

# DINÁMICA DEL FLUJO DE BIÓXIDO DE CARBONO Y DE ENERGÍA SOBRE UN PASTIZAL NATURAL DEL NORTE DE MÉXICO

Alejandro Zermeño-González<sup>1</sup>, Jorge Aimir Ríos-Estudillo<sup>1</sup>, José Alexander Gil Marin<sup>2</sup>, Martín Cadena-Zapata<sup>3</sup> y José Ángel Villarreal-Quintanilla<sup>4</sup>

## RESUMEN

Debido a que los pastizales representan una fracción significativa de la superficie continental, estos pueden tener una importante contribución en la retención de bióxido de carbono atmosférico. Por tal motivo, el objetivo de la investigación fue utilizar el método de la covarianza turbulenta para medir el flujo de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y energía (radiación neta, calor sensible, calor latente, calor en el suelo) sobre un pastizal natural del norte de México, para evaluar la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> por la superficie vegetal y la distribución de los flujos de energía. La tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> del pastizal fue hasta 18  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . La retención promedio diaria de CO<sub>2</sub> por el pastizal (diferencia entre la asimilación durante el día y liberación durante la noche) fue 123,081  $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}$ , que correspondió a un promedio diario de 54,12  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Esto demuestra la importancia que tiene este ecosistema en la fijación del bióxido de carbono atmosférico. La eficiencia intrínseca del uso del agua y de la radiación por la superficie vegetal fue mayor en días nublados que en días totalmente despejados. La radiación neta sobre la superficie se disipó principalmente en flujo de calor latente, flujo de calor sensible y en menor proporción en flujo de calor en el suelo. Esto mostró la importancia de la evapotranspiración en la disipación de la radiación absorbida por la superficie vegetal.

**Palabras clave adicionales:** Balance de energía, covarianza turbulenta, fotosíntesis

## ABSTRACT

### Dynamics of the energy and carbon dioxide flux above a natural grassland of northern Mexico

As the grassland covers a significant fraction of the continental surface, they may have an important contribution to the sequestration of atmospheric carbon dioxide. For this reason, the objective of this research was to use the eddy covariance method to measure the flux of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and energy (net radiation, sensible heat, latent heat and soil heat flux), above a natural grassland of northern Mexico, to evaluate the rate of CO<sub>2</sub> assimilation by the vegetated surface and the partitioning of the energy fluxes. The CO<sub>2</sub> assimilation rate by the grassland was up to 18  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . The average daily retention of CO<sub>2</sub> by the grassland (difference between assimilation during daytime and release during nighttime) was 123,081  $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}$ , which corresponded to a daily average of 54.12  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . This shows the importance of this ecosystem in the sequestration of atmospheric carbon dioxide. The intrinsic water use efficiency and the energy use efficiency were higher in cloudy days than under conditions of clear sky. Net radiation over the vegetated surface was mainly dissipated in latent heat flux, sensible heat flux and in a smaller rate in soil heat flux. This showed the importance of evapotranspiration on dissipating the absorbed radiation by the vegetated surface.

**Additional keywords:** Energy balance, eddy covariance, photosynthesis

## INTRODUCCIÓN

Las grandes emisiones de gases de invernadero (como bióxido de carbono) a la atmósfera han ocasionado incrementos de temperatura entre 0,3

y 0,6 °C del planeta en los últimos 100 años (Carson, 1996). Este calentamiento global a inducido un cambio climático que ha sido notado en varios países y regiones, y ha tenido influencia sobre la ocurrencia de eventos climáticos

Recibido: Agosto 25, 2009

Aceptado: Septiembre 13, 2010

<sup>1</sup> Dpto. de Riego y Drenaje, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila 25315 México.

<sup>2</sup> Escuela de Ingeniería Agronómica, Universidad de Oriente. Campus Los Guaritos, Monagas, Venezuela.

<sup>3</sup> Dpto. de Maquinaria Agrícola, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila 25315 México.

<sup>4</sup> Dpto. de Botánica, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila 25315 México.

extraordinarios como sequías, inundaciones y temperaturas extremas en las últimas décadas (Smith, 1996.) Incluso, el cambio climático puede resultar en un peligroso incremento de incendios en los bosques boreales (Stocks et al., 1998).

