

0156

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACION
ESCUELA DE POSGRADUADOS



**FIJACION, EMISIÓN Y BALANCE DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN
PASTURAS EN MONOCULTIVO Y EN SISTEMAS SILVOPASTORILES DE FINCAS
LECHERAS INTENSIVAS DE LAS ZONAS ALTAS DE COSTA RICA**

POR

VESALIO MORA CALVO

CATIE

Turrialba, Costa Rica
2001

**CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION
Y ENSEÑANZA**

CATIE

PROGRAMA DE ENSEÑANZA

AREA DE POSGRADO



**FIJACION, EMISIÓN Y BALANCE DE GASES DE EFECTO
INVERNADERO EN PASTURAS EN MONOCULTIVO Y EN
SISTEMAS SILVOPASTORILES DE FINCAS LECHERAS
INTENSIVAS DE LAS ZONAS ALTAS DE COSTA RICA**

Tesis sometida a consideración del Comité Técnico de Posgrado y Capacitación del Programa de Enseñanza en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, para optar el grado de

Magister Scientiae

Por

✓
Vesalio Mora Calvo

Turrialba, Costa Rica

2001.

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

FIRMANTES:

Muhammad Ibrahim, Ph.D.
Consejero Principal

Markku Kanninen, Ph.D.
Miembro Comité Consejero

Alfonso Pérez, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

Sergio Abarca, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

Carlos Manuel Rodríguez, Lic.
Miembro Comité Consejero

Ali Moslemi, Ph.D.
Director Escuela de Posgrado

Vesalio Morá Calvo
Candidato

DEDICATORIA

A DIOS TODOPODEROSO por estar siempre conmigo, por ser ese amigo fiel, quien siempre me ha dado fortaleza espiritual para afrontar tan grandes retos.

A mis madres: Tina (Q. D.G) y Lida, por su apoyo e aliento constante que estimulan la superación personal.

A mis hijas: Lindsay, Natalia, Stephanie y Sarita, quienes son y serán fuente de inspiración y alegría por siempre, cuando están a mi lado y aún en su ausencia.

A mis sobrinos: Daniela, Andrés, Marco, Rolo, Julián, Renato, Luis, Heiner, Vane, Michael y Paulo.

AGRADECIMIENTO

Al Dr Muhammad Ibrahim, por sus consejos, por sus ideas, por las oportunas llamadas de atención, principalmente por su disposición para compartir sus valiosos conocimientos, pero sobretodo por brindarse siempre como amigo, **Gracias Muhammad.**

Al Lic. Carlos MI Rodríguez, por el apoyo logístico para realizar el trabajo de campo y por sus comentarios para el mejoramiento de este documento.

A Dr. Markku Kanninen, Mg. Sc. Alfonso Pérez, y Mg.Sc. Sergio Abarca, por las observaciones y valiosos y oportunos comentarios en beneficio de esta investigación.

Al Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria (O.I.R.S.A.), en especial en la persona del Mg.Sc. Sergio Abarca, por el financiamiento de este plan de estudio.

Al Ministerio de Agricultura y Ganadería (M.A.G.) de Costa Rica, por el apoyo económico durante mis dos años de estancia en el CATIE.

Al Dr. Gerardo Rodríguez y a Frank López, por los análisis de laboratorio realizados.

Al personal de Agroforestería, en especial a Patricia Aguilar, Paulo Dittel, Ariadne, Celia López y Azálea Salguero, por su paciencia.

A mis compañeras (os) de maestría, en particular a Mirtha, Karen, Judith "*Chencha*", Angela "*China*", Cristóbal, Alfredo "*Brother*", a la familia Sabido en particular a mi sobrina Carissa, a Mildred "*Gertrudis*", Hilda "*Pollito*", Jeannette "*Mamacita*", Chelsia "*Bruja*", a todas (os) un eterno agradecimiento por su amistad y sus enseñanzas.

MORA CALVO, V. 2001. Fijación, Emisión y Balance de Gases de efecto invernadero en pasturas en monocultivo y en sistemas silvopastoriles de fincas lecheras intensivas de las zonas altas de Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. M. Sc Tesis CATIE.

Palabras claves: Fijación de carbono, carbono almacenado, balance gases, emisión de gases, efecto invernadero, CH₄, N₂O, CO₂, *Drymis granadensis*, *Penissetum clandestinum*, *Cynodon nlemfluensi*.

RESUMEN

El propósito del presente estudio fue realizar un balance de los gases de efecto invernadero (CH₄, N₂O y CO₂) en fincas con manejo de Sistemas Silvopastoriles y de manejo de pasturas en monocultivo, para lecherías especializadas en las zonas altas de Costa Rica. La investigación se desarrolló en fincas de la zona de Pacayas, Costa Rica, ubicada a 9° 56'46" N, 83° 48'08" O, y altitudes que van desde 1550 hasta 2300 m.s.n.m.; con una temperatura media anual que oscila entre 15 y 19°C, y 2002 mm de precipitación anual, se clasifica en la zona de vida Bosque Húmedo Montano Bajo.

En el área de estudio las fincas tienen un área media de 4.5 has, con 15 vacas en ordeño que producen 210 kg leche finca⁻¹ día⁻¹. Las especies de pasto predominantes son *Pennisetum clandestinum* (Kikuyo) y *Cynodon nlemfluensis* (Estrella africana), con una fertilización que varía desde 175 a 310 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

En el primer artículo los sistemas evaluados consisten de potreros de pasto Kikuyo y pasto Estrella africana en monocultivo y sistemas silvopastoriles, bajo un diseño irrestricto al azar. Se midió el carbono fijado y almacenado en los diferentes estratos del sistema: suelo, pasto, animal y árbol. El carbono del suelo se midió a cuatro diferentes profundidades (0-20, 20-40, 40-60 y 60-100 cm). Los resultados obtenidos muestran que el suelo es un importante sumidero de carbono, principalmente aquellos cubiertos por el pasto estrella africana en monocultivo con 756.5 tC ha⁻¹, y en especial a una profundidad de 60-100 cm donde se almacena el 45% del carbono depositado en el suelo. La cantidad de carbono almacenado en el suelo en el estrato de 0-60 cm de profundidad, fue diferente entre los sistemas evaluados. El sistema de estrella en monocultivo obtuvo mayores valores que estrella asociado con árboles, pero en el caso del kikuyo el comportamiento fue al contrario.

La presencia de árboles afecta el rendimiento y producción de materia seca y hojarasca de los pastos, así como su tasa de fijación de carbono, donde destaca el pasto Kikuyo sin árboles con 5.16 tC ha⁻¹ año⁻¹. En promedio el carbono fijado por las excretas de los animales fue mayor en pastos sin sombra con 0.95 t C ha⁻¹ año⁻¹. La especie de árboles dispersos más abundante en los potreros es el *Drymis granadensis*, mientras que el poró (*Erythrina berteroana*) constituye la única especie de cerca viva, y entre ambas secuestran 0.31 tC ha⁻¹ año⁻¹ en promedio.

En el segundo artículo se muestran los valores de estimación para la emisión y el balance de gases de efecto invernadero. Se tomaron diferentes fincas y se agruparon en tres (3) sistemas de manejo: 1) 260 kg N ha⁻¹ año⁻¹, 5 kg concentrado vaca⁻¹ año⁻¹ y 100 árboles dispersos ha⁻¹ en los apartos; 2) 328 kg N ha⁻¹ año⁻¹, 5 kg concentrado vaca⁻¹ año⁻¹ y 63

árboles dispersos ha^{-1} en los apartos y 3) 350 kg N ha^{-1} año^{-1} , 8 kg concentrado vaca $^{-1}$ año^{-1} y sin árboles dispersos en los apartos.

Para estimar la emisión del metano (CH_4) se utilizaron las ecuaciones del grupo de expertos del IPCC; para el óxido nitroso (N_2O) y el dióxido de carbono (CO_2) se emplearon las ecuaciones del IPCC y la EPA. Los valores de éstos gases fueron transformados a sus equivalentes de carbono para realizar el balance de los gases.

La emisión de CH_4 (rumia y excretas) es de 388, 463 y 470 g vaca lactante $^{-1}$ día $^{-1}$, mientras que las vacas secas emitieron 230, 244 y 248 g vaca $^{-1}$ día $^{-1}$ en las fincas del sistema de manejo 1), 2) y 3) respectivamente. Con una eficiencia de emisión de 25.5 ± 1.7 g CH_4 kg^{-1} leche producido, siendo las vacas de mayor producción láctea (20 kg leche vaca $^{-1}$ día $^{-1}$) los animales más eficientes con 23.5 g kg^{-1} leche producido.

La emisión de N_2O (fertilizante y excretas) es 6.76, 8.87 y 10.91 kg N_2O ha^{-1} año^{-1} para las fincas con el sistema de manejo 1), 2) y 3) respectivamente, con una mayor emisión de N_2O por parte de los animales cuando cosechan pasto a plena exposición solar. Aunque las fincas con mayores niveles de fertilización nitrogenada producen más N_2O , esta enmienda es importante para la sostenibilidad del sistema, porque reduce los problemas de degradación de las gramíneas y prolonga su vida útil.

La emisión total de CO_2 es 2.9 t CO_2 ha^{-1} año^{-1} , y donde el 80% de esta emisión proviene del pasto, siendo la finca del sistema de manejo 1 las de mayor emisión como resultado de una mayor producción de biomasa del pasto (24 t MS ha^{-1} año^{-1}).

El balance muestra valores positivos (fijación neta) de 3.44 t C_{Equiv} ha^{-1} año^{-1} para la finca del sistema de manejo 1 (260 kg N ha^{-1} año^{-1} , 5 kg concentrado vaca $^{-1}$ día $^{-1}$ y 100 árboles dispersos ha^{-1}) y de 1.28 t C_{Equiv} ha^{-1} año^{-1} para la finca del sistema de manejo 2 (328 kg N ha^{-1} año^{-1} , 5 kg concentrado vaca $^{-1}$ día $^{-1}$ y 63 árboles $^{-1}$ dispersos ha^{-1}), mientras que la finca del sistema de manejo 3 (350 kg N ha año , 8 kg concentrado vaca día y sin árboles dispersos en los potreros) presenta un balance negativo (emisión) de 0.54 t C_{Equiv} ha^{-1} año^{-1} .

MORA CALVO, V. 2001. Fixation, emission and balance of greenhouse gasses in pastures in monoculture and in silvopastoral systems in intensive milk production farms in the highlands of Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. M.Sc. Thesis. CATIE.

Key words: Carbon fixation, stored carbon, gas balance, gas emission, greenhouse effect, CH₄, N₂O, CO₂, *Drymis grandensis*, *Pennisetum clandestinum*, *Cynodon nlemfluensis*.

SUMMARY

This study was carried out to make a balance of greenhouse gases (CH₄, N₂O, CO₂) in milk production farms under silvopastoral and monoculture systems in the highlands of Costa Rica. The research was developed in farms located in Pacayas, Costa Rica, 9° 56'46" N, 83° 48'08" O, altitudes ranging between 1550 and 2300 m.a.s.l; mean annual temperature ranging between 15 and 19°C, 2002 mm mean annual precipitation, classified within the zone of low montane humid forest.

In the study area, the farms have an average area of 4.5 has, with 15 milking cows and producing 210 kg milk farm⁻¹ day⁻¹. The main grasses species are *Pennisetum clandestinum* (Kikuyo) and *Cynodon nlemfluensis* (African star), with a fertilization between 175 until 310 kg N ha⁻¹ year⁻¹.

In the first article, the systems evaluated are composed of Kikuyo and African Star grasses in monoculture and in silvopastoral systems, under a randomized design. Fixed and stored carbon in the different strata of the system were measured: soil, pasture, animal, tree. Carbon in the soil was measured at four different depths (0-20, 20-40, 40-60 and 60-100 cm). The results showed that the soil is an important carbon sink, mainly when covered with African Star grass in monoculture with values of 756.5 tC ha⁻¹, and especially at 60-100 cm depth where 45% of the carbon stored is located. The carbon stored in the soil at strata of 0-60 cm depth, were different between the systems studied. The African Star grass in monoculture had better results than African Star grass with trees, however the Kikuyo grass showed an completely different performance.

The trees affected yield and production of dry matter and litter of the grasses, as well as carbon fixation rate, were Kikuyo grass without trees had 5.16 tC ha⁻¹. Average fixed carbon by cow manure was higher in grass without shade with 0.95 tC ha⁻¹. The most abundant tree species among isolated trees was *Drymis grandensis*, while poró (*Erythrina berteroana*) was the only species in the live fence, and both fixing an average of 0.31 tC ha⁻¹.

In the second article, estimated values for greenhouse gas emission and balance are shown. Different farms were selected and grouped under three (3) management systems: low) 260 kg N ha⁻¹ year⁻¹, 5 kg concentrate cow⁻¹ year⁻¹ and 100 isolated trees ha⁻¹ in the pasture; medium) 328 kg N ha⁻¹ year⁻¹, 5 kg concentrate cow⁻¹ year⁻¹ and 63 isolated trees ha⁻¹ in the pasture; and high) 350 kg N ha⁻¹ year⁻¹, 8 kg concentrate cow⁻¹ year⁻¹ and without trees in the pasture.

Equations of the IPCC group were used to estimate emission of methane gas (CH_4); IPCC and EPA equations were used for nitrous oxide (N_2O) and for carbon dioxide (CO_2). The values of these gases were transformed into their carbon equivalents to carry out gas balances.

Emission of CH_4 (ruminal and manure) is 388, 463 and 470 g (milking cows) $\text{cow}^{-1} \text{ day}^{-1}$, while the dry cows emitted 230, 244 and 248 gr $\text{cow}^{-1} \text{ day}^{-1}$ in the farms under management systems low), medium) and high) respectively, with an emission efficiency of 25.5 ± 1.7 gr CH_4 kg milk produced.

N_2O emission (manure and fertilizer) is 6.76, 8.87 and 10.91 kg $\text{N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ for farms under management systems low), medium) and high) respectively, with higher emission of N_2O by the animals fed with grass under full sunlight. Although the farms with higher levels of nitrogen fertilization produces more N_2O , this amendment is very important for the sustainability of the system, because it reduces problems of pasture land degradation and extend their lifetime.

Total emission of CO_2 is 2.9 t $\text{CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, where 80% of this emission comes from the grass, thus the farm under management low showed the highest emission as a result of higher grass biomass production (24 t DM $\text{ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$).

The balance showed positive values (net fixation) of 3.44 t $\text{C}_{\text{Equivalence}} \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ for the farm under management system low (260 kg N $\text{ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, 5 kg concentrate $\text{cow}^{-1} \text{ day}^{-1}$ and 100 disperse trees ha^{-1}) and 1.28 t $\text{C}_{\text{Equiv}} \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ for the farm under management system medium (328 kg N $\text{ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, 5 kg concentrate $\text{cow}^{-1} \text{ day}^{-1}$ and 63 disperse trees ha^{-1}), while the farm under management system high (350 kg N ha year, 8 kg concentrate cow day and without disperse trees in pasture lands) presented a negative balance (emission) of 0.54 t $\text{C}_{\text{Equiv}} \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$.

CONTENIDO

INTRODUCCION GENERAL	1
REVISION LITERATURA	4
BIBLIOGRAFIA	9
ARTICULO 1.	13
CAPITULO 1. Introducción	13
Objetivo	15
CAPITULO 2. Materiales y Métodos	16
2.1. Definición del área de estudio	16
2.2. Manejo de las fincas evaluadas	16
2.3. Sistemas evaluados	16
2.4. Variables evaluadas	16
2.5. Selección y descripción de las unidades experimentales	18
2.6. Mediciones	18
Suelo	18
Carbono acumulado en el suelo	18
Carbono fijado en el suelo	19
Pasto	19
Los animales	20
Consumo de materia seca	20
Carbono fijado de las excretas	21
Arboles dispersos y cercas vivas	21
2.7. Diseño experimental	24
2.8. Análisis de datos	25
CAPITULO 3. Resultados.	26
Componentes del sistema	26
Suelo	26
Carbono almacenado en el suelo	26
Carbono fijado	29
Pasto	29
Animales	32
Arboles	33
CAPITULO 4. Discusión	36
CAPITULO 5. Conclusiones	41
CAPITULO 6. Recomendaciones	42
CAPITULO 7. Bibliografía	43

ARTICULO 2.	49
CAPITULO 1. Introducción	49
1.2 Objetivos	52
CAPITULO 2. Materiales y Métodos	53
2.1. Definición área de estudio	53
2.2. Manejo de fincas evaluadas	54
2.3. Variables evaluadas	54
2.4. Selección y descripción de las unidades experimentales	55
2.5. Estimaciones de la emisión de CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O	56
Suelo	56
Dióxido de carbono (CO ₂)	56
Oxido nitroso (N ₂ O) del fertilizante	57
Los animales	57
Emisión metano (CH ₄) por fermentación ruminal	57
Emisión metano (CH ₄) por excretas	59
Emisión dióxido de carbono (CO ₂) por excretas	60
Emisión óxido nitroso (N ₂ O) por excretas	60
2.6. Balance de Gases de Efecto Invernadero	61
2.7. Análisis Estadístico	61
CAPITULO 3. Resultados	62
3.1. Calidad de los alimentos	62
3.2. Rendimiento materia seca y carbono fijado por pasto y la hojarasca del pasto	63
3.3. Emisión de Gases de Efecto Invernadero	64
Emisión de metano por los rumiantes	64
Metano excretado	66
Emisiones a nivel de finca	67
Metano	67
Oxido nitroso	68
Dióxido de carbono	70
3.4. Balance de Gases de Efecto Invernadero	71
CAPITULO 4. Discusión	75
CAPITULO 5. Conclusiones	83
CAPITULO 6. Recomendaciones	85
CAPITULO 6. Bibliografía	86

LISTA DE FIGURAS

Artículo 1

<u>Figura #</u>	<u>Página #</u>
1. Carbono almacenado en el suelo bajo pasturas solas y en Sistemas Silvopastoriles	28
2. Carbono fijado por las excretas de los animales en los diferentes tratamientos	32
3. Relación entre el diámetro a la altura del pecho con Carbono almacenado en árboles de Chilillo	35

Artículo 2

1. Emisión CH ₄ por las vacas lactantes en fincas de diferentes intensidades, estimados por los métodos de Shibata, IPCC y Moe y Tyrrel	64
2. Emisión CH ₄ por vacas secas y lactantes, en fincas de diferentes intensidades de manejo	65
3. Balance neto para la finca con bajo nivel de uso de insumos	72
4. Balance neto para la finca con nivel medio de uso de insumos	73
5. Balance neto para la finca con bajo nivel de uso de insumos	74

LISTA DE CUADROS

Artículo 1.

<u>Cuadro #</u>	<u>Página #</u>
1. Variables evaluadas en diferentes componentes de los sistemas	17
2. Cantidad de carbono almacenado en el suelo en diferentes sistemas de pasturas sin y con árboles (profundidad de 0-100 cm)	26
3. Carbono almacenado en el suelo, según el efecto de la interacción pasto, árbol y profundidad del suelo	27
4. Carbono fijado en el suelo	29
5. Fracción de carbono de los pastos en los diferentes sistemas	30
6. Rendimiento y fijación de carbono del pasto y la hojarasca del pasto	31
7. Fracción de carbono del componente leñoso del sistema	33
8. Carbono fijado en el componente leñoso del sistema y los árboles	34

Artículo 2.

<u>Cuadro #</u>	<u>Página #</u>
1. Variables evaluadas en diferentes componentes de los sistemas	55
2. Clasificación de fincas, según los insumos y los árboles dispersos en los apartos	56
3. Calidad de los alimentos consumidos por las vacas en fincas de los tres sistemas	62
4. Rendimiento y fijación de carbono en el pasto y en la hojarasca del pasto	63
5. Producción de CH ₄ en las excretas	66
6. Emisión de CH ₄ según el nivel de finca	67
7. Eficiencia de emisión de CH ₄ , por kg leche producida y kg de peso vivo	68
8. Emisión de N ₂ O por el fertilizante, las excretas y total	69
9. Emisión de CO ₂ según la fuente de la materia orgánica	70
10. Balance de Gases, por ha para fincas de los tres sistemas de manejo	71
11. Emisión de Gases de Efecto Invernadero en la finca de nivel bajo de uso de insumos	72
12. Emisión de Gases de Efecto Invernadero en la finca de nivel medio de uso de insumos	73
13. Emisión de Gases de Efecto Invernadero en la finca de nivel alto de uso de insumos	74

1. INTRODUCCION GENERAL

Gases radiactivamente activos, que atrapan parte de la radiación infrarroja saliente de la superficie del suelo causan el calentamiento de la atmósfera. Esto es el conocido efecto invernadero. Sin el efecto invernadero la temperatura del planeta sería 33 °C más baja que la temperatura actual, lo que haría imposible cualquier forma de vida presente (IPCC 1995).

Los gases invernaderos se originan en la naturaleza sin la mediación humana; estos gases incluyen: vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y ozono. La acentuación en la concentración atmosférica de CO₂, N₂O y otros gases invernadero, producidos por las emanaciones de los suelos después de la deforestación, muestra que la tumba y quema de los bosques en las áreas tropicales es de importancia global. Estos gases resultan de la quema de la biomasa almacenada durante años en los bosques o por la descomposición de la materia orgánica que es sometida a procesos de oxidación (Botero 1999).

Indiscutiblemente las actividades humanas provocan cambios medibles en la atmósfera. Si bien las secuelas de dichos cambios son asunto de controversia, hay un inherente calentamiento del planeta causado por el "efecto invernadero".

