

## LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES Y EL CALENTAMIENTO GLOBAL: UN BALANCE DE EMISIONES<sup>1</sup>

Johnny Montenegro<sup>2/\*</sup>, Sergio Abarca\*

**Palabras clave:** *Calentamiento global, óxido nitroso, dióxido de carbono, metano, balance de emisiones.*

### RESUMEN

Se realizó un balance de emisiones de gases con efecto invernadero en Sistemas Silvopastoriles (SSP) ubicados en 3 diferentes zonas de vida. Se determinó la emisión de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) en forma de gas, se cuantificó la cantidad de carbono (C) fijado en el suelo y en el componente arbóreo, y se estimó la emisión de metano (CH<sub>4</sub>) producido por los bovinos. Se realizó análisis de variancia y de correlación lineal entre las distintas variables evaluadas. El SSP ubicado en el Bosque Montano Bajo, presentó 41,2 ton C ha<sup>-1</sup> fijado y valores de emisión neta (EN) de 5,65 y 6,87 kg de N y C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> respectivamente. En el componente arbóreo se determinó una fijación de 229 kg C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>, la emisión de CH<sub>4</sub> fue de 360 kg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. El balance anual refleja una emisión neta de 2418 kg de C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. En la zona de vida Bosque Premontano muy Húmedo, en el SSP se determinó en el suelo 20,9 ton C ha<sup>-1</sup>, siendo la EN de -1,58 y 3,51 kg de N y C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>, respectivamente. El C fijado por el componente arbóreo fue 313 kg C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>; la emisión de CH<sub>4</sub> fue de 654 kg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. El balance anual presentó una emisión neta de 3911 kg de C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. En el SSP ubicado en el Bosque Húmedo Tropical, se determinó 42,8 ton C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. La EN

### ABSTRACT

**Silvopastoral systems and global warming: a gas emission balance.** A gas emission balance was carried out in SPS located in the Montano Low Forest (MLF), Wet Premontain Forest (WPF), and Tropical Wet Forest (TWF) of Costa Rica. The methane emission from cattle, N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emission from soil, temperature, humidity, carbon, ammonium and nitrate contents, and soil compaction were determined in SPS as well as in natural forest ecosystems. In the SPS located at the MLF and TWF emissions were higher than in natural ecosystems. In both, the N-NH<sub>4</sub> soil concentration positively influenced the nitrous oxide gas emission. In the WPF ecosystem, the net emission showed a favorable N<sub>2</sub>O balance (-1.58 kg of N ha<sup>-1</sup>year<sup>-1</sup>) for the SPS but the natural forest emitted less C (3.51 kg of C ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>). The methane emission factor determined was 654 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>year<sup>-1</sup> in the WPF, 183 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>year<sup>-1</sup> in the TWF and 360 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>year<sup>-1</sup> in the MLF. The emission efficiency expressed as g of CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> of produced milk was MLF: 19, WPF: 22 and TWF: 31. The carbon in the soil was higher in the SPS than in the natural forest ecosystems. The annual amount of C per land unit in the arboreal component was higher in the SPS of the WPF and TWF than in the MLF. The lowest

1/ Recibido para publicación el 29 de marzo del 2001.  
2/ Autor para correspondencia. Correo electrónico:  
jmonte@guayabo.sa.ucr.ac.cr

\* Dirección de Protección Fitosanitaria. Ministerio de  
Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica.

correspondió a 1,16 y 3,99 kg de N y C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>, respectivamente. El C fijado por año en el componente arbóreo fue de 313 kg C ha<sup>-1</sup>, la emisión de CH<sub>4</sub> fue de 183 kg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. El balance anual presentó una emisión neta de 418 kg de C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. En los 3 SSP evaluados las emisiones de gases con efecto invernadero fueron mayores que el C fijado, incidiendo en ello principalmente el CH<sub>4</sub>; sin embargo, es factible disminuir las emisiones de este gas e incrementar la cantidad de C fijado, ya que existe la tecnología para ello, lo cual afectaría positivamente el balance final obteniéndose SSP más amigables con el ambiente.