Los ecosistemas vegetales constituyen el proceso natural para sustraer bióxido de carbono atmosférico, ya que por medio de la fotosíntesis el carbono es fijado en la estructura vegetal donde se mantiene almacenado por largos periodos de tiempo, y lo cual es función de las características de la vegetación y del manejo de la misma (Ordoñez y Masera, 2001). Los pastizales cubren cerca de 3,4 billones de ha en el mundo, lo que equivale a la quinta parte de la superficie continental del planeta. En este sentido, incrementos en la captura de CO<sub>2</sub> por los pastizales pueden tener una importante contribución en la disminución de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Fisher et al., 1994). Al respecto, México cuenta con más de 300.000 km<sup>2</sup> de pastizales que corresponden a cerca del 16 % de la superficie total del país (INEGI, 2007).

Estudios previos muestran que los pastizales tienen gran potencial de asimilación de bióxido de carbono (Flanagan et al., 2002; Miranda et al., 1997).

El objetivo del estudio fue analizar la dinámica del flujo de bióxido de carbono y los flujos de energía sobre un pastizal natural del norte de México, y evaluar su capacidad de asimilación de CO<sub>2</sub>.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó entre los meses de julio y agosto de 2007, en el rancho experimental ganadero “Los Ángeles”, municipio de Saltillo, Coahuila., México, (25° 06' N ), con elevación promedio de 2100 msnm. El clima del lugar, según García (1975), corresponde a seco árido, semicálido, de invierno fresco, con temperatura media anual que fluctúa entre 18 y 22 °C, precipitación promedio anual de 450 a 550 mm, distribuidas principalmente en verano e invierno.

El trabajo experimental se desarrolló en una pradera con suelo profundo, con 2 % de materia orgánica, densidad aparente de 1 g·cm<sup>-3</sup> y textura de migajón arcilloso. La pradera esta formada por

diferentes especies vegetales nativas de la localidad, con predominio de zacate picoso (*Stipa clandestina* Hack.), un pasto perenne de tipo C<sub>3</sub> y con altura promedio de 0,55 m. El porcentaje de cobertura vegetal en el sitio de estudio fue de aproximadamente 60 %.

El flujo de bióxido de carbono (FCO<sub>2</sub>) y los flujos de energía (calor latente-LE y calor sensible-H) entre la superficie vegetal y la atmósfera se determinaron de acuerdo al método de la covarianza “eddy”, utilizando las siguientes relaciones:

$$FCO_2 = \overline{w'\rho_{CO_2}'}$$

$$LE = \overline{Lw'\rho_{wv}'}$$

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

donde:  $\rho_a$  y  $C_p$  son la densidad y capacidad calorífica del aire,  $L$  es el calor latente de vaporización del agua y  $Ta$  es la temperatura del aire. Los productos  $w'\rho_{CO_2}'$ ,  $w'\rho_{wv}'$ ,  $w'Ts'$  representan la covarianza entre la velocidad vertical del viento ( $w$ ) y la densidad del bióxido de carbono ( $\rho_{CO_2}$ ), densidad del vapor de agua ( $\rho_{wv}$ ) y la temperatura sónica ( $Ts$ ), respectivamente. La barra horizontal representa el promedio del producto de las desviaciones de un determinado segmento de tiempo (20 min). Los valores de  $w$  y  $Ts$  se midieron con un anemómetro sónico tridimensional CSI-CSAT3 (Campbell Sci.), mientras que  $\rho_{wv}$  y  $\rho_{CO_2}$  se determinaron con un analizador de bióxido de carbono y vapor de agua de conducto abierto Li-7500 (Li-Cor). Los sensores se instalaron a una altura de 1,5 m sobre el dosel de la vegetación, con una distancia de más de 300 m hasta el límite de la superficie de estudio. La velocidad vertical del viento, temperatura sónica, densidad del vapor de agua y del bióxido de carbono se midieron a una frecuencia de 10 Hz, y las covarianzas se calcularon para segmentos de 20 min (en forma continua) durante el tiempo del estudio.

