conversión de este tipo imagen al formato IDRISI (File/Import/Desktop Publishing Formats), la definición de los valores de entrada para los sistemas de referencia y medición, donde corresponden a los parámetros intrínsecos de la misma imagen determinados por columnas y renglones (coordenadas en X e Y, máximas y mínimas) pero no a las unidades de distancia, las cuales pueden ser medidas angulares con valores comprendidos entre 0° y 360° y planas donde la unidad mínima es el pie (sistema inglés) y el metro para el sistema internacional (IDRISI, 2004). Por tanto, se debe aplicar un factor de conversión, ya



comentado (Cuadro 1) para generar una tabla con mediciones empleadas como el discutido aquí (mm y μm).

Procedimiento empleado en la plataforma 2, Arc-View e IDRISI

En concordancia con el objetivo planteado, en la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo donde están representados cada paso requerido para el proceso de análisis de las imágenes digitales y su transformación raster-vector hasta obtener las mediciones puntuales de los objetos meta, que en este caso tiene que ver con la morfología del suelo, y particularmente con la porosidad, integradas en tablas dbase compatibles con Excel.

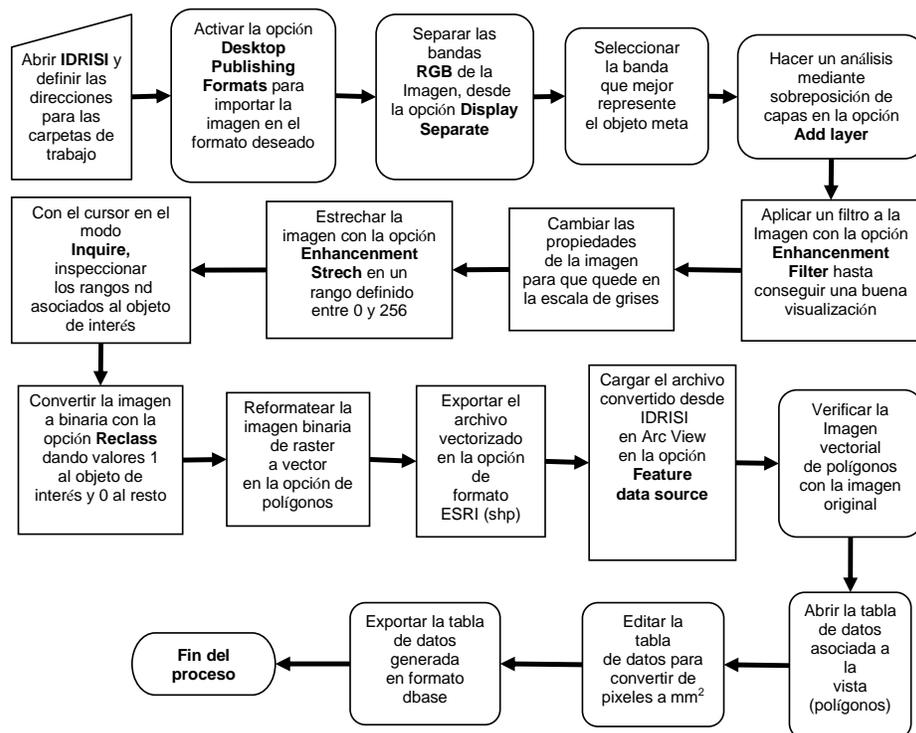


Figura 1. Diagrama de flujo para el análisis de imagen en la plataforma 2, Arc-View e IDRISI.



Comparación visual entre plataformas

Es importante mencionar que las imágenes de la Plataforma 1, en el ambiente Image Pro Plus, después de ajustar la escala en mm/píxel con base en los coeficientes dados en el Cuadro 1, se sometieron a un proceso de igualación de tono, así como de mejoramiento del contraste y brillo (equalization), para luego convertirlas a imagen con valores enteros en un rango de 0 a 255 (8 bites) en escala de grises. Este proceso finaliza cuando es convertida a imagen binaria, que para este caso se eligió un umbral (threshold) de 130 puntos; umbral utilizado por González et al., (2004)¹. Esto como parte de la técnica de agrupamiento o clusters que recomiendan Mezaris et al., (2004), Angulo y Serra, (2005), Rodríguez, (2005) por ser más simple que otras técnicas de segmentación, como detección de fronteras, regiones de convergencia-divergencia, segmentaciones morfológicas y contornos deformes. Esta acción, clásica (Rodríguez, 2005; Peth et al., 2008; Luo et al., 2008) permite una clasificación o umbralización de los píxeles en regiones homogéneas, que se expresa en un aumento en el número de objetos cuantificados.

En la composición de imágenes (Figura 2) se observa que los procesos de análisis de imagen realizados en cada plataforma son distintos entre sí debido a la naturaleza de cada proceso, la primera por realizarse sobre un mapa de bites y la segunda por emplear una imagen rasterizada. Pero lo cierto es que por lo menos presentan el mismo aspecto; es decir, en ambos casos los patrones de visualización tienen la misma tendencia, puesto que proceden del mismo patrón de respuesta espectral, lo cual es consistente con la teoría de la digitalización (IDRISI, 2004).

Además es importante mencionar que un aspecto común de ambas plataformas es que la imagen binaria es la base de las mediciones puntuales y generales, que pueden arrojar datos directos o integrados en tablas de datos (txt, dbase, Excel, ASCII,

¹ El *threshold* recomendado de 130 puntos, es un valor obtenido por González Cervantes después de muchos intentos en imágenes de suelos y actualmente es ampliamente utilizado en el Laboratorio de Imagen del CENID-RASPA.



etc.). Por ello, el trabajo previo de segmentación y realce que puede caer en una acción repetida de mejoramiento-inspección de la imagen, puede ser relativo en ambos casos y depende mucho de la persona encargada del proceso.

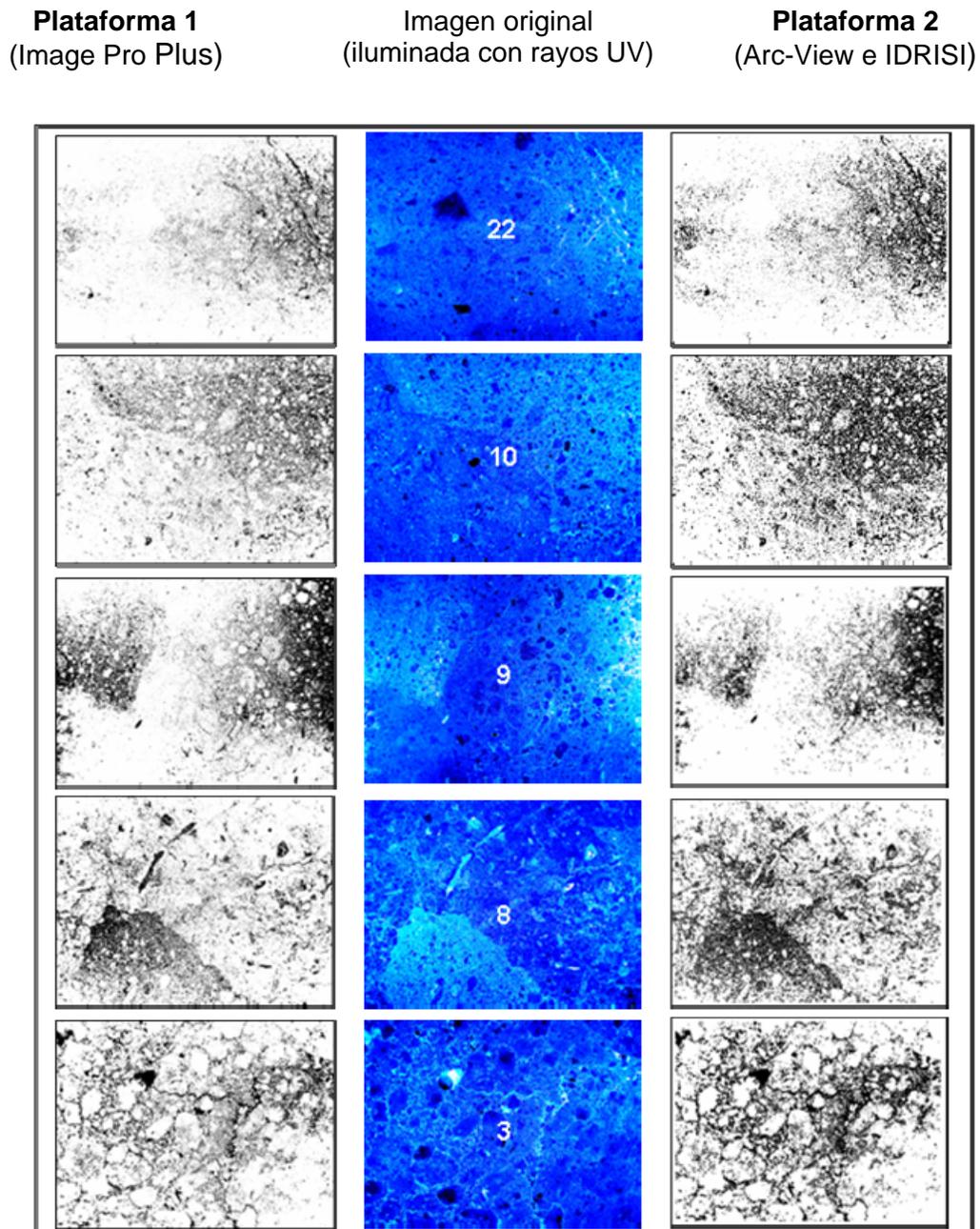


Figura 2. Comparación visual de las imágenes originadas en las dos plataformas.



Comparación de los datos de salida

Las mediciones morfomatemáticas que se pueden realizar en ambas plataformas suelen comprender otros rasgos importantes en los estudios de porosidad, pero en este caso solo se sometieron a comparación y contraste la superficie medidas en mm^2 . Por ello, en la Figura 3 se muestra las diferencias absolutas, con respecto al área total de la imagen ($125 \times 90 \text{ mm}$) que resultan de la comparación aritmética para cada rango de tamaño de poros.

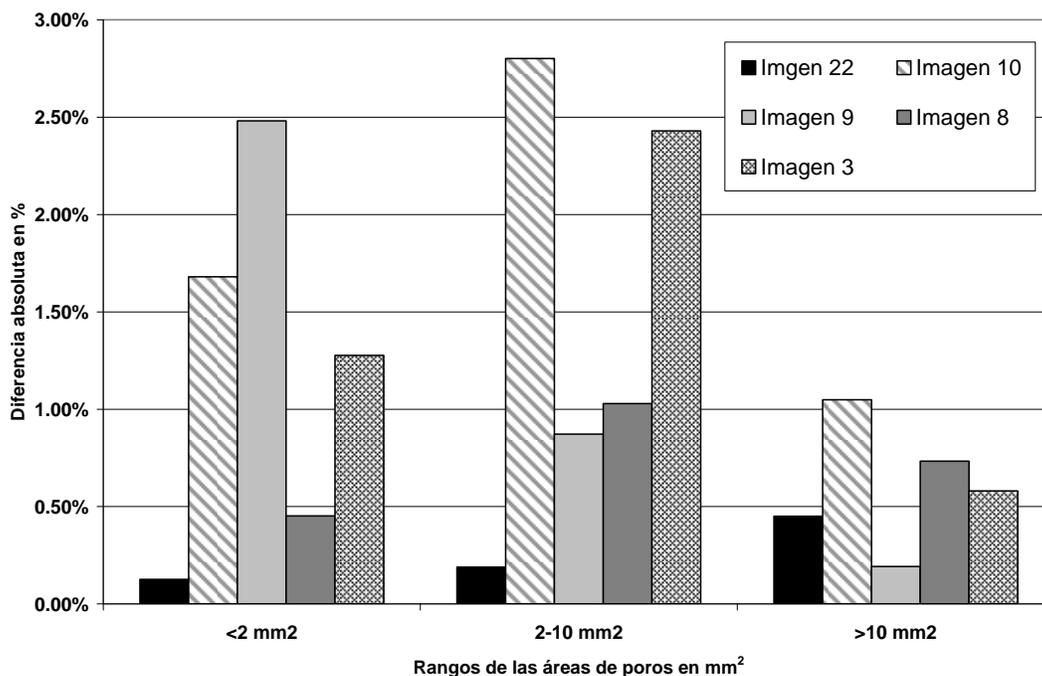


Figura 3. Diferencias absolutas que resultan de la comparación aritmética de las tablas de datos originadas en cada plataforma.