## INTRODUCCION

El efecto invernadero se produce como consecuencia de la acumulación de gases en la atmósfera, principalmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), los cuales se incrementan anualmente 0,5%, 0,6% y 0,35%, respectivamente. Aproximadamente el 30% de estos gases se produce por el cambio en el uso del suelo. Se estima que los trópicos emiten de 10 a 30 millones de ton de C año<sup>-1</sup> como resultado del decrecimiento de la materia orgánica en los suelos deforestados (Detwiller y Hall 1988). En este sentido, los suelos con pasturas presentan un rol muy importante por la gran extensión que cubren, la retención y reducción de la emisión de C a la atmósfera (Minami *et al.* 1993, Fischer *et al.* 1994).

Los bovinos contribuyen con el calentamiento global al producir y emitir CH<sub>4</sub> cuando convierten material con gran contenido de celulosa en alimento de alta calidad nutritiva como la carne y la leche. En este proceso, el CH<sub>4</sub> representa energía alimenticia que se pierde en forma de gas, en vez de ser aprovechado y transformado en leche o carne. Afortunadamente, es factible reducir las emisiones en la ganadería mediante la aplicación de tecnología apropiada (Montenegro y Abarca 2000).

balance value (418 kg of C ha<sup>-1</sup>year<sup>-1</sup>) was estimated for the SPS in the TWF and the highest (3911 kg of C ha<sup>-1</sup>year<sup>-1</sup>) for the SPS in the WPF; an intermediate range was estimated for the SPS located in the MLF (2418 kg of C ha<sup>-1</sup>year<sup>-1</sup>). The total emission of N<sub>2</sub>O was higher in the bovine production systems than in the natural ecosystem, with the exception of the SPS located in the WPF. The emission of carbon dioxide was always higher in the SPS. The total carbon amount stored in the soil profile was higher in the SPS. The balance indicated that all farms evaluated act as originators of greenhouse gases, methane being the main gas affecting the final balance.

Otro importante gas que incrementa el calentamiento global es el N<sub>2</sub>O; se ha especulado mucho sobre las emisiones en el trópico, y aunque potencialmente podrían producirse grandes emisiones, esto no siempre ocurre. En las pasturas, las emisiones de N<sub>2</sub>O declinan con el tiempo (Keller *et al.* 1993) y posiblemente, después de 10 años de establecidas emiten cantidades significativamente menores que el bosque original. Esta dinámica de la disminución está relacionada con la rápida descomposición de la materia orgánica del suelo.

Se ha señalado que en el trópico los Sistemas Agroforestales pueden tener gran potencial para contribuir a la mitigación del problema del calentamiento global (Kursten and Burschel 1993), dado que la combinación de especies vegetales en estos sistemas de producción pueden actuar como un eficiente sumidero de C. En este sentido, los Sistemas Silvopastoriles (SSP) en vegetales deben ser evaluados para cuantificar y determinar su contribución con el ambiente.

Con el propósito de realizar un balance de emisiones de gases con efecto invernadero, se estimó la emisión de CH<sub>4</sub> que producen los bovinos, y se determinó la emisión gaseosa de CO<sub>2</sub> y de N<sub>2</sub>O del suelo; además, se cuantificó la cantidad de C almacenado en éste y en el componente arbóreo, en 3 sistemas silvopastoriles ubicados en diferentes zonas ecológicas de Costa Rica.