Los flujos de vapor de agua y bióxido de carbono se corrigieron por efectos de densidad (Webb et al., 1980). Posteriormente los flujos de  $H$  y  $LE$  se corrigieron para establecer el balance de energía, considerando que el método realiza una buena determinación de la relación de Bowen

(H/LE). El flujo de CO<sub>2</sub> se corrigió con el mismo factor (Ham y Heilman, 2003). La temperatura del aire se midió (a la misma altura de las mediciones de Ts) con un sensor de temperatura y humedad relativa HP45C (Vaisala), a una frecuencia de 1 s para obtener promedios de 20 min.

El balance de energía sobre la superficie vegetal se obtuvo con la relación  $R_n - G = H + LE$ , donde  $R_n$  es la radiación neta y  $G$  es el flujo de calor en la superficie del suelo. En la ecuación no se consideró la energía almacenada por cambio de temperatura de la vegetación y del aire a la altura del dosel, ni la energía almacenada (en la fotosíntesis) o liberada (en la respiración) por la vegetación, por ser poco significativos con relación a los términos de la ecuación (Jiyane y Zermeño-González, 2003).  $R_n$  se midió con un radiómetro neto NR-LITE (Keep & Zonen) que se colocó a una altura de 1,5 m sobre el dosel de la vegetación. Por su parte,  $G$  se midió usando dos transductores de calor HFT3 (Campbell Scientific) que se colocaron a una profundidad de 0,08 m por debajo de la superficie del suelo, uno bajo condiciones de vegetación y el otro en suelo desnudo con el objeto de generar el valor promedio de  $G$  de la superficie de estudio. A cada valor de  $G$  se le sumó el cambio de energía del estrato de suelo por cambios de temperatura sobre el transductor (0,02 y 0,06 m), que se midió utilizando un termopar de cuatro puntas (Kustas et al., 2000).

Las mediciones se realizaron a una frecuencia de un segundo y se generaron promedios de 20 min. Todos los sensores se conectaron a un registrador CR 23X (Campbell, Sci.) donde se realizó el procesamiento electrónico de datos. La dinámica de la tasa del flujo instantáneo (promedios de 20 min.) de bióxido de carbono (FCO<sub>2</sub>), radiación neta ( $R_n$ ), flujo de calor latente (LE), flujo de calor sensible (H) y flujo de calor en el suelo (G), se analizó graficando la tasa de flujo en función del tiempo. Para el caso de FCO<sub>2</sub>, se consideraron periodos continuos durante el día y la noche (en función de la disponibilidad de datos), con el propósito de determinar las máximas tasas instantáneas de asimilación (durante el día) y liberación (durante la noche). Mientras que  $R_n$ , LE, H y G se graficaron únicamente entre las 7 y las 21 h, para evaluar las variaciones de las tasas instantáneas de flujo a través del día y su variación en función de las

condiciones del clima. Las mediciones se realizaron en cuatro fechas diferentes (días número 202, 209, 214 y 218 del año), momentos en que la dirección del viento permitió la generación de datos en forma continua). La asimilación de bióxido de carbono durante el día y liberación durante la noche, se obtuvo integrando los flujos instantáneos (valores negativos durante el día y positivos durante la noche). La tasa de retención diaria de CO<sub>2</sub> se obtuvo con la diferencia entre la asimilación (fotosíntesis) durante el día y la liberación durante la noche (respiración nocturna). La disipación diurna de la radiación neta en flujo de calor sensible, calor latente y calor en el suelo (LE/ $R_n$ , H/ $R_n$ , G/ $R_n$ ) se obtuvo con los flujos instantáneos integrados de las 8 a las 20 h. La eficiencia intrínseca del uso del agua (Ef<sub>H<sub>2</sub>O</sub>) y de la radiación neta (Ef <sub>$R_n$</sub> ) se obtuvieron integrando (8 a 20 h) los flujos instantáneos de bióxido de carbono, calor latente y radiación neta de acuerdo con las siguientes relaciones:

$$Ef_{H_2O} = \frac{\int (FCO_2) dt}{\int (LE/2,44) dt}$$

$$Ef_{R_n} = \frac{\int (FCO_2) dt}{\int (R_n) dt}$$

donde el factor 2,44 se utilizó para obtener la evapotranspiración de la superficie (L·m<sup>-2</sup>) en función del flujo de calor latente (MJ·m<sup>-2</sup>)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Dinámica de los flujos instantáneos de bióxido de carbono y de energía