Estudios recientes proponen un escape neto de Carbono desde las regiones tropicales a causa de la deforestación de 0.42 a 1.60 Pg ⁽¹⁾ año⁻¹ (Kanninen, 2001) de los cuales 0.1 a 0.3 Pg son originados por la reducción en la materia orgánica de los suelos. La proporción en la cantidad de carbono emitido hacia la atmósfera por los suelos tropicales sólo es aventajada por la liberación mundial debida al consumo de combustibles fósiles (Veldkamp 1993)

La emisión de 14 millones tC en 20 años o 700 000 tC año⁻¹, es equivalente a la emisión en el mismo tiempo de 325 000 automóviles (asumiendo que un carro viaja 32000 km año⁻¹ y consume en promedio 10 km lt⁻¹ o 3330 lt año⁻¹ de gasolina) Los cálculos están basados en

¹ 1 Petagramo = Pg = 1 Gigaton = 10 x 10⁸ toneladas

el peso de la gasolina de 0.77 kg lt^{-1} (84.2% de carbono), de manera tal que un automóvil quema 2.6 t año^{-1} de gasolina y expulsa 2.15 tC año^{-1} (Fujisaka et al 1998).

Las prácticas agropecuarias tradicionales juegan un importante papel ya sea adicionando gases de efecto invernadero, resultado de las tecnologías de producción o, reduciéndolos mediante su captura en la biomasa. Durante el pastoreo una porción del pasto ofrecido no es consumido, parte de estos residuos son incorporados como materia orgánica en el suelo e incrementa la cantidad de carbono en el mismo. En consecuencia, una de las funciones de los pastos y los Sistemas Silvopastoriles (SSP) es como sumidero de carbono, reduciendo la concentración del CO_2 atmosférico.

En las últimas décadas, el deterioro de los recursos naturales en las áreas de ladera y en el trópico húmedo del continente americano evidencia los efectos del crecimiento de la población. Esta presión por aumentar la frontera agrícola y elevar la producción de alimentos para una población creciente ha traído como consecuencia aumentos en: la tasa de deforestación, el uso de agroquímicos, en la erosión de los suelos, en el deterioro de las cuencas y fuentes de agua y en la emisión de gases asociados al calentamiento global (Serrao y Toledo, 1992).

En los últimos 25 años, América tropical ha mostrado incrementos en la producción de carne y leche, pero dichos aumentos han sido debidos al crecimiento en la población bovina y en la superficie en pastos. De otro lado, la productividad ha disminuido como consecuencia de implementación de sistemas de producción más extensivos y de la incorporación de suelos de menor fertilidad (Pezo y Ibrahim, 1996). Sin embargo, en el caso de Costa Rica el panorama ha cambiado sustancialmente en los últimos cinco años, donde el hato nacional ha disminuido en mas de un millón de cabezas para ubicarse en 1,358209 cabezas (Pérez, 2001) pero la producción de leche se ha triplicado (Meléndez, 1998).

El CO_2 es el gas de mayor importancia desde el punto de vista del calentamiento global debido al volumen producido todos los años, con un aumento en su concentración

atmosférica y por el tiempo de residencia del gas en la atmósfera. El CO₂ es responsable del 50% del calentamiento global a través de la absorción de la radiación térmica emitida por la superficie de la tierra (Veldkamp 1993).

En la presente investigación se ofrecen los resultados de la fijación y emisión de los tres principales G.E.I., para finalmente realizar un balance (fijación – emisión) considerando los diferentes estratos involucrados en las fincas ganaderas, a saber: el suelo, los pastos, los animales y los árboles.

2. Revisión de literatura.

Los ingresos generados por la exportación de productos lácteos se ha incrementado significativamente en los últimos años, pasando de US \$4.5 millones en 1990, a US \$ 17 millones en 1996, lo que representó un aumento del 300% (SEPSA 1998).

Algunos grupos de opinión como los ambientales y ecologistas, manifiestan que la ganadería es la principal causa de la deforestación en el trópico de Centroamérica; en el caso de Costa Rica, la actividad ganadera ha sido colonizadora y en ocasiones la selva fue tumbada por grandes hombres, generalmente anónimos, que hicieron surgir pueblos y ciudades dentro de la selva, bajo este contexto se puede indicar que esta actividad en forma extensiva es una consecuencia y no la causa de la deforestación (Abarca 1997).

Anualmente se deforestan 17 millones ha para convertirlas en agricultura y/o pastos y plantaciones silvícolas. En términos generales, la deforestación libera aproximadamente 1000 millones de toneladas de carbono a la atmósfera cada año, en forma de dióxido de carbono (Houghton, 1991).

La mayor parte de los trabajos para determinar carbono en SSP, provienen de modelos ideados para bosques, lo que representa una limitante por las adaptaciones y modificaciones que deben realizarse de los mismos. Además, hasta el momento las investigaciones no han considerado el secuestro del carbono por parte del componente animal, que representa un eslabón muy importante dentro del S.S.P.; y tampoco han inventariado otros gases de efecto invernadero como metano y óxido nítrico, y convertirlos a su equivalente de carbono (Botero 1998). ✓

Comparada con las sabanas, las pasturas con base en gramíneas "mejoradas" secuestran más Carbono en partes profundas del perfil del suelo, generalmente debajo de la capa arable (10-15 cm, generalmente). Esta característica hace que este Carbono este menos expuesto a los procesos de oxidación y por tanto su pérdida como gas invernadero (Fisher et al, 1994) ✓

En el contexto del cambio climático y el ciclo global del carbono, la agroforestería es de interés a lo menos por dos razones. La primera es que los componentes arbóreos fijan y almacenan carbono desde la atmósfera vía fotosíntesis. La segunda razón, es su aparente potencial para reducir la necesidad de talar nuevas áreas de bosque para la agricultura proveyendo una alternativa para cultivos de cambio (Schroeder, 1994). ✓

La cantidad de carbono que cualquier ecosistema vegetal puede inmovilizar está relacionado con la productividad primaria neta. En este sentido, los ecosistemas tropicales y entre ellos las pasturas tienen un gran potencial, comparado con los ecosistemas templados. Las gramíneas utilizadas en la producción animal tropical generalmente son de metabolismo C₄, lo cual les da mayor capacidad de integrar el gas en la materia orgánica de las plantas. Esta materia orgánica puede ser consumida por los animales y gran parte de ella (30 - 70%) regresa al suelo como heces y orina. Parte de las plantas se hacen senescentes y son incorporadas directamente al suelo (Pezo e Ibrahim, 1996). ✓

Aunque el consumo de forraje ocurre durante el pastoreo, una parte de esos residuos son incorporados como materia orgánica en el suelo e incrementa la cantidad de carbono en el mismo. Parte de ese carbono puede permanecer en el suelo o en las raíces de la planta por extensos períodos de tiempo. En consecuencia, la función del pasto es como sumidero de carbono, reduciendo la concentración del CO₂ atmosférico (Minami, et al 1993).

Las investigaciones de instituciones como el CATIE y el CIAT (Colombia) han identificado a los pastos mejorados y los Sistemas silvopastoriles como tecnologías con potencial para incrementar la productividad por unidad de área de las fincas, lo que permitiría una alternativa de uso de la tierra para la ganadería en las áreas más frágiles. Estos Sistemas de pasturas han demostrado contribuir al uso más sostenible de la tierra mediante la fijación de nitrógeno, rápido reciclaje del fósforo e incremento de la actividad biológica del suelo (Ibrahim y Mannetje, 1998).

El adecuado manejo del pastoreo de las gramíneas aumenta la producción de la materia orgánica, reflejada en el incremento de la producción de biomasa, lo que representa un enorme beneficio para el ambiente (Roos, et al 1995).

Metano (CH₄):

El CH₄ es el segundo gas en importancia en los gases de efecto invernadero, con una contribución relativa estimada en 20%. La concentración de CH₄ en la atmósfera en los últimos dos siglos ha aumentado en más de 140% (IPCC 1996) y los científicos estiman que este aumento ha sido causado principalmente por la actividad humana. Entre las principales fuentes de emisión de este gas están la descomposición de la materia orgánica, los sistemas energéticos basados en petróleo y gas natural, la actividad agropecuaria (fermentación entérica y producción de arroz), las minas de carbón, el tratamiento de aguas residuales y algunos procesos industriales (EPA 2000).

La contribución del CH₄ al efecto invernadero a escala global es muy alta debido al mayor potencial de calentamiento que caracteriza a este gas. Los gases de efecto invernadero tienen diferente capacidad de captura calor en la atmósfera. Por esta razón el IPCC (1994) definió el concepto de Potencial de Calentamiento Global (PCG) de diferentes gases, tomando como referencia al CO₂. Se estima que el CH₄ es 21 veces más efectivo que el CO₂ (el PCG del metano es 21). Las principales fuentes de emisión de CH₄ en Costa Rica son el sector agropecuario, y la actividad ganadera contribuye con más del 80% de la misma (Montenegro y Abarca 2001).

Dióxido de Carbono (CO₂):

El CO₂ es el gas con mayor contribución relativa al efecto invernadero, con 65%. La principal fuente de emisiones de CO₂ proviene del uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural) para producir energía que a su vez utiliza para transporte, calor y generación de electricidad, por lo que se estima que el 80-85% del CO₂ emitido globalmente proviene de esta fuente (IPCC 1996).

Otra fuente importante de incremento de CO₂ emitido proviene de los cambios en el uso de la tierra, fundamentalmente la deforestación (Kanninen 2001). Los casos en que el corte y la quema se realizan para limpiar áreas de bosques y convertirlas a tierras de cultivo y pasturas, en general resultan en balances negativos (Rosenberg y Izaurralde 2000; Baethgen y Martino 2001). El IPCC (1996) estima que entre el 15 y 20% del CO₂ emitido a la atmósfera proviene del resultado de éstos cambios en el uso de la tierra.

No todos los cambios en el uso de la tierra son negativos desde el punto de vista de emisiones de CO₂. Algunos cambios en el uso de la tierra que resultan en fijación neta de CO₂ como por ejemplo la conversión de pasturas naturales poco productivas a bosques bien manejados o en pasturas mejoradas (Baethgen y Martino 2001).

Considerando sólo las emisiones de CO₂ lo que interesa son los balances netos. Entonces un buen sistema agropecuario es el que secuestra más carbono del que emite. Tal como la técnica agropecuaria de cero labranza, que permite acumular hasta 1 tC ha⁻¹ año⁻¹ cuando se realiza en suelos que han perdido cantidades importantes de materia orgánica (Martino y Van Hoff 1999).

Oxido Nitroso (N₂O):

Otro gas de efecto invernadero producido en cantidades considerables en la actividad agropecuaria es el N₂O, con una contribución relativa al efecto invernadero estimada en 5% (IPCC 1996). El valor Potencial de Calentamiento Global de este gas se estima entre 210 (Houghton et al 1996) y 310 (IPCC 1996) veces mayor que una molécula de CO₂.

El N₂O se produce naturalmente en el suelo por dos procesos biológicos: la desnitrificación y la nitrificación (Paul 1999). En la desnitrificación los microorganismos del suelo utilizan el nitrato (en ausencia de oxígeno) como aceptor final de electrones en el proceso respiratorio. El nitrato es reducido y uno de los productos intermedios del proceso de que puede ser liberado a la atmósfera es el N₂O (Baethgen y Martino 2001).

Muchas prácticas de manejo de suelos comúnmente utilizadas en la agricultura contribuyen a las emisiones de N_2O . Los fertilizantes orgánicos y sintéticos aumentan las cantidades de nitrógeno aplicadas a los suelos y por lo tanto pueden aumentar las emisiones de N_2O (Baethgen y Martino 2001). El IPCC sugiere que la emisión de N_2O proveniente de los cultivos y de sistemas de agrícolas con fertilización nitrogenada representan $3.5Tg N \text{ año}^{-1}$ (Houghton et al 1996).

3. BIBLIOGRAFÍA

- Abarca, S. 1997. Ganadería de carne, amiga del ambiente y os bosques: una alternativa de producción sostenible. *Agronomía Costarricense* 21(2):285-298.
- Baethgen, W.E.; Martino, D.L. 2001. Emisiones de gases de efecto invernadero en los sectores agropecuario y forestal del Uruguay y oportunidades en el mercado de carbono. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*. 9(2): 127-134.
- Botero, J.A. 1998. Contribución de los sistemas ganaderos tropicales al secuestro de carbono. II Conferencia Electrónica de Agroforestería para la Producción Animal en América Latina (FAO-CIPAV). www.lead.virtualcentre.org/es/ele/conferencia2/bvconfe.htm.
- Fisher, M.J.; Rao, I.M.; Ayarza, C.E.; Sanz, J.I.; Thomas, R.J.; Vera, R.R. 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature*. 31:236-238 pp.
- Fujisaka, S.; Castilla, C.; Escobar, G.; Rodrigues, V.; Veneklaas, E.J.; Thomas, R.; Fisher, M. 1998. The effects of forest conversion on annual crops and pastures: Estimates carbon emissions and plants species loss in a Brazilian Amazon colony. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 69:17-26.
- Houghton, R.A. 1991. Tropical deforestation and atmospheric carbon dioxide. *Climatic Change* 19:99-118.
- Houghton, J.T; Meira Filho, L.G.; Callander, B.A.; Harris, N. 1996. *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*, WG1, IPCC. Cambridge University Press, Cambridge.

- Ibrahim, M.; Mannetje, L T. 1998. Compatibility, persistence and productivity of grass legume mixtures in the humid tropics of Costa Rica. 1. Dry matter yield, Nitrogen yield and botanical composition. *Tropical Grasslands (Australia)* 32 (2):1-10.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. 1996. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*; J.T. Hogthorn, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell; eds.; Cambridge University Press. Cambridge, U.K.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. 1995 *Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Report of the Scientific Assessment Working Group of IPCC: Summary for policy makers and Technical summary of the working group.* IPCC/WMO.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. 1994. *Radiative forcing of climate change. The 1994 report of the Scientific Assessment working group of IPCC: Summary for policy makers.* IPCC/WMO.
- Kanninen, M. 2001. *Sistemas Silvopastoriles y almacenamiento de carbono: Potencial para América Latina. En conferencia electrónica en potencialidades de los Sistemas Silvopastoriles para la generación de servicios ambientales.* LEAD- CATIE
- Martino, D.L.; E.van Hoff. 1999. *Mercadeo de carbono: una oportunidad para Uruguay.* *Uruguay Forestal* 9(21):4-9. www.inia.org.uy/agroclima/index.html.
- Meléndez Ch, C. 1998. *Desde hace 50 años, el día comienza con Dos Pinos. Historia de la Cooperativa de Productores de Leche R.L. 1ª edición.* San José, Costa Rica. 208 p.
- Mínami, K.; Gourdriaan, 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 ref.

- Montenegro, J.; Abarca, S. 2001. Importancia del sector agropecuario costarricense en la mitigación del calentamiento global. Ministerio de Agricultura y Ganadería; Instituto Meteorológico Nacional, 2001. 137p.
- Paul, J. 1999. Nitrous oxide emission resulting from animal manure management. *In* Desjardins, R.; Keng, J.C.; Haugen-Kozyra, K., eds. Reducing nitrous oxide emissions from agroecosystems. International N₂O workshop held. Marzo 3-5, 1999. Banff, Alberta, Canada. pp 216-225.
- Pérez G, E. 2001. Análisis del Censo Ganadero 2000. Informe Final. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Programa del Gusano Barrenador. San José, Julio 2001.
- Pezo D.; Ibrahim, M. 1996. Sistemas silvopastoriles, una opción para el uso sostenible de la tierra en sistemas ganaderos. En: Pastoreo intensivo en zonas tropicales. 1er Foro Internacional. FIRA/Banco de México. Veracruz, México. 35p.
- Roos, D.; Speir, T.; Kettles, H.; Tate, K.; Mackay, A. 1995. Soil biomass, C and N mineralization and enzyme activities in hill pasture: influence of grazing management. *Australian J. Research*. 33:943-59.
- Rosenberg, N.; Izaurralde, R. 2000. Storing Carbon in Agricultural soils to help mitigate global warming. Council for Agricultural Science and Technology (C.A.S.T.) Issue Paper. 8p.
- Schroeder, P. 1994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 27:89-97.
- SEPSA (SECRETARIA EJECUTIVA DE PLANIFICACION SECTORIAL). 1998. Boletín estadístico sectorial agropecuario N° 9. 28p.

Serrao, E.A.; Toledo, J.M. 1992. Sustaining pasture based production system for the humid tropics. In: Development or destruction, the conversion of tropical forest to pasture in Latin America. Eds. S. Downing, H. Pearson, C. García Downing. Boulder, Westview Press. 257 – 280 pp.

Veldkamp. E. 1993. Soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropics of Costa Rica. Ph. D. Thesis. Wageningen, Netherlands, Agriculture University of Wageningen. 117 p.

ARTICULO 1 DISTRIBUCION DEL CARBONO FIJADO EN PASTURAS EN MONOCULTIVO Y SISTEMAS SILVOPASTORILES DE FINCAS LECHERAS INTENSIVAS DE LA ZONA ALTA DE COSTA RICA.

CAPITULO 1- INTRODUCCIÓN

La ganadería en los trópicos es parte de las actividades económicas, sociales y culturales y, es una práctica extensiva en fincas pequeñas, medianas y grandes. En Centro América, la ganadería es un activo en 375.000 fincas con 15 millones de hectáreas de pastos (Pomareda, 1999). Algunos ecologistas opinan que la ganadería extensiva ha sido responsable de deforestación, al convertir bosques en pastizales, como resultado de una mayor demanda de carne en la llamada "Hamburger Connection" (Altieri 2001).

La industria láctea en Costa Rica es una fuente importante de divisas, que en 1996 generó 17 millones de dólares americanos (SEPSA 1998). Una parte de esta producción proviene de fincas lecheras intensivas en tierras altas que se caracterizan por manejar razas especializadas de *Bos taurus* y, que requieren alimentos concentrados; además de dosis altas de fertilizantes nitrogenados para aumentar la disponibilidad de pasto para los animales, que les permita alcanzar producciones lácteas económicamente sostenibles. Aunque cabe resaltar que el 70% de la leche que procesa la Cooperativa Dos Pinos en Costa Rica procede de fincas de las llanuras del norte del país (región de San Carlos) que se caracteriza por el pasto Estrella africana y con una altitud promedio de 400 m.s.n.m.

Debido a las condiciones climáticas y a las características propias de los alimentos concentrados y fertilizantes nitrogenados, es de esperar un aumento en la emisión gases de efecto invernadero como el metano y el óxido nitroso, siendo su potencial de calentamiento 21 y 250 veces mayores que el dióxido de carbono (Arias et al 2001)

El calentamiento climático predicho y el incremento medio de la temperatura del suelo podrían acelerar la emisión terrestre de CO₂. Existen dos formas principales de reducir la

emisión: 1- incrementar la cantidad de carbono almacenado en el suelo y en la biomasa y, 2- quemando menos combustibles fósiles (USDA 1998).

Preston y Leng (1989); comentan que las prácticas agropecuarias juegan un importante papel, ya sea adicionando gases de efecto invernadero como resultado de las modernas tecnologías de producción o, reduciéndolos mediante su captura en la biomasa.

Para Ibrahim y Mannetje (1998), las investigaciones han identificado a los pastos mejorados y los Sistemas silvopastoriles como tecnologías con potencial para incrementar la productividad por unidad de área de las fincas, lo que permitiría una alternativa de uso de la tierra para la ganadería en las áreas más frágiles.

La producción de biomasa de los árboles es un sumidero de dióxido de carbono ampliamente reconocido. Además, la materia orgánica del suelo puede jugar un importante papel, si es manejado en forma sostenible para el secuestro de carbono (Veldkamp, 1994).

Durante el pastoreo una parte del pasto ofrecido es rechazado, esos residuos son incorporados como materia orgánica en el suelo e incrementa la cantidad de carbono en el mismo. En consecuencia, la función del pasto es como sumidero de carbono, reduciendo la concentración del CO₂ atmosférico (Minami, et al 1993).

En dos estudios diferentes en Costa Rica y Panamá quedo demostrada la importancia del secuestro de carbono por el suelo y por los árboles en los sistemas silvopastoriles. Medido a una profundidad de 50 cm y con una cobertura de pasto Guinea *Panicum maximum*, el carbono orgánico del suelo fue de 233 tC /ha, mientras en un suelo ligeramente menos fértil con *Panicum maximum* y *Cordia alliodora*, de menos de 10 años de edad, se almacenaron entre 180 y 200 tC /ha (Ibrahim y Mannetje, 1998)

A pesar de la reconocida importancia de los sistemas silvopastoriles en la distribución del carbono fijado, hay pocos estudios al respecto, y los existentes mencionan solo uno de los componentes del sistema.

Este estudio tiene por propósito determinar el carbono fijado por los principales componentes del sistema de pasturas en monocultivo y del sistema silvopastoril, a saber: el suelo, el pasto, el animal y el árbol.

1.2. OBJETIVOS

Objetivo General.

- Contabilizar la fijación de carbono en fincas de lechería especializada, con manejo de pasturas en monocultivo y en sistema silvopastoril.

Objetivos específicos.

- Evaluación de la fijación de Carbono en los diferentes componentes de pasturas en monocultivo y en sistema silvopastoriles.
- Generar datos sobre carbono fijado en el suelo; pasto; plantas leñosas y los animales.
- Establecer la importancia de las lecherías en el secuestro o emisión de dióxido de carbono atmosférico.

CAPITULO 2- MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1. Definición del área de estudio.

La investigación se realizó en la zona de Pacayas (localiza a 9° 56' 46" latitud norte y 83° 48' 08" longitud oeste) de Cartago (Viquez y Portilla, 1993) en fincas con sistema de explotación de lechería especializada en zona de altura. La altitud de las mismas va desde los 1550 hasta los 2300 m.s.n.m. La precipitación media anual es de 2002 mm, y la temperatura anual oscila entre los 15 °C a 19°C. Se clasifica como Bosque Húmedo Montano Bajo (Holdridge, 2000).

Los suelos predominantes son Lithic Dystrandept asociados con Typic Dystrandept (Viquez y Portilla, 1993). Con un pH de 5.6-6.5; acidez < 0.5 meq 100 ml⁻¹; 10% saturación de acidez; nivel de fósforo < 10 ug ml⁻¹ y el potasio 0.21 ug ml⁻¹ (Berstch 1995).