## MATERIALES Y METODOS

Esta investigación se realizó en 3 fincas comerciales ubicadas en diferentes zonas ecológicas del país. La primera con una extensión de 11 ha y localizada a 2400 msnm (Bosque Montano Bajo, BMB), presentó una temperatura promedio anual de 18°C. Los animales, 48 bovinos en total, pastoreaban en kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) fertilizado con 485 kg de N ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> y un período de descanso de 25 días. Esta finca, con una carga animal de 3,9 UA ha<sup>-1</sup> (UA=350 kg PV), producía 15 kg de leche vaca<sup>-1</sup>día<sup>-1</sup>. El suelo se clasificó como Andisol con textura franca.

La segunda finca, con 3,5 ha de extensión, ubicada a 1640 msnm y 22°C de temperatura promedio anual, se localizó en el Bosque Premontano muy Húmedo (BPH). En esta se pastoreaba cada 26 días el estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*), fertilizado con 250 kg de N ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. Bajo estas condiciones se manejaban 28 animales, siendo la carga animal de 6,5 UA ha<sup>-1</sup> y el nivel de producción de 12 kg de leche vaca<sup>-1</sup>día<sup>-1</sup>. Esta finca, al igual que la anterior, son típicas de explotaciones de lechería especializadas.

La tercer finca, con una extensión de 45 ha, era típica de explotaciones de doble propósito. Esta ubicada en el Bosque Húmedo Tropical (BHT) (Holdridge 1996), a 200 msnm, con una temperatura promedio anual de 26°C, utilizaba pasto ratana (*Ischaemum indicum*) sin fertilizar. Aquí pastoreaban 144 bovinos (2,2 UA ha<sup>-1</sup>), siendo los períodos de descanso de 32 días. La producción de leche en este sistema fue 6 kg de leche vaca<sup>-1</sup>día<sup>-1</sup>. El suelo en estas 2 últimas fincas se clasificó como Inceptisol con textura franco-arenosa.

Todas las pasturas fueron muestreadas utilizando la técnica del pastoreo simulado. Las muestras recolectadas se analizaron en el Laboratorio de Nutrición Animal del CATIE siguiendo la metodología de la AOAC (1970) y de Van Soest (1994) determinándose: ceniza, grasa, fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), hemicelulosa, celulosa, lignina, proteína cruda (PC) ligada a la FDN, PC, carbohidratos no estructurales, carbohidratos estructurales y car-

bohidratos totales. Los análisis se realizaron por duplicado.

Los animales presentes en las fincas ubicadas en el BMB y BPH eran de la raza Jersey y recibían 1 kg de concentrado en cada uno de los 2 ordeños diarios. Los bovinos de la finca localizada en el BHT eran animales típicos de sistemas de doble propósito (cebuinos cruzados con razas europeas) y solo recibían banano verde (5 kg vaca<sup>-1</sup>día<sup>-1</sup>) como suplemento durante el ordeño diario.

Con los datos disponibles se diseñó un modelo de simulación para estimar la cantidad de CH<sub>4</sub> emitido por animal (g animal<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>) de acuerdo con el consumo de forraje (NRC 1989) y de suplemento (cantidad y calidad), la raza, el estado fisiológico de los animales, la edad de estos, así como el nivel de producción de leche y la ganancia de peso. Para realizar los cálculos correspondientes al balance, en las estimaciones de la emisión de metano se incluyeron todos los animales presentes en las fincas (vacas, novillas y terneras). Con los datos obtenidos se calculó el factor de emisión (emisión de CH<sub>4</sub> por unidad de área) y la eficiencia de emisión (cantidad de CH<sub>4</sub> emitido por kg de leche producido).

La determinación de la emisión de N<sub>2</sub>O y de CO<sub>2</sub> se realizó mediante la técnica de la cámara cerrada (Veldkamp 1994), ubicándose estas al azar dentro de las pasturas por un período de 20 min entre las 9:00 a.m. y la 1:00 p.m. Las cámaras empleadas (cilindros con tapas de PVC sellados herméticamente), tenían un diámetro interno de 30,84 cm, una altura de 20 cm y un abanico interno para homogenizar la mezcla de gases; se introdujeron aproximadamente 1,5 cm en el suelo, con el propósito de evitar fugas e interferencias externas.