El pastizal mostró un alto potencial de asimilación ya que se observaron tasas instantáneas de flujo de bióxido de carbono (FCO<sub>2</sub>) de la atmósfera hacia la superficie vegetal de hasta 18 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> (Figura 1). Las máximas tasas de flujo de la atmósfera hacia la superficie en los diferentes días evaluados se presentaron entre las 11:00 y las 14:00, que corresponde a la máxima incidencia de radiación. En otras condiciones climáticas, como el cinturón subalpino del Cáucaso Central, Tappeiner y Cernusca (1996) reportaron tasas menores de asimilación para un pastizal (7 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>), mientras que para condiciones templadas,

durante la transición otoñal, Ham y Knapp (1998) observaron tasas de asimilación de hasta  $23 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Sin embargo, en una pradera con pasto nativo de Oklahoma, donde las condiciones de humedad del suelo no fueron limitantes, las tasas de asimilación fueron de hasta  $32 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (Suyker y Verma, 2001).

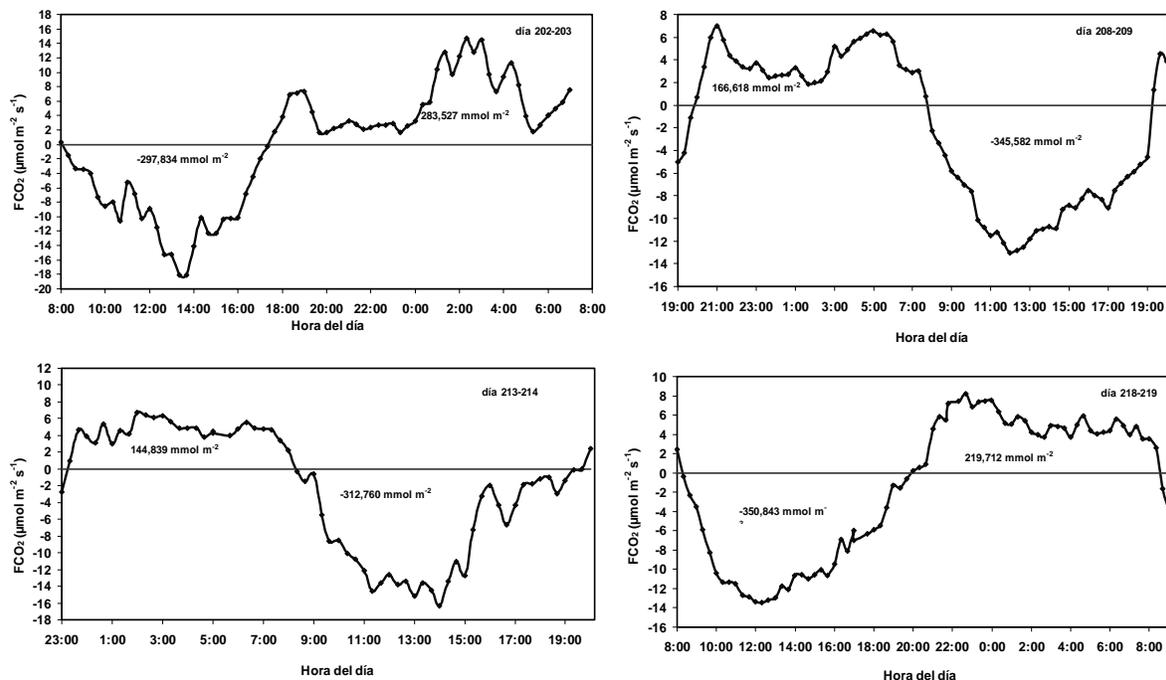
Durante el día (8 a 19 hr), las mayores variaciones en los flujos instantáneos de bióxido de carbono ( $\text{FCO}_2$ ) se observaron en los días con mayor nubosidad o nubosidad intermitente (días 202 y 214; Figura 1) y estas variaciones coincidieron con las fluctuaciones de los flujos de energía ( $R_n$ , LE, H) sobre la superficie vegetal (Figura 2). En días despejados (días 209 y 218),  $\text{FCO}_2$  tuvo variaciones más ligeras, al igual que los flujos de energía sobre la superficie vegetal (Figuras 1 y 2). Igualmente, bajo condiciones de nubosidad intermitente se observaron las mayores variaciones de los flujos de energía y los valores menores de lámina de agua evapotranspirada (Figura 2). En condiciones de cielo despejado las variaciones de  $R_n$ , H y LE mostraron una forma de campana y la lámina de agua evapotranspirada fue mayor. En promedio, esta lámina fue  $1,66 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ , valor bajo que se atribuye a moderada disponibilidad de agua en el suelo, ya que durante el periodo de lluvias en una pradera natural Bremer et al. (2001) encontraron tasas de evapotranspiración de hasta  $6,1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ .

En la Figura 1 se muestran los flujos integrados de bióxido de carbono durante los segmentos de tiempo continuo con asimilación (valores negativos) y liberación (valores positivos). La menor asimilación integrada ( $297,834 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}$ ) se observó el día 202 y el pastizal dejó de asimilar bióxido de carbono al atardecer (17:20 hr); esto debido a que en este día se presentó nubosidad intermitente y se tuvieron valores menores de radiación neta. Por el contrario, en el día 218 se observó la mayor asimilación de  $\text{CO}_2$  ( $350,843 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}$ ) y la superficie vegetal asimiló  $\text{CO}_2$  hasta las 19:40 hr. Este día fue totalmente despejado con un valor mayor de radiación neta (Figura 2). Para los cuatro días y noches evaluados la asimilación promedio diurna integrada de  $\text{CO}_2$  fue  $326,755 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}$ , mientras que la liberación integrada (respiración nocturna) fue  $203,674 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}$ . Esto representó una tasa promedio de retención diaria de  $\text{CO}_2$  de

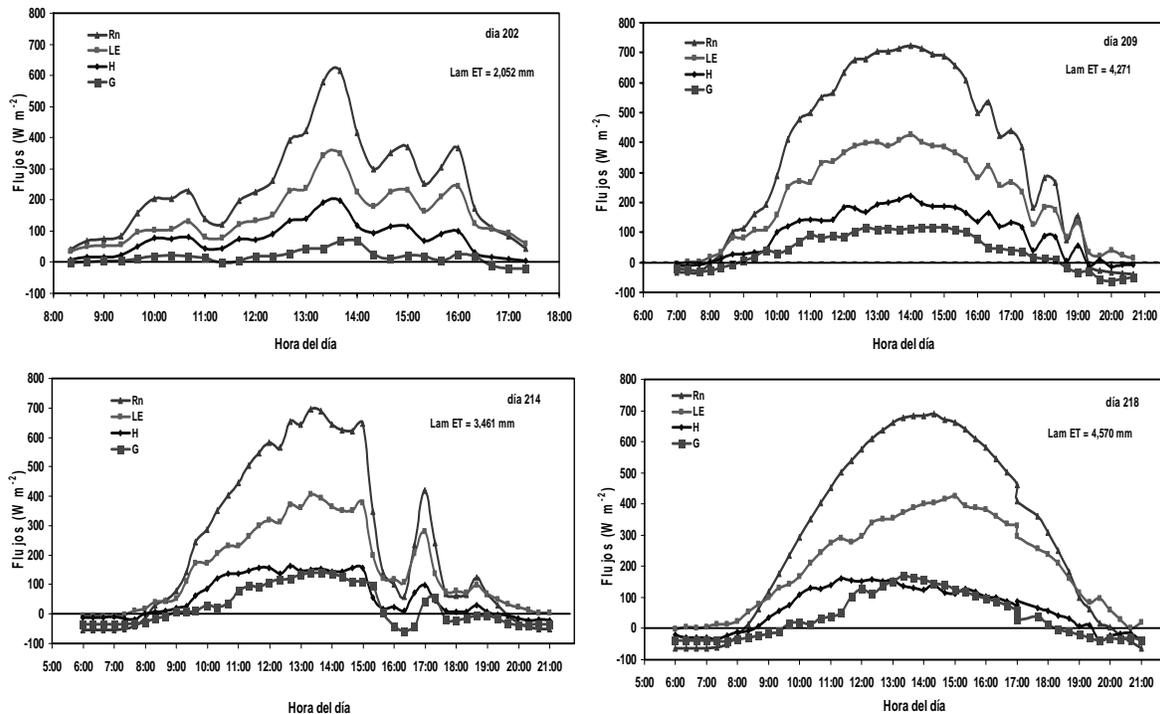
$123,081 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}$ , equivalente a  $54,12 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Esta estimación muestra el potencial de retención de  $\text{CO}_2$  que tiene el pastizal de esta región, ya que aunque fue menor al promedio diario de  $142,74 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  observado en un bosque boreal de Canadá (Amiro, 2001), fue ligeramente mayor a los  $45,62 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  que se observó en un bosque de la especie  $C_3$  *Fagus sylvatica* (Anthoni et al. 2004). En el Cuadro 1 se muestra la forma en que la radiación neta se disipó en los flujos de LE, H y G. Para condiciones de cielo despejado, se observó una mayor proporción de disipación de  $R_n$  en LE y H, y una menor disipación en G que para condiciones de cielo con nubosidad. La menor disipación de  $R_n$  en G se presentó en condiciones de nubosidad intermitente a lo largo del día.