Todas las diferencias aritméticas comparadas, con excepción de la imagen 10, son inferiores al 2.5%, en tanto que para las imágenes 22, 9 y 8 las diferencias son alrededor de 0.5%, de las que sobresale la 22 por ser más pequeña para los rangos de



poros de <2 y $2-10\text{mm}^2$. Además, en el Cuadro 2 se muestran resultados numéricamente diferentes en relación al número total de datos o poros medidos, los valores máximos extremos y el área total medida; aunque de esta última sus magnitudes se expresan en porcentaje con respecto al área total de la imagen.

Cuadro 2. Rasgos generales de los datos de salida y resultados del análisis estadístico.

Imagen	Plataforma	No. total de datos o poros medidos	Valores extremos (mm^2)		Área total medida (mm^2)	% de la imagen (125 x 90)	F value	Pr >F
			Máximo	Mínimo				
22	1	5446	39.445	0.029	748.289	6.65%	3.50	0.019
	2	4729	32.261	0.029	834.426	7.42%		
10	1	7299	95.991	0.029	1581.769	14.06%	21.06	0.006*
	2	7001	12.992	0.029	959.573	8.53%		
9	1	5185	27.606	0.029	907.324	8.07%	3.69	0.055
	2	3501	18.269	0.029	508.162	4.52%		
8	1	6373	43.220	0.029	1370.590	12.18%	7.55	0.006*
	2	6415	35.356	0.029	1121.281	9.97%		
3	1	5588	29.294	0.029	1540.717	13.70%	4.84	0.028
	2	5250	57.975	0.029	1189.470	10.57%		

En el Cuadro 2 se observa que como resultado de los contrastes estadísticos ($p \leq 0.01$) por el método de Tukey-Kramer, entre las tablas de datos asociadas a cada imagen hay diferencias y similitudes. Para las mediciones de las imágenes 8 y 10 la diferencia es altamente significativa, mientras que para la 3, 9 y 22 no hay diferencia. Esto en términos de la hipótesis planteada y las herramientas de medición, la



Plataforma 2 produjo resultados semejantes con los originados en la Plataforma 1 para 60% de los casos estudiados.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados la Plataforma 2, compuesta por Arc-View e IDIRSI, constituye una alternativa muy aproximada, y por tanto muy real, para las mediciones de porosidad en programas especializados como Image Pro Plus.

Además, las ventajas observadas fueron: 1) como secuencia metodológica es accesible, sencilla y no requiere conocimientos profundos de los programas de cómputo empleados; 2) los programas Arc-View e IDRISI, por su bajo costo, son de uso común en los medios universitarios; y 3) con la misma rutina expuesta (Plataforma 2), sus aplicaciones se pueden extender a otros campos de la investigación, como la exploración de morfología de raíz, la cuantificación de polen, estudios de densidad de pastos, etc.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es producto de la sinergia con investigadores del CENID-RASPA del INIFAP de Gómez Palacio, Dgo. Por ello, se agradecen las facilidades y el apoyo otorgado por el personal de este centro de investigaciones y muy especialmente la del Dr. Guillermo González Cervantes. Asimismo, se agradece el apoyo otorgado por la UAAAN y el CONACYT.

LITERATURA CITADA

- Angulo J., andy J. Serra. 2005. Segmentación de imágenes en color utilizando histogramas bi-variables en espacios color polares luminancia/saturación/matíz. *Computación y Sistemas*. 8 (4): 303-316.
- Buj O., andy J. Gisbert. 2007. Cuantificación de la porosidad en areniscas mediante análisis digital de imágenes. *Facultad de Ciencias de la Tierra, Departamento de Petrología y Geoquímica. Geogaceta* 41: 35-38.
- Costa, C., L. M. Dwyer, R. I. Hamilton, R. I., Ch. Hamel, L. Nantais, and D. L. Smith. 2000. A sampling method for measurement of large root systems with scanner-based image analysis. *Agron. J.* 92 (4): 621-627.
- Chang, J., D. E. Clay D. E., K. Dalsted K., S. Clay Sh., and M. O'Neill M. 2003. Corn (*Zea mays L.*) yield prediction using multispectral and multitude reflectance. *Agron. J.* 95 (6): 1447-1453.
- Cheng, H. D., X. H. Jiang, Y. Sun, and W. J. Li. s/f. 2008. Color Image Segmentation: Advances & Prospects. Textoinfo ed. by Dept. of Computer Science, Utah State University. Revisado (24/03/08). ,In: http://www.csie.ntu.edu.tw/~r95007/VFX/Final_bk/paper.pdf



- Fitzpatrick, E. A., and T. Gudmunson. 1978. The impregnation of wet peat for the production of thin sections. *Soil Sci.* 29: 585-587.
- Fox, G. A., and G. J. Sabbagh. G. J. 2002. Estimation of soil organic matter from red and near-infrared remotely sensed data using a soil line euclidean distance technique. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66 (6): 1922-1929.
- González, C. G., C. I. Sánchez, y A. D. García. 2004a. Relaciones entre el manejo del huerto de nogal y la porosidad del suelo. *Terra Latinoamericana.* 22 (3): 279-287.
- González, C. G., C. I. Sánchez, y J. P. Rossingol. 2004b. Morfología de poros de circulación preferencial del agua en el suelo mediante técnicas de análisis de imagen. Caso de una cuenca del norte de México. *Ingeniería. Hidráulica en México.* XIX (3): 15-23.
- Gutiérrez, C. M. de C., Ch. J. Reyes, y S. B. Figueroa. et al., 1999. Desarrollo estructural en un Entisol bajo el sistema de labranza de conservación y tradicional. *TERRA Latinoamericana.* 17 (2): 87-96.
- IDRISI, 2006. IDRISI Kilimanjaro. Guide for GIS and image processing. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Manual versión 14 Traducción en español, por Ravelo A. C. Clark Labs, USA. 312 p.
- Image Pro Plus, 2001. Image-Pro Plus, the proven solutions. Software version 4.5 for para Windows 98/NT/2000
- Image Pro-Plus, 2007. The ultimate image analysis solution from the Image-Pro family. Revisado (12/09/07), In <http://ncimicro.com/m23Downloads/Image-pro-plus.pdt>
- Ingram, K. T., and G. A. Leers. 2001. Software for measuring root characters from digital images. *Agron. J.* 93 (4): 18-922.
- Karcher, D. E., and M. D. Richardson. 2005. Batch analysis of digital images to evaluate turfgrass characteristics. *Crop Sci.* 45 (6): 1536-1539.
- Luo L., L. Henry, P. Halleck. 2008. Quantifying soil structure and preferential flow in intact soil using x-ray computed tomography. *SSSAJ* 72 (4): 1058-1069
- Mezaris, V., I. Kompatsiaris, I., and M. G. Strintzis. 2004. Still image segmentation tools for object-based multimedia applications. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence.* 18 (4): 701-725.
- NOESIS, 2007. The next level in image analysis. Revisado (15/03/07)., In: <http://topedai//.com/samples/Brouchee.pdt>
- Osuna, C. E. S., S. B. Figueroa, C. Oleschko, D. M. de L. Flores, M. R. Martínez, y C. F. V. González. 2005. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia.* 40 (1): 27-38.
- Peth S., R. Horn, F. Beckman, T. Donath, J. Fischer, and A. J. M. Smucker. 2008. Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography. *SSSAJ.* 72 (4): 897-907
- Rafael, N. S. A., y M. Guido-Herrera. 2002. Uso del análisis de imágenes en el diagnóstico de la "tristeza de los cítricos" en limoneros (*Citrus limon* (L.) Burm.) del Valle de Malleauco. *INIA, Chile. Agric. Téc.* 62 (4): 606-615.
- Rebolledo-Robles, H. H. 2002. Manual SAS por computadora, análisis estadístico de datos Experimentales. 1ra ed. Ed TRILLAS, México, D.F. 208 p
- Rodríguez, R. 2005. Segmentation of blood based on a threshold that combine statical and scale space filters. *Computación y Sistemas.* 9 (2): 093-103.
- SAS, Institute, 2006. SAS 0.13 User's Guide. Statistics. SAS Inst. Cary NC, US., 2006.
- Singh, P., R. S. Kanwar, and M. L. Thompson. 1990. Measurement and characterization of macropores by using AUTOCAD and automatic image analysis. *J. Environ Qual.* 20: 289-294.
- Singh P., S. R. Kanwar, and L. T. Thompson. 1991. Macropore Characterization for two tillage systems using resin-impregnation technique. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55 (6): 1674-1679
- USGS, 2008. Geographic information systems. U.S. department of the Interior-U.S. geological survey. Revisado (02/26/08), In: http://www.erg.usgs.gov/isb/pubs/gis_poster/index.htm

Monitoring of CO₂ Flux and Contribution for Components in the Soil-Plant System in a Grassland from Northeastern Mexico

1 López-Santos Armando, 2 Cadena-Zapata Martín, 2 Zermeño-González Alejandro, 3 González-Cervantes Guillermo., 2 Gil-Marín José Alexander, 3 Sánchez-Cohen Ignacio

1 Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la UACH (alopez@chapingo.uruz.edu.mx), 2 División de Ingeniería UAAAN, Buenavista, Saltillo, Coah. Méx., 3 Centro Nacional de Investigación Interdisciplinario en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera del INIFAP, Gómez Palacio, Dgo, Mex.

Abstract

The monitoring and quantification of CO₂ released to the atmosphere by the rural production systems is an uprising need when facing the actual challenge of global warming. It is known, that in the last decade the change of land use and silviculture have contributed in a significant manner in the net emissions of CO₂ to the atmosphere. However, is not quite clear the magnitude of the contribution of each individual ecosystem, and even it is least known the contribution of the separate action of the soil-plant system components. There are three methods for monitoring and quantifying the CO₂ flux in an extensive open area condition: i) Open or close use of interchange gas chambers; ii) Using the technique of the Bowen Relation Method; and iii) Using the Eddy Covariance Method. In this experiment, the last mentioned was used for its high reliability in the measurements of mass and energy flux in extensive land conditions. The experiment was carried out at Rancho Los Angeles Municipality of Saltillo, Coahuila, México (25° 6.650' N and 100° 59.413' W). It was measured the CO₂ flux, in plots of 2.4 ha after removing the native vegetation, dominated by three families (*Chenopodaceae*, *Euphorbaceae* y *Asteraceae*), using two tillage treatments: vertical tillage by chiseling (VT) and conventional tillage by disc ploughing (CT), the flux was measured as well in a reference plot without tillage treatment (NT). In all plots it was determined the magnitude of flux for each component at the soil-plant system. The results showed that under the predominant climatic conditions at Autumn 2006, when separating the components of the soil-plant system from the CO₂ total flux monitored (FCO_{2tm}), the more important contribution came from the soil in both tillage methods used (FCO_{2sLV}=66 % and FCO_{2sLC}=74 %).

Key words: Eddy Covariance, Rural Production Systems, CO₂ flux.

Introduction

Mexico ranks second among the Latin-Americans countries as CO₂ emitter, with net emissions of 444.5 millions of metric tons for 1990, from this amount, it is estimated that the change in land use and silviculture contribute with 30.6 % (PNUMA-SEMARNAT, 2004). Considering the need to reduce release of CO₂ and maintain the quality of the soil to support food production, the role and importance of the tillage practices and its impact in the organic matter should be reexamined (So et al, 2001; Lokupitiya et al,

2006), this is also important because of the raise of carbon bonus market among the countries that signed the Kyoto protocol (Inclán, 2007; Cervantes, 2007).