Las cámaras fueron colocadas en las pasturas a los 0, 1, 2, 3, 5, 10, 15, y 20 días después del pastoreo. Las muestras de gas (20 ml) se recolectaron en el momento que las cámaras se colocaron y al final del período indicado, siendo analizadas estas antes de 36 h en un cromatógrafo de gas Hewlett Packard 5890, previa preparación de una curva estándar de calibración.

Adicionalmente, se determinó, en un perfil de 0-10 cm de profundidad la temperatura, la

humedad, el contenido de amonio ( $N-NH_4$ ), de nitratos ( $N-NO_3$ ) y la compactación de este (Forsythe 1980). También se realizó un muestreo del suelo (0-10 cm) y se determinó el contenido de C de acuerdo con la metodología utilizada por Veldkamp (1994). Estas mediciones se efectuaron tanto en los SSP como en los ecosistemas de bosque natural.

Con los datos obtenidos se calculó para cada SSP y ecosistema natural el factor de emisión (cantidad de gas emitida por unidad de área). En el caso de los SSP también se calculó la emisión neta (factor de emisión menos la emisión del ecosistema natural).

El C almacenado en el componente arbóreo de los SSP se calculó de acuerdo con la metodología utilizada por Cubero y Rojas (1999). Para ello se incluyó el componente arbóreo que se encontraba disperso en las pasturas y para propósitos de esta investigación se simuló la misma edad promedio de éstos (15 años) y la misma densidad de árboles ( $75 \text{ ha}^{-1}$ ) de jaúl (*Alnus acuminata*) en el BMB y de laurel (*Cordia alliodora*) en los BPH y BHT. El volumen de madera en pie, correspondió a  $0,29 \text{ m}^3 \text{ árbol}^{-1}$  en el BMB y de  $0,39 \text{ m}^3 \text{ árbol}^{-1}$  en BPH y BHT.

Posteriormente, con los datos de emisión y de C fijado en cada SSP, se procedió a realizar el balance de emisiones. Ello se efectuó en unidades equivalentes de C, utilizándose los siguientes factores de conversión: una molécula de  $N_2O$  igual a 250 moléculas de  $CO_2$  y una molécula de  $CH_4$  igual a 25 moléculas de  $CO_2$  (Sass 1992). Los datos en el texto se expresan como C equivalente. En todos los casos se consideró la emisión neta (emisión del SSP menos la emisión del ecosistema natural) para el balance. En el caso del C almacenado en el suelo se consideró que el valor neto (cantidad determinada en el SSP menos la determinada en el ecosistema natural) se había fijado en un período de 30 años en el BPH y en 20 años en los BMB y BHT. Estos períodos corresponden al tiempo estimado de cuando el bosque natural fue eliminado en los lugares donde se ubicaron los SSP.

Se utilizó el SAS para realizar análisis de correlación lineal.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Emisión de $N_2O$ y $CO_2$ del suelo

Los factores de emisión para el  $N_2O$  ( $6,38 \text{ kg de N ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ) y para el  $CO_2$  ( $9,06 \text{ kg de C ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ) fueron mayores en la finca ubicada en el BMB que en el ecosistema natural ( $0,72 \text{ kg de N ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  y  $2,19 \text{ kg de C ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ) ubicado en la misma zona ecológica. La mayor emisión del  $N_2O$  en el sistema de producción bovina se explica por la aplicación de fertilizante nitrogenado (Magalhaes *et al.* 1987) ya que éste alteró la relación C:N del suelo y ello afectó las poblaciones y la actividad de las bacterias denitrificantes. El reciclaje de N que realizan los animales en pastoreo ha sido señalado como un factor que afecta positivamente los niveles de emisión (Bouwman 1995, Velthof *et al.* 1996).