En general, entre las 12 y las 15 hr del día,  $R_n$  se disipó más en flujo de calor latente que en flujo de calor sensible y flujo de calor en el suelo. En promedio, para las diferentes condiciones atmosféricas, 61,4 % de  $R_n$  se disipó en LE, 26,4 % en H y 12,3 % en G, indicando que la evapotranspiración es el principal mecanismo de disipación de la radiación neta sobre la superficie vegetal. Al respecto, Chen y Dudhia (2001) mencionan que la relación entre LE y H determinan la magnitud del cambio de fase del agua y el gradiente de temperatura entre la superficie vegetal y el aire. Estudios realizados por Jaramillo y Escobar (1987) mostraron que el 67 % de  $R_n$  se disipó en LE, 30 % en H y 3 % en G sobre una plantación de *Coffea arabica* L.

A pesar de que bajo condiciones de nubosidad se obtuvo menor asimilación de  $\text{CO}_2$  (Figura 1), la eficiencia del uso del agua por la superficie vegetal fue mayor para esas mismas condiciones (Cuadro 1). También, la eficiencia del uso de la radiación neta fue mayor en días con nubosidad ( $36,76 \text{ mmol CO}_2\cdot\text{MJ}^{-1}$  en un día nublado vs  $12,46 \text{ mmol CO}_2\cdot\text{MJ}^{-1}$  en un día totalmente despejado). Esto se atribuye que en condiciones de cielo despejado el exceso de energía radiante recibida se habría empleado en calentar el follaje del pasto y sin utilidad en el proceso de fotosíntesis. Así mismo, otros autores reportan que la eficiencia de la carboxilación disminuye con las altas temperaturas de la hojas (Cunningham y Read, 2002; Borjigidai et al., 2006; Hikosaka et al., 2006).



**Figura 1.** Valores instantáneos (promedios de 30 min) e integrados de flujo de bióxido de carbono entre la superficie vegetal y la atmósfera sobre un pastizal del norte de México en diferentes días del verano 2007. Valores negativos indican que la dirección del flujo es de la atmósfera hacia la superficie vegetal



**Figura 2.** Dinámica del flujo de radiación neta (Rn), calor latente (LE), calor sensible (H) y calor en la superficie del suelo (G) sobre un pastizal del norte de México en diferentes días del verano 2007. Flujos integrados de masa y energía, y la eficiencia intrínseca del uso del agua y de la radiación  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$