Según datos de la Agencia de Servicios Agropecuarios del M.A.G (Molina 2001) existe una área de 1110 has de pasturas. En promedio las fincas tienen un tamaño de 4.5 has, con 15 vacas en ordeño que producen 210 kg leche finca⁻¹ día⁻¹. Las especies de pasto principales son el Kikuyo (*Penissetum clandestinum*) y Estrella africana (*Cynodon nlemfluensis*), con una fertilización que varía entre 175 a 310 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Entre los meses de Febrero y Julio del 2001, se realizó un estudio de campo para cuantificar el carbono fijado en fincas lecheras de altura con manejo de pasturas en monocultivo y con sistemas silvopastoriles de la zona de Pacayas en Cartago. Los indicadores técnicos de las fincas se presentan en el cuadro 2.

2.2. Manejo de las fincas evaluadas.

Las fincas de la zona de Pacayas tienen un manejo tecnificado de los animales y los potreros. La ocupación de los apartos es de 10 horas, con dos apartos por día, y una

rotación que va desde 22 a 35 días en la época de menos lluvia, hasta 30 – 40 días en la época lluviosa. La fertilización es de 260 a 350 kg N ha⁻¹ año⁻¹, y una media de 320 kg N.

2.3. Sistemas evaluados

Este trabajo experimental se realizó en fincas lecheras donde predominan los potreros con pasto Kikuyo y pasto Estrella africana, en monocultivo y bajo sistemas silvopastoriles.

2.4. Variables evaluadas

En el cuadro 1 se presentan las variables evaluadas en los diferentes estratos del sistema.

Cuadro 1: Variables evaluadas en los diferentes componentes de los sistemas.

Estrato	Variable
Suelo	Carbono almacenado Carbono fijado, proveniente de la hojarasca y las raíces de los pastos y los sistemas silvopastoriles.
Pasto	Carbono fijado en la biomasa aérea no comestible por el animal
Animal	Consumo de materia seca del pasto y alimentos concentrados Cantidad de excretas líquidas y sólidas Carbono fijado por las excretas
Arbol	Carbono fijado

Todas las variables de emisión se presentan en equivalentes de carbono por hectárea y por vaca, este último obtenido de la división de los valores de fijación entre la carga animal de cada finca.

2.5. Selección y descripción de las unidades experimentales

Las fincas experimentales fueron seleccionadas utilizando la base de datos de la Agencia del M.A.G. de Pacayas. Se tomaron fincas que reunían los requisitos establecidos de tipos de pastos, y potreros con y sin árboles. Las fincas se visitaron y se entrevistó a sus propietarios y administradores para evaluar su disposición a colaborar con la investigación. Completada esta etapa las fincas fueron seleccionadas al azar.

2.6. Mediciones

Suelo.

Carbono acumulado en el suelo

El contenido del carbono orgánico en el suelo se estimó a 4 diferentes profundidades:

a) 0-20 cm; b) 20-40 cm; c) 40-60 cm y d) 60-100 cm.

Se tomó una muestra de 200 g para el análisis de materia orgánica (m.o.) con el método de Walkey y Black. Para cada parcela se midió la densidad aparente (Forsythe, 1972) a las diferentes profundidades para calcular la cantidad de carbono.

Para determinar el carbono almacenado en el suelo se utilizó la fórmula:

$$CA = \% CS \times DA \times P \times 10000$$

CA = carbono almacenado, tons ha⁻¹

CS = contenido de carbono en el suelo, %.

DA. = densidad aparente, ton m⁻³

P = Profundidad de suelo, m

El porcentaje de carbono en el suelo, se estimó según el método de Walkley y Black:

$$\% \text{CS} = \% \text{MO suelo} / 1.724.$$

Carbono fijado en el suelo

Para realizar esta medición se determinaron los valores de producción de hojarasca y raíces del pasto y los árboles en los apartos. Estos datos se multiplicaron por la respectiva fracción de carbono, según la especie de pasto y de árboles dominantes en la pradera.

Pasto.

La producción anual del pasto, se estimó tomando el promedio de producción ciclo⁻¹ y multiplicando por número de ciclos del año.

La producción del pasto por ciclo de rotación, se calculó de la siguiente manera:

$$PPc = PPO - PPRc-1$$

donde:

PPc = Producción de pasto por ciclo, kg M.S. ha⁻¹

PPO = Producción pasto ofrecido, kg M.S. ha⁻¹

PPR c-1 = Producción de pasto rechazado del ciclo anterior

Para obtener la materia seca, las muestras fueron secadas en horno a 65°C.

La fracción del carbono de los pastos se determinó en el Laboratorio de Suelos de la Universidad de Guelph, Canadá, utilizando un LECO C12 Carbon Analyzer con patrón para calibración de 42.1%.

El carbono capturado por el pasto se obtuvo de la siguiente manera:

$$CA = B \times Fc$$

donde:

CA = carbono almacenado, tC ha⁻¹ año⁻¹

B = Biomasa seca del pasto, tC ha⁻¹ año⁻¹

Fc = Fracción de carbono en el pasto tC ha⁻¹ año⁻¹

La biomasa de las raíces se estimó en 29% de la biomasa aérea (Rincón et al, 1998).

La producción anual de hojarasca se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$H = PPo - (PPc-1 + PPk)$$

donde:

H= producción anual de hojarasca (t MS ha⁻¹ año⁻¹)

PPo = producción pasto ofrecido (t MS ha⁻¹ año⁻¹)

PPc-1= Producción de pasto rechazado del ciclo anterior (t MS ha⁻¹ año⁻¹)

PPk = Cantidad de pasto consumido (kg ha⁻¹año⁻¹)

El valor de H obtenido se multiplica por la fracción de carbono correspondiente para cada pasto, para lograr el valor de tC ha⁻¹ año⁻¹ de la hojarasca.

Los animales.

Consumo de materia seca.

Para estimar la fijación de carbono por las excretas de los animales, fue necesario evaluar el consumo de MS por parte de los mismos. Se estableció el consumo de MS a partir de la relación del porcentaje (%) peso vivo del animal con el porcentaje (%) de Fibra Detergente Neutro (FDN) según las tablas del NRC (1989). Para ello se hizo un muestreo de pastos bajo la técnica de pastoreo simulado, tomando muestras para el análisis de Fibra Detergente Neutro (FDN), Digestibilidad in vitro de la Materia Seca (DIVMS), Fibra Acido Detergente (FAD), Proteína Cruda (PC), PC ligada al FDN, Extracto etéreo (EE) y Energía metabolizable, según la metodología de Van Soest (1994) y la A.O.A.C. (1970).

Carbono fijado a través de las excretas.

Se estimó la producción fecal de los animales, según la fórmula (Consumo = Producción fecal / 1 - D.I.V.M.S.), y este valor se multiplicó por la fracción de carbono de los pastos y los alimentos concentrados consumidos. Veldkamp (1993) reporta que la materia orgánica en descomposición fija como carbono el 65% de este compost y, el 35% restante se libera en forma de CO₂ como producto de la mineralización de la materia orgánica.

Arboles dispersos y en cercas vivas.

Se realizó un inventario de las especies leñosas en las parcelas seleccionadas. Cada parcela tenía un área promedio 2000 m². Se contabilizaron los individuos de cada especie, y se tomaron muestras para su respectiva identificación por género y especie, en el Herbario Nacional de la U.N.A.. A estos árboles se les midió el diámetro a la altura del pecho (Dap) y la altura total.

Para estas especies se calculó volumen comercial total (VCT), volumen comercial neto (VCN) y volumen total (VT), con la ayuda de diferentes ecuaciones reportadas en Segura y Venegas (1999).

$$VCT (m^3) = LnV = -9.439315 + 2.074218 \times (LnDap) + 0.813232 \times (LnH).$$

$$VCN (m^3) = LnV = -9.2859 + 2.0011 \times (LnDap) + 0.8042 \times (LnH).$$

$$VT (m^3) = VCT \times FEB.$$

Brown y Lugo (1984) mencionan la relación entre biomasa total y la biomasa de la madera para una variedad de bosques tropicales, en el caso del Bosque Lluvioso Montano Bajo la relación de biomasa total a biomasa del fuste es de 1.4.

Este dato se considera como Factor de Expansión de la Biomasa (FEB) para el cálculo de Volumen total = V. Comercial total X FEB, y así no incurrir en el sesgo de estimar el Factor de Forma.

Sin embargo, y debido a los bajos valores de Dap encontrados en los árboles presentes en los apartos, se trabajó con un FEB de 1.8 (Kanninen, datos sin publicar).

En el caso del Chilillo la biomasa se determinó así:

Volúmen Total x gravedad específica de la madera de 0.44 kg/ m^3 (Stooten et al 1970).

Brown et al (1989) han desarrollado ecuaciones para bosques latifoliados a partir de bases de datos que incluyen muchas especies de árboles cosechas en las 3 regiones tropicales del mundo. Para leñosas con un dap >5 cm en el Bosque Tropical Húmedo (1500-4000 mm anuales y una estación seca corta o sin estación seca), se recomiendan la ecuación:

$$Y = \exp (-2.13 + 2.5 \times (\text{Ln} (\text{Dap}))) (R^2 = 0.97)$$

donde:

Y = biomasa en Kg

Dap = diámetro a altura de pecho en cm (1.30 m)

Ln = logaritmo natural

Exp = elevado a...

A los árboles muertos en pie o caídos se les midió el Dap y la altura. Estos valores después se utilizan para calcular la biomasa usando la ecuación de volumen de un cilindro y la densidad de la madera. De esa fuente de carbono los troncos son el mayor contribuyente a los sumideros (Fundación Solar 2000).

Para los árboles muertos en pie se utilizaron las ecuaciones de biomasa supracitada, con la condición de que se tome solo el 70% de la biomasa reportada por la ecuación. Para árboles latifoliados de la zona húmeda quedaría así:

$$Y = (\exp (-2.134 + 2.53 * \text{Ln} (\text{Dap}))) * 0.7$$

El carbono acumulado se estima mediante la multiplicación de la biomasa total (Bt) por la fracción de carbono (Fc).

$$CA (\text{t C ha}^{-1}) = Bt \times Fc$$

Para determinar la fracción de carbono en la biomasa se utilizó el método de calorimetría (Eduarte y Segura, 1998). En el caso de los árboles de poró, se utilizaron las ecuaciones recomendadas por Avila (2000) en las que se mide la altura del fuste o poste, el DAP, la altura y 3 diámetros de cada cabeza (de donde salen las ramas manejadas por la poda) y la densidad de la madera. Para estimar volúmen y biomasa de cada árbol se emplearon las siguientes fórmulas:

$$V = V_p + V_c$$

V= volúmen m³/ árbol

V_p= volúmen del fuste m³

V_c= volúmen de cada cabeza

El V_p corresponde a:

$$V_p = (dap^2 * (\pi/4) / 10000) * (hp)$$

$$(dap^2 * (\pi/4) / 10000) = \text{área basal del fuste m}^2.$$

H_p = altura del fuste.

Con el volúmen estimado se calculó la biomasa del árbol con la siguiente fórmula:

$$B = V * GE.$$

B= biomasa aérea (t /árbol),

V volúmen del árbol (m³)

GE es la gravedad específica de la madera (0.25 t m³) (Avila 2000).

Para estimar el carbono fijado se empleó la ecuación:

$$CF = CA / EA$$

donde:

CF= carbono fijado (tC ha⁻¹ año⁻¹)

CA = carbono almacenado (tC ha⁻¹)

EA= edad del árbol (años)

Debido a la imposibilidad de cortar los árboles, la edad de los mismos se estimó a partir de los datos que relacionan el Dap (cm) con la edad (años) de árboles de jaúl (*Alnus acuminata*) (CATIE 1995), y con la ayuda de la regresión exponencial:

$$Y = 1.795 \times \text{Dap} * \exp 0.587 \quad (r^2=0.969)$$

donde:

y= años del árbol

Dap = diámetro a altura de pecho (cm)

Exp 0.587= elevado a la potencia ...

2.7. Diseño experimental.

El diseño experimental utilizado fue un Irrestricto al azar con parcelas sub- subdivididas, donde la parcela grande está conformada por los pastos con un arreglo factorial de 2 X 2 X 4 para las variables del suelo (materia orgánica, densidad aparente y Carbono almacenado), donde la sub - parcela está conformada por los árboles, y la sub - subparcela la profundidad del suelo.

El modelo matemático a desarrollar para las variables de suelo es: $Y_{ijklm} = \mu + T_i + \epsilon_{im} + S_j + TS_{ij} + \epsilon_{ijm} + PT_{ik} + SP_{jk} + TSP_{ijk} + \epsilon_{ijklm}$.

Para las variables de pasto, árboles y animales, el diseño experimental fue un Irrestricto al azar con parcelas sub - divididas, donde la parcela grande son los pastos con un arreglo factorial de 2 X 2 y; los árboles representan la sub-parcela.

El modelo matemático a desarrollar es: $Y_{ijklm} = \mu + T_i + \epsilon_{im} + S_j + TS_{ij} + \epsilon_{ijm}$.

Para ambos diseños el número de repeticiones es variable (diseño desbalanceado). Los tratamientos de Kikuyo tuvieron tres repeticiones cada uno (sin y con árboles), y los de pasto Estrella africana dos réplicas cada uno.

El nivel de significancia utilizado en as pruebas estadísticas realizadas fue 95% ($\alpha = 0,05$).

2.8. Análisis de datos.

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis factorial de tres niveles para las variables de suelo, y de dos niveles para los otros componentes del sistema. Para comparar las medias de las variables, se realizaron pruebas de Duncan por tratarse de un diseño desbalanceado, y para calcular las medias ajustadas de cada tratamiento y ver cuáles eran diferentes la prueba Pdiff. Para todos los análisis se utilizó el Statistical Analysis Systems (SAS 1988).

Capítulo 3. RESULTADOS

Componentes del Sistema.

Suelo

Carbono almacenado.

En el cuadro 2 se presentan los datos sobre la cantidad de C acumulado en el suelo para los sistemas de pasturas sin y con árboles. La cantidad promedio de C acumulado en suelos bajo la cobertura del pasto estrella africana fue significativamente ($p < 0.05$) superior que el promedio del pasto kikuyo con una diferencia del 22.7%.

La incorporación de árboles no afecta de manera estadística la cantidad de C fijado en las pasturas, sin embargo se presenta una tendencia a una mayor acumulación de C en el suelo del sistema estrella africana sin árboles superó al promedio de los apartos con árboles en un 4.7%.

Cuadro 2. Cantidad de carbono acumulado en el suelo ($t\ ha^{-1}$) en sistemas de pasturas sin y con árboles (profundidad de suelo 0 -100 cm).

Arboles	Carbono acumulado ($tC\ ha^{-1}$)		Promedio
	Tipo de Pasto		
	Kikuyo	Estrella	
• Sin árboles	494.5 (± 34.6)	756.5 (± 54.1)	625.5a
• Con árboles	572.5 (± 29.5)	624.1 (± 65.1)	598.3a
Media	533.50b	690.6a	

Medias con igual letra no difieren significativamente ($p < 0.05$)

La interacción entre especies de pasto y sistema de árboles fue significativa ($p < 0.05$) para el carbono almacenado en el suelo a diferentes profundidades (Cuadro 3). En los estratos entre 0-60cm de profundidad de suelo, la pastura de estrella sin árboles alcanzó las mayores valores de carbono almacenado en comparación con la asociación de estrella con árboles superándola en 35.2%. Por otra parte y contrario a lo observado en estrella africana, en los sistemas con pasto kikuyo se consiguieron las mayores cantidades en el sistema de kikuyo con árboles con una diferencia de 21.9%. En el estrato más profundo del perfil del suelo (60-100 cm) no se encontraron diferencias en las pasturas con y sin árboles, y el sistema de estrella superó al kikuyo en 29.4% para el carbono almacenado en el suelo.

Cuadro 3. Carbono acumulado en el suelo, según el efecto de la interacción pasto, árbol y profundidad del suelo.

Tratamiento	Profundidad del suelo (cm)			
	0-20	20-40	40-60	60-100
Kikuyo sin árboles	89.2 ± 15.3	96.1 ± 48.1	119.2 ± 20.6	190.0 ± 38.7
Kikuyo con árboles	109.5 ± 12.1	120.2 ± 11.6	141.6 ± 14.3	201.2 ± 53.7
Estrella sin árboles	120.7 ± 20.4	165.3 ± 14.1	202.2 ± 54.7	268.4 ± 122
Estrella con árboles	93.2 ± 1.5	117.2 ± 31.6	150.6 ± 64.8	263.0 ± 125
Promedio	103.2c	124.7 bc	153.4b	230.7a

Medias con igual letra y en la misma columna no difieren entre significativamente ($p < 0.05$).

Los incrementos en el carbono almacenado se ven afectados por la profundidad del suelo. Así las diferencias entre la capa de 40-60 cm y 60-100 cm son de 70.8; 59.6; 66.2 y 112.4 t C ha⁻¹ para los sistemas de kikuyo sin árboles, kikuyo con árboles, estrella sin árboles y estrella con árboles respectivamente.

La figura 1 ilustra sobre el contenido de carbono almacenado para los sistemas de pasturas solas y en manejo silvopastoril, a cuatro profundidades del perfil del suelo, en la profundidad de 60-100 cm sobresale el tratamiento de pasto estrella africana sin árboles con 268.4 tC ha⁻¹, que supera en 2; 33.4 y 41.3% las cantidades encontradas para los tratamientos de estrella africana con árboles, kikuyo con árboles y sin árboles respectivamente.

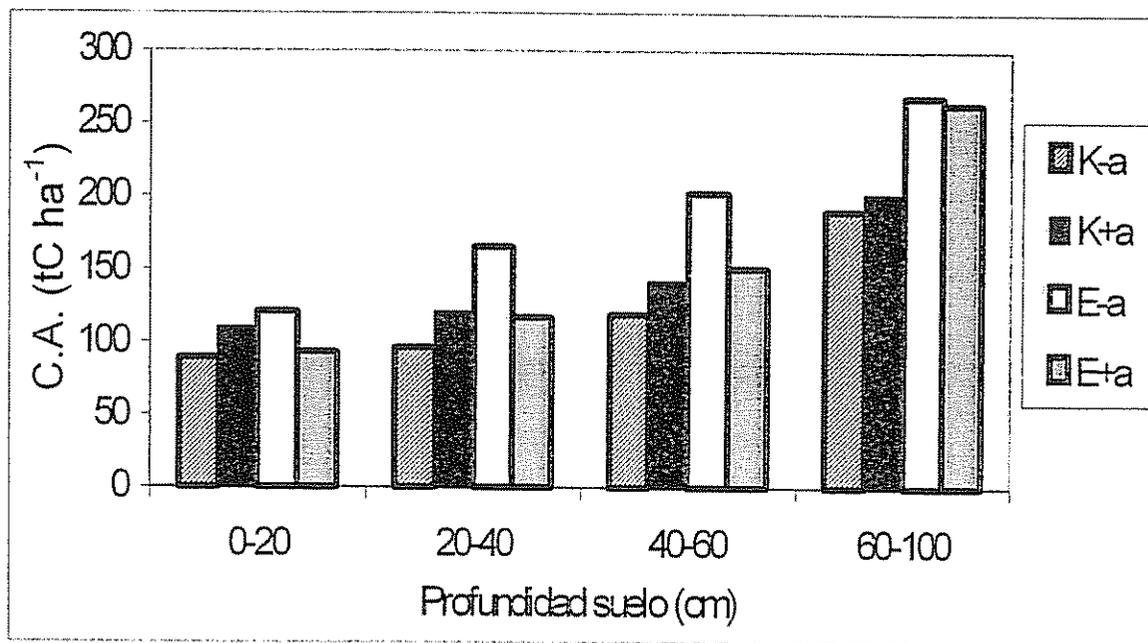


Figura 1. Carbono almacenado en el suelo bajo pasturas solas y en sistemas silvopastoriles

K - a = Kikuyo sin árboles

K + a = Kikuyo con árboles

E - a = Estrella africana sin árboles

E + a = Estrella africana con árboles

Carbono Fijado.

El carbono fijado en el suelo es el resultado de la incorporación de la materia orgánica generada por la hojarasca y las raíces muertas del pasto y los árboles, y el reciclaje de las excretas animales.

Los datos del carbono fijado en los sistemas de pasturas solas y asociadas con árboles se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 4. Carbono fijado en el suelo ($tC\ ha^{-1}\ año^{-1}$)

Arboles	Carbono fijado ($tC\ ha^{-1}año^{-1}$)		Promedio
	Tipo de Pasto		
	Kikuyo	Estrella	
• Sin árboles	5.16 (± 0.30)	4.79 (± 0.18)	4.97 ^a
• Con árboles	5.14 (± 0.25)	4.91 (± 0.04)	5.02 ^a
Media	5.15 ^a	4.85 ^a	

Medias con igual letra no difieren significativamente ($p < 0.05$)

No hay diferencias estadísticas entre los pastos como tampoco entre pasturas solas y en sistemas silvopastoriles. Aunque el carbono fijado en el suelo cubierto por el pasto kikuyo tiende a ser mayor (6 %) a lo encontrado para las pasturas de estrella africana.

Pasto

Los valores de la fracción de carbono de los pastos investigados aparecen en el cuadro 5. Es interesante el hecho que ninguna de las gramíneas alcanzó un contenido de 0.4 de carbono, a pesar de abundantes reportes de literatura que suponen un valor de 0.5. La fracción de

carbono en los pastos fue ligeramente superior para los sistemas de pasturas sin árboles comparadas con aquellas con especies leñosas.

Cuadro 5. Fracción de Carbono de los pastos en los diferentes sistemas.

Tratamiento	Fracción de Carbono
• Kikuyo sin árboles	0.387
• Kikuyo con árboles	0.373
• Estrella africana sin árboles	0.395
• Estrella africana con árboles	0.379

El análisis de varianza muestra que hay diferencias significativas ($p < 0.05$) entre sistemas con respecto al rendimiento del pasto, la hojarasca y la cantidad de carbono fijada por este componente (cuadro 6).