La concentración de  $N-NH_4$  del suelo también influyó la emisión, ya que se determinó una correlación positiva ( $r^2=0,77$  y  $P=0,0439$ ) con la emisión de este gas nitrogenado. Ello coincide con lo informado por Davidson *et al.* (1996) quienes determinaron que la emisión de  $N_2O$  se incrementó cuando las concentraciones de  $N-NH_4$  fueron altas.

La emisión neta para el sistema silvopastoril fue  $5,66 \text{ kg de N ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  y  $6,87 \text{ kg de C ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ .

Las emisiones de  $N_2O$  ( $3,14 \text{ kg de N ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ), determinadas en el sistema de producción ubicado en el BPH, fueron 50% inferiores a las detectadas en el bosque natural ( $4,72 \text{ kg de N ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ). Los mayores valores de emisión del bosque natural se debieron entre otros factores a la alta tasa de reciclaje de N que ocurre en estos ecosistemas (Vitousek y Matson 1988) y a los altos contenidos de  $N-NO_3$  en el suelo, los cuales correlacionaron positivamente ( $r^2=0,64$ ,  $P=0,0892$ ) con la emisión de este gas. Ello coincide con los resultados obtenidos por Weier *et al.* (1991). La pastura presentó niveles más bajos de  $N-NO_3$  que el bosque natural.

Las emisiones de  $CO_2$  ( $2,51 \text{ kg de C ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ) determinadas en el bosque natural fueron menores que en el sistema silvopastoril ( $6,03 \text{ kg de C ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ) del BPH, sin que las variables

evaluadas presentaran influencia en los niveles de emisión de este gas.

La emisión neta en este sistema de producción correspondió a  $-1,58 \text{ kg de N ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  y a  $3,51 \text{ kg de C ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ . Ello demuestra un balance favorable para el caso del  $\text{N}_2\text{O}$ , mientras que el bosque natural emite menor cantidad de C. Esto concuerda con lo informado por otros investigadores (Sanhueza *et al.* 1990, Keller *et al.* 1993) quienes determinaron mayores emisiones de N en el ecosistema de bosque natural que en pasturas. En lo que respecta al C, este es emitido en mayor cantidad por suelos cubiertos por el pasto debido a la alta tasa de crecimiento de la gramínea, lo cual ocasiona que se depositen cantidades importantes de materia orgánica sobre el suelo debido al pastoreo. Este también provoca la mortalidad de raíces superficiales. La descomposición de ese material por microorganismos del suelo, que son estimulados por la disponibilidad de N en el sistema, explica las mayores emisiones de  $\text{CO}_2$  en el agroecosistema.

En el sistema silvopastoril del BHT se determinó emisiones del orden de  $2,28 \text{ kg de N ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  y de  $6,17 \text{ kg de C ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ , mientras que en el ecosistema natural, las mismas correspondieron a  $1,12$  y  $2,18 \text{ kg de N y C ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ , respectivamente. En ambos casos las emisiones fueron mayores en el sistema de producción debido a la mayor disponibilidad de N en el suelo, producto del reciclaje que realizan los animales en pastoreo. De acuerdo con Velthof *et al.* (1996), el porcentaje de  $\text{N}_2\text{O}$  que proviene de las excretas de los animales puede ser mayor que el proveniente del N del fertilizante; Bouwman (1995) también ha señalado la importancia del reciclaje efectuado por los animales en pastoreo en la emisión de este tipo de gases. La tasa de denitrificación es mayor en el N reciclado debido a que este solo afecta entre el 10% y 15% del área total

en pastoreo, por lo que la tasa de liberación de  $\text{N}_2\text{O}$  es alta (Ruz-Jerez *et al.* 1994).

La emisión de  $\text{N}_2\text{O}$  correlacionó con la concentración de  $\text{N-NH}_4$  ( $r^2=0,83$ ,  $P=0,0214$ ) y con la de  $\text{N-NO}_3$  ( $r^2=0,89$ ,  $P=0,0072$ ) demostrándose con ello la influencia de ambos compuestos nitrogenados en la generación y emisión de este gas con efecto invernadero. Resultados similares fueron obtenidos por Davidson *et al.* (1996).