The CO₂ emissions from the surface on bare soil give a direct assessment in the short time about the carbon dynamic in the soil, but when vegetation is present, the interpretation of the total soil respiration is difficult due to the root contribution in the CO₂ release (Rochete, 1999). It has been estimated that the rizosfera contributes with 40-50 % of the total soil respiration, and the 50-60 % remaining includes the decomposed microbial root exudates and other rhizodepositations (Kuzyakov, 2002).

Some authors (Rochete, 1999) have utilized values of isotopic carbon (¹³C) in order to measure CO₂ separating from the total soil respiration that which comes from the rhizosphere in a maize crop (*Zea mays* L.) by using a portable chamber for gas exchange (LI-Cor), from those experiments, and they found that the rhizosphere contributes with 45% of the total respiration, this value agrees also with that reported by Kuzyakov (2002). Also they observed as well that the values of the soil respiration decreased from 3.3 to 1.4 g m⁻²d⁻¹.

Similarly, other authors (Qi et al, 2007) used a dark gas exchange fix chamber to measure total respiration, also the microbial and radicular from a grassland dominated by *S. balcalensis* and from bare soil, condition obtained by cutting the aerial part of the plants the day before the sampling, it was found that maximum spoil respiration occurred in July with a value of 6 g CO₂ m⁻²d⁻¹.

In terrestrial ecosystems, the CO₂ movements, as well as, other energy flux energetic, can be measured basically by three methods: 1) Eddy Covariance, (EC); 2) Bowen Relation, (BR); and 3) Open or Close, exchange gas chamber (CIG). Every method have advantages and disadvantages in relation to the measurements to characterize the flux behavior, because they are affected by variability in the local and surrounding conditions during day and night, such as humidity, temperature, barometric pressure, wind direction, etc. (Peters et al, 2001; Clark, 2001).

In the present work, the total measure of CO₂ flux, is part of an investigation based in the Eddy Covariance method, which have the follow characteristics: i) Direct measurements of the heat flux, water vapor and carbon dioxide; ii) Not assumption is made of coefficient values; iii) measurements are independent; iv) Allow to evaluate the precision of energy balance (Rn=H+LE+G); and v) Is considered the most precise method to measure superficial fluxes (Peters et al, 2001; Clark, 2001).

Based on the above, the objectives of this work were: i) Monitoring CO₂ flux in extensive outdoor conditions and ii) To asses the contribution of native vegetation in the CO₂ sequestration by the separation of the soil-plant components system.

Materials and Methods

This investigation was carried out in the autumn 2006, at Rancho “Los Angeles”, municipality of Saltillo, Coah., México. This is a farm dedicated to the Charolais breed production, in a total surface around 6700 has. The site location is 25° 6.650' N and 100° 59.413 W, in the sub province called Gran Sierra Plegada, located at north of the Physiographic Region Sierra Madre Oriental, as could be seen in the Figure 1.

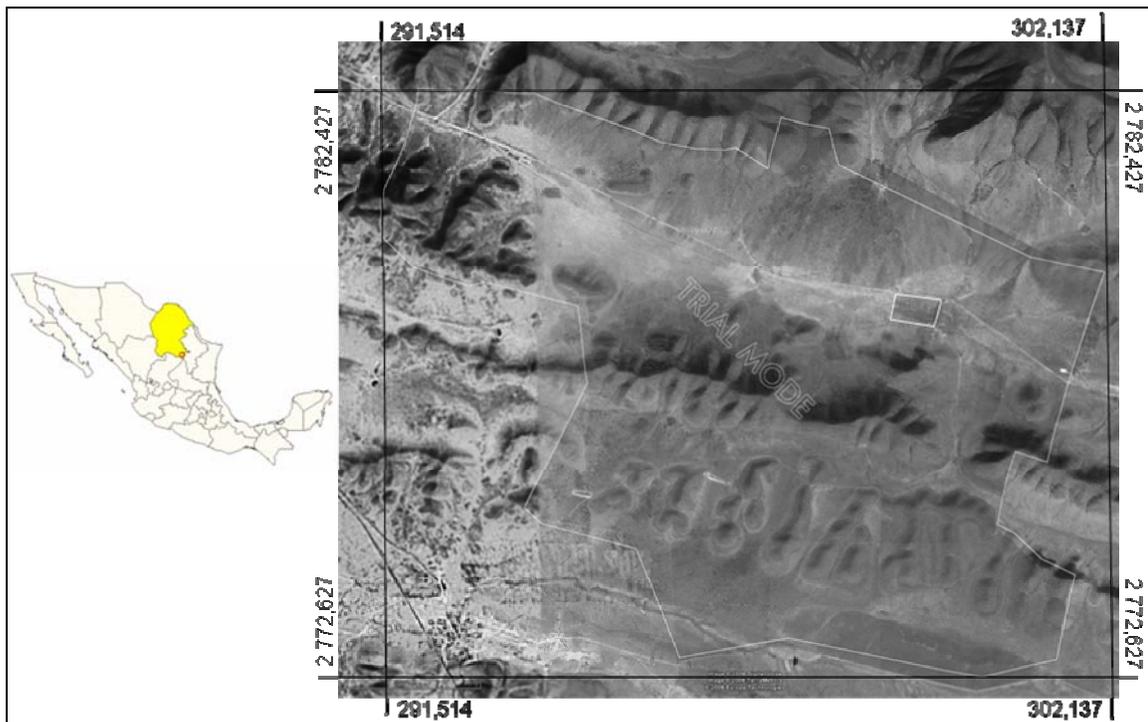


Figure 1. Field where was put the monitoring system (UTM coordinates system)

Two factors influence the cattle management in this place: One is the climate [BWhw(x')(e)] which is semiarid (Garcia, 1975), having a precipitation of 350 mm per year, with a rainy season from May to September when falls 80 to 90 percent of total rain; the other factor is the landform; having to the north mountains like the Sierra Leona with a maxim altitude above sea level of 2850 m and to the south the Sierra Los Angeles with 2400 m above sea level, this condition have produced small valleys used as grazing lots, which have an average altitude of 2100 m. The soil type, is mainly Luvisol in a 40 % of total surface, the soils are deep with superficial horizons of dark color and high organic matter content (INEGI, 1976).

The vegetation have a distribution in relation to the topographic, edaphic, and microclimatic characteristics in this place, in the hillslope prevail the shrub and in the hilltop prevail the pine trees (*Pinus sp.*) combined with shrubs; In the valleys is well established the grasses which are a compound that includes the following gramineae: *Asistida*, *Buchloe*, *Boteloua*, *Mulenbergia*, *Steria e Stipia* (Mellado, 2007), that are sharing spaces with other plants from families like *Laminaceas*, *Chenopodaceas*, *Euphobaceas* and *Asteraceas*.

Selection, location and characteristics of the monitoring plot

The monitoring of CO₂ flux was made in an area of 35 has of the grazing lot number four located at the central part of the Ranch (rectangle at the Figure1 centre). Three plots of 2.4 ha each, with similar characteristics in soil type and vegetation were established. The dimensions of each plot were: a width of 120 m to N-S direction and a length of 200 m to E-W direction.

The soil horizons from 0-0.30 and 0.30-0.60 m depth were studied, the resulting data showed texture with clay content greater than 40% (Boyucos Hydrometer), PH with more than 8 (potentiometer), color in the soil surface layer (Munsell tables: 10YR 5/2), and total carbonates content grater than 37% (neutralization volume), from this data and based on the INEGI (2001) methodology, it is deduced that the soil characteristics match with a Feozem luvic (HI) (INEGI 1976; FAO-ISRIC-ISSS-AISS-IBG, 1994).

On the other hand, the native vegetation found in this season of the year and its relative importance value (RIV) was determined using line interception method and the more important species are shown in Table 1.

Table 1. Floristic list and RIV in the monitoring plots

Family	Technical name	RIV
Asteraceae	<i>Brickellia laciniata</i> Gray	7
Asteraceae	<i>Zinnia acerosa</i> (DC.) Gray	5
Asteraceae	<i>Aphanostephus ramosissimus</i> DC.	5
Acanthaceae	<i>Dischoryste linearis</i> (T.&G.)O. Ktze	7
Onagraceae	<i>Calylophus belandieri</i> (Spach) Towner	10
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia furcillata</i> H.B.K.	2
Boraginaceae	<i>Tiquila canescens</i> (DC.) Richardson	8
Laminacea	<i>Marrubium vulgare</i> L.	50

It was noticed that in the grazing lot where experimental plots were established, the gramineae were not dominant species due to this lot had been also used to establish winter forage crops like oats (*Avena sativa*) and barley (*Hordeum vulgare L.*), so other families as listed in table 1 were dominants.

Monitoring duration of FCO₂ and separation of components

In the first plot the monitoring of FCO₂ was made during space of 21 days (from October 20th to November 10th) under not disturbed soil-plant system, this condition was defined as total flux monitored or FCO₂^{NT}, in a second plot, the measurements of FCO₂ was made during 18 days (from November 10th to November 28th) the condition of the plot was that the present vegetation was eliminated, with a chisel plough with delta wings at 25 cm depth. This condition of the system where vegetation were removed by vertical tillage was defined as FCO₂^{SVT} the flux was monitored directly from the tilled soil. In a third plot the native vegetation was removed using a disc plough, to a depth of 25 cm. The measurements of CO₂ flux in this condition of bare soil defined as FCO₂^{SCT} was made for 27 days (until December 8th) Figure 2, illustrates the condition of the second and third plot where the two types of tillage were carried out.



Figure 2. Exclusion vegetal cover by VT (left) and CT (right)

Instrumentation for monitoring the systems

The instruments used, were integrated in an automatic meteorological station (Eddy Station), which has the following components: (1) net radiometer Nr (model NR-LITE, Keep and Zonen Inc.) to measure the difference between short and long wave

radiation, (2) a sensor to measure air temperature and water vapor, respectively (model HMP45C, Vaisala, Inc.) (3) two plates to measure heat flux soil (model HFT3, REBS Inc.), attached with two thermocouples of four tips (model TCAV, Campbell, Sci. Inc) for measuring the energetic gradient in the soil, G . The Eddy Station had other instruments like a sensor to measure wind speed and wind direction (model 03001-5, RM Young Inc.), an electronic pluviograph to measure the rain events (model TE525, Texas Instruments, Inc.). Also, were used two [datalogers] (models 23X and CR7, both of Campbell, Sci Inc.), and two solar panel one of 64 W and other of 20 W, which provided the energy required for the monitoring system.

Results and Discussion

The results that will be discussed correspond to the first step of an investigation about the measure and evaluation of energy and mass flux under different conditions of soil management and season of the year. The purpose of this is to asses the role of the agroproductive systems from semiarid condition in the FCO_2 dynamics. Figure 3, shows a flow chart for the analysis for the energy and mass flux from the data collected at the experimental plots.