El rendimiento del pasto ($t MS ha^{-1} año^{-1}$) fue similar en los sistemas de kikuyo sin y con árboles, pero en los sistemas de pasto estrella africana la producción del pasto sin árboles es 26.2% mayor al compararla con el sistema con árboles.

La producción de hojarasca sigue una tendencia similar a la observada para el rendimiento del pasto, con el mayor valor de hojarasca para el sistema de pasto kikuyo sin árboles ($16.3 t MS ha^{-1} año^{-1}$) y el menor valor para el sistema de estrella africana con árboles ($11.9 t MS ha^{-1} año^{-1}$).

Cuadro 6. Rendimiento y fijación de carbono del pasto y la hojarasca del pasto.

Sistema	Rendimiento pasto (t MS ha ⁻¹ año ⁻¹)	Hojarasca (t MS ha ⁻¹ año ⁻¹)	Carbono Fijado (tC ha ⁻¹ año ⁻¹)	
			Pasto	Hojarasca
Kikuyo sin árboles	25.1a ± 2.96	16.31a ± 0.37	9.6 a ± 0.38	6.5 a ± 0.14
Kikuyo con árboles	23.6 a ± 2.35	15.34a ± 0.58	9.2 a ± 0.13	6.14a ± 0.22
Estrella sin árboles	23.1a ± 1.49	15.01a ± 1.02	9.2 a ± 0.2	6.01a ± 0.15
Estrella con árboles	18.3 b ± 3.14	11.89b ± 0.92	6.9b ± 0.06	4.76 b ± 0.17

Medias con igual letra no difieren significativamente ($p < 0.05$)

La cantidad de carbono fijada por el pasto y por la hojarasca fue similar para los sistemas de pasto kikuyo, mientras que en los sistemas de pasto estrella africana, la cantidad de carbono fijado por el pasto y la hojarasca en el sistema sin árboles superó al sistema con árboles en 33.3 y 26% correspondientemente, siendo significativas ($p < 0.05$) las diferencias en ambos casos.

Animales

El carbono fijado mediante la producción fecal de los animales está directamente relacionado con el consumo y la digestibilidad real (incluye velocidad de pasaje) de la materia seca de los alimentos que el animal ingiere, porque esto afecta la cantidad de carbono reciclado por las excretas del animal.

En la figura 2 se observa el aporte de los animales a la fijación del carbono en los diferentes sistemas existentes en las fincas, mediante el reciclaje de las excretas.

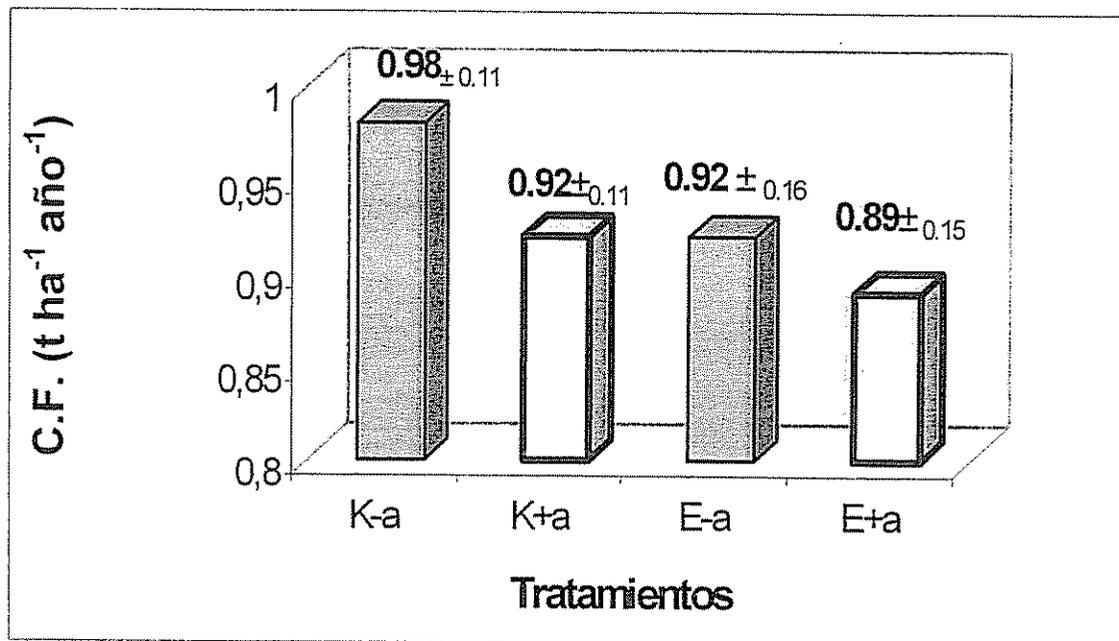


Figura 2. Carbono fijado por las excretas de los animales en los diferentes tratamientos.

La cantidad de carbono fijado por las excretas animales fue similar para los cuatro sistemas, a pesar que el sistema de pasto kikuyo y pastos sin árboles superan en 5% la fijación de carbono que hacen el pasto estrella africana y los pastos con árboles respectivamente.

Arboles.

En promedio hay 95 árboles dispersos ha^{-1} finca $^{-1}$, de los cuales el 85% pertenecen a Chilillo (*Drymis granadensis*), mientras que otras especies encontradas fueron Targuá (*Croton draco*), Guayabillo (*Myrcianthes starkii*), Lloró (*Cornus disciflora*), Salvia (*Buddleja crotonoides*), con un aporte inferior a $0.01 \text{ tC ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ por parte de éstas últimas.

Además, las cercas vivas están conformadas por árboles de poró blanco (*Erythrina berteriana*) distanciados entre sí a 1.59 m, lo que representa 63 postes de poró cada 100 m lineales de cerca viva. Esta densidad es similar a una siembra en bloque con un distanciamiento de $8 \times 8 \text{ m}$.

En el cuadro 7 se presentan los valores de la fracción de carbono para las diferentes especies de árboles presente en los apartos.

Cuadro 7. Fracción de Carbono en el componente leñoso del sistema.

Nombre Común	Fracción de Carbono
Guayabillo	0.467
Lloró	0.457
Targuá	0.444
Salvia	0.447
Chilillo	0.471
Poró	0.455

Además de su función de protección de los animales y delimitación de las áreas, los árboles representan un importante reservorio de carbono. En el cuadro 8 se demuestra como el componente leñoso secuestra desde 0.03 hasta $1.22 \text{ tC ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Cuadro 8. Carbono fijado en el componente leñoso del sistema.

Tratamiento (finca)	C.A. en poró tC árbol ⁻¹ ₂	C.A. en poró tC ha ⁻¹	C.A. en árboles dispersos tC árbol ⁻¹	C.A. árboles tC ha ⁻¹	C.A. total. Poró + árboles tC ha ⁻¹	C.F. tC ha ⁻¹ año ⁻¹
K+a (Am)	0.01 (225)	2.20	0.10 (100)	10.0	12.2	1.22
K+a (Ng)	0.001 (140)	0.14	0	0	0.14	0.02
E+a (Ng)	0.001 (140)	0.14	0	0	0.14	0.02
K+a (MaS)	0.003 (67)	0.2	0	0	0.2	0.03
E+a (Mtm)	0.01 (200)	2.0	0.01 (63)	0.6	2.6	0.26
Promedio	0.01 (155)	0.94	0.02	2.12	3.06	0.31

C.A. = Carbono almacenado.

C.F. = Carbono Fijado.

² Entre paréntesis N° árboles ha⁻¹

En la figura 3, se presenta la relación entre el carbono almacenado y diámetro a la altura del pecho (cm) para la especie de árboles (Chilillo) más abundante en los apartos que es la especie más abundante en los apartos, se estableció a partir de la ecuación siguiente:

$$\text{Carbono almacenado} = 0.0444 * X^{2.5364}; R^2 = 0.858$$

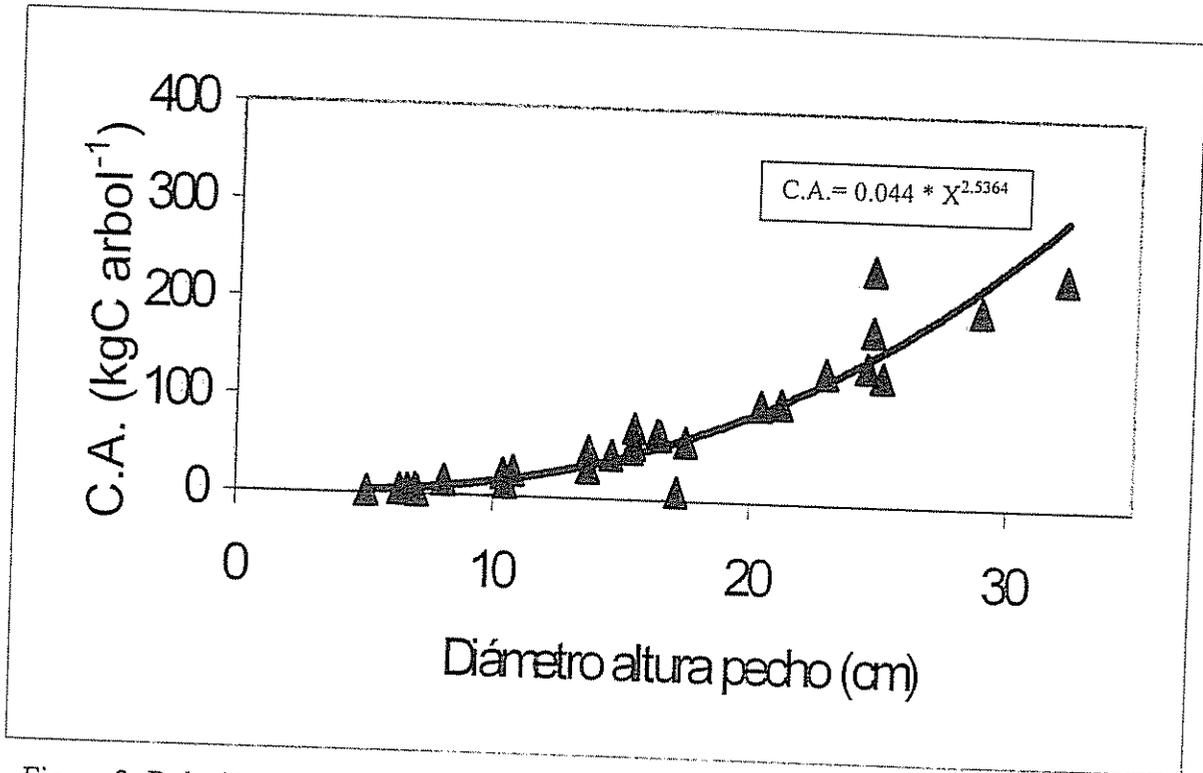


Figura 3. Relación del Diámetro a la altura de pecho (Dap) con carbono almacenado para los árboles de Chilillo.

4. DISCUSION

El carbono almacenado en los suelos cubiertos por el pasto estrella africana es mayor que aquellos bajo el pasto kikuyo, relacionado con el hecho que los suelos cubiertos por pasto estrella presentan los mayores contenidos de materia orgánica con 9.6% (anexo 1). Esto respalda lo reportado en las investigaciones de Botero (1998) y Márquez (1997), quienes resaltan la importancia del suelo, principalmente a través de su contenido de materia orgánica que se considera alto (Berstsch 1995), en la determinación de carbono almacenado.

Los suelos de pasturas a plena exposición solar almacenan 4.5% más carbono que en los suelos en donde se encuentran asociados con árboles. En este sentido una mayor producción de biomasa también producirá más hojarasca y material orgánica que se incorpora al suelo.

Los pastos son plantas con un metabolismo del tipo C_4 que alcanzan su máximo potencial productivo con intensidades de luz tan altos como las registradas al mediodía con el cielo despejado. En el caso de las gramíneas tropicales fertilizadas ($360 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), se encontró que la producción máxima se presenta entre 70 – 100% de luz (Gutiérrez 2000).

Diferente a lo reportado por López M (1998), el carbono en el suelo aumentó con la profundidad hallándose 230.7 tC ha^{-1} a 100 cm. Este valor también es superior en este estudio al reportado por Fisher y Trujillo (2000) con 106 tC ha^{-1} a un metro de profundidad para una pastura de *Brachiaria humidicola* asociada con la leguminosa *Arachis pintoi*.

En los estratos que van de 0 a 60 cm de profundidad del suelo, la pastura de estrella africana sin árboles superó a la estrella sola en la cantidad de carbono almacenado en el suelo. Esto puede estar relacionado con el sombreado que producen los árboles, que provoca una reducción en la cantidad de biomasa de la pastura. Varios autores mencionan la poca tolerancia a la sombra de esta especie (Botero 1998).

Por otro parte, el sistema de kikuyo con árboles mostró valores similares de carbono almacenado en el suelo a los encontrados en la pastura de kikuyo sin árboles. El pasto kikuyo es una especie que los finqueros tradicionalmente manejan en sistemas silvopastoriles (Beer 1980) en las zonas altas, donde la especie permite buenos niveles de producción de leche. En las zonas altas de Costa Rica más del 50% de las fincas son manejadas con pasto kikuyo asociado con árboles como jaúl (SEPSA 1998).

Es posible que el pasto kikuyo sea menos agresivo que la estrella africana y que ésta última tenga un mayor desarrollo de raíces en los estratos de 0-60 cm del suelo. Esta poca agresividad del kikuyo es la que probablemente le permite al kikuyo con árboles mantener niveles similares de carbono en el suelo que en pasturas en monocultivo.

En el presente estudio se observó un fuerte incremento (113 tC ha^{-1}) en la cantidad de carbono almacenado en el suelo entre los estratos de 40-60 y 60-100 cm, que indica que uno de los factores que pudo influir en estos estratos es la competencia entre las raíces del árbol y el pasto, lo que provocó que los árboles desarrollaran un sistema radicular más profundo. La mayor cantidad de carbono almacenado en los estratos bajos, puede resultar en mayores beneficios para el pago por servicios ambientales, debido a que hay interés en pagar el carbono protegido (madera y en capas profundas del suelo).

El suelo juega un rol importante en la acumulación del carbono. Avila (2000) trabajando en un suelo del clase Inceptisol, encontró un almacenamiento de 66.2 y 84.2 tC ha^{-1} para pasturas a pleno sol de *B. brizantha* e *Ischaemium indicum* respectivamente, en este estudio el almacenamiento fue superior en 75.1% a 30 cm de profundidad. Esto respalda lo reportado por Veldkamp (1993) al mencionar que el tipo de suelo también tiene implicaciones directas sobre la capacidad de retener carbono, ya que los suelos volcánicos (andosoles) tienen gran capacidad de almacenar materia orgánica debido a los complejos que se forman con los componentes amorfos de la matriz del suelo.

En el presente estudio el 83.1% del carbono almacenado en el suelo se encuentra en los estratos inferiores (20-100 cm) y principalmente entre los 40-100 cm donde se deposita el

62.8%. Esto reviste vital importancia si se considera que este C que se encuentra debajo de la capa arable (20 cm), es menos propenso a procesos de oxidación o pérdidas por prácticas de laboreo, tal como lo comentan varios autores (Pomareda 1999; Arias et al 2000).

El carbono fijado en el suelo es el resultado de la descomposición de la materia orgánica proveniente de la hojarasca, las raíces de los pastos y los árboles, y el aporte de las excretas de los animales. Las pasturas con y sin árboles prácticamente muestran los mismos valores para el carbono fijado, aunque los suelos bajo la cobertura de pasto kikuyo superan en 6% la fijación que hacen los suelos cubiertos por pasto estrella africana. Los valores son inferiores a los conseguidos por Arias et al. (2001) quienes reportan una tasa de fijación de carbono de $9.8 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a un metro de profundidad, para una pastura de estrella asociada con *Gliricidia sepium*.

La producción de materia seca de los pastos varió entre 18.3 y $25.1 \text{ t MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y valores comparables han sido reportados para kikuyo y estrella africana en condiciones similares al sitio del presente estudio (Giraldo y Bolívar 1999; Van der Grinten 1992). La producción de kikuyo fue similar para los sistemas sin y con árboles, lo que demuestra que esta especie tiene buena tolerancia a la sombra y puede ser recomendado su uso en sistemas silvopastoriles; algunos autores reportan aumentos en la producción del pasto cuando éstos son asociados con árboles leguminosos (Bustamante, 1991; Libreros, 1993); mientras que otros no encontraron diferencias o la producción de biomasa disminuyó con el sombreado (Somarriba, 1988; Giraldo y Bolívar, 1999).

Por otra parte, la reducción del 26% en la producción de estrella africana con árboles está relacionada con la competencia de luz entre los árboles y el pasto. Debido a su mejor adaptación a la altitud y temperatura media de la zona, el pasto kikuyo no se ve afectado por las condiciones de baja intensidad de luz y a temperaturas bajas, mientras que el pasto estrella a temperaturas menores a 10°C entra en estado de latencia (Feuchter 2000).

Veldkamp (1993) indica que las pasturas mejoradas a pleno sol retienen 60% más carbono que bajo sombra, debido a la mayor biomasa y longevidad radicular así como al incremento

de materia orgánica del suelo, contrario a lo reportado por Avila (2000) que menciona que pasturas de brizantha con árboles almacenan 32% más que carbono que a pleno sol. En este sentido hay diferencias entre especies, en cuanto a su tolerancia a la sombra y es importante seleccionar especies de alta productividad en sistema silvopastoriles.

El carbono fijado por la biomasa del pasto kikuyo es muy similar para el sistema sin y con árboles, pero la presencia del componente leñoso permite una mayor estabilidad en la fijación del carbono, porque los valores varían en 130 kg C ha^{-1} mientras que a plena exposición solar la fluctuación es de 380 kg C ha^{-1} . Estos valores son semejantes a los encontrados por Andrade (1999) con 0.7 t C ha^{-1} para una asociación de *Brachiaria brizantha* con *Eucaliptus deglupta*; a los mencionados por Sención (1996) de 0.5 a 1.5 t C ha para pasturas tropicales y, a lo reportado por Rosenberg e Izaurralde (2000) de 0.35 y 1.5 t C ha^{-1} para sistema de brizantha con Eucalipto y brizantha con *Acacia mangium* respectivamente.

La tasa de fijación del carbono por la hojarasca del pasto está estrechamente ligada con el rendimiento del pasto y la consiguiente producción (MS) de la hojarasca. En este sentido, el comportamiento de las especies es el mismo que el presentado para el carbono fijado por la biomasa del pasto, y que en el sistema estrella con árboles muestra una disminución del 26.1% con respecto a la misma especie en monocultivo. Debe considerarse que en sistemas de pastoreo rotativo, sólo el 30-35% del pasto producido es consumido por los animales (excepto cuando es atacado por plagas) y el resto es reciclado en el sistema como carbono.

Las excretas de los animales contribuyen a la fijación del carbono como resultado de la desintegración de las mismas. En este sentido, las tasas de fijación van desde 0.89 hasta $0.98 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, que representan el 26.6 y 10.1% para los sistemas estrella con árboles y kikuyo sin árboles respectivamente; estos valores son inferiores al $1.2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ informado por Arias et al. (2001).

El carbono almacenado por el componente leñoso muestra una tasa media de 3.06 t C ha^{-1} , similares a los encontrados por Andrade (1999) que oscilaron de 3.7 a 4.7 t C ha^{-1} para un

sistema silvopastoril de *A mangium* y *E deglupta* asociados con *B. brizantha*, *B. decumbens* y *Panicum maximum*, Mientras que Avila (2000) reportó 6.0 t C ha⁻¹ en el sistema brizantha – acacia y 2.2 t C ha⁻¹ en el asocio brizantha – eucalipto.

El carbono fijado por los árboles (dispersos y cerca viva) es de 0.31 t C ha⁻¹ año⁻¹, muestra la relevancia de este componente en el secuestro de carbono. Los valores encontrados son superiores al reportado por Kursten y Burschel (1993) de 0,1 t C ha⁻¹ año⁻¹ para árboles de Jaúl establecidos en potreros de kikuyo. Aunque inferiores a los de Andrade (1999) de 1.8 t C ha⁻¹ año⁻¹ para eucalipto y acacia (2 años de edad) en un sistema silvopastoril en trópico húmedo.

En el caso de los árboles de poró (cerca viva) la fijación es de 0.02 t C ha⁻¹ año⁻¹ con una densidad de 155 árboles ha⁻¹, similares a los encontrados por Arias et al (2000) de 0.38 t C ha⁻¹ año⁻¹ (2204 plantas ha⁻¹) *Gliricidia sepium* de 0.13 para un sistema silvopastoril y de 0.33 t C para un sistema agroforestal.

Las cercas vivas tienen importancia económica y ecológica, porque su establecimiento resulta un 54% más barato que las cercas convencionales (Holmann et al, 1992) y reducen la presión sobre el bosque para la obtención de postes y leña (Ibrahim et al, 1999).

5. CONCLUSIONES

El suelo representa un importante sumidero de carbono en los sistemas de pastos en monocultivo y en sistemas silvopastoriles. Principalmente en suelos cubiertos por el pasto estrella africana en monocultivo y, en especial a una profundidad de 80 cm en el perfil del suelo volcánico donde se almacena el 45% del carbono depositado en el suelo.

La cantidad de carbono almacenado en el suelo en el estrato de 0-60 cm de profundidad, fue diferente entre los sistemas evaluados. El sistema de estrella en monocultivo obtuvo mayores valores que estrella asociado con árboles, pero en el caso del kikuyo el comportamiento fue al contrario.

Tanto en rendimiento de pasto como en la producción de la hojarasca, el pasto kikuyo y el estrella africana se comportan mejor en ausencia de los árboles, lo que también se reflejó en la tasa de carbono fijado para el pasto como para la hojarasca, y en ambos se destaca el kikuyo sin árboles aunque muy similar a la producción bajo sombra, lo que indica el potencial de este pasto para los sistemas silvopastoriles.

El carbono fijado por las excretas de los animales fue menor en los apartos con sombra, lo que indica que la calidad de las pasturas bajo sombra es mayor, tal como lo comenta la literatura.