La emisión neta para el sistema silvopastoril fue  $1,16 \text{ kg de N ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  y  $3,99 \text{ kg de C ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ .

### Emisión de $\text{CH}_4$

La mayor emisión de  $\text{CH}_4$  se determinó en la finca ubicada en el BHT, en segundo lugar se ubicó la del BMB y la menor emisión total se estimó para el sistema de producción en el BPH. En lo que respecta al factor de emisión, el mayor nivel ( $654 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ) se determinó en la finca del BPH y el menor en la del BHT ( $183 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ); en un nivel intermedio se ubicó la finca del BMB ( $360 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ). La eficiencia de emisión fue 19, 22 y 31 g de  $\text{CH}_4 \text{ kg}^{-1}$  de leche producido, para los sistemas silvopastoriles ubicados en el BMB, BPH y BHT respectivamente (Cuadro 1).

Las diferencias en la emisión de  $\text{CH}_4$  se explican por el manejo de las fincas (calidad de las pasturas consumidas y acceso a suplemento así como también por el número de animales) y la calidad genética de los animales, que en combinación con la calidad de la dieta, afecta la proporción de alimento que es transformado en este gas.

La mejor eficiencia se determinó en la finca del BMB debido a que en esa zona ecológica se presentan una serie de condiciones que favorecen la producción de leche, tales como un clima con temperatura relativamente baja ( $18^\circ\text{C}$  promedio anual), alta calidad nutritiva del forraje

Cuadro 1. Emisión de  $\text{CH}_4$  en 3 sistemas silvopastoriles ubicados en diferentes zonas ecológicas. Costa Rica, 2001.

Variable	BMB	BPH	BHT
Emisión total, $\text{kg CH}_4 \text{ ha}^{-1}\text{año}^{-1}$	3960	2289	8418
$\text{CH}_4$ , $\text{kg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$	360	654	183
Eficiencia, $\text{g CH}_4 \text{ kg}^{-1}$ leche	19	22	31

disponible y excelente calidad genética de los animales.

Las eficiencias de emisión de las fincas localizadas en el BPH y en el BHT, son similares a las reportadas por Montenegro y Abarca (1998), y son menores que en el BMB, debido a que el clima cálido que poseen esas zonas ecológicas (22°C y 26°C respectivamente) condiciona la especie y la calidad de las pasturas, así como el tipo de animal que se puede manejar. Ello afecta negativamente la eficiencia de utilización de la dieta por parte de los animales presentes en las fincas. De acuerdo con investigaciones previas realizadas por Montenegro y Abarca (2000), es posible, mediante la modificación del manejo de las pasturas disminuir, los niveles de emisión de CH<sub>4</sub> en las explotaciones bovinas, independientemente de la zona ecológica donde estas se localicen.

### Carbono en el suelo

La cantidad de C que se determinó en el suelo de los sistemas silvopastoriles (BMB: 41,2 ton C ha<sup>-1</sup>, BPH: 20,9 ton C ha<sup>-1</sup> y BHT: 42,8 ton C ha<sup>-1</sup>) fue mayor que la detectada en los ecosistemas de bosque natural (BMB: 35,2 ton C ha<sup>-1</sup>, BPH: 15,7 ton C ha<sup>-1</sup>, y BHT: 24,8 ton C ha<sup>-1</sup>) utilizados como comparador.

Esto es congruente con los resultados de otras investigaciones que han demostrado la importancia de las pasturas para capturar y retener C en el suelo (Minami *et al.* 1993, Fischer *et al.* 1994). Ello posiblemente se debe a la gran biomasa radical de las gramíneas, donde la proporción de arena presente en estos suelos se constituye en un factor que estimula su desarrollo (Veldkamp 1994).