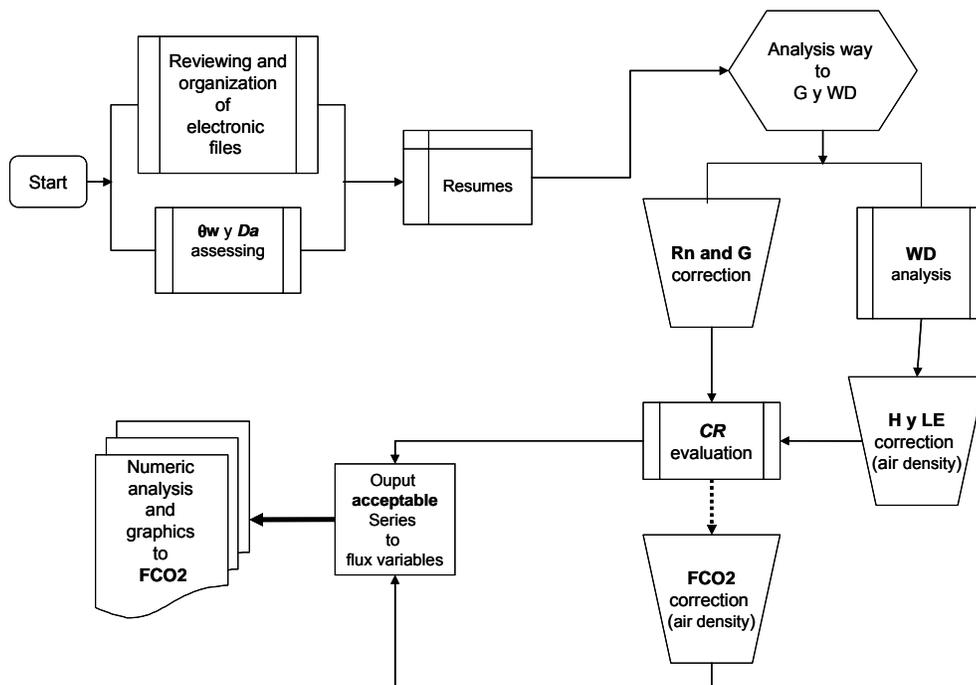


Figure 3. Diagram to analysis for the energy and mass flux

As a first step, the data of the experiment was arranged in two sets, the data from the eddy station was tabulated for analysis in excel files. Other data from laboratory, and field properties of soil and characteristics of the vegetation was arranged in another set for analysis.

In a second step, the analysis of G and the wind direction (WD) was used as a criterion to correct every one of the flux variables. According to the experimental site prevailing wind direction, the acceptable range of WD were from 0 to 90° NE and from 270 to 360° NW.

As a third step, energetic fluxes were determined, with the exception of Rn under soil surface and in soil surface with $W\ m^{-2}$. The first is represented by the heat flux at the edaphic layer (G) at 0.08 m depth. The second is represented by the sensible heat (H) and latent heat or water vapor (LE) which were measured at 1.4 m above the soil surface.

The correction of G was made using the formula:

$$G = G_{D8} + \frac{[(Cds + \theta w \cdot Cw) \rho_d \cdot \Delta T \cdot \Delta z]}{\Delta t} \quad (1)$$

Were G_{D8} is the heat flux, measured at 8 cm depth from the soil surface; Cds is caloric capacity of the minerals ($840\ J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$); θw is the volumetric water content, Cw is the caloric capacity of the water ($4190\ J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$); ΔT is the average change in temperature ($^{\circ}C$) by the sensors placed from 2 to 6 cm depth. Δz is the depth at which the plate for sensing the heat flux is placed (0.08m); and Δt is the variation of time in seconds.

For H and L, there were utilized the following equations (2) and (3):

$$H = \rho_a \cdot \overline{C_p \cdot w'} T_s' - 0.51 \cdot T_a \left[\frac{\rho_a \cdot C_p}{\lambda} \right] \lambda E \quad (2)$$

$$LE = \lambda \overline{w' \rho_{wv}'} \quad (3)$$

Were, ρ_a is the air density ($kg\ m^{-3}$); C_p is the caloric capacity of the air ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$); T_s is the sonic temperature measured with the anemometer; T_a is the air temperature; w' is the vertical wind speed ($m\ s^{-1}$); λ is the heat water vapor ($J\ kg^{-1}$). $w' T_s'$, $w' \rho_{wv}'$ represents the covariance among the variables and the top bar means the average in a

time interval that was established as 20 minutes. The frequency of data gathering for w' , T_s , and ρ_{wv} , and T_a were of 10 Hz.

A fourth step was the correction of FCO₂ according to the next formula (4).

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

Where ρ_{CO_2} is the density of carbon dioxide ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-3}$) and ρ_{wv} is the density of the water vapor (kg m^{-3}). The frequency on the measurements was the same as indicated before for the other variables.

As a fifth step for the data from the accepted ranges of WD, the CR is determined according to the following equation:

$$CR = \frac{[R_n - G]}{[H + LE]} \quad (5)$$

In this case it is important to mention the instantaneous values measured with the carbon dioxide analyzer and the air water content from the 3D sonic anemometer. Those data are valid when corrected according to the local air density and correspond to values between 0.7 and 1 (Zermeño-Gonzalez, 2001; Ham, 2003).

The sixth and last part of the process was to make the numerical and graphic analysis of FCO₂ considering that as mass flux $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ is independent from the calculations in equation (5). However, it is used as a reference, the data series that fall in the ranges that meet the criteria indicated for CR.

FCO₂ measured above the soil-plant system

In the first plot (reference plot) not disturbed by the tillage was made the total measuring of FCO₂. In this phase of monitoring as can be seen in the Figure 4 for the day number 294, had a typical behavior represented for diurnal assimilation and nocturnal release. The first, due to the photosynthetic process from the phototropic organisms, with a rate maxim of assimilation close to $3 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, which occurred around 13:00 hs; and the second like product from breakdown organic matter by macro and microorganism whit a maxim releaser of $-3 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, occurred between the 19:00 and the 20:00 hs. These results are similar to other reported (Scow, 1999; Pumpanen et al 2003; Qi et al, 2007).

These allow to found the general characteristics in the FCO₂ dynamic, for the release as well as assimilation, and whit this was estimated the proportion of the contribution from every component of the soil-plant system.

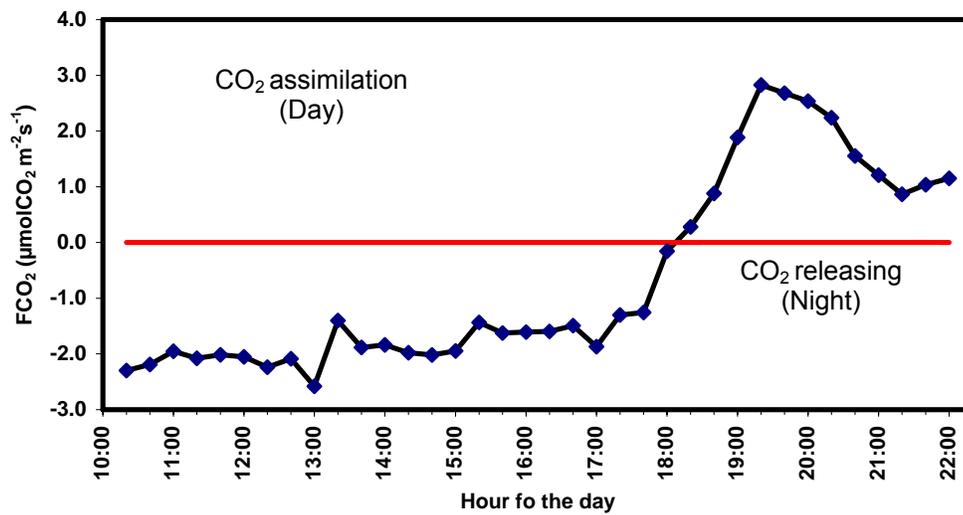


Figure 4. CO₂ flux from the soil with native vegetation (FCO₂NT), observed at day 294

FCO₂ monitored whit native vegetation excluded by tillage

The temporal elimination of the vegetation at the soil surface and the exposition of the root system to the action of environmental factors, allowed to have an exclusion of the vegetal cover and its root system, like can see in the Figure 5. From that, it was established that the flux measured under those soil management conditions correspond to the FCO₂ produced or released under the soil condition left by both tillage system used VT and CT. This is FCO_{2SVT} and FCO_{2SCT}, respectively.

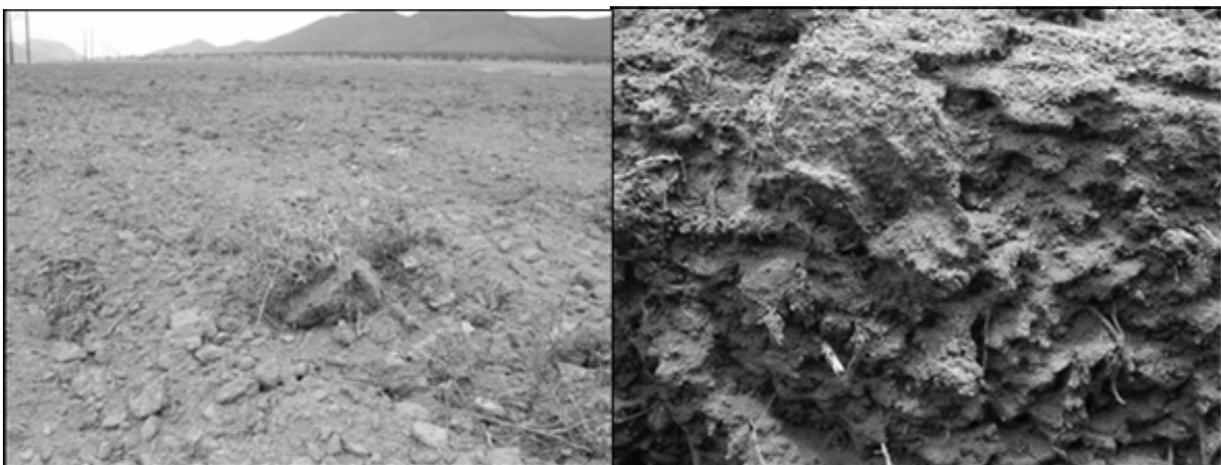


Figure 5. Exclusion vegetation effect. Aboveground (left) and root in the profile view (right)

As a result of the use of both tillage method it could be observed a significant change in the FCO_2 typical behavior, because it changed from capture source to release source; in both management systems the assimilation was negligible, and this situation was maintained for eight and nine continuing days. The release, although with a decrement trend on time was observed day and night in both cases, from 1.14 to 0.99 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and for 1.3 to 0.87 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for VT y CT, respectively.

For VT, as it can be seen in the Figure 6, that a maximum value of 2 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, occurred at the 14:00 h, it could be observed that the curve that represent the release, was maintained day and night being more pronounced for the last case, similar condition was present for CT as it can be seen en the Figure 7, also, in this tillage system can see a frequent variation in the releases of CO_2 from the soil, the maximum value registered was almost same at 2 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and values of assimilation of less than 0.5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

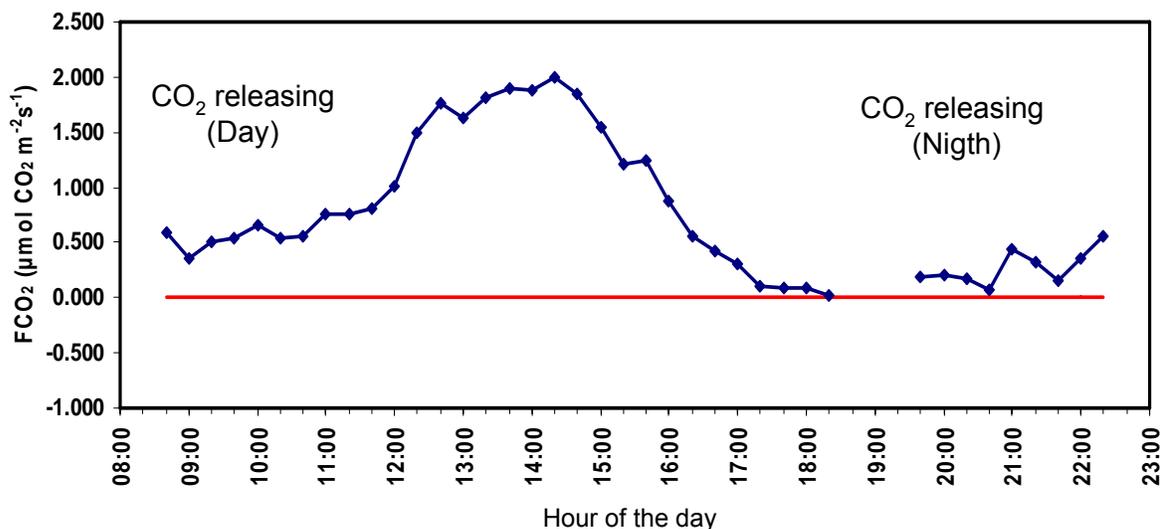


Figure 6. CO_2 flux from the soil without vegetation observed at day 316, two days after VT

The data gathered in the different treatments allow to separate and to quantify the participation of each component of the soil-plant studied, it also make the possibility to determine the impact of tillage in the flux dynamics of this production system.