El componente leñoso en los apartos, además de proveer de sombra y abrigo a los animales, permitió la fijación de $310 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, además de proveer de leña y postes a los finqueros, lo que reduce la presión sobre los bosques adyacentes.

Existe una estrecha relación entre el diámetro a la altura del pecho y el carbono almacenado en los árboles de *Drymis granadensis* que es la especie predominante en los potreros.

6. RECOMENDACIONES

Realizar un estudio con diferentes especies de pasto y árboles, que permitan comparar la eficiencia de unos y otras especies y asociaciones.

Efectuar este mismo trabajo en fincas lecheras especializadas de bajura, con propósito medir la eficiencia de fijación de carbono.

Considerar muy seriamente la inclusión de los sistemas de fincas lecheras de altura principalmente aquellas con manejo de sistemas silvopastoriles, como potenciales beneficiarios del Pago de Servicios Ambientales estipulado en la Ley Forestal de Costa Rica.

7. BIBLIOGRAFIA

- Altieri, M. 2001. Servicios ambientales, Agroecología y relaciones Norte-Sur. En; Conferencia electrónica en Potencialidades de los Sistemas Silvopastoriles para la generación de servicios ambientales. LEAD/CATIE.
- Andrade, H. 1999. Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucaliptus deglupta* en el Trópico Húmedo. Tesis Mag. Sc.. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 70 p.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemist). 1970. Methods of analysis of the Official Chemist. 2nd ed. Washington, USA. 1015p.
- Arias S.,K.; Ruiz-Silvera C.; Milla, M.; Messa, H.F.; Escobar, Aquiles. 2001. Almacenamiento de carbono por *Gliricidia sepium* en sistemas agroforestales de Yaracuy, Venezuela. Livestock Research for Rural Development (13)5.2001. [Http://www/cipav.org.co/lrrd/lrrd1.3/5/ruiz135.htm](http://www/cipav.org.co/lrrd/lrrd1.3/5/ruiz135.htm)
- Avila V.; G. 2000. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. Tesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba. Costa Rica. 102 p.
- Beer, J. 1980. *Alnus acuminata* con pasto. En: Curso sobre técnicas Agroforestales para el trópico húmedo. Dic 8-16. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 6p.
- Berstsch, F. 1995. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. Universidad de Costa Rica U.C.R. San José, Costa Rica. 2da edición. 78p.

- Botero, J.A. 1998. Contribución de los sistemas ganaderos tropicales al secuestro de carbono. II Conferencia Electrónica de Agroforestería para la Producción Animal en América Latina (FAO-CIPAV). www.lead.virtualcentre.org/es/ele/conferencia2/bvconfe.htm.
- Bustamante, J. 1991. Evaluación de comportamiento de ocho gramíneas forrajeras asociadas con poró (*Erythrina poeppigiana*) y solas. Tesis Mag Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 131p.
- Brown, S.; Lugo, A. 1984. Biomass of Tropical Forest: a New Estimate based on Forest Volumens. *Science*. 223:1290-1293.
- Brown, S.; Gillespie, A, J.R.; Lugo, A. 1989. Biomass Estimation methods for tropical forests with applications to Forest inventory data. *Forest Science*. 35(4):881-902
- CATIE. Jaúl: *Alnus acuminata* spp *arguta*, especie de árbol de uso múltiple en América Central / CATIE. Turrialba, C.R.: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Programa Manejo Integrado de Recursos Naturales, 1995. 37p. (Serie Técnica. Informe Técnico: No. 248).
- Eduarte, E.; Segura, M. 1998. Determinación del carbono utilizando la calorimetría. (nota técnica). *Ciencias Ambientales* No. 15:54-55.
- Environmental Protection Agency EPA. 2001. Methodology for estimating CH₄ emissions from enteric fermentation. www.epa.gov/globalwarming/publications/emissions/us2001/annex-i.pdf.
- Feuchter, F. 2000. Establecimiento y manejo sustentable de praderas. Universidad Autónoma de Chapingo. Méjico. www.zoetecnocampo.com/Documentos/zacate/zacate.html
- Fisher, M.; Trujillo, W. 2000 Fijación de carbono por pastos tropicales en las sabanas de los suelos ácidos neotropicales. *In* Intensificación de la Ganadería en Centroamérica:

Beneficios Económicos y Ambientales. C. Pomareda y H. Steinfeld (editores). CATIE/FAO/SIDE, San José, Costa Rica. pp 115-135.

Forsythe, W. 1972. Manual de Laboratorio de Física de Suelos. I.I.C.A. Turrialba, Costa Rica. 216p.

Fundación Solar. 2000. Elementos técnicos para inventarios de Carbono en uso del suelo. Lilian Márquez. Editora. Fundación Solar Guatemala. 31 p. www.capas.org.pdf

Giraldo, L.A.; Bolívar, D.M. 1999. Evaluación de un sistema silvopastoril de *Acacia decurrens* asociada con pasto kikuyo *Pennisetum clandestinum*, en clima frío de Colombia. www.cipav.org.co/redagrofor/memorias99/GiraldoA.html.

Gutiérrez, M.V. 2000. Apuntes Curso Fisiología Vegetal. Escuela Posgrado CATIE. 3er trimestre.

Holdridge, L.R. 2000. Ecología basada en zonas de vida. Quinta reimpresión. San José, Costa Rica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1996, c1978. 216p.

Holmann, F.; Romero, F.; Montenegro, J.; Chana, C.; Oviedo, E.; Baños, A. 1992. Rentabilidad de los sistemas silvopastoriles con pequeños productores de leche en Costa Rica. Turrialba 42:79-89.

Ibrahim, M.; Camero, A.; Camargo, J.; Andrade, H. 1999. Sistemas Silvopastoriles en América Central: Experiencias de CATIE. www.cipav.org.co/redagrofor/memorias99/IbrahimM.html

Ibrahim, M.; Mannelje, L T. 1998. Compatibility, persistence and productivity of grass legume mixtures in the humid tropics of Costa Rica. 1. Dry matter yield, Nitrogen yield and botanical composition. Tropical Grasslands (Australia) 32 (2):1-10.

- Kürsten, E.; Burschel, P. 1993. CO₂ Mitigation by Agroforestry. *Water, Air and Soil Pollution*. 70:533 – 544.
- Libreros, J.H. 1993. Efecto de depositar en el suelo material de poda de poró (*Erythrina poeppigiana*) sobre la producción y calidad de la biomasa de king grass (*Pennisetum purpureum X P. typhoides*) establecido en asocio. Tesis Mag Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 116p.
- López M.; A. 1998. Cuantificación del carbono almacenado en el suelo de un sistema silvopastoril. Tesis Mag. Sc. CATIE Turrialba. Costa Rica. 58p.
- Márquez, L. 1997. Validación de campo de los métodos del Instituto Winrock para el establecimiento de parcelas permanentes de muestreo para cuantificar carbono en sistemas agroforestales. Guatemala. Universidad del Valle de Guatemala. 45p.
- Meléndez Ch, C. 1998. Desde hace 50 años, el día comienza con Dos Pinos. Historia de la Cooperativa de Productores de Leche R.L. 1ª edición. San José, Costa Rica. 208p.
- Minami, K.; Gourdiaan, 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 ref.
- Pérez G, E. 2001. Análisis del Censo Ganadero 2000. Informe Final. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Programa del Gusano Barrenador. San José, Costa Rica. Julio 2001. 22p.
- Preston, T.R.; Leng, R.A. 1989. The green house effect and its implications for world agriculture. The need for environmentally friendly development. *In Livestock Research for Rural Development*. 1(1): 23-30.

- Pomareda, C. 1999. Carbon Sequestration through pasture intensification: Technical, Economic and Management Issues. The Livestock and Environment Initiative. The World Bank and FAO. San José, Costa Rica. 48p.
- Rincón, X.R.; Clavero, T.J.; Márquez, A.T.; Rincón, E.; Quintero, C.F. 1998. Crecimiento y producción de cultivares de pasto Buffel (*Cenchrus ciliaris*) en macetas. Revista Fac. Agronomía (LUZ) 15:359-367. Maracaibo, Venezuela. www.redpav-fpolar.info.ve/fagroluz.html
- Rosenberg, N.; Izaurrealde, C. 2000. Storing carbon in agricultural soils to help mitigate global warming. Issue Paper. Council for Agricultural Science and Technology. 14:1-8.
- Segura, M.; Venegas, G. 1999. Tablas de volúmen comercial con corteza para encino, roble y otras especies del bosque pluvial montano de la Cordillera de Talamanca, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. 46p.
- Sención, G.J. 1996. Valoración económica de un ecosistema de bienes y servicios ambientales en un bosque subtropical: Estudio de caso La Palotada, Petén, Guatemala: Tesis Mag Sc. CATIE, Turrialba. Costa Rica. 132p.
- SEPSA (SECRETARIA EJECUTIVA DE PLANIFICACION SECTORIAL). 1998. Boletín estadístico sectorial agropecuario N° 9. 28p.
- Slooten van der H.J., Acosta – Contreras I., Ass, P.S. 1970. Maderas latinoamericanas. III. *Podocarpus standleyi*, *Podocarpus oleifolius*, *Drymis granadensis*, *Magnolia poasana* y *Didymopanax pittieri*. Revista Turrialba 20 (1): Enero - Marzo. Costa Rica.

- Somarriba, E. 1988. Pasture growth and floristic composition under the shade of guajava (*Psidium guajava*) trees un Costa Rica. *Agroforestry Systems* (Netherlands). 6:153-162.
- USDA Global Change Fact Sheet. 1998. Soil carbon sequestration: Frequently asked questions. USDA. www.usda.gov/oce/gcpc/sequeste.htm.
- Van der Griten, P.; Baayen, M.T.; Villalobos, L.; Dwinger, R.H.; Mannetje, L.T. 1992. Utilisation of kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*) pastures and dairy production in a high altitude region of Costa Rica. *Tropical Grasslands* 26:255-262.
- Van Soest, P. 1994. Nutritional ecology of the ruminant. 2nd ed. Comstock Cornell University Press, Ithaca, New York.
- Veldkamp, E. 1994. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. *Soil Science Society American Journal*. 58:175-180
- Veldkamp, E. 1993. Soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropics of Costa Rica. Tesis de Ph. D., Universidad de Wageningen, NL. 117 p.
- Viquez A.; Portilla L. 1993. Protección de Cuencas Hidrográficas. Diagnóstico cantón de Alvarado. Convenio MIRENEM - IFAM. 82p.

ARTICULO 2. EMISIÓN Y BALANCE DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN PASTURAS SOLAS Y SISTEMAS SILVOPASTORILES, EN LECHERÍAS DE ALTURA EN COSTA RICA

CAPITULO 1- INTRODUCCIÓN

Se ha dado a llamar efecto invernadero a la consecuencia de la acumulación de gases atmosféricos, entre los que se destacan el CO₂, CH₄ y N₂O con incrementos anuales de 0.5, 0.6 y 0.35% respectivamente (Minami et al, 1993). En el trópico se emiten 10-30 millones de toneladas de carbono al año como consecuencia de la disminución de la materia orgánica en suelos deforestados (Detwiller y Hall, 1988).

El calentamiento global predicho y el incremento medio de la temperatura del suelo podrían acelerar la emisión terrestre de CO₂. Existen dos formas principales de reducir la emisión: a) Incrementar la cantidad de carbono almacenado en el suelo y en la biomasa y, b) quemando menos combustibles fósiles (USDA 1998), o reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero

Estimaciones recientes sugieren una emisión neta de carbono desde los países tropicales, debido a la deforestación, de entre 0.42 y 1.6 Pg (billones de toneladas) de carbono por año, de los que 0.1 a 0.3 Pg año⁻¹ son atribuidos al descenso en el contenido de materia orgánica del suelo. (Detwiler y Hall, 1988).

La proporción en la cantidad de carbono emitido hacia la atmósfera por los suelos tropicales sólo es aventajada por la liberación mundial debida al consumo de combustibles fósiles (Veldkamp 1993).

En las últimas décadas, el deterioro de la base de los recursos naturales en las áreas de ladera y en el trópico húmedo del continente americano evidencia los efectos del crecimiento de la población. Esta presión por aumentar la frontera agrícola y elevar la producción de alimentos para una población creciente ha traído como consecuencia

aumentos en la tasa de deforestación, aumentos en el uso de agroquímicos, en la erosión de los suelos, en el deterioro de las cuencas y fuentes de agua y en la emisión de gases asociados al calentamiento global (Serrao y Toledo, 1992).

Las prácticas agropecuarias tradicionales juegan un importante papel ya sea adicionando gases de efecto invernadero, resultado de las tecnologías de producción o, reduciéndolos mediante su captura en la biomasa (Preston y Leng, 1989). Durante el pastoreo una porción del pasto ofrecido no es consumido, estos residuos son incorporados como materia orgánica en el suelo e incrementa la cantidad de carbono en el mismo. En consecuencia, la función de los pastos mejorados y los Sistemas Silvopastoriles (SSP) es como sumidero de carbono, reduciendo la concentración del CO₂ atmosférico (Minami et al, 1993).

Los rumiantes participan activamente en el efecto invernadero al emitir CH₄, como producto de su proceso digestivo. En este proceso el CH₄ representa la energía alimenticia que se pierde en forma de gas, en vez de ser aprovechado y transformado en leche o carne (Johnson et al, 1996). Además, el uso de fertilizantes nitrogenados para aumentar la producción de biomasa forrajera de los pastos, aumenta las emisiones del N₂O. Una molécula de N₂O tiene un potencial de calentamiento equivalente a 250 moléculas de CO₂ (Mosier, 1999).

El balance es afectado por las entradas y salidas del sistema mismo. En el caso de los sistemas ganaderas, y en particular los bovinos productores de leche, un aspecto de suma importancia es la alimentación. Si la vaca consume alimentos de baja calidad y con altos contenidos fibrosos, la emisión de metano se incrementará. El uso de alimentos concentrados y de otras fuentes de alimentación como los ensilajes y henos, disminuyen la emisión de metano.

Sin embargo, el fertilizante nitrogenado también mejora la calidad de los pastos, debido al incremento de la proteína y a la disminución de los carbohidratos estructurales (Mora 1990), entonces el uso de este tipo de enmiendas puede reducir la emisión del CH₄ al mejorar la digestibilidad de los pastos.

El CO₂ es el gas de mayor importancia desde el punto de vista del calentamiento global debido al volumen producido todos los años, con un aumento en su concentración atmosférica y por el tiempo de residencia del gas en la atmósfera. El CO₂ es responsable del 50% del calentamiento global a través de la absorción de la radiación térmica emitida por la superficie de la tierra (Veldkamp 1993).

La producción de biomasa de los árboles es un sumidero de dióxido de carbono ampliamente reconocido. Además, la materia orgánica del suelo en agroecosistemas puede jugar un importante papel, si es manejado en forma sostenible para el secuestro de carbono (Veldkamp, 1994).

Un Balance de Gases de Efecto Invernadero permitirá comparar las cantidades emitidas y fijadas, y analizar los factores que intervienen en el proceso, para tratar de prever su evolución. De esta forma podemos conocer si el sistema en estudio es un emisor o un almacenador neto y, cual (es) componente (s) está (n) influyendo positiva o negativamente en dicho balance.

En este artículo se presentan resultados sobre la emisión y balance de gases de efecto invernadero, producidos en sistemas de fincas lecheras intensivas manejadas con diferentes sistemas de pasturas y cantidades de insumos.



1.2. OBJETIVOS

Objetivo General.

Realizar un balance de los gases (CH_4 , N_2O y CO_2) de efecto invernadero en fincas lecheras intensivas con manejo de Sistemas silvopastoriles y de pasturas en monocultivo, en las zonas altas de Costa Rica.

Objetivos específicos.

- Estimación de la emisión de gases de efecto invernadero (G.E.I.) en fincas de diferentes niveles de uso de insumos.
- Generar datos de la emisión de gases de efecto invernadero, bajo el sistema suelo-pasto- árbol y animales.
- Evaluar cómo las fincas lecheras de altura influyen en la emisión y balance de Gases de Efecto Invernadero.
- Determinar los alimentos que inciden en una mayor emisión de metano por parte de los animales.
- Generar información de sobre emisión y balance de carbono, que sirva como insumo para las políticas nacionales sobre Pago por Servicios Ambientales.

CAPITULO 2- MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1. Definición del área de estudio.

La investigación se realizó en la zona de Pacayas (localizada a 9° 56' 46" latitud norte y 83° 48' 08" longitud oeste) en la provincia de Cartago, en fincas con sistema de explotación de lechería especializada en zona de altura. La altitud de las mismas va desde los 1550 hasta los 2300 m.s.n.m. La precipitación media anual es de 2002 mm, y la temperatura anual oscila entre los 15 °C a 19°C. La zona está clasificada como Bosque Húmedo Montano Bajo (Holdridge, 2000).

Los suelos predominantes son Lithic Dystrandept asociados con Typic Dystrandept. El uso actual que predomina del suelo en general es el pasto y las hortalizas, siendo el cultivo de papa el más importante junto con la lechería (Viquez y Portilla, 1993).

Según datos de la Agencia de Servicios Agropecuarios del M.A.G (Molina, 2001) existe una área de 1110 has de pastos (nativos y mejorados). Las principales especies de pasto presentes en la zona son el Kikuyo y Estrella africana, con una fertilización que varía entre 175 a 310 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

En promedio las fincas tienen un tamaño de 4.5 has, con 15 vacas en ordeño que producen 210 kg leche finca⁻¹ día⁻¹.

Entre los meses de Febrero y Julio del 2001, se realizó el estudio de campo para cuantificar la emisión de diferentes gases de efecto invernadero en fincas lecheras de altura con manejo de pasturas en monocultivo y con sistemas silvopastoriles de la zona de Pacayas en Cartago. Con base en los datos de las fincas, éstas se clasificaron según el uso de alimentos concentrados para las vacas, las dosis de fertilizante nitrogenado, la presencia de árboles dispersos en los potreros, y el manejo de las pasturas. Para realizar el balance de G.E.I. en fincas, éstas se agruparon según cada estrato, y cuyas características se presentan en el cuadro 1.

Fijación de Carbono.

En el artículo 1 de este estudio, se presentaron los resultados sobre la fijación de carbono en el suelo, la pastura, el animal y el árbol. Estos mismos datos serán considerados para estimar el carbono fijado por hectárea y por finca, y para elaborar el Balance de Gases Invernadero.

2.2. Manejo de las fincas evaluadas.

Las fincas de la zona de Pacayas tienen un manejo tecnificado de los animales y los potreros, y se consideran dentro de las fincas de lechería especializada. La ocupación de los apartos es de 10 horas diarias, con dos (2) apartos por día y una rotación que va desde 22 hasta 35 días en la época de menos lluvia, hasta 30 y 40 días en la época lluviosa, cuando los pastos se ven afectados en su crecimiento.

La fertilización nitrogenada va desde los 260 hasta los 350 kg N ha⁻¹ año⁻¹, con una media de 320 kg N.

En promedio las vacas lactantes consumen 11.0, 11.2 y 13.6 kg MS vaca⁻¹ día⁻¹ suministrados por el pasto, y el alimento concentrado para las fincas del nivel bajo, medio y alto respectivamente. Mientras las vacas secas ingieren 7.8, 8.0 y 8.3 kg MS vaca⁻¹ día⁻¹, para el mismo orden de fincas.

2.3. Variables evaluadas

En el cuadro 1 se presentan las variables evaluadas en los diferentes estratos del sistema, para cuantificar la emisión de los diferentes G.E.I.

Cuadro 1. Variables evaluadas en los diferentes componentes de los sistemas.

Estrato	Variable
Suelo	Emisión de CO ₂ por materia orgánica Emisión de N ₂ O
Pasto	Emisión de CO ₂ por materia orgánica de la hojarasca y las raíces muertas.
Arbol	Emisión de CO ₂ por materia orgánica de la hojarasca y las raíces muertas.
Animal	Consumo de materia seca del pasto, ensilaje y concentrados Emisión de CH ₄ Emisión de N ₂ O Volúmen de excretas líquidas y sólidas CO ₂ emitido por las excretas

Todas las variables de emisión y del balance neto de los gases, se presentan en equivalentes de carbono por hectárea y por vaca, este último obtenido de la división de los valores entre la carga animal de cada tratamiento.

2.4. Selección y descripción de las unidades experimentales

Las fincas experimentales fueron seleccionadas utilizando la base de datos de la Agencia del M.A.G. de Pacayas. Se tomaron fincas que reunían los requisitos establecidos de tipos de pastos, y apartos con y sin árboles. Las fincas se visitaron y se entrevistó a sus propietarios y administradores para evaluar su disposición a colaborar con la investigación.

Completada esta etapa las fincas fueron seleccionadas al azar y se clasificaron para este estudio, en tres niveles según el uso de insumos que realizan y los sistemas de pasturas que manejan.

Cuadro 2. Clasificación de fincas, según el manejo de insumos y árboles dispersos en los apartos.

Factor	Nivel de fincas según el uso de insumos		
	Bajo	Medio	Alto
• Kg N ha ⁻¹ año ⁻¹	260	328	350
• Consumo de concentrados en vacas lactantes (kg animal ⁻¹ día ⁻¹)	5	5	8
• N° árboles dispersos en los potreros	100	63	0

2.5. Estimaciones de la emisión de CO₂, CH₄ y N₂O.

Suelo.

Dióxido de Carbono (CO₂).

La emisión del CO₂ del suelo se estima a partir de los datos de producción de hojarasca y raíces del pasto y los árboles (capítulo 3). Se estima que el 35% del carbono de estos componentes son emitidos como CO₂ durante el proceso de descomposición de la materia orgánica (Veldkamp 1993), y según la siguiente ecuación:

t MS hojarasca * 0.35 (fracción del CO₂) * 12/44 (conversión CO₂ a equivalentes de C IPCC, 2000) .