### Carbono en el componente arbóreo

La cantidad estimada de C que es fijado anualmente por unidad de área en el componente arbóreo fue mayor en los SSP del BPH y BHT (313 kg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>) e inferior en el BMB (229 kg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>). Ello se explica por la mayor tasa de crecimiento que presenta el laurel por las diferencias en los volúmenes de madera que se determinaron en cada finca evaluada.

### Balance de emisiones

El balance de emisiones en los 3 sistemas de producción silvopastoril evaluados fue positivo, es decir, en todos los casos estos actúan como emisores netos (Cuadro 2).

Los menores valores se estimaron para la finca ubicada en el BHT (418 kg de C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>)

Cuadro 2. Balance de emisiones, en equivalentes de C, para 3 sistemas silvopastoriles ubicados en diferentes zonas ecológicas. Costa Rica, 2001.

Variable	BMB	BPH	BHT
<b>Emisión neta</b>			
CH <sub>4</sub> , en kg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	2454	4459	1248
N <sub>2</sub> O, en kg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	386	-108	79
CO <sub>2</sub> , kg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	7	3	4
<b>Total emitido</b>	<b>2847</b>	<b>4354</b>	<b>1331</b>
<b>Carbono fijado</b>			
Suelo, kg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	200	130	600
Arboles, kg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	229	313	313
<b>Total fijado</b>	<b>429</b>	<b>443</b>	<b>913</b>
<b>Balance total</b>			
Emisión neta, kg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	<b>+2418</b>	<b>+3911</b>	<b>+418</b>

y los mayores para el SSP localizado en el BPH (3911 kg de C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>); en un rango intermedio se ubicó el SSP evaluado en el BMB (2418 kg de C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>).

El factor que afectó en mayor proporción y de manera negativa el balance de las emisiones fue el CH<sub>4</sub>, ya que este gas se produce continuamente en los sistemas de producción bovina. Además, su aporte global se incrementa cuando se realiza la correspondiente transformación mediante el factor de conversión.

## CONCLUSIONES

La cantidad de óxido nitroso emitido en forma de gas es influenciada de forma positiva por el N aplicado como fertilizante y del reciclado por los animales. Además, con excepción del sistema silvopastoril localizado en el bosque premontano húmedo, la emisión total de este gas fue mayor en los sistemas de producción bovina. Las emisiones de dióxido de carbono presentaron una tendencia similar a la determinada para el óxido nitroso.

La cantidad total de carbono almacenado en el perfil de suelo evaluado, fue mayor en los sistemas silvopastoriles que la determinada en los ecosistemas de bosque natural. Ello demuestra la factibilidad real de encontrar agroecosistemas más eficientes en el secuestro de carbono en el suelo que los ecosistemas de bosque natural.

En los 3 sistemas silvopastoriles evaluados el balance de emisiones de gases con efecto invernadero indicó que fue mayor la cantidad de carbono emitido, incidiendo en ello principalmente el metano.

Existe tecnología para disminuir las emisiones de metano en los sistemas de producción bovina e incrementar la fijación de carbono, por lo tanto es factible afectar positivamente el balance final y obtener sistemas productivos más amigables con el ambiente.