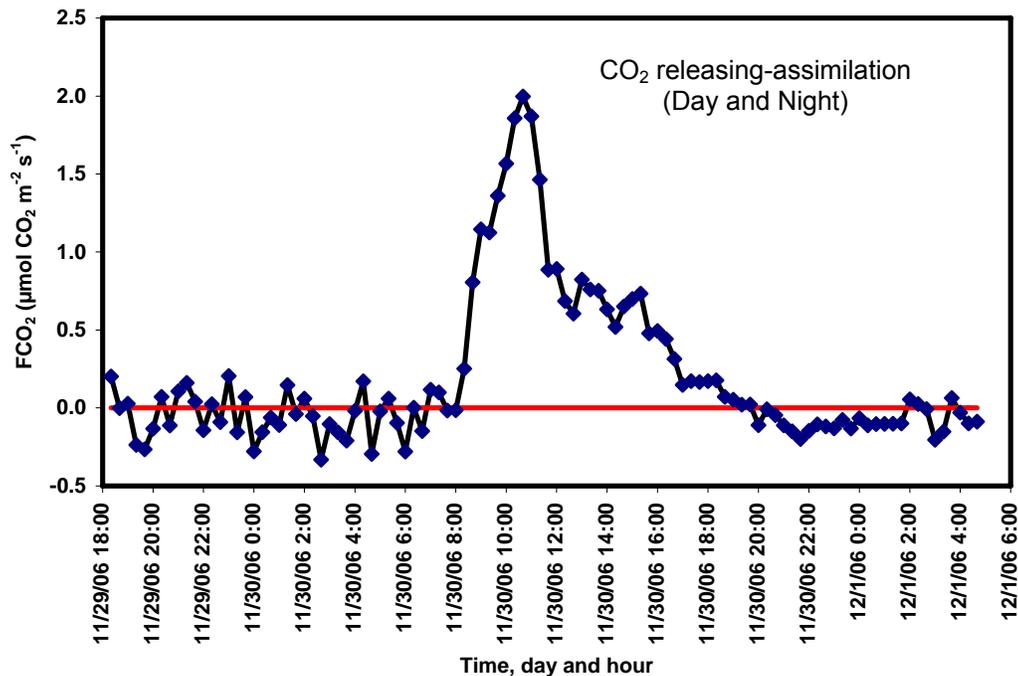


Figure 7. CO₂ flux observed days from 333 to 335, between two and fourth days after CT

FCO₂ estimated for components from the soil-plant system

The net contribution for each component of the soil-plant system, to the release and assimilation of CO₂ was estimated taking as a reference the average of four events of the instantaneous rates recorded by the sensor in the undisturbed plot, representing as FCO_{2mt}. The difference resulting from the fluxes in the reference plot (undisturbed condition) and those rates measured in the plots disturbed for each type of tillage are the contribution of each condition to the CO₂ released as it is presented in table 2.

It should be also stated that under certain environmental condition some abiotic processes such as the dissolution of carbonates and chemical oxidation could be contributing also to the total CO₂ flux (Hashimoto and Suzuki, 2002).

Table 2. Average of rate release of CO₂ measured and estimated for components from the soil-plant system

Events	FCO ₂ _{mt} (†)	LV		LC	
		FCO ₂ from the soil-plant system (FCO ₂ _{SPVT})‡	FCO ₂ from the soil (FCO ₂ _{sVT}) §	FCO ₂ from the soil-plant system (FCO ₂ _{SPCT})¶	FCO ₂ from the soil (FCO ₂ _{SCT})#
$\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$					
1	1.600	0.200	1.400	0.730	0.870
2	1.270	0.295	0.975	0.020	1.250
3	1.710	1.030	0.680	0.170	1.540
4	1.618	0.628	0.990	0.741	0.877
Averages	1.527	0.508	1.011	0.415	1.134
Percents	100	34%	66%	26%	74%

† FCO₂_{mt} total instant rate measured in the NT plot.

‡ FCO₂_{SPVT}, estimated rate for difference among FCO₂_{mt} and FCO₂_{sVT}.

§ FCO₂_{sVT}, Instant rate measured in the plot with VT.

¶ FCO₂_{SPCT}, estimated rate for difference among FCO₂_{mt} and FCO₂_{SCT}

FCO₂_{SCT}, Instant rate measured in the plot with CT.

Conclusions

It was possible to establish the importance that vegetation has (where not gramineae are dominant) in the sequestration of carbon. The rhizosphere in the described soil condition for the experiment contributes with 26 to 34 % of the total flux of CO₂.

Both soil tillage methods used promotes the liberation of CO₂ to the atmosphere, this is particularly important when land use have to be changed or when tillage is performed early in the season 4 or 6 months before the rainy season as it is the case in the region.

Recommendations

It should be further investigations on the natural soil capacity to return to the initial condition after the tillage impact because this could be occur at different time scales for some morphologic and biologic properties. It is important to give a value to the roll played by grassland in the sequestration of carbon, given the importance that in the

present and future will have the environmental services and the market of green bonus of carbon.

Thankfulness

The work described here has been possible, thanks to the help giving from the UAAAN and CONACYT, particularly the Ingeniería Division, where are the follow Faculties: Ingeniería Mecánica Agrícola, Riego y Drenaje and Soils. Also, thanks for the staff of the Rancho “Los Anegels”, whos gave all kind of help.

Cited references

- Cervantes, 2007. El mecanismo de desarrollo limpio y las reducciones certificadas de emisiones. Dirección de Proyectos de Cambio Climático en la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT
- Clark DA, Brown S, Kiclighter WD, Chambers QJ, Thomlinson RJ, Ni J. 2001. Measuring Net Primary Production in Forest: Concepts and Field Methods. Ecological Society of America. Ecological Applications 11(2): 356-370
- FAO-ISRIC-ISSS-AISS-IBG, 1994. World Reference Base for Soil Resources. Wagening, Rome. P 56.
- García E. 1975. Climas Coahuila y Nuevo León, precipitación y probabilidad de lluvia en la República Mexicana y su evolución. CETENAL, México, D.F.
- Ham JM, Heilman JL. Experimental Test of Density and Energy-Balance Corrections on Carbon Dioxide Flux as Measured Using Open-Path Eddy covariance. American Society of Agronomy, 2003; 95: 1393 – 1403.
- Hashimoto S, Suzuki M. 2002. Vertical Distribution of Carbon Dioxide Diffusion Coefficients and Production Rates in Forest Soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 66: 1151-1158
- Inclán GU. 2007. Mercado de Bonos de Carbono y sus beneficios potenciales para proyectos en México. Dirección de Cambio Climático-SENER. Consulted (07/19/07), *In*

http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/2962/1/images/22_sener.pdf.

INEGI. Thematic Cartography of: Edaphology, Geology, Topography, Vegetation and Land Use. Maps: Agua Nueva (G14-C43) y Huachichil (G14-C44). Escale 1:50,000. 1976

Kuzyakov Y. 2002. Separating Microbial Respiration of Exudates from Root Respiration in non-sterile soils: a comparison of four Methods. *Soil Biology & Biochemistry*, 34: 1621-1631

Lokupitiya E, Paustian K, 2006. Agricultural Soil Gas Emissions: A Review of National Inventory Methods. *J. Environ. Qual.* 35: 1413-1427

Mellado M. 2007. Traslape de Dietas entre el Perrito de la Pradera (*Cynomys mexicanus*) y Bovinos en un Pastizal. Mediano Abierto. Consulted (08/19/08) in <http://www.uaaan.mx/DirInv/Rdos2003/Zaridas/dietas.pdf> s/f.

Peters G, Fischer B, Munser H. 2001. Eddy Covariance Measurements with Closed-Path Optical Humidity Sensors: A feasible Concepts? *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, American Meteorological Society..

PNUMA-SEMARNAT, 2004. El Cambio Climático en América Latina y El Caribe (Preliminar Version). Consulted (07/07/07) in <http://www.pnuma.org/Cambioclimatico/CAMBIO%20CLIMATICO-web.pdf>

Pumpanen J, Ilvesniemi H, Hari P. 2003. A process Based Model Predicting Soil Carbon Dioxide Efflux and Concentrations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 402-413

- Qi YCh, Dong Y, Liu J, Domroes M, Geng Y, Liu L, et al. 2007. Effect of the Conversion of Grassland to Spring Wheat Field on the CO₂ Emission Characteristics in Inner Mongolia, China. *Soil and Tillage Research*. 94: 310-320
- Rochete P, Flanagan LB, Grgorich EG. 1999. Separating Soil Respiration into Plant and Soil Components Using Analyses of the natural Abundance of Carbón-13. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1207-1213
- Scow MK. 1999. *Soil Microbial Communities and Carbon Flow in Agroecosystems*. Ed. Academic Press, Editado por Jakson, L. E. Carolina University, USA. Pp 367-413.
- So HB, Dalal RC, Chan KY, Menzies NM, Freebarm DM. 2001. Potential of conservation tillage to reduce carbon dioxide emission in Australian soils. In D.E Sttot, RH Mothar and GC Steinhardt (eds). *Sustaining the global farm. Selected papers from the 10Th International Soil Conservation Organization meeting*.
- Zermeño-González A. 2001. Métodos Micrometeorológicos para medir flujos de calor y vapor de agua entre los cultivos y la atmósfera. XIII Semana Internacional de Agronomía, 2001

Changes in the Soil Porosity as a Result of Tillage in a Grassland Ecosystem

¹ A. LÓPEZ-SANTOS, ² G. GONZÁLEZ-CERVANTES, ³ M. CADENA-ZAPATA,
² J.L. GONZÁLEZ-BARRIOS, ¹ J.G ARREOLA-ÁVILA, ¹ J.S. RODRIGUEZ-LOPEZ

¹Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas of the U. A. Chapingo. Address Bermejillo, city, Durango, State, México. Postal number, 8; Postal code, 35230. Phones: (872) 776-0160, 90 and Fax (872) 776-0043. Mail: alopez@chapingo.uruza.edu.mx; ²Centro Nacional de Investigaciones en Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera del INIFAP-México; ³Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah., Mexico.

Abstract: The soils of grassland ecosystems have always been distinguished by their fertility, for that reason, the farmers prefer to plant cereal and fodder, whose looking for growing yields do so at the expense of expanding its agricultural frontier. They just focused their attention on soil where costs are lower initially. Changes in land use have been assessed from various points of view, for example tillage is known to influence changes in soil porosity, and the processes associated with it. However, there are still questions about the extent of its impact. For that reason, this research was conducted during 2006 and 2007 with the objective to measuring and comparing the porosity in the soil of grassland converted to agricultural use, using a sophisticated image technique, in Los Angeles farm located at south of Saltillo County of the Coahuila State, Mexico (6.650 ° 25 'N and 100 ° 59.413 W). The climate is classified as BWhw (x') (e) where the site and soil type are Feozem luvisc (Ht). The effect of conventional tillage (CT) and vertical tillage (VT), were compared to a non-disturbed soil (NT). The results indicate changes in size and shape of the pores. Also it was observed that treatment with vertical tillage LV showed a decrement in three diameter ranges of soil porosity: T3 (with pores less than 2 mm²; T4 (with pores of 0.1 to 2 mm²) and T6 (with pores less than 0.02 mm²).

Key words: High Tech Image, Clayish Soil, Rural land uses

INTRODUCTION

Grassland ecosystems occupy more than half of the land world. Its importance is not only associated with that cover part of the forage needs of livestock operations that demand and complement the production of cultivated pastures and improved, but also in its role as a natural sink for carbon dioxide (CO₂) that helps mitigate global warming and prevent soil erosion (Cox *et al.*, 2000).