Oxido Nitroso (N₂O) del fertilizante

En el caso del óxido nitroso (N₂O) se utilizaron las ecuaciones recomendadas por IPCC (2000) para estimar la emisión de N₂O en suelos de uso agrícola:

$$\text{Emisión de N}_2\text{O-N (toneladas N}_2\text{O-N)} = F \times 0.01 \times 44/28,$$

donde:

F= consumo total de N (ton N ha⁻¹ año⁻¹).

44/28 = factor de conversión de N₂O - N a N₂O

El dato del 1% año⁻¹ está entre en el rango reportado por la literatura para el flujo de campo del N₂O, con un coeficiente de multiplicación que va desde mayores a 0.001 hasta inferiores a 0.1 (C.A.S.T., 1992).

Los animales.

Emisión de Metano (CH₄) por fermentación ruminal.

Para determinar la emisión de CH₄ por los animales, se estimó el consumo de MS por parte de los mismos. Se estableció el consumo de MS (% peso vivo del animal) a partir de la relación con % de Fibra Detergente Neutro (FDN) según las tablas del NRC (1989). Para ello se hizo un muestreo de pastos bajo la técnica de pastoreo simulado, tomando muestras para el análisis de FDN, Digestibilidad *in vitro* de la Materia Seca (DIVMS), Fibra Acido Detergente (FAD), Proteína Cruda (PC), PC ligada al FDN, EE (Extracto Etéreo) y Energía, según la metodología de Van Soest (1994) y la A.O.A.C. (1970).

La estimación de la emisión del CH₄ por los animales se hizo tomando en cuenta las diferentes cantidades de alimento que consumen los bovinos: pasto y concentrados. Se utilizaron tres métodos para comparar la emisión del CH₄ por las vacas.

1. El método de Shibata (1993), estima la producción de CH₄ con base en el consumo de la materia seca:

$$Y = -17.766X + 42.793X - 0.849X^2$$

donde:

Y = L CH₄ animal⁻¹ día⁻¹ (para convertir a Kg multiplicar por 0.7168 g/L).

X = consumo de materia seca (kg animal⁻¹ día⁻¹).

2. El método de Moe y Tyrrel (1979) se basa en consumo de materia seca y calidad del pasto:

$$\text{CH}_4 \text{ (Mcal/día)} = 0.439 + 0.273 \pm 0.015 \text{ residuo soluble digestible} + 0.512 \pm 0.078 \text{ hemicelulosa digestible} + 1.393 \pm 0.097 \text{ kg celulosa digestible.}$$

Para este caso las muestras de pasto se analizaron en el Laboratorio de Nutrición Animal del CATIE y se determinó DIVMS, hemicelulosa, celulosa, PC, P.C. ligada al FDN, FDN, cenizas, E.E., energía metabolizable.

El residuo soluble se calculó con las siguientes ecuaciones:

$$100 - (\% \text{FDN} - \% \text{PC} \Leftrightarrow \text{FDN}) = Z$$

$$Z - (\% \text{PC} - \% \text{PC} \Leftrightarrow \text{FDN}) = M$$

$$(M - E.e) * 0.98 = \% \text{ residuo soluble digestible (RSD)}$$

RSD X Consumo de materia seca (kg/día) = kg residuo soluble digestible (kg RSD)

Kg RSD X fracción hemicelulosa X 0.55 = kg hemicelulosa digestible

Kg RSD X fracción celulosa X 0.77 = kg celulosa digestible

0.98 = digestibilidad de solubles detergentes neutros en pasturas de clima templado, y 0.83 para pasturas tropicales. En este caso se usó 0.98 para Rye grass y Kikuyo, y 0.83 para Estrella africana (Van Soest 1967).

0.55 = digestibilidad hemicelulosa (Wilkins 1969)

0.77 = digestibilidad de la celulosa para Rye Grass (Wilkins 1969).

3. El método del IPCC (2000) se basa en la estimación de las demandas de energía bruta del animal según su condición reproductiva, de producción láctea, horas de trabajo y la digestibilidad del alimento que consume.

$$EB = \frac{(ENm + ENpp + ENa + ENlact + ENpr) \times (100 / \% ED)}{(ENmd / ED) + [ENc / (ENcd / ED)]}$$

donde:

EB= Energía bruta consumida (MJ/animal/día)

ENm= Energía neta de mantenimiento (MJ/día)

ENpp= Energía neta debida a la pérdida de peso (MJ/día)

ENlact= Energía neta de lactación (MJ/día)

ENpr= Energía neta para de preñez (MJ/día)

ENmd/ED= Relación entre energía neta disponible en la dieta para mantenimiento y la energía neta consumida.

EN= Energía neta para crecimiento (MJ/día)

ENc/ED= Relación entre energía neta disponible para crecimiento y la energía digestible consumida.

ED= Energía digestible expresada como un porcentaje.

Emisión CH₄ (kg vaca⁻¹ año⁻¹) = [EB X Conversión de CH₄ X 365 días/año] / (55.65 MJ/kg de CH₄).

Emisión de CH₄ en las excretas de los animales.

Con el método del IPCC (2000) se estimó la emisión de CH₄ para vacas en producción y vacas secas por separado. Para las primeras se tomó el dato de las pesas de leche de 10 vacas al azar y su respectivo contenido de grasa en las fincas.

El CH₄ difundido por los animales a través del estiércol se determinó mediante la ecuación:

$$CH_4 = SV * Bo * FCM * 0.662 \text{ (IPCC 2000)}$$

donde:

SV= total de sólidos volátiles producidos⁻¹ animal⁻¹ año⁻¹

Bo= producción máxima de CH₄ por kg de sólidos volátiles (m³ CH₄ kg⁻¹ SV)

FCM= factor de conversión de CH₄

0.662= factor de conversión de m³ CH₄ a kg de CH₄.

El método para calcular la producción de Sólidos Volátiles en vacas lecheras, relaciona la producción de leche con la producción de SV (EPA 2001):

$$Y = -7^{-8} * x^2 + 2.9^{-3} * x - 16.765$$

donde:

Y = sólidos volátiles (Lb animal⁻¹año⁻¹)

X = producción de leche (Lb animal⁻¹año⁻¹).

Dióxido de Carbono (CO₂) por las excretas.

Se estimó la producción fecal de los animales, según la fórmula:

$$\text{Consumo} = \text{Producción fecal} (1 - \text{D.I.V.M.S.})^{-1}$$

Este valor se multiplicó por la fracción de carbono de los pastos y los alimentos concentrados consumidos (capítulo 3). Se estima que el 35% del carbono de las excretas es emitido como CO₂ durante la descomposición de la materia orgánica (Veldkamp 1993).

Oxido nitroso (N₂O) por las excretas.

Para el caso de la emisión de N₂O a través de las excretas de los rumiantes, se estima que los animales de carne retienen sólo el 10% del N ingerido, el resto es excretado vía heces y orina (Thomas, et al 1992). Sin embargo y, por tratarse de ganado de leche se trabajó con una retención del 20% del N (Minson 1990).

El N consumido se determinó a partir del contenido de P.C. de los pastos y alimentos concentrados ingeridos por los animales y, según la fórmula:

$$\%N = P.C. / 6.25$$

Una vez determinada la cantidad de N excretado por los rumiantes, se aplicó la misma ecuación utilizada para el fertilizante químico (IPCC 2000):

$$\text{Emisión de N}_2\text{O-N (toneladas N}_2\text{O-N)} = F \times 0.01 \times 44/28,$$

donde:

F= consumo total de N (ton N ha⁻¹ año⁻¹).

44/28 = factor de conversión de N₂O - N a N₂O

2.6. Balance de gases de efecto invernadero.

Para elaborar el balance se agruparon y sumaron las variables que emitían CO₂, CH₄ y N₂O. Estas fuentes provenían de la materia orgánica (CO₂), del fertilizante nitrogenado (N₂O), de las excretas de los animales (CO₂, N₂O y CH₄) y del proceso de fermentación entérica (rumia) de los animales (CH₄).

Los sumideros o contenedores de carbono también fueron agrupados según el componente del sistema. Entonces, el elemento suelo estuvo conformado por el carbono orgánico, el factor pasto consistió de biomasa aérea, biomasa de las raíces y hojarasca y, el componente leñoso por biomasa aérea, raíces y hojarasca. Todos ellos se sumaron y constituyeron un gran total de contenedores de carbono a los que se les restó el total de las fuentes. Los valores de cada componente en términos de MS, se presentan en el cuadro 6 del artículo 1.

Para poder realizar las comparaciones, todos los gases fueron convertidos a sus equivalentes de carbono. Las conversiones son las que se detallan:

- Equivalentes tC para el CH₄= toneladas CH₄ X 21 (convertir a CO₂) X 12/44 (convertir CO₂ a C).
- Equivalentes tC para el N₂O= toneladas N₂O X 250 (convertir a CO₂) X 12/44 (convertir CO₂ a C).
- Equivalentes tC para el CO₂= toneladas CO₂ X 12/44 (convertir CO₂ a C).

2.7. Análisis estadístico

Los datos obtenidos para cada finca fueron sometidos a pruebas de T para determinar si existían diferencias entre los tipos de finca. Para todos los análisis se utilizó el Statistical Analysis Systems (SAS 1988).

Capítulo 3. RESULTADOS

3.1 Calidad de los alimentos.

En el cuadro 3 se presentan los valores de la calidad nutritiva de los alimentos suministrados en las fincas. La DIVMS es similar para los tres niveles de fincas pero en el caso de la PC el mayor valor se encuentra en la finca de altos insumos.

Cuadro 3. Calidad de los alimentos consumidos por las vacas en las fincas de los tres niveles de finca.

Tipo de alimento	Nivel de finca		
	Bajo (%)	Medio (%)	Alto (%)
Pasto:			
• Materia seca	23.4	19.2	22.5
• D.I.V.M.S.	66.5	64.7	66.3
• Proteína cruda	14.0	14.2	22.8
• P.C. ligada al F.D.N.	6.9	4.9	6.2
• F.D.N.	68.3	64.1	64.7
• F.A.D.	31.1	29.5	28.9
• Hemicelulosa	43.3	37.9	35.9
• Cenizas	7.2	10.9	8.7
• E.E.	1.6	1.9	1.5
• Energía	2.3	2.5	2.4
Concentrado:			
• D.I.V.M.S.	75.0	77.1	77.0
• E.M. (Mcal kg ⁻¹ consumido)	2.71	2.79	2.78
Consumo MS:			
• Vacas Lactantes	10.8	11.2	13.8
• Vacas Secas	8.0	8.2	8.5

D.I.V.M.S.= Digestibilidad *in vitro* de la materia seca

P.C. = proteína cruda

F.D.N.= Fibra Detergente Neutra

F.A.D.= Fibra Acido Detergente

E.E. = Extracto etéreo.

E.M. = Energía metabolizable = DIVMS * 4.409*0.82

3.2. Rendimiento MS y Carbono Fijado por el pasto y la hojarasca.

Los tres (3) niveles de fincas cuentan con pastos en monocultivo y con manejo de sistema silvopastoril.

Como lo muestra el cuadro 4, el rendimiento del pasto ($t MS ha^{-1} año^{-1}$) fue similar en las fincas de kikuyo sin y con árboles, pero en los sistemas de pasto estrella africana la producción del pasto sin árboles es 26.2% mayor al compararla con el sistema con árboles.

La producción de hojarasca sigue una tendencia similar a la observada para el rendimiento del pasto, con el mayor valor de hojarasca para el sistema de pasto kikuyo sin árboles ($16.3 t MS ha^{-1} año^{-1}$) y el menor valor para el sistema de estrella africana con árboles ($11.9 t MS ha^{-1} año^{-1}$).

Cuadro 4. Rendimiento y fijación de carbono en el pasto y la hojarasca del pasto.

Sistema	Rendimiento pasto ($t MS ha^{-1} año^{-1}$)	Hojarasca ($t MS ha^{-1} año^{-1}$)	Carbono Fijado ($tC ha^{-1} año^{-1}$)	
			Pasto	Hojarasca
Kikuyo sin árboles	$25.1a \pm 2.96$	$16.31a \pm 0.37$	$9.6 a \pm 0.38$	$6.5 a \pm 0.14$
Kikuyo con árboles	$23.6 a \pm 2.35$	$15.34a \pm 0.58$	$9.2 a \pm 0.13$	$6.14a \pm 0.22$
Estrella sin árboles	$23.1a \pm 1.49$	$15.01a \pm 1.02$	$9.2 a \pm 0.2$	$6.01a \pm 0.15$
Estrella con árboles	$18.3 b \pm 3.14$	$11.89b \pm 0.92$	$6.9b \pm 0.06$	$4.76 b \pm 0.17$

Medias con igual letra no difieren significativamente ($p < 0.05$)

3.3. Emisión de Gases de Efecto Invernadero (G.E.I.).

Emisión de CH₄ por los rumiantes.

En la figura 1 se presentan los datos de la emisión de CH₄, estimada por los métodos de Shibata, Moe y Tyrrel y el grupo de expertos del IPCC. La producción del CH₄ fue similar para los métodos de Shibata y Moe y Tyrrel, pero el método del IPCC estima valores de 70, 73 y 61.5 % superiores que los otros dos métodos para los niveles de finca bajo, medio y alto correspondientemente.

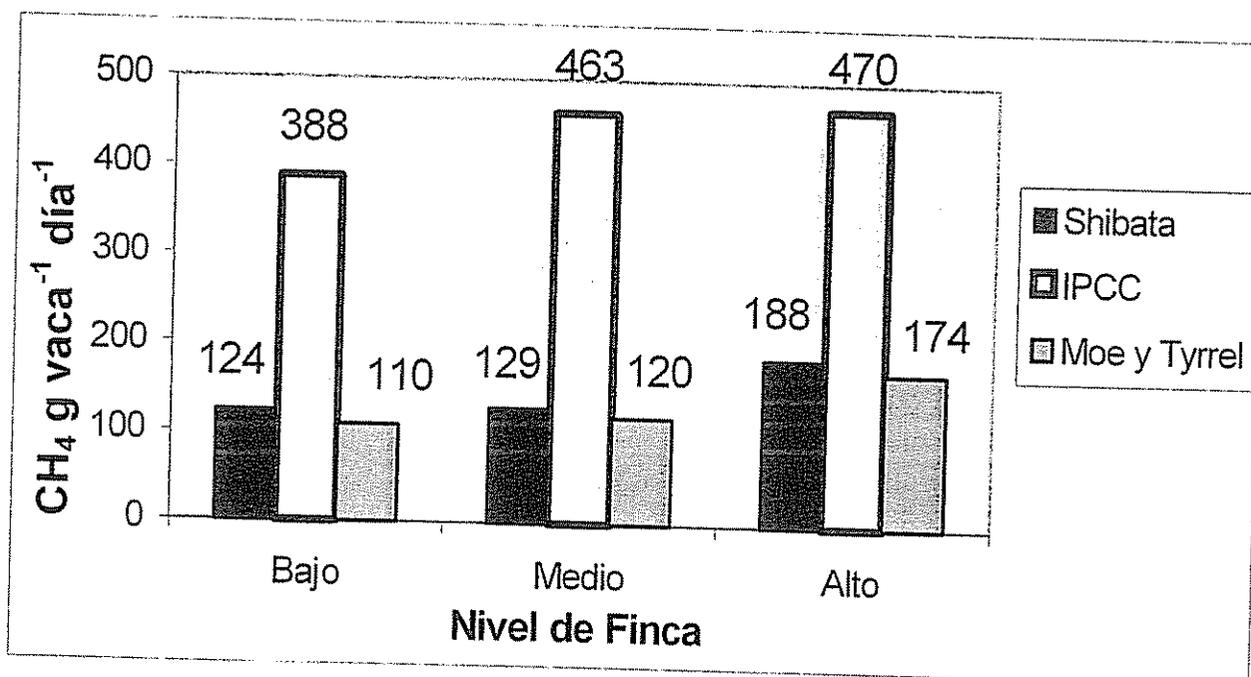


Figura 1. Emisión de CH₄ por vacas lactantes en fincas de diferentes niveles (bajo, medio y alto) de uso de insumos, estimados por los métodos de Shibata, IPCC y Moe y Tyrrel.

Se utilizó el método del IPCC para estimar la emisión de CH₄ por las vacas lactantes y secas en los diferentes tipos de fincas (figura 2). La emisión de CH₄ por las vacas lactantes fue mayor en 69.1, 73.2 y 72.8% que las vacas secas para las fincas del nivel bajo, medio y alto respectivamente.

En el nivel bajo de insumos, las vacas lactantes emiten 16.2 y 17.4% menos CH₄ que en las fincas del nivel medio y alto correspondientemente.

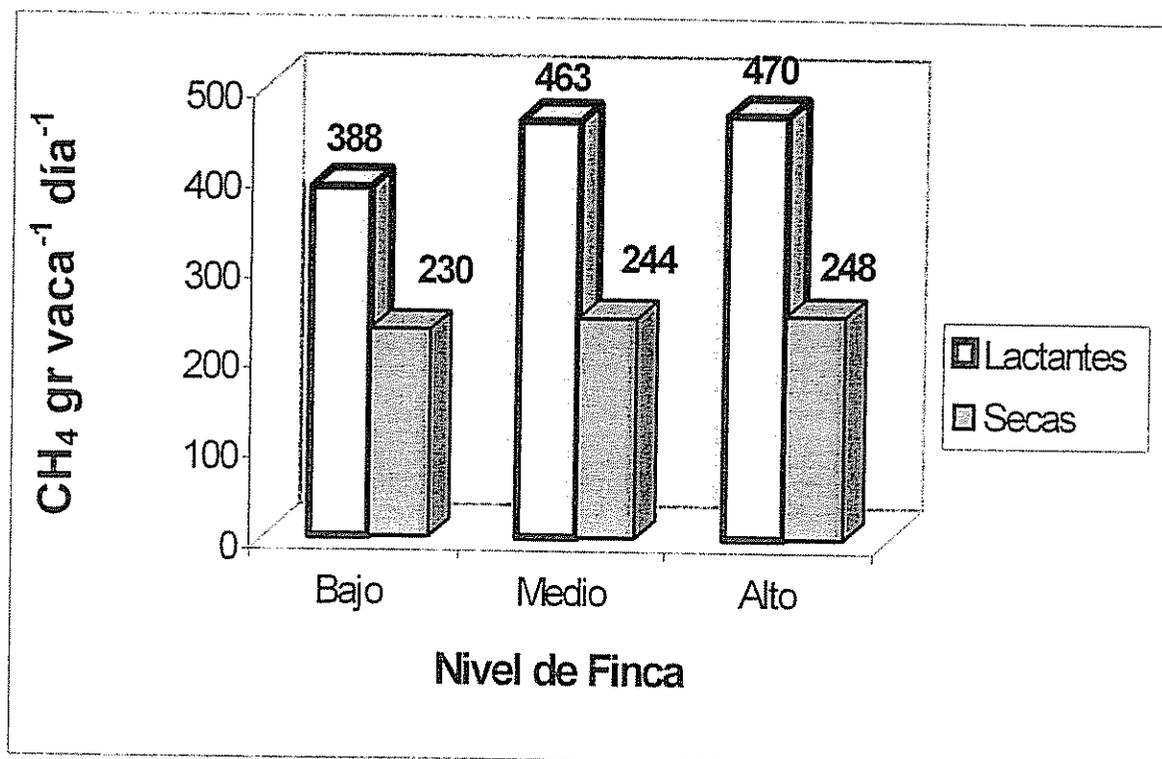


Figura 2. Emisión de CH₄ por vacas lactantes y vacas secas en fincas con diferentes niveles de uso de insumos (bajo, medio y alto).

Metano excretado.

El cuadro 5 muestra los resultados de emisión de CH₄ en las excretas de las vacas en ordeño en las fincas. La producción de 15 kg de leche día⁻¹ y 350 kg peso es para el tipo de vaca manejada en las fincas del nivel bajo; con 17 kg de leche y 400 kg de peso una vaca de la finca del nivel medio y, con 450 kg peso vivo es para vacas de las fincas del nivel alto de insumos.

Cuadro 5. Producción de metano en las excretas.

Producción leche kg ⁻¹ vaca ⁻¹ día ⁻¹	Sólidos volátiles kg vaca ⁻¹ día ⁻¹	Bo m ³ CH ₄ kg ⁻¹ SV	FCM	Emisión de CH ₄ Kg CH ₄ vaca ⁻¹ año ⁻¹
15 (350) ³	2.46	0.125	0.108	6.59
17 (400)	2.81	0.143	0.108	8.62
20 (450)	3.17	0.161	0.108	13.30

Los valores Bo y FCM son tomados de las tablas K-2 y K-5 del EPA (2001) y aplicados para animales promedio de las fincas estudiadas.

FCM = factor de conversión del metano.

Bo = Producción máxima de CH₄ por kg de sólidos volátiles (m³ CH₄ kg⁻¹ SV).

³ Entre paréntesis, Peso vivo (kg) del animal promedio.

Emisiones por nivel de manejo de fincas.

Metano.

La calidad y cantidad del alimento que reciben los animales, está directamente relacionada con la emisión del CH₄. De esta manera, en el cuadro 6 se aprecia como al separar las fincas por el nivel de manejo de insumos (alimento concentrado y fertilizante), los niveles de emisión del gas varían entre las fincas, mostrándose significativamente diferentes entre sí.

Cuadro 6. Emisión de CH₄, según el nivel de finca.

Nivel de Finca	Area # has	# animales	Emisión CH ₄ Toneladas año ⁻¹		
			Vaca ⁻¹	ha ⁻¹	Finca
Fermentación ruminal:					
Bajo	27	58	0.13 ± 0.001	0.28 ± 0.01	7.6
Medio	16	48	0.16 ± 0.01	0.48 ± 0.005	7.7
Alto	33	90	0.24 ± 0.03	0.67 ± 0.10	22.1
Excretas:					
Bajo	27	58	0.007 ± 0.001	0.01 ± 0.003	0.27
Medio	16	48	0.009 ± 0.001	0.03 ± 0.001	0.48
Alto	33	90	0.013 ± 0.003	0.04 ± 0.005	1.32
TOTAL:					
Bajo	27	58	0.14 ± 0.01	0.30 ± 0.01	8.1
Medio	16	48	0.16 ± 0.01	0.51 ± 0.04	8.2
Alto	33	90	0.26 ± 0.03	0.72 ± 0.09	23.8

± = desviación estándar

En el caso de la finca de bajos insumos (260 kgN ha⁻¹ año⁻¹ y 5 kg concentrado vaca⁻¹ día⁻¹) las emisiones del CH₄ son inferiores tanto por vaca como por unidad de área, mientras que la finca del nivel alto (350 kg N ha⁻¹ año⁻¹ y 8 kg concentrado vaca⁻¹ día⁻¹) siempre se mostró superior a las otras fincas.