## LITERATURA CITADA

- AOAC (ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMIST). 1970. Methods of analysis of the Association of Official Chemist. Washington, USA. 1015 p.
- BOUWMAN A. 1995. Compilation of a global inventory of emission of nitrous oxide. Ph.D. Thesis, Wageningen. Agricultural University.
- CUBERO J., ROJAS S. 1999. Fijación de carbono en plantaciones de melina (*Gmelina arborea* Roxb.), teca (*Tectona grandis* L.f.) y pochote (*Bombacopsis quinata* Jacq.) en los cantones de Hojanca y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Tesis Lic. Ciencias forestales. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 94 p.
- DAVIDSON E., MATSON P., BROOKS P. 1996. Nitrous emission controls and inorganic nitrogen dynamic in fertilized tropical agricultural soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1145-1152.
- DETWILLER R., HALL C. 1988. Tropical forest and the global carbon cycle. *Science* 239:42-47.
- FISCHER M., RAO I., AYARZA M., LASCANO C., SANZ J., THOMAS R., VERA R. 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American Savanna. *Nature* 371(6494):236-238.
- FORSYTHE W. 1980. Física de suelos. San José, Costa Rica, IICA. 212 p.
- HOLDRIDGE L. 1996. Ecología basada en zonas de vida. San José, IICA. Costa Rica. 216 p.
- KELLER M., VELDKAMP E., WEITZ A., REINERS W. 1993. Effects of pasture age on soil trace-gas emission from a deforested area of Costa Rica. *Nature* 365:244-246.
- KURSTEN E., BURSCHEL P. 1993. CO<sub>2</sub>-mitigation by agroforestry. *Water, Air and Soil Pollution* 70:533-544.
- MAGALHAES A., NELSON D., CHALK P. 1987. Nitrogen transformations during hydrolysis and nitrification of urea. I. Effect of soil properties and fertilizer placement. *Fertilizer Research* 11:161-172.
- MINAMI K., GOUDRIAAN J., LANTINGA E., KIMURA T., BAKER M. 1993. Significance of grasslands in emission and absorption of greenhouse gases. *Grasslands for our world (New Zealand)* 444-450:60.
- MONTENEGRO J., ABARCA S. 2000. Alternatives to methane emissions reduction in the livestock of Costa Rica. *In: Second International Conference Methane Mitigation*, 18-23 June, Novosibirsk, Rusia. p. 175-182.
- MONTENEGRO J., ABARCA S. 1998. Estimación de la emisión de metano en la ganadería bovina de Costa

- Rica, 1990 y 1996. *In: Methane Measurements Workshop*. Ed. by D. Conneely, M. Gibbs, M. Orlic. Washington State University. Pullman, WA. p. 19-29.
- NRC (NATIONAL RESEARCH COUNCIL). 1989. Nutrient requirements of dairy cattle. Subcommittee on dairy cattle nutrition, Committee on Animal Nutrition. Washington, USA. 157 p.
- RUZ-JEREZ B., WHITE R., ROGER P. 1994. Long-term measurement of dinitrification in three contrasting pastures grazed by sheep. *Soil Biol. Biochem.* 26(1):29-39.
- SASS R.L. 1992. Short summary chapter for methane. *In: Proceedings of an international workshop: Methane and nitrous oxide emission from natural and anthropogenic sources and their reduction research plan*. Tsukuba, Japan. p. 1-8.
- SANHUEZA E., MIN HAO W., SCHARFFE D., DONOSO L., CRUTZEN P. 1990. N<sub>2</sub>O and NO emissions from soils of the Northern Part of the Guyana Shield, Venezuela. *Journal of Geophysical Research* 95:22481-22488.
- VAN SOEST P. 1994. Nutritional ecology of the ruminant. Comstock Cornell University Press, Ithaca, New York. p. 476.
- VELDKAMP E. 1994. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. *In: Soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropics of Costa Rica*. Thesis Ph.D. Netherlands, Wageningen University. p. 47-64
- VELTHOF G., BRADER A., OENEMA O. 1996. Seasonal variations in nitrous oxide losses from managed grasslands in The Netherlands. *Plant and Soil* 181:263-274.
- VITOUSEK P., MATSON P. 1988. Nitrogen transformations in a range of tropical forest soils. *Soil Biol. Biogeochem.* 20(3):361-367.
- WEIER K., MACRAE I., MYERS R. 1991. Seasonal variation in denitrification in a clay soil under a cultivated crop and a permanent pasture. *Soil Biol. Biochem.* 23(7):629-635.