Generally the Feozem soils in which is rooted part of the pasture, are usually deep, fertile and rich in organic matter. Because of this characteristic, in many regions around the world, including Mexico with 82 million ha and with nearly 10% of the total national soil of this type, farmers historically have preferred such soils for seeding cereal and fodder, thereby increasing their susceptibility to erosion (SEMARNAT, 2002; SIAP, 2007; CONAFOR, 2008); a trend that could increase due the demand for food, which could reach one billion of ton for the next 15 years. This is

based on the fact that the increases in production come from three main sources: expansion of the surface of farmland, increment in the intensity of crops and performance improvements (FAO, 2002).

The impacts of changes in land use have been assessed and documented extensively, based on this information, it is known that agricultural activities, among other things, tend to increase the volume density (Udawatta *et al.* 2008a) thereby affecting other physical properties, such as the ability to drive and store moisture in the layer plow. However, the distinction of tillage operations effects in terms of porosity changes has not always been easy to demonstrate statistically (Singh *et al.*, 1991; Eynard *et al.*, 2004).

The differences between advantages and disadvantages of tillage have been in part exposed by some authors (González *et al.* 2004a,b; Udawatta *et al.*, 2008b) using advanced techniques of image

analysis. Therefore, the objectives of this research were: 1) To determine the morphopatematic characteristics of the pores through image analysis; and 2) To compare the impact of the two tillage systems on a grassland soil.

MATERIALS AND METHODS

Location and soil characteristics which made the sampling of soil

This research was made in Los Angeles farm, County of Saltillo, Coahuila, México (25° 6.650' N y 100° 59.413 W), for two consecutive years (Fall, 2006 and Summer, 2007) after five years of rest, in a grassland soil destined to agricultural use more than 25 years ago. The weather of this site reported by *García* (1975) is [BWhw(x')(e)] semiarid, with a not too cool winter, 18 to 22 °C annual average temperature, 450 to 550 mm annual precipitation distributed along summer and winter, and approximately 2,100 meters above sea level.

The laboratory results (Boyucos Hidrometer) show that the soil is a clayish type, because it has >40 % (g·kg⁻¹ for: 320, sans; 240 silt; and 440, clay); a granulate structure; pH>8, (potentiometer); contents an organic matter between 3.5 and 5.49 % (Walkey y Black); brown colored surface of dry soil (Munsell Tables: 10YR 5/2); and total carbonates >37 % (Neutralitation volume). According to this analysis and by reference of INEGI's classification (2001) and *FAO-ISRIC-ISSS-ISSA-IBG* (1994), it was confirmed that this is a Feozem luvic (Hl) type of soil, found primarily in plains which cover slightly more than 40 % of the Farm's total area (6700 ha). The site's typical vegetation reported is grass, which includes genders: *Arista*, *Buchloe*, *Boteloua*, *Mulenbergia*, *Steria* and *Stipia* (Mellado, s / f). The species found in the studied site correspond to the families in the next importance order: *Laminaceas*, *Chenopodacea*, *Euphorbacea* y *Asteraceae*; this as a result from changes in rural land use.

Trial plots

To measure and differentiate the magnitude of tillage impact, within the same type of soil identified as Hl, we selected two sites: the first site in an area of 35 ha, which as mentioned has been devoted to agricultural use for more than 25 years, where two parcels of 2.4 ha received tillage treatments; the second site was selected in a paddock devoted to

grazing cattle which was considered as a treatment control.

Tillage treatments were performed by using a chisel plow fitted with fins at Delta (LV) and a reversible plow three discs, commonly used in the study area (LC). LV was used by a NEWHOLLAND tractor model 6810, 95 HP, and LC was used by a John Deere, tractor, Model 3200, 84 HP. Both were calibrated to operate at 0.25 m depth, as shown in Figure 1.



Figure 1. Soil Tillage through LV (a) and LC (b).

Experimental design and Image Tech

Three randomly samples were taken in each one of the treatments including the control. Draws were done at depths 0-0.15 and 0.15-0.30 m, a total of 18 units were considered. The samples were prepared in monoliths of 0.15 m and extracted by using stiff cardboard mold of equal size, and encased with a film of wax to prevent tampering, the effect of the manipulation at the time of being transported. Moisture was eliminated in the laboratory by the moisture vapor phase method, proposed by Fitzpatrick y Gudmunson (1978), thus it was possible to keep the soil damp (as in the field), without altering their natural microstructure; action that was complemented with the addition of epoxy according to the technique proposed by Singh et al. (1991), and widely used in studies of structure and porosity of the soil (Singh et al., 1990; Singh et al., 1991; González, 2004a,b; Osuna et al., 2005; Buj and Gisbert, 2007).

Once solidified the impregnated cubes with resin, parallel cuts were made with respect to ground level, thus it was possible to represent the depths to 0.05, 0.10, 0.20 and 0.25 m. The samples were polished with an industrial belt sander, with ranks from 40 to 400, to get a very smooth texture to the touch. The polished samples were translated to a photo section at the Laboratory of Image CENID-RASP-INIFAP, Mexico.

To differentiate pores size, six ranges of pores size were defined (Rzp) in mm² for the two scales respectively: M1 and M2, which are shown in Table 1. For the first scale, the images were captured by an Olympus camera (Mod. C4040), with 7.5x zoom of 4.1 MP, the same camera was used for the second, but in this case, it was mounted on a stereo OLYMPUS (Mod. SZ-CTV), with 110 AL 2x WD38 lens.

In both instances were used two lamps (Mineralight Lamp) which emit UV rays at a wavelength of 254-365 nm (nanometers), to illuminate the target area with what is possible to differentiate the empty spaces of the soil. This produced high-contrast images in JPEG format 2272 x 1704 pixels, and 1.04 MB (megabytes). The images were loaded subsequently into the Image Pro Plus 4.5® for digitizing from a grid for each level: M1 = 126 x 93 mm; and M2 = 13.5 x 10.1 mm.

Table 1. Keys for six ranges of pores size defined in two scales.

Key	M1 scale			M2 scale		
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Rzp	>10	2-10	<2	>0.1	0.1-.02	<0.02

Measured variables

Table 2 lists the values of bulk density, Bd, initial and final to the depths of 0.05 to 0.25 m. The values of the original Bd were determined by gravimetrically from samples extracted from drill cores to a depth indicated there, so this allowed to estimate the final Bd based on the proportion of the observed changes after measurements made on the surface of the ground at two points, using the micro relief technique described for Cadena et al (2004), as illustrated in Figure 2.

Table 2. calculated Bd_{in} by gravimetry and estimated Bd_{fin} based on the proportion of negative changes that occur in each type of tillage.

Trat.	Bd _m layer (m)				Bd _m layer (m)			
	.05	.10	.20	.25	.05	.10	.20	.25
	-----Kg m ⁻³ -----							
NL	904	923	816	955	904	923	816	955
LV	916	863	956	973	905	852	944	961
LC	973	939	915	915	921	888	866	866

On the other hand, with digitalized images, after a segmentation and visualization process until becoming binary, it was proceeded to generate perimeter and area measurements, thereby leading to the distribution of porosity in percentage range for each size and other properties of the pores such as irregular, oblong or round shapes.

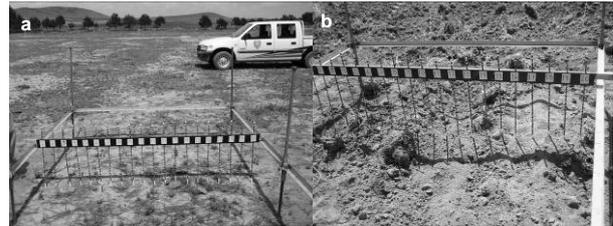


Figure 2. Micro relief technique to determine the immediate changes of bulk density at two points: (a) initial reference level, and (b) the resulting roughness after plowing.

Statistic Analysis

Statistical analysis included the average percentage of area, shape and type of pores. Due to the information available the PROOC GLM in SAS program (SAS, 2006) was applied, under a completely randomized design, in which tillage operations (NT, VT and CT) depth (0.05, 0.10, 0.20 and 0.25 m) and the pores shapes (Rs = round, Is = irregular, and Es = elongated) were considered as sources of variation (classes), and the percentage equivalent morphomatematic values as response variables. The comparisons for both treatments and repetitions were performed using the Duncan’s multiple-range test and the statistical differences were declared significant with p ≤ 0.01.

RESULTS AND DISCUSSION

In this part to determine the magnitude of the effect of tillage on the structure and porosity of the soil it is described and discussed based on two properties: 1) the porosity quantified in terms of area in the ranges already defined as: M1: T1 = >10, T2 = 2-10, y T3 = < 2 mm²; and M2: T4 = > 0.1, T5 = 0.1 a 0.02, y T6 = <0.02; and 2) its characterization based on the pores geometry, according to oblong, round and irregular shapes. The relationship of both properties will establish a dynamic balance between constructive and destructive processes, primarily for

the porosity in the ranges defined on the M1 scale. Processes that have been characterized by its hydrodynamic performance in similar works (Henderson, 1979; Lal y Vandoren, 1990; Kay y Vanden, 2002; Udawtta, 2008; González et al., 2004a,b).

Theory porosity

The amount of empty spaces of different sizes in a mass of soil is known as the total porosity (Tp), it can theoretically be estimated between the unitary difference and the Bd/Real Density, Rd [Tp = 1 – (Bd/Rd)] relation; were Rd assumes a constant value of 2.65 kg m⁻³ (Eynard et al., 2004). According to this, and based on the Bdfin values described above (Table 2), we calculated the changes on Tp (Tpin □ Tpin) in the plots subjected to tilling, taking the treatment NL as reference (shown in Table 3). The values obtained allow us to infer the distribution of the porosity proportions for the size ranges already defined. This process has been successful in other similar works (Gonzalez et al. 2004a, b).

The values shown in Table 3 allow us to confirm that both tillage systems have a direct effect on mass-volume relations (Udawatta et al, 2008).

It is clear that the total porosity (Tp) changes in the same proportion as Bd and the roughness of the ground's surface presented negative changes for the density (Bd) with values equivalent to 1.26 and 5.38% for LV and LC, respectively. These values are very close to those reported by Azooz et al (1996) for a silty loam soil with 1.6% and a sandy loam soil with 0.72%; in which both have been worked with plow disks.

Table 3. Total initial Porosity (Tp_{in}) and Total final porosity (Pt_{fin}) calculated from Bd values.

Tre.	Tp _{sta} by layer (m)				Tp _{end} by layer (m)			
	.05	.10	.20	.25	.05	.10	.20	.25
Percent (%)								
NT	65.8	65.1	69.2	63.9	65.8	65.1	69.2	63.9
VT	65.4	67.4	63.9	63.3	65.8	67.8	64.4	63.7
CT	63.3	64.6	65.5	65.5	65.2	66.5	67.3	67.3

Surface and distribution of porosity in the profile

The percentages of the area the pores occupy as well as their distribution along the profile for NT, VT and CT on the scales M1 and M2 are shown in Figure 3 (3a, 3b, 3c).

It is worth mentioning that a fraction of the porosity of 30 to 43 % was not quantified and it's assumed that it corresponds to the microporos that can only be seen with the scanning electron microscope (SEM). Naturally soils have a pores spectrum of a radio that generally goes from 10⁻³ to 10⁻⁷ (Kung et al., 2005). It was expected that the tillage immediately affected only those pores whose radius were closer to 10⁻³, where the macro pores are located.

Porosity in the control treatment (NT): In advance, it is important to clarify that the NT could only process data that represented depths of 0.05 and 0.10 m. However, the description of its behavior is illustrated in Figure 3a. The porosity which was measured on both scales of 0.05 to 0.10 m depth went from 35.85 to 28.91%; where M2 is 3.3 and 2.9 times larger than M1 for the first and second depth, respectively. That is, while M1 at 0.05 m deep occupies an area equivalent to 8.26% in M2 it was of 27.59, while at 0.10 m depth M1 was 7.41% and M2 was 21.50%.