En cuanto a la emisión de CH₄ por vaca ésta se ve afectada ($p < 0.001$) principalmente por la carga animal de cada finca, que es de 2.1, 3.0 y 2.8 vacas ha⁻¹ para las fincas del nivel de finca bajo, medio y alto respectivamente.

Para determinar la eficiencia de emisión de los animales, se dividió la producción de CH₄ entre la producción de leche por vaca y también entre el peso corporal promedio de las mismas. Las vacas de la finca del nivel bajo producen 15 kg leche vaca⁻¹ día⁻¹ y un peso vivo (PV) de 350 kg, en la finca del nivel medio las vacas producen 17 kg leche diarios y con 450 kg PV, mientras que las vacas de la finca del nivel alto producen 20 kg leche día⁻¹ y pesan 450 kg PV, en esta última predominan vacas de la razas Holstein y Simmenthal. Al comparar la eficiencia de emisión de CH₄ (cuadro 7) en la finca del nivel medio las vacas presentan las mayores emisiones, sobrepasando la emisión de las vacas de la finca de nivel bajo, e incluso las del nivel alto.

Cuadro 7. Eficiencia de emisión, por kg leche producida y por kg de peso vivo

Nivel de Manejo	CH ₄ g kg leche producido ⁻¹	CH ₄ G kg P.V. ⁻¹
Bajo	25.9 ^a	1.1 ^a
Medio	27.2 ^a	1.0 ^a
Alto	23.5 ^a	1.0 ^a

Medias con igual letra no difieren significativamente ($\alpha = 0.05$).

Sin embargo, las diferencias entre las fincas no resulta significativo en ninguna de las comparaciones, aunque resulta interesante notar como las vacas de mayor peso corporal y producción láctea, también de mayor consumo de alimento, son las más eficientes en emisión.

Oxido nitroso.

En el cuadro 8 se presentan los datos sobre la emisión del N₂O por la aplicación de fertilizante, por las excretas de los animales y, el total. Al tener diferentes áreas (has) no se realizó una comparación entre fincas.

La emisión de N₂O ha⁻¹ por la aplicación de fertilizantes fue significativa ($p < 0.05$) entre las fincas, excepto para la comparación entre la finca del nivel medio con el nivel alto. La finca del nivel de altos insumos (350 kg N ha⁻¹ año⁻¹, 8 kg concentrado vaca⁻¹ día⁻¹) emite

37.7 y 6.4% más N₂O que la finca del nivel bajo (260 kg N ha⁻¹ año⁻¹, 5 kg concentrado vaca⁻¹ día⁻¹) y medio (328 kg N ha⁻¹ año⁻¹, 5 kg concentrado vaca⁻¹ día⁻¹) correspondientemente.

Cuadro 8. Emisión de N₂O por fertilizante, excretas y total

Sistema de Manejo de Finca	Area (# has)	# animales	Emisión N ₂ O Kg año ⁻¹	
			vaca ⁻¹	ha ⁻¹
Fertilizante(F):				
• Bajo	27	58	1.91 ± 0.01	3.98 ± 0.15
• Medio	16	48	1.66 ± 0.03	5.15 ± 0.30
• Alto	33	92	1.96 ± 0.01	5.48 ± 0.21
Excretas (E):				
• Bajo	27	58	1.33 ± 0.17	2.78 ± 0.15
• Medio	16	48	1.2 ± 0.13	3.72 ± 0.38
• Alto	33	92	1.94 ± 0.45	5.43 ± 0.59
TOTAL (F+E):				
• Bajo	27	58	3.23 ± 0.15	6.76 ± 0.10
• Medio	16	48	2.20 ± 0.06	8.87 ± 0.12
• Alto	33	92	3.81 ± 0.07	10.91 ± 0.5

± = Desviación estándar

Así mismo, la cantidad de N₂O ha⁻¹ emitido por las excretas de los animales fue mayor para el nivel de finca alto cuando se compara con las fincas del nivel medio y bajo, con diferencias de 31.5 y 48.8% comparativamente. La emisión total (fertilizante + excretas) presenta a la finca del nivel alto como la de mayor liberación de N₂O, superando en 61.4 y 23.0% a las fincas del nivel bajo y medio correspondientemente.

Dióxido de Carbono (CO₂).

La emisión del CO₂ es resultado de la descomposición de la materia orgánica de la hojarasca y raíces muertas del pasto y los árboles, además de las excreciones de los animales en los apartos.

Para estimar las difusiones del CO₂ se determinó en primera instancia el rendimiento en términos de toneladas de materia seca de los pastos y la hojarasca del pasto, como lo muestra el cuadro 4.

Con base en estos datos se estimó la emisión del CO₂ y cuyos valores no presentan desigualdades estadísticamente destacables entre los niveles de finca, tal como se aprecia en el cuadro 9. En el caso de las emisiones provenientes del pasto, éstas no difieren de manera importante ($p > 0.05$) entre los niveles de finca, aunque se evidencia como las pasturas de la finca del nivel bajo tienen una mayor producción de CO₂, a pesar de recibir menos ($90 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) fertilizante que los pastos de las otras fincas.

Las emisiones provenientes del árbol y de las excretas de los animales no son diferentes ($p > 0.05$) entre las fincas, a pesar de ello en la finca del nivel alto las vacas emiten un 20% más CO₂ que las vacas de las otras fincas. La emisión total es de 2.97, 2.75 y 2.93 toneladas de CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ para las fincas del nivel bajo, medio y alto respectivamente.

Cuadro 9. Emisión CO₂ según fuente de la materia orgánica.

Sistema de Manejo	Area (# has)	# animales	Emisión CO ₂ Toneladas ha ⁻¹ año ⁻¹		
			Hojarasca + Raíces del Pasto	Hojarasca + Raíces del Arbol	Excretas
Bajo	27	58	2.38 ± 0.26	0.18 ± 0.004	0.41 ± 0.03
Medio	16	48	2.22 ± 0.04	0.15 ± 0.004	0.40 ± 0.14
Alto	33	92	2.27 ± 0.18	0.15 ± 0.01	0.51 ± 0.11

3.3. Balance de gases invernadero.

El balance se realizó una vez determinadas las emisiones y fijación de los gases en los diferentes componentes del sistema (cuadro 10). Para ello se sumaron los aportes de los sumideros de carbono, tales como suelo (carbono fijado) – pasto (hojarasca, biomasa aérea y radicular) – animal (excretas)- árbol (hojarasca, biomasa aérea y de raíces), y a estos se les restó las fuentes de emisión de los diferentes gases, a saber metano (rumia y excretas) y óxido nitroso (fertilizantes y excretas) y, dióxido de carbono (descomposición de las excretas de los animales).

Al igual que en el análisis para la emisión de gases, las fincas fueron separadas con base en el uso de los insumos (cuadro 2, sección 2.8) y, todos los valores son presentados en términos de equivalentes de carbono.

Cuadro 10. Balance total por hectárea para fincas de los tres niveles evaluados.

Sistema de Manejo de Finca	Balance $tC_E \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$	
	Media	D.E.(±)
Bajo	3.44 ^a	0.57
Medio	1.28 ^a	0.23
Alto	-0.54 ^a	0.54

Medias con igual letra no difieren significativamente ($p > 0.05$).

D.E. = Desviación estándar

Aunque son evidentes las desigualdades entre los valores obtenidos para cada nivel de finca, las diferencias entre ellas no se muestran significativas ($p > 0.05$).

A pesar de ello, el nivel de finca de bajos insumos tiene mayor capacidad de fijación que las de otros sistemas, siendo superior en 2.16 y 3.98 $tC \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a las fincas de los niveles medio y alto respectivamente.

En el cuadro 11 se presentan los valores de los gases emitidos y sus equivalentes en carbono, éstos últimos utilizados para realizar el balance de gases en las mismas unidades, para su respectiva comparación.

Cuadro 11. Emisión de gases de efecto invernadero en el nivel de finca de bajos insumos (260 kg N ha⁻¹ año⁻¹, 5 kg concentrado vaca⁻¹ día y 100 árboles ha⁻¹).

Gas estimado	Toneladas ha ⁻¹ año ⁻¹	Equivalentes carbono tC ha ⁻¹ año ⁻¹
CH ₄	- 0.297	- 1.70
N ₂ O	- 0.0067	- 0.50
CO ₂	- 3.12	- 0.85

En la figura 3 se aprecia los valores de las fuentes de emisión y fijación según los diferentes componentes del sistema y el valor alcanzado para el balance neto para el nivel de finca bajo.

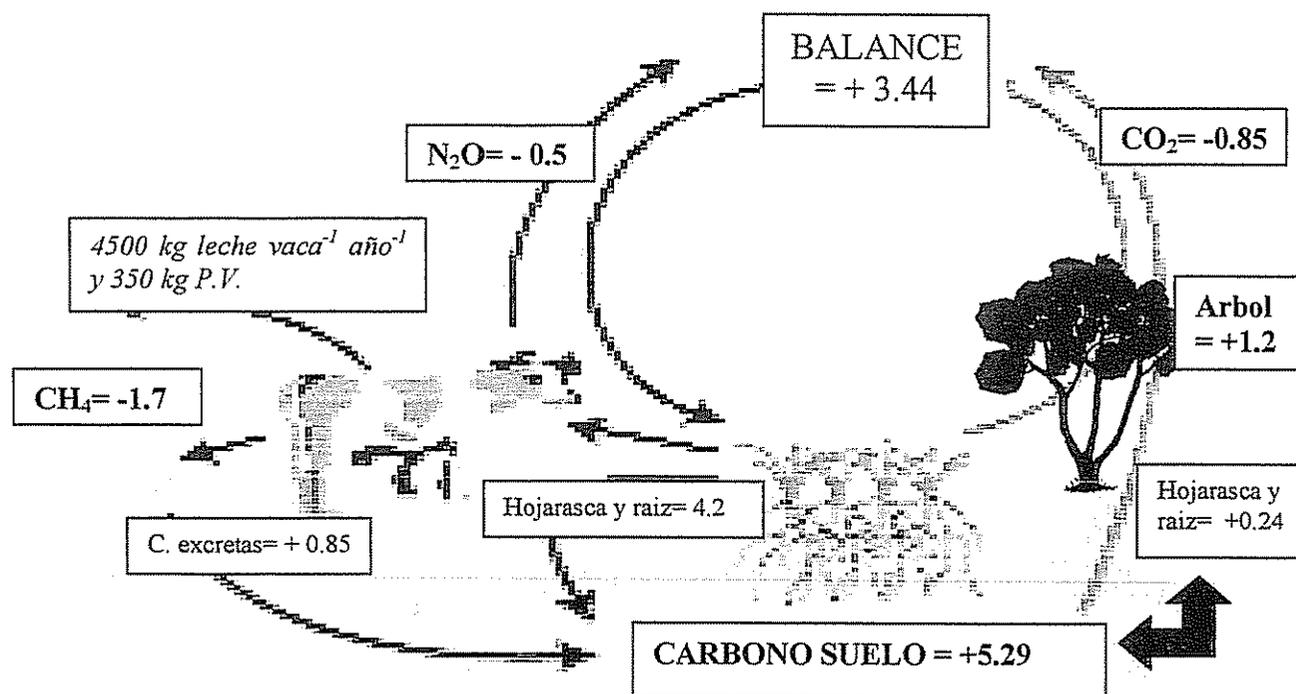


Figura 3. Balance Neto para la finca de nivel de insumos bajo (260 kg N ha⁻¹ año⁻¹, 5 kg concentrado vaca⁻¹ día⁻¹ y 100 árboles ha⁻¹).

Cuadro 12. Emisión de gases de efecto invernadero para la finca del nivel medio de insumos (328 kg N ha⁻¹ año⁻¹, 5 kg concentrado vaca⁻¹ día y 63 árboles ha⁻¹).

Gas estimado	Toneladas ha ⁻¹ año ⁻¹	Equivalentes carbono tC ha ⁻¹ año ⁻¹
CH ₄	- 0.506	- 2.90
N ₂ O	- 0.007	- 0.50
CO ₂	- 2.75	- 0.75

En la figura 4 se presentan los valores del balance neto para la finca del nivel medio. En lo que a fijación del carbono se refiere el componente de mayor aporte es el suelo, que representa el 82% del carbono fijado total. Por otra parte, el CH₄ es la mayor fuente de emisión y constituye el 70.6% de la emisión de los gases totales, mientras que la emanación del CO₂ es el 18.2%.

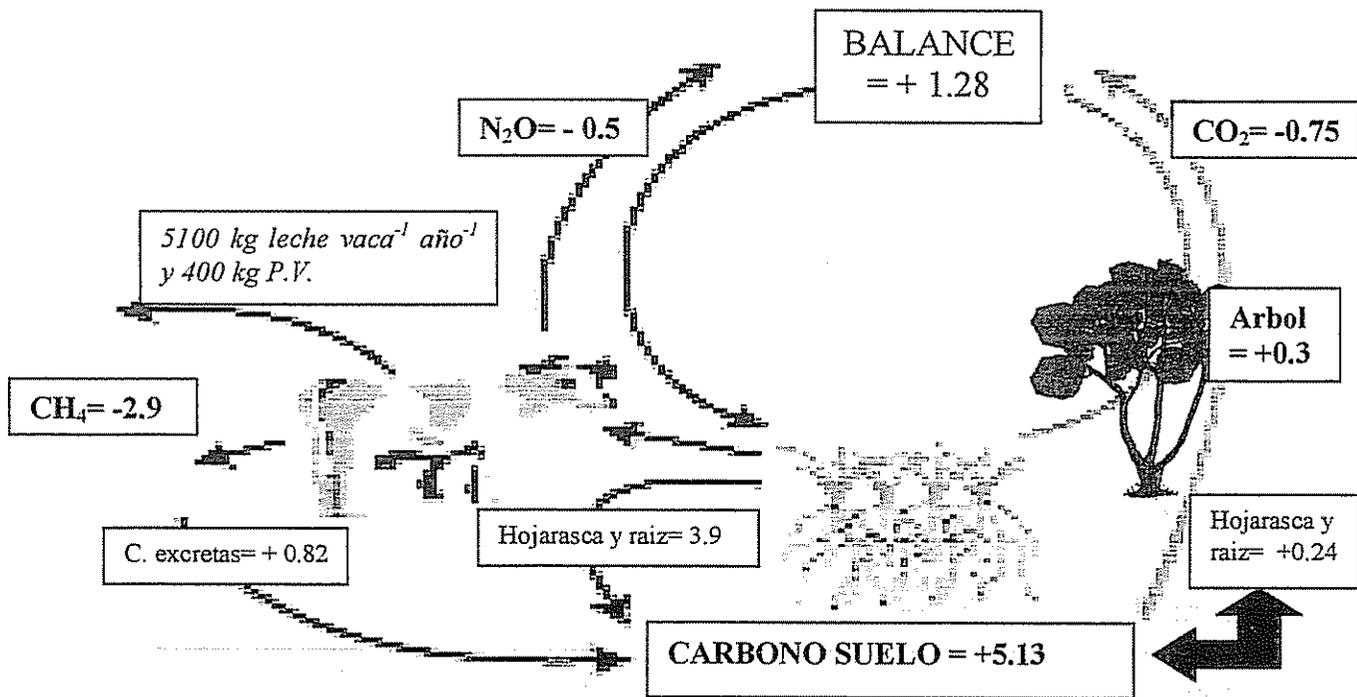


Figura 4. Balance Neto para finca del nivel medio (328 kg N ha⁻¹ año⁻¹, 5 kg concentrado vaca⁻¹ día y 63 árboles ha⁻¹).

Cuadro 13. Emisión de gases de efecto invernadero en la finca de nivel alto de insumos
(350 kg N ha año, 8 kg concentrado vaca⁻¹ día⁻¹ y sin árboles dispersos)

Gas estimado	Toneladas ha ⁻¹ año ⁻¹	Equivalentes carbono tC ha ⁻¹ año ⁻¹
CH ₄	- 0.716	- 4.10
N ₂ O	- 0.011	- 0.74
CO ₂	- 2.75	- 0.80

Comparativamente, la finca del nivel alto es la menos eficiente de los tres modelos evaluados, tal como lo muestra la figura 5. En este tipo de explotación pecuaria el balance neto es de -0.54 tC ha⁻¹ año⁻¹ en promedio.

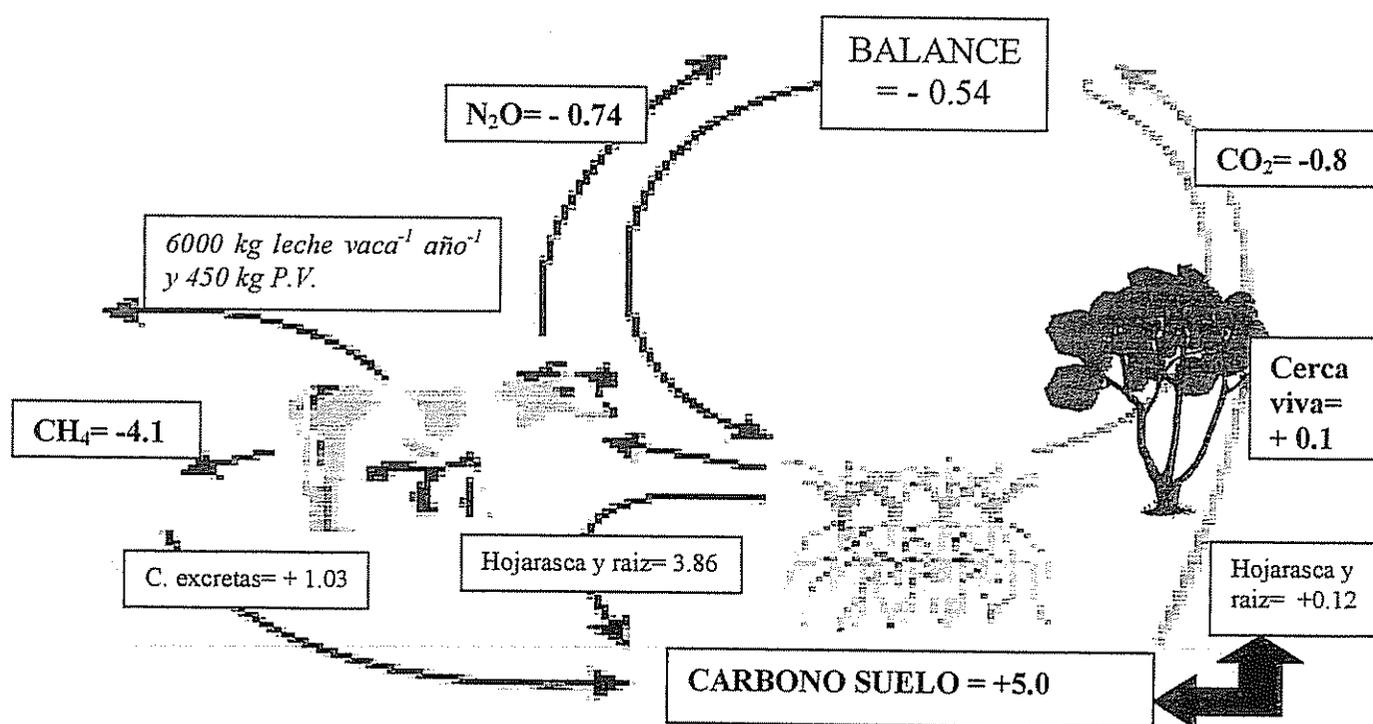


Figura 5. Balance Neto para finca de nivel alto (350 kg N ha año, 8 kg concentrado vaca⁻¹ día⁻¹ y sin árboles dispersos).

Capítulo 4. DISCUSIÓN

Para comparar los resultados de las ecuaciones de Moe y Tyrrel, Shibata y la del IPCC, se analizó la emisión basado en el consumo de pasto y alimento concentrado. De manera tal que las emanaciones de las vacas lactantes siempre fueron superiores en la finca del nivel alto de uso de insumos, y la presencia de los árboles (nivel de finca bajo y medio) permite una menor emisión de CH₄; siguiendo el mismo comportamiento en las tres ecuaciones.

Aunque el comportamiento en términos de eficiencia es totalmente contrario, ya que en la finca del nivel alto las vacas muestran las menores emisiones por kilo de leche producido, con emisiones 9.3 y 13.6% menores que las obtenidas para las vacas de las fincas del nivel bajo y medio respectivamente.

La ecuación de Moe y Tyrrel es muy adecuada para predecir la producción de CH₄ en vacas secas, donde los errores de predicción asociados con los datos son menores que los errores de predicción para vacas lactantes, donde la variabilidad es mayor. La ventaja de esta predicción es que los análisis de laboratorio requeridos para su cálculo son relativamente fáciles de obtener (Wilkerson et al 1995).

La ecuación de Moe y Tyrrel (1979) sobreestima la producción promedio de metano en 0.69 Mcal animal⁻¹ día⁻¹ y el R² = 0.42 se considera muy bajo (Benchaar et al 1998).

La ecuación de Shibata considera el consumo de materia seca del animal, pero no el estado fisiológico del mismo, entonces deja por fuera un importante aspecto como son las demandas de energía del animal según producción, reproducción y trabajo del mismo.

Por lo expuesto, en adelante se hará mención sólo a los resultados obtenidos con las ecuaciones del IPCC (2000) que consideran la calidad de los alimentos consumidos, la condición productiva y reproductiva, además del consumo de materia seca por parte de los animales.