**Cuadro 1.** Valores integrados diarios (8 a 20 hr) de las fracciones del balance de energía sobre una pradera natural del norte de México en diferentes condiciones climáticas, y eficiencia intrínseca del uso del agua (Ef H<sub>2</sub>O) y radiación neta (Ef Rn)

Día del año	Condición	$\frac{LE}{Rn}$	$\frac{H}{Rn}$	$\frac{G}{Rn}$	Ef H <sub>2</sub> O (mmol·L <sup>-1</sup> )	Ef Rn (mmol·MJ <sup>-1</sup> )
202	Nubosidad a lo largo del día	0,618	0,311	0,071	145,14	36,76
209	Parcialmente despejado	0,588	0,280	0,135	80,92	19,52
214	Nubosidad a partir de las 16:00 hr	0,618	0,245	0,137	90,36	22,87
218	Totalmente despejado	0,631	0,221	0,148	48,17	12,46

Rn: radiación neta; LE: flujo de calor latente; H: flujo de calor sensible; G: flujo de calor en la superficie del suelo

En promedio, para las diferentes condiciones climáticas prevalecientes durante el estudio, la eficiencia del uso del agua por el pastizal fue 91,15 mmol CO<sub>2</sub>·L<sup>-1</sup> de agua evapotranspirada y la eficiencia del uso de la radiación neta fue 22,90 mmol de CO<sub>2</sub>·MJ<sup>-1</sup>. En un pasto C<sub>3</sub> de la especie *Lolium perenne* L., con cobertura total del suelo, Emmerich (2007) reportó valores máximos de eficiencia del uso del agua de hasta 167 mmol CO<sub>2</sub>·L<sup>-1</sup>, mientras que en una pradera de pastos C<sub>4</sub> Schapendonk et al. (1997) observaron valores máximos de eficiencia del uso de la radiación de hasta 63 mmol CO<sub>2</sub>·MJ<sup>-1</sup>

## CONCLUSIONES

Para las condiciones climáticas donde se desarrolló el estudio, el pastizal mostró tasas de asimilación instantáneas de bióxido de carbono de hasta 18 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. La tasa de retención de CO<sub>2</sub> promedio diaria fue 123,081 mmol·m<sup>-2</sup>, equivalente a 54,12 kg·ha<sup>-1</sup>.

La eficiencia del uso del agua y de la radiación por la pradera fue mayor bajo condiciones de cielo con nubosidad durante el día.

Debido a la presencia de humedad en el suelo, la radiación neta se disipó principalmente en flujo de calor latente (61,4 %), seguido por flujo de calor sensible (26,4 %), indicando la importancia de la evapotranspiración en la disipación de la radiación absorbida por la superficie vegetal.

## LITERATURA CITADA

1. Amiro B.D. 2001. Paired-tower measurements of carbon and energy fluxes following disturbance in the boreal forest. *Global Change Biology* 7:253-268.
2. Anthoni P.M., A. Knohl, C. Rebmann, A. Freibauer, M. Mund, W. Ziegler, O. Kolle y D. Schulze, 2004. Forest and agricultural land-use-dependent CO<sub>2</sub> exchange in Turingia, Germany. *Global Change Biology* 10: 2005-2019.
3. Borjigidai, A., K. Hikosaka, T. Hirose, T. Hasegawa, M. Okada y K. Kobayashi. 2006. Seasonal changes in temperature dependence of photosynthetic rate in rice under a free-air CO<sub>2</sub> enrichment. *Annals of Botany* 97: 549-557.
4. Bremer, J.D., M.L. Auen, M.J. Ham y E.C. Owensby. 2001. Evapotranspiration in a prairie ecosystem: Effects of grazing by cattle. *Agronomy Journal* 93: 338-348.
5. Carson, D.J. 1996. Modeling climatic change: achievements and prospects. *Forests and Climate Commonwealth Forestry Review* 75(1): 12-18.
6. Chen, F. y J. Dudhia. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system Part I: model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review* 129: 569-585.
7. Cunningham, S.C. y J. Read. 2002. Comparison of temperate and tropical rainforest tree species: photosynthetic responses to growth temperature. *Oecology* 133: 112-119.
8. Emmerich, E.W. 2007. Ecosystem water use efficiency in a semiarid shrubland and grassland community. *Rangeland Ecology Management* 60: 464-470.