Porosity in the vertical tillage treatment (VT): Figure 3b shows a decreasing trend of the porosity (M1 + M2) from the first depth, which rates are 25.92, 24.85, 25.21 and 21.35 to 0.05, 0.10, 0.20 and 0.25 m deep, respectively. Although, as in the previous case, the higher values correspond to M2 for being 4.0, 3.4, 3.1 and 2.0 times bigger than M1, since the values in each of the depths for M2 are 20.69, 19.25, 19.05 and 14.27%, while for M1 they are 5.22, 5.60, 6.16 and 7.07% respectively.

Porosity in the conventional tillage treatment (CT): Unlike the two treatments described above, the sum of M1 + M2 porosity in LC has an increasing trend for being of 23.64, 27.80, 28.75 and 26.59% for the four depths in the order above, being M2 5.2, 2.6, 2.6 and 2.9 times bigger than M1. The values for M2 are: 19.85, 20.15, 20.77 and 19.76% while for M1 are: 3.8, 7.66, 7.98 and 6.83% respectively. The indices M1/Tp and M2/Tp shown in Figure 4 indicate

the proportion of Tp porosity which was measured in the ranks of pores on the scales M1 and M2 after plowing operations. For example, the porosity within the ranks of pores on the scale M2 is larger than M1 in all cases.

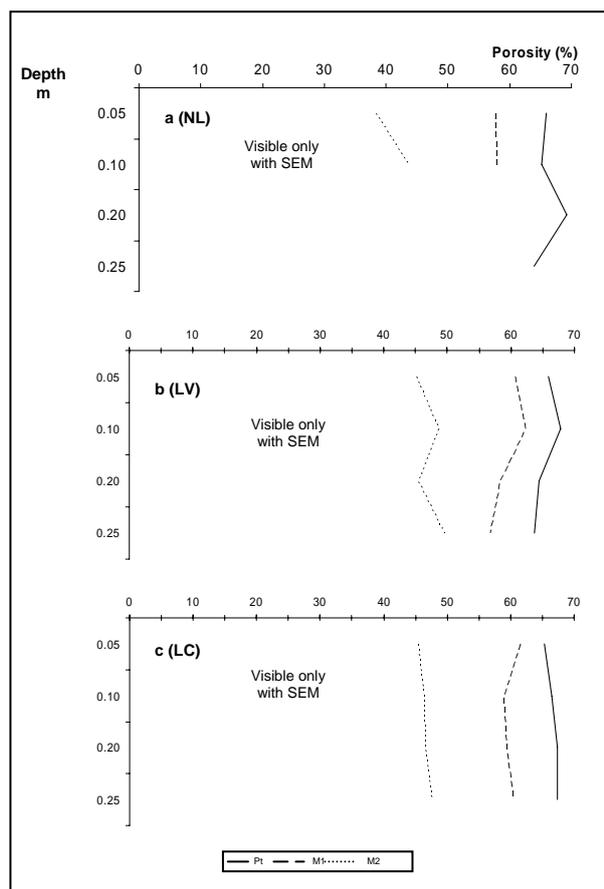


Figure 3. Porosity percentage profile on the scales for M1 and M2; (a) No tillage, (b) vertical tillage and (c) conventional tillage.

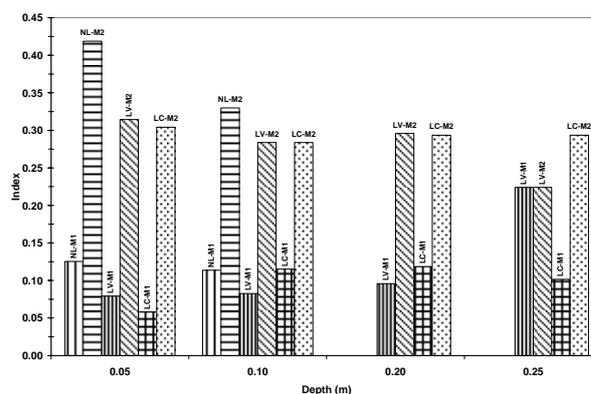


Figure 4. Treatment Porosity Indexes represented for the four depths (m) studied.

For NT (with horizontal lines) the observed values are of nearly 0.45 and 0.35 for 0.05 and 0.10 m respectively, also for this same scale (M2) for VT (with diagonal lines) and LC (with mesh points), with the exception of 0.25 m depth, the rates are around 0.35. On the other hand, for the M1 scale the indexes for VT (with vertical lines) and CT (with grid) are around 0.075, being its value more pronounced (> 0.10) for 0.10 and 0.20 m depth.

The comparison of the rates shown above (Figure 3) could be misleading if its not considered that this ground is naturally porous, as seen in NT, derived from its intrinsic characteristics which are associated with the proportion of clay ($> 40\%$) organic matter ($> 5.0\%$), and by the presence of carbonates ($> 37\%$); key factors in the development of the microporos complex of the soil (Katsvairo *et al.*, 2002; Causarano, *et al.*, 2008).

There are bigger differences observed between NL-M2 compare to LV-LC-M2 and M2, which make the tillage effect more notorious because the differences between NT-M1 respect M1-VT, and CT-M1 are smaller, therefore, smaller differences on the pores ranges in scale M1, with rates not higher than one digit (between 3.7 to 8.26%) will have more impact than in the M2 ranges which values are approximately between 12 and 20.77%.

We must not overlook that the agricultural management affects the distribution of the pores size, as well as its continuity and crookedness. The traffic particularly reduces the macroporosity, and the tillage

mechanically breaks the continuity of pores (Azooz *et al.*, 1996; Eynard *et al.*, 2004), compacts the soil increasing its bulk density through time and creates a hard layer that makes the penetration of agricultural machinery and the entry and circulation of water difficult to do.

analysis by the binary images display shown in Figure 6, are expected to help identify and explain the effect of tillage on soil structure and porosity. In the first one, for being a comparison that analyzes three types of pores found in the images: irregular (mesh points), round (lattice) and elongated (with vertical lines); and the second one, for being the same images in which the measurements discussed in this document were made.

With the exception of LC at 0.25 m deep [i (LC)], the prevalent shapes observed in Figure 5 are irregular and round pores that correspond to sizes identified as: T3, T4 and T6. The main feature of both of them is that they are present in all samples tested.

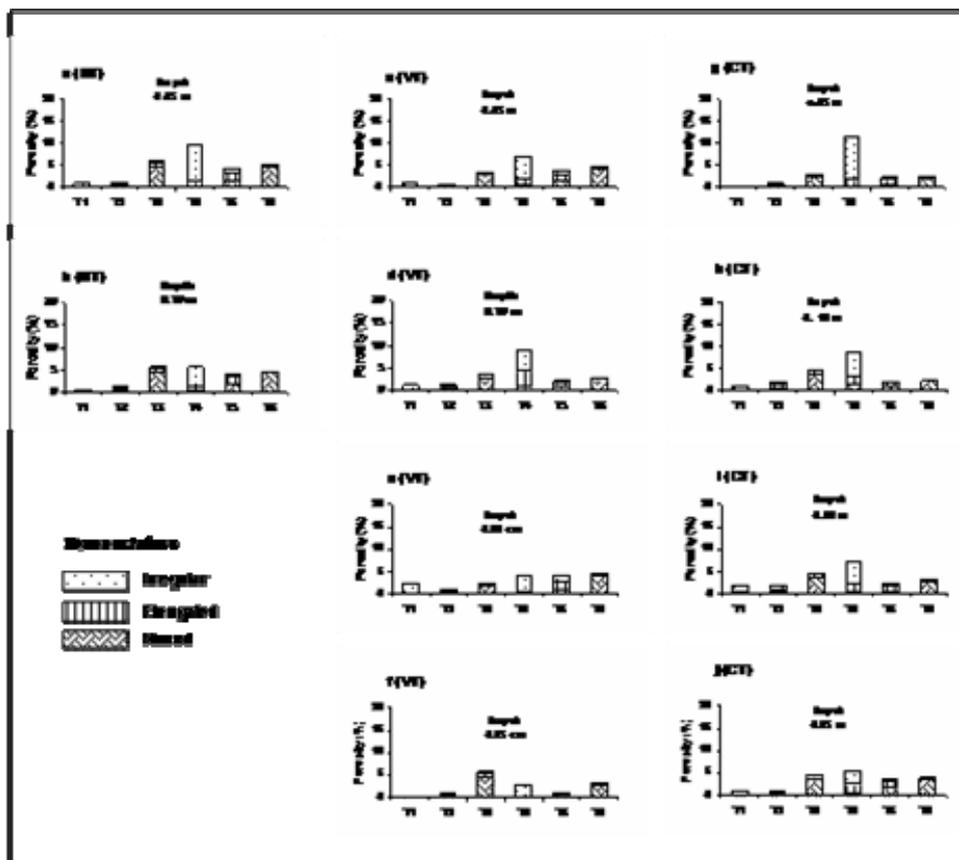


Figure 5. Relative importance (%) of the morphology of pores for NT, VT and CT.

Morphology of pores

The quantitative analysis, that describes the histograms in Figure 5, and the qualitatively

Although it is also clear that its presence changes as the depth becomes different, as described below:

At a depth of 0.05 m the irregular pores are in the T4 scale and have a predominance of 8.41% in the NT, followed by VT and CT with 9.86 and 5.24% respectively. It also shown that the round pores located in scales T3 and T6, have an equivalent presence of 4.5% in NT, while in VT and CT its value is 4.26 and 2.46% respectively. While the elongated pores sum to the six scales (T1 to T6) for NT, VT and CT are 5.47, 4.45 and 3.83% respectively. Unlike the previous case, the round pores predominate at a depth of 0.10 m in NT and CT on the scales T6 and T3, where LV is an exception because elongated pores appear in the T4 scale with 3.77% of relative importance.

Continuing with the description for VT and CT at a depth of 0.20 m round forms dominate the scales T3 and T6 with a 3.48 and 3.94% respectively. Finally, at a depth of 0.25 m the behavior described above remains the same.

Qualitative description

To complement the evaluation of the tillage effects on soil, Figure 6 shows 10 images (from A to J) that correspond to the four depths in this study. Obviously, there are features such as cracks or fissures which represent cavities produced by plant roots and the action of soil microorganisms.