9. Fisher, M. J., I.M. Rao, C.E. Ayarza, C.E. Lascano, J.I. Sanz, R.J. Thomas y R.R. Vera. 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 31: 236-238.
10. Flanagan, L.B., L.A. Wever y P.J. Carlson. 2002. Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Global Change Biology* 8: 599-615.
11. García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geología, UNAM. México. 217 p.
12. Ham, J. M. y J.L. Heilman. 2003. Experimental test of density and energy-balance corrections on carbon dioxide flux as measured using open-path eddy covariance. *American Society of Agronomy* 95: 1393-1403.
13. Ham, J. M. y A.K. Knapp. 1998. Fluxes of CO<sub>2</sub>, water vapor and energy from a prairie ecosystem during the seasonal transition from carbon sink to carbon source. *Agricultural and Forest Meteorology* 89: 1-14.
14. Hikosaka, K., K. Ishikawa, A. Borjigidai, O. Muller y Y. Onoda. 2006. Temperature acclimation of photosynthesis: mechanisms involved in the changes in temperature dependence of photosynthetic rate. *Journal of Experimental Botany* 57(2): 291-302.
15. INEGI. 2007. Conjunto nacional del uso del suelo y vegetación. Serie III. (<http://www.inegi.gob.mx/inegi/contenidos/esp/anol/prensa/Contenidos/estadisticas/2007/ambiente07.pdf> (consulta del 2/06/2008).
16. Jaramillo, A. y E. Escobar. 1987. Balance de energía en /Coffea arábica/ L. *Cenicafé* 34(4):115-126.
17. Jiyane, J. y A. Zermeño-González. 2003. Applying the equilibrium evapotranspiration approach to irrigated agriculture in arid zones. *Agrociencia* 37(6): 553-563.
18. Kustas, W.P., J.H. Prueger y J.L. Hatfield. 2000. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. *Agricultural and Forest Meteorology* 103: 249-264.
19. Li, S. G., J. Asanuma, W. Eugster, A. Kotani, J.J. Liu, T. Urano, T. Oikawa, G. Davaa, D. Oyunbaatar y M. Sugita. 2005. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Global Change Biology* 11: 1941-1955.
20. Miranda, A.C., H.S. Miranda, J. Lloyd, J. Grace, R. J. Francey, J. A. Mcintyre, P. Meir, P. Riggan, R. Lockwood y J. Brass. 1997. Fluxes of carbon, water and energy over Brazilian cerrado: an analysis using eddy covariance and stable isotopes. *Plant, Cell and Environment* 20: 315-328.
21. Morecroft, M.D. y J.M. Roberts. 1999. Photosynthesis and stomatal conductance of mature canopy oak (*Quercus robur*) and sycamore (*Acer psedopplantanus*) trees throughout the growing season. *Functional Ecology* 12: 332-342.
22. Ordoñez, A. y O. Maser. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7(1): 3-12.
23. Schapendonk, A.H., P. Dijkstra, J. Groenwold, C.S. Pot y S. Van de Geijn. 1997. Carbon balance and water use efficiency of frequently cut *Lolium perenne* L. swards at elevated CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology* 3(3): 207-216.
24. Smith, J.B. 1996. Standardized estimates of climate change damages for the United States. *Climate Change* 32(3): 313-326.
25. Stocks, B.J., M.A. Fosberg, T.J. Lynham, L. Mearns, B.M. Wotton, Q. Yang, J.Z. Jin, K. Lawrence, G.R. Hartley, J.A. Mason y D.W. Mckenney. 1998. Climate change and forest fire potential in Russian and Canadian boreal forests. *Climate Change* 38: 1-13.
26. Suyker, A.E. y S.B. Verma. 2001. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie.

Global Change Biology 7: 179-289.

19: 403-417.

27. Tappeiner, U. y A. Cernusca. 1996. Microclimate and fluxes of water vapour, sensible heat and carbon dioxide in structurally differing subalpine plant communities in the Central Caucasus. *Plant, Cell and Environment*

28. Webb, E.K., G.I. Pearman y 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.