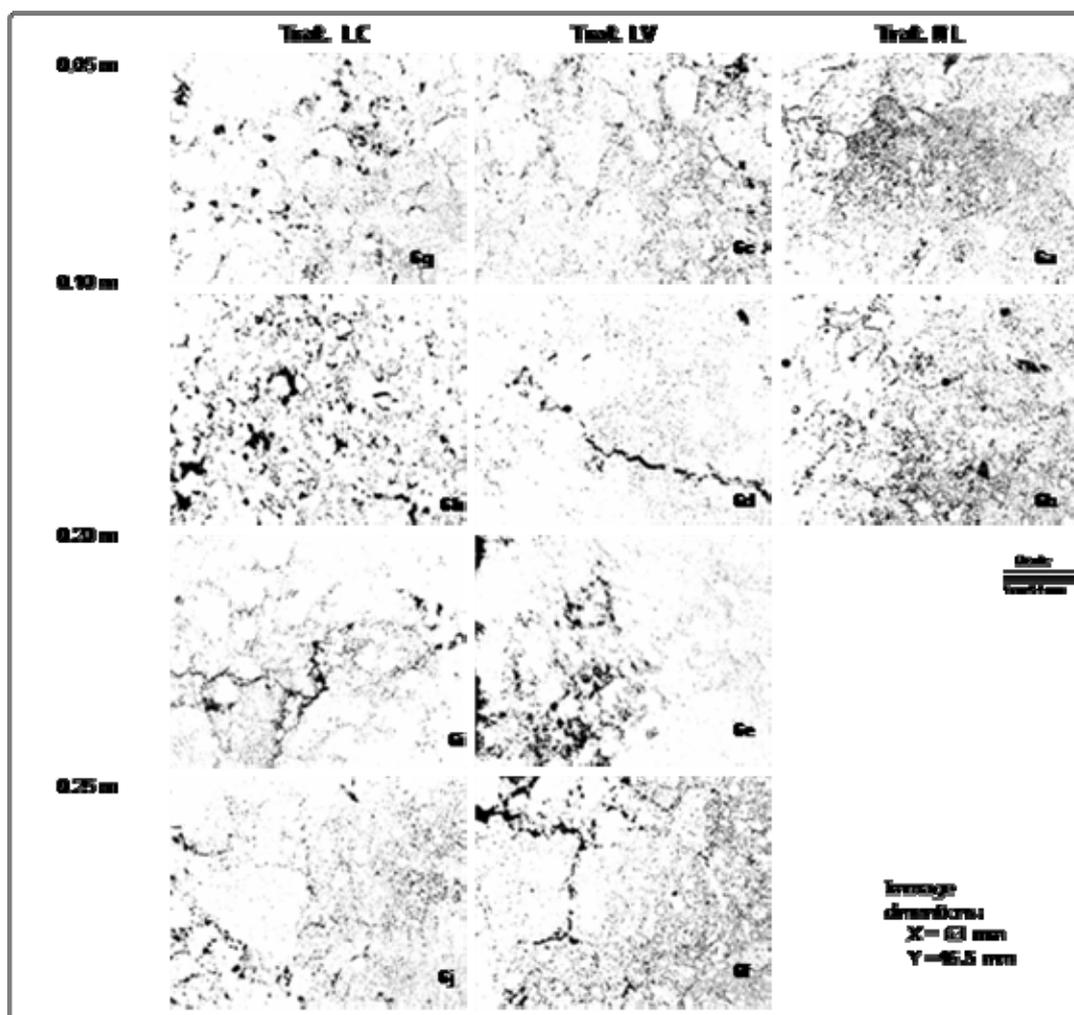


Figure 6. Binary images on which the measurements were made the measures to four depths.

The cracks resulting from the mechanical action of tillage or the recalcitrant action of the wetting and drying cycles, a phenomenon that is expressed in changes of soil porosity and deformation (Nidal and Abu-Hamdeh, 2003), which effects are observed in LV-10 and in 0.25 meters deep (6d and 6f), while in CT it manifests in minor importance with a depth of 0.20 m (6i).

The cracks are usually vertical, subplanares or polygonal and may be a result of the wetting and drying, or from the consolidation of inert material. The importance of this type of deformation is usually associated with the role they play in the preferential flow of water and are the primary cause of temporal changes in the soil's hydraulic conductivity. The cracks are primarily associated but not restricted to clay soils and are more pronounced in soils that swell and shrink, in which case this phenomenon may be reversible (Schoeneberg et al 1998).

Analysis of variance

The differences arithmetic described above are complemented with the results of the variance analysis (GLM) for three of the porous properties displayed in Table 4, because the averages do not have significant differences compared to the variable form. The variable pore area at a 0.5 m depth for LC has the higher average but does not differ with LV, that value is expressed more clearly at a 0.10 m depth in LV, due to the fact that among NL and LC there is no significant difference.

For the depths of 0.20 and 0.25 m, CT has the highest average but shows no significant difference against VT. For the form type, the results indicate that Es is less likely to be present in this type of soil, furthermore Rs and Is did not manifested significant difference.

Derived from the above, it is important to mention that the results of the statistical analysis (Table 3) are similar to those reported by several authors (Singh et al., 1991; Eynard et al., 2004; Wdawatta et al., 2008).

Table 4. Effects of tillage treatments on soil porosity properties.

Deep (m)	Trat.	Properties			Average (%)
		Area	Shape	Kind	
0.05	NT	47.9 c	1.5 a	FR	1.4 a
	VT	52.9 ab	1.1 a	FI	1.2 ab
	CT	53.4 ab	1.1 a	FA	0.7 b
0.10	NT	50.7 bc	1.2 a		
	VT	55.4 a	1.0 a		
	CT	52.6 ab	1.1 a		
0.20	NT	nd	nd		
	VT	51.7 abc	1.0 a		
	CT	52.9 ab	1.1 a		
0.25	NT	nd	nd		
	VT	53.1 ab	0.8 a		
	CT	54.0 ab	1.1 a		

Rs, round shape, Is, irregular shape; Es, elongated shape. nd, no data.

Note: The means with the same letter are not significantly different.

CONCLUSIONS

Because its fertility, grassland ecosystems are currently threatened by the increase in demand for food; this is presumably due, to the expense of a sacrifice in the role they have in moisture conservation, soil protection and their contribution to carbon sequestration. Although the magnitude they have for the particular area of study, is a topic currently carried out. Based on this fact, it was found that the plow disc (LC) is the implement that causes less damage to soil structure and is expressed in soil porosity where the water has better circulation. In addition, the results found in this study, would be expected to be used to improve the understanding of statistical differences in the structure, due to soil management which can not be quantified using traditional methods.

THANKS

This work is a product of synergy with researchers of the CENID-RASPA-INIFAP, Gomez Palacio, Durango, Mexico. We appreciate, therefore, the facilities and support given by the staff of this Research Center, especially Dr. Guillermo Gonzalez Cervantes. Finally we appreciate to UAAAN and CONACYT for the support given.

CITED LITERATURE

- Azooz R. H., M. A. Arshad, and A. j. Franzluebbers. 1996. Pore size distribution and hydraulic conductivity affected by tillage in Northwestern Canada. *Soil Sci. Am. J.* 60 (4): 1197-1201.
- Bouma, J., A. Jongerius, and D. Schoonderbeek. 1979. Calculation of saturated hydraulic conductivity of some pedal clay using micromorphometric data. *Soil Sci. Soc. Am J.* (43): 261 – 264.
- Buj O., and J. Gisbert. 2007. Cuantificación de la porosidad en areniscas mediante análisis digital de imágenes. Facultad de Ciencias de la Tierra, Departamento de Petrología y Geoquímica. *Geogaceta* (41): 35-38.
- Cadena Z M., G. T. Muñiz y G. A. Zermeño. 2004. Desempeño de Implementos en Términos de Consumo de Energía y Calidad de Trabajo. *Agraria Nueva Época.* I (3):12-18.
- Causarano H., A. J. Franzluebbers, J. N. Shaw, D. W. Reeves, and R. L. Raper. 2008. Soil organic carbon fractions and aggregation in the southern Piedmont and Costal Plain. *SSSAJ*, 72 (1): 221-230.
- CONAFOR, 2008. Suelos mexicanos, diversidad que distingue, reportaje sobre suelos (II parte). Revista electrónica de la Comisión Nacional Forestal, 04 de marzo de 2008.
- Cox P.M., Betts R.A. y Jones C.D. 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408: 184-187.
- Eynard A., T. E. Schumacher, M. J. Lindstrom, and D. D. Malo. 2004. Porosity and pore-size distribution in cultivated Ustolls and Usters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68 (6): 1927-1934.
- FAO-ISRIC-ISSS-AISS-IBG. 1994. World Reference Base for Soil Resources. Wageningen, Rome. P 56.
- FAO, 2002. Agricultura Mundial: hacia los años 2015/2030, Informe resumido en español de "World agriculture: towards 2015/2030". Cap. Perspectivas por sectores principales, Producción de cultivos *In:* <http://www.fao.org/docrep/004/Y3557S/y3557s00.HTM>
- Fitzpatrick, E. A., and T. Gudmunson. 1978. The impregnation of wet peat for the production of thin sections. *Soil Sci.* (29): 585-587.
- García E. 1975. Climas Coahuila y Nuevo León, precipitación y probabilidad de lluvia en la República Mexicana y su evolución. CETENAL, México, D.F.
- German, P. and K. Beven. 1981. Water flow in soil macropores. I. An experimental infiltration. *J. Soil Sci.* (32): 1-13.
- González, C. G., I. Sánchez-Cohen, y D. García-Arellano. 2004a. Relaciones entre el manejo del huerto de nogal y la porosidad del suelo. *Terra Latino.* (22): 279-287.
- González, C. G., I. Sánchez-Cohen, y J. P. Rossingol. 2004b. Morfología de poros de circulación preferencial del agua en el suelo mediante técnicas de análisis de imagen. Caso de una cuenca del norte de México. *Ing. Hidráulica Méx.* XIX (3): 15-23.
- Henderson, DW. 1979. Soil management in semiarid environments. In: *Crop productivity in arid and semiarid environments.* Hall A.E. (ed). Ecol. Studies Springer Verlong (35): 224-237. Revisado (02/11/08) *In* <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v23n2/v23n2a07.pdf>
- SEMARNAT, 2002. Compendio de Estadísticas Ambientales, 2002. Superficie, tipo de uso y vegetación por entidad federativa. México, D.F., 2003.
- SIAP. 2007. Sistema Integral de Información Agroalimentaria y Pesquera. In: <http://www.siap.sagarpa.gob.mx/>
- Katsvairo T., W. J. Cox and H. v. Es. 2002. Tillage and rotation effects on soil physical characteristics. *Agron. J.* 94 (2): 299-304.
- Kay, B.D. and V. Bygaard, A.J. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.* 66: 107-118. Revisado (29/02/08) *In:* http://www.inta.gov.ar/parana/info/documentos/suelos/indicadores_cal/30222_060810_poro.htm
- Kung K. J., M. Hanke, C.S. Helling, E. J. Klavivko, T. J. Gish, T.S. Steenhuis, and D. B. Jaynes. 2005. Quantifying pore-size spectrum of macropore-type preferential pathways. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69 (4): 1196-1208.
- Lal, R. y Vandoren, D.M. 1990. Influence of 25 years of continuous corn production by three tillage methods on water infiltration for two soils in Ohio. *Soil Tillage Res.* (16): 71-84.
- Mellado M. s/f. Traslapo de Dietas entre el Perrito de la Pradera (*Cynomys mexicanus*) y Bovinos en un Pastizal. Mediano Abierto. Revisado (08/19/07), *In:* <http://www.uaaan.mx/DirInv/Rdos2003/Zaridas/dietas.pdf>
- Nidal H. and Abu-Hamdeh. 2003. Compaction and subsoling effects on corn growth and soil bulk density. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67 (4): 1213-1219.
- Narro, E. 1994. Física de Suelos, con Enfoque Agrícola. 1ra Ed. ed. TRILLAS-UAAAN. México, D.F. p 50.
- Osuna, C. E. S., S. B. Figueroa, C. Oleschko, D. M. de L. Flores, M. R. Martínez, y C. F. V. González. 2005. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia* 40: 27-38.
- SAS, Institute, 2006. SAS 0.13 User's Guide. Statistics. SAS Inst. Cary NC, US.
- Singh P., S. R. Kanwar, and L. T. Thompson. 1991. Macropore characterization for two tillage systems using resin-impregnation technique. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (55): 1674-1679.
- Singh, P., R. S. Kanwar, and M. L. Thompson. 1990. Measurement and characterization of macropores by using AUTOCAD and automatic image analysis. *J. Environ Qual.* (20): 289-294.
- Schoeneberg P. J., D.A. Wysocki, E.C. Benham, and W.D. Broderson. 1998. Field book for describing and sampling soils. Natural Resources Conservation Service, USDA, National Resources Soil Survey Center, Lincoln, NE. Pp 58-59.
- Udawatta Ranjith P, Anderson Stephen H, Gantzer Clark J, y Garret Harold E. 2008a. Influence of Praire Restoration on CT-measured Soil Pore Characteristics. *J. Environ. Qual.* 37: 219-228.
- Udawatta R. P., C. J. Gantzer, S. H. Anderson, and H. E. Garrett. 2008b. Agroforestry and grass buffer effects on pore characteristics measured by high-resolution X-ray computed tomography. *SSSAJ* 72 (2): 295-304.