Utilizando la técnica del hexafluoruro de azufre (SF₆), Westberg *et al* (1994) para pasto kikuyo reportan valores similares de metano (422 g) para vacas lactantes a los obtenidos en este estudio. Aunque inferiores a los 549.1 g CH₄ vaca⁻¹ día⁻¹ estimados mediante ecuaciones de predicción por Leng (1993) y respaldados por Arias *et al* (2001) para una pastura asociada de estrella africana y madero negro. También los resultados alcanzados en esta investigación superan los valores predichos por Johnson *et al* (1991) de 380 g CH₄ vaca⁻¹ día⁻¹ y los 343 g CH₄ vaca⁻¹ día⁻¹ del EPA (1993).

Debido al mayor consumo de materia seca, las vacas lactantes irradian más metano que las vacas secas. Westberg *et al* (1994) con la técnica del SF₆ en vacas secas alimentadas con heno de alfalfa, ensilaje de maíz y torta de soya, obtuvo niveles de emanación de 230.9 g CH₄ vaca⁻¹ día⁻¹. Estos valores son iguales a los alcanzados en la finca con el sistema de manejo de bajos insumos, pero inferiores en 13 y 17 g CH₄ vaca⁻¹ día⁻¹ a los alcanzados en las fincas con el sistema de manejo medio y alto de insumos respectivamente.

A pesar de lo considerado por los expertos del IPCC, las emisiones de CH₄ provenientes de las excretas representan entre 38, 49 y 76 kgC vaca⁻¹ año⁻¹ para los tres niveles de fincas estudiadas, y que representan 2.16, 3.2 y 8.6 tC finca⁻¹ año⁻¹ para el nivel de finca bajo, medio y alto respectivamente.

Con la clasificación de fincas por nivel de consumo de concentrados, dosis de fertilizantes y presencia de árboles dispersos en los apartos, se evidencia el efecto de estas variables en la emisión de los gases invernadero.

Es así como los animales del nivel de finca alto (350 kg N ha⁻¹ año⁻¹ y 8 kg alimento concentrado vaca⁻¹ día⁻¹) emiten 2.2 y 25.1 kg CH₄ vaca⁻¹ año⁻¹ más que los animales de las fincas del nivel medio y bajo respectivamente, mostrándose estadísticamente diferente ($p < 0.05$) las emisiones de los niveles de finca alto y medio con respecto a la finca del nivel bajo. En el caso de la última, las emisiones superan en 8 gr CH₄ vaca⁻¹ día⁻¹ a los valores obtenidos por Johnson *et al* (1991)

También la aplicación de fertilizante afecta la emisión del CH₄, porque promueve la producción de biomasa en los pastos, lo que a su vez permite una mayor carga animal en los mismos. Debido a esto, las fincas con mayor suministro de fuentes nitrogenadas tienen niveles mayores de emisión por unidad de área.

Las emisiones son afectadas por el tipo de animales presentes en cada explotación lechera. En la finca del nivel alto las razas predominantes son Holstein y Simmenthal (animales de mayor peso corporal y producción láctea), cuyas mayores demandas de materia seca y energía influyen en la emisión del CH₄. A pesar de ello, el porcentaje de consumo de pasto (53%) y alimento concentrado (47%) es muy similar entre los niveles de fincas estudiadas.

En cuanto a la emisión por unidad de área, las desigualdades obedecen a las diferencias en la carga animal entre las fincas que involucra el pasto, la fertilización, el suelo, los animales y el manejo de la finca.

Los valores en términos de eficiencia de emisión de CH₄ permiten comparar animales de diferente condición corporal y raza. Bajo esta comparación las diferencias se vuelven mínimas y no significativas, porque incluso las vacas (450 kg de peso vivo y 20 kg leche día⁻¹) del nivel de finca alto presentan una emisión de 2.4 y 3.7g kg de leche producido⁻¹ menor que las vacas de las fincas del nivel bajo y medio respectivamente, y con menor consumo de concentrado. En lo que a eficiencia por peso corporal se refiere, las diferencias no existen.

El promedio de los valores obtenidos para la eficiencia de emisión en los tres niveles de finca (25.5 ±1.7 gramos CH₄ kg leche⁻¹) es superior a los 19 y 22 gramos para kikuyo y estrella africana con ciclos de 28 y 21 días respectivamente, reportados por Montenegro y Abarca (2001) quienes emplearon las ecuaciones de Moe y Tyrrel.

La producción de metano varía desde 3.4 a 8.6 % de la energía bruta consumida, con un promedio de 5.7 % que responde al valor promedio de 6 ± 0.5 % reportado por Johnson et

al (1996). Las ecuaciones del IPCC utilizan esta conversión de CH_4 expresada en forma decimal 0.057.

Para este estudio, la producción de CH_4 con relación a la energía bruta consumida fue ligeramente superior al 10 % para IPCC y 8.4 % con Moe y Tyrrel; aunque inferior al 6.63 % (± 0.76) alcanzados por Westberg et al (1994) con la técnica del SF_6 .

Otro aspecto que incide en la emisión del CH_4 por los animales es la digestibilidad de los pastos, que en el nivel de finca de altos insumos es 64.7%, inferior en 1.7% y 1.5% a los valores obtenidos para los pastos en las fincas del nivel medio y bajo. Los animales al consumir pastos más fibrosos requieren de un mayor gasto energético para el proceso de rumia, por lo que aumenta la emisión de CH_4 por vaca.

Las fincas del nivel medio y bajo cuentan con 63 y 100 de árboles dispersos en los apartos respectivamente, los cuales ejercen un efecto importante sobre la calidad de las pasturas presentes. Sanderson et al (1997) comenta que la sombra de los árboles al atenuar la intensidad de la luz y la temperatura foliar de las plantas, modifica apreciablemente la calidad de los forrajes al aumentar la digestibilidad y reducir el contenido de fibra debido al aumento de proteína cruda.

Los niveles de emisión del N_2O varían de acuerdo a las dosis de fertilizante nitrogenado para los pastos. Fincas con aplicaciones de $260 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (nivel de insumos bajo) emiten significativamente ($p < 0.05$) menos $\text{N}_2\text{O ha}^{-1}$ que aquellas que aplican 350 y $328 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (nivel de finca alto y medio). Esto concuerda con lo reportado por Velthof et al (1996), quienes determinaron incrementos en el flujo de N_2O una vez aplicado el fertilizante nitrogenado.

Con emisiones por fertilizante de 3.98, 5.15 y $5.48 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para los niveles de finca bajo, medio y alto distributivamente, se evidencia como el nivel de finca alto (más insumos) son las mayores liberadoras de N_2O . Los tres niveles de finca cuentan con pastos kikuyo y estrella africana, y los valores encontrados son similares a los reportados por

Montenegro y Abarca (2000) con 7.74 y 4.37 kg N₂O ha⁻¹ año⁻¹ para Kikuyo y Estrella africana.

En cuanto al N₂O excretado, la significancia de las diferencias ($p < 0.01$) en gran medida responde a los niveles de consumo de nitrógeno en forma de proteína cruda por parte de los animales. Del N total consumido sólo el 20% es retenido por el ganado lechero (Minson 1990), de modo que las vacas de las fincas con mayor consumo de concentrados ingieren 395 gr N día⁻¹, mientras que las vacas del nivel de finca medio y bajo consumen 260 y 290 gr N día⁻¹ correspondientemente. Estos niveles de consumo de nitrógeno (en forma de proteína cruda) concuerdan con los obtenidos por Van der Grinten et al (1992); y en los que se presenta la tendencia a suministrar más proteína cruda de la requerida por los animales, sobretodo a las vacas lactantes que con el 50 – 60% de la proteína suministrada suplen sus necesidades diarias. Esta acción de los finqueros redunda en una mayor emisión del N₂O por parte de las vacas.

Paul (1999), sugiere que la emisión indirecta resultante de las excretas es mayor que la proveniente del fertilizante por dos razones básicas. La primera es que las excretas son frecuentemente aplicadas en niveles muy superiores a los requeridos por las plantas y esto aumenta las tasas de desnitrificación de las bacterias, y la segunda es que durante la época lluviosa se presentan pérdidas significativas de nitrógeno a través del suelo y por el agua de escorrentía.

La emisión total de N₂O en la finca del nivel de insumos alto expone como la mezcla de alta fertilización (350 kg N ha⁻¹ año⁻¹) y alto consumo de concentrados (8 kg vaca⁻¹ día⁻¹), representan los principales promotores de emanación del N₂O en las fincas lecheras. La ausencia de diferencias entre el nivel medio y bajo, se debe a que en la finca del nivel medio las vacas ingieren 27.5 kg N vaca⁻¹ año⁻¹ menos que en el la finca del nivel bajo, pero los pastos reciben 68 kg N ha⁻¹ año⁻¹ más de fertilizante; lo que equipara las emisiones de estos dos sistemas de manejo de fincas.

En el caso de la emisión N_2O producto del fertilizante, las fincas (nivel medio y bajo) con presencia de árboles muestran menores niveles de emisión debido a que la sombra del componente leñoso disminuye la temperatura ambiente de los apartos, tal como lo mencionan Marantz et al (1999) al afirmar que la emisión de nitrógeno en forma de N_2O depende del contenido de nitrógeno, la aireación, la temperatura y el origen de la materia orgánica del suelo.

La sombra de los árboles disminuye la producción de biomasa y mejora la calidad del pasto, lo que afecta el consumo por parte de los animales. En este sentido, los pastos sin influencia de la sombra de los árboles siempre fueron mayores emisores de los gases, debido a varios factores. Los pastos son plantas con un metabolismo del tipo C_4 , que alcanzan su máximo potencial productivo con intensidades de luz tan altos como las registradas al mediodía con el cielo despejado. En el caso de las gramíneas tropicales fertilizadas a razón de $360 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, se encontró que la producción máxima se presenta entre 70 – 100% de luz (Gutiérrez 2000).

El N_2O excretado por hectárea, es mayor en apartos sin árboles debido a la mayor carga animal en éstas fincas; sin embargo, la emisión por vaca es menor en apartos arbolados porque la digestibilidad de los pastos es mayor en un 3-5 % (Buxton y Kephart 1993).

La descomposición de la materia orgánica del suelo juega un rol crítico en el suministro de nutrientes inorgánicos para la producción de la planta y puede convertirse en la mayor fuente de emisión de CO_2 atmosférico (Veldkamp 1993).

La emisión del CO_2 del pasto representa más del 80% del total emitido, siendo la finca del nivel bajo donde se hallaron las mayores emisiones como resultado de una mayor producción de biomasa ($24 \text{ ton MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Los valores de emisión para los tres niveles de finca son superiores en $0.19 \text{ tC ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a lo reportado por Veldkamp (1993) de $0.60 \text{ tC ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para una pastura mejorada de *Brachiaria dyctioneura*.

En el balance de los Gases de Efecto Invernadero en fincas con diferentes niveles de uso de insumos, influyen factores como la alimentación (cantidad y calidad) de los animales, el manejo de las excretas de los animales, el tipo de pasturas, el uso de fertilizantes, la presencia de árboles en los apartos; para enumerar sólo algunos de los factores que afectan el balance total.

El Balance neto de gases resulta positivo (fijación de carbono) para los niveles de finca bajo y medio, pero negativo (emisión) en la finca con nivel alto con $-0.54 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En la finca del nivel alto de insumos (350 kg N ha año, 8 kg alimento concentrado vaca día y sin árboles dispersos), la emisión de CH_4 aumenta con el suministro de concentrados, y este gas es el que afecta en mayor proporción y de manera negativa el balance total.

Las explotaciones pecuarias que cuentan con árboles dispersos en los apartos y suministran menos alimento concentrado suministran a sus vacas, presentan una mayor fijación de carbono y favorecen el balance de gases.

Un hecho importante de resaltar es la relación que existe entre varios factores y que afectan el balance neto. Las fincas que más fertilizan mantienen mayor carga animal, esto representa un mayor consumo de pasto, lo que a su vez implica una mayor demanda de nutrientes por parte de la gramínea forrajera. El suelo no es capaz de llenar las necesidades nutricionales del pasto, por lo que el finquero recurre al mayor uso de fertilizantes, con el consiguiente aumento en la emisión de N_2O . Un mayor consumo de MS por parte de las vacas aumenta la emisión de CH_4 y, el balance en estas explotaciones es menor que en aquellas fincas con menor uso de fertilizantes.

Otro aspecto de importancia para la sostenibilidad de los sistemas de pasturas lo representa a fertilización. Considerando que en el área del estudio, la producción de los pastos sin fertilizar es 10 toneladas MS $\text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Molina, 2001). Entonces por cada kg de fertilizante aplicado a las pasturas de la finca del nivel bajo ($260 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), el balance neto (Carbono fijado por el pasto menos N_2O emitido por el fertilizante) es de 28 kg de carbono,

mientras que en la finca del nivel alto ($360 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) el balance es de 19.7 kg C , en ambos casos con valores positivos.

Ahora bien, mucho se comenta sobre el uso de fertilizantes en la ganadería y su impacto en el calentamiento global. Pero sin fertilización las praderas se degradarán prontamente debido a la intensidad de uso del forraje, por lo que el finquero muchas veces utiliza el fuego para quemar el material viejo y preparar el terreno. Esta quema permitirá la emisión del CO_2 producto de la combustión del material orgánico depositado en el pasto y en el suelo. Siendo este tipo de prácticas en las sabanas las que más contribuyen al carbono liberado a la atmósfera, con un 42% del total (NASA, 1999).

El balance neto para los tres niveles de finca evaluados, muestra al carbono del suelo como el principal sumidero seguido por el pasto, y con un importante aporte ($1 \text{ tC ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) del componente leñoso en el caso del nivel de finca de bajos insumos ($100 \text{ árboles dispersos ha}^{-1}$).

Al analizar las fuentes de emisión se nota como el CH_4 es el de mayor proporción entre los gases de efecto invernadero, con valores de 55.7, 69.9 y 72.7% del total emitido para los niveles de finca bajo, medio y alto respectivamente.

Los escasos informes científicos acerca de balance de gases invernadero en sistemas silvopastoriles, varían según los componentes del sistema considerados por los autores. En uno de ellos, Arias et al (2001) reportan un balance positivo (fijación) de $8.2 \text{ tC ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, para un sistema silvopastoril de *Gliricidia sepium* y pasto Estrella africana con animales de doble propósito; mientras que Abarca y Montenegro (2001) hallaron balances negativos (emisión) de $-2.42 \text{ tC ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para una finca lechera ubicada en bosque montano bajo.

Capítulo 5. CONCLUSIONES

Existen varias ecuaciones para estimar la emisión del CH_4 , pero las que brindan información más completa sobre la emisión del CH_4 son aquellas que consideran las necesidades energéticas del animal a partir de su condición fisiológica y productiva, la calidad y cantidad del forraje, además del consumo de materia seca.

Las estimaciones de emisión con valores de 388, 463 y 470 g CH_4 vaca⁻¹ año⁻¹ para los tres niveles de finca evaluados, no difieren de los resultados de otros estudios que reportan datos de medición con otras técnicas; lo que indica que las ecuaciones ajustan de manera satisfactoria.

Las vacas de mayor producción láctea (20 kg leche vaca⁻¹ día⁻¹) son los animales más eficientes en términos de emisión de CH_4 con 23.5 g CH_4 kg leche producido⁻¹.

Los valores de emisión de CH_4 obtenidos con la ecuación del IPCC no necesariamente deben tomarse como los datos a reportar internacionalmente por un país como Costa Rica, dependerá de las condiciones que se establezcan en los mercados del mundo para definir el modelo o la ecuación a utilizar para reportar los valores de emisión de CH_4 , y así poder comparar eficiencia de emisión entre países.

Las mayores emisiones de N_2O se presentan en las fincas con mayor uso de fertilizante nitrogenado para el pasto y consumo de nitrógeno (proteína cruda) por las vacas, tal como sucede con la finca del nivel alto (350 kg N ha⁻¹ año⁻¹ y 8 kg concentrado vaca lactante⁻¹ día⁻¹), con una emisión de 5.48 kg N_2O ha⁻¹ año⁻¹.

Las mayores emisiones de CO_2 (2.97 t CO_2 ha⁻¹ año⁻¹) resultan en la finca con mayor producción de biomasa del pasto (24 t MS ha⁻¹ año⁻¹), como en el caso de la finca bajos insumos.

Las emisiones de GEI son mayores en aquellas fincas que suministran más alimento concentrado a sus vacas y que más fertilizan los pastos, porque existe una relación directa entre el CH₄ y el concentrado y, entre fertilizante y N₂O. Además, las fincas sin árboles dispersos son mayores emisores que aquellas que cuentan con componente leñoso disperso en los potreros. En este caso, la finca del nivel alto (350 kg N ha⁻¹ año⁻¹, 8 kg concentrado vaca lactante⁻¹ día⁻¹ y sin árboles dispersos) emite 5.64 tC_{Equival} ha⁻¹ año⁻¹, mientras que la finca del nivel bajo (260 kg N ha⁻¹ año⁻¹, 5 kg de concentrado vaca lactante⁻¹ día⁻¹, y 100 árboles dispersos ha⁻¹) libera 3.05 tC_{Equival} ha⁻¹ año⁻¹ y, la finca del nivel medio (328 kg N ha⁻¹ año⁻¹, 5 kg concentrado vaca lactante día⁻¹ y 63 árboles dispersos ha⁻¹) emite 4.15 tC_{Equival} ha⁻¹ año⁻¹.

El CH₄ representa entre el 56 y el 73% de las GEI emitidos por las fincas lecheras especializadas en la zona alta de Costa Rica.

La fertilización de los pastos representa una enmienda importante para la sostenibilidad del sistema, porque reduce los problemas de degradación de las gramíneas y prolonga su vida útil. Si la pastura se agota, el agricultor quema el material orgánico en el suelo del potrero para la preparar el terreno, y permite la emisión del CO₂.

El Balance de Gases Invernadero en fincas lecheras con bajo uso de insumos es positivo, con una fijación de 3440 kg de equivalentes de carbono (fijación neta de carbono). En el caso de la finca del nivel alto, el balance se torna negativo con una emisión neta de 540 kg de equivalentes de carbono por hectárea por año.

Capítulo 6. RECOMENDACIONES

Establecer internacionalmente el método o ecuaciones para reportar la emisión de CH₄, permitirá comparar la eficiencia de emisión entre los países, y de esta manera incentivar aquellas prácticas que efectivamente sean más amigables con el medio ambiente. Además de reconocer el esfuerzo que realizan los países tropicales por producir alimento en forma sostenible.

Hay gran discrepancia en la manera de estimar la emisión de los gases, sobretodo por los métodos que se emplean para ello. De ahí la desavenencia con respecto a los resultados de algunas investigaciones.

La producción de leche en tierras de bajura está en expansión, de ahí la importancia de desarrollar un trabajo similar al presente en fincas lecheras de zonas bajas, que permita comparar la eficiencia de emisión de estas explotaciones.

Importante es realizar el estudio de Balance de GEI en fincas, y sustituir parte de los alimentos concentrados por leguminosas forrajeras y otras dietas, para evaluar la eficiencia de emisión de metano y óxido nitroso por parte de los animales.

La capacitación de personal de laboratorio que pueda realizar los análisis de gases es sumamente importante, para poder ejecutar todos los ámbitos de una investigación sobre emisión de gases.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFIA

AOAC (Association of Official Analytical Chemist). 1970. Methods of analysis of the Official Chemist. 2nd ed. Washington, USA. 1015p.

Arias S.K.; Ruiz-Silvera C.; Milla, M.; Messa, H.F.; Escobar, Aquiles. 2001. Almacenamiento de carbono por *Gliricidia sepium* en sistemas agroforestales de Yaracuy, Venezuela. Livestock Research for Rural Development (13)5.2001. [Http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd1.3/5/ruiz135.htm](http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd1.3/5/ruiz135.htm)

Benchaar C., Rivest J., Pomar C., Chiquette J. 1998. Prediction of methene production from dairy cows using existing mechanistic models and regression equations. Journal Animal Science. 76:617-627.

Buxton, D.R; Kephart, K.D. 1993. Forage quality responses of C3 and C4 perennial grasses to shade. Crop science 33 (July-August): 831-837.

C.A.S.T. 1992. Council for Agricultural Science and Technology. Preparing U.S. Agriculture for global climate change. Task Force report. No. 119. Council for Agricultural Science and Technology, Ames. IA., US. www.ciesin.org/docs/004-181/004-181.html

Detwiler, R.P.; Hall, C.A.S. 1988. Tropical Forest and the global carbon cycle. Science. 239:42-47.

Environmental Protection Agency. 1993. Anthropogenic Methane Emissions in the United States: Estimates for 1990. Report to Congress. EPA 430 – R- 93- 003.

Environmental Protection Agency.2001.Methodology for estimating CH₄ emissions from enteric fermentation. www.epa.gov/globalwarming/publications/emissions/us2001/annex-j.pdf.

- Gutiérrez, M.V. 2000. Apuntes Curso Fisiología Vegetal. 3^{er} trimestre Escuela Posgrado. CATIE.
- Holdridge, L.R. 2000. Ecología basada en zonas de vida. Quinta reimpresión. San José, Costa Rica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1996, c1978. 216p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2000. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual. Agriculture. Chapter 4. 114p.
- Johnson, D.E., M. Branine, G.M. Ward, B. Carmean; Lodman, D. 1991. Livestock methane emissions: variaton, comparative warming perspectives and amerioration potential. Proc. Southwst Nutrition and Management Conference. Univer. Arizona Press., Tempe, AZ.
- Johnson, D.E., G. M. Ward, J. J. Ramsey. 1996. Livestock methane: current emissions and mitigation potential. *In* E.T. Enhance and Protect the Environment. P 219. CRC, Lewis Publishers, Boca Ratón, FL.
- Marantz, D.; Kohut, C.; Haderlein, L. 1999. Controlled release fertilizers and nitrous oxide emissions. *In* Desjanrdins, R.; Keng, J.C.; Haugen-Kozyra, K., eds. Reducing nitrous oxide emissions from agroecosystems. International N2O workshop held. Marzo 3-5, 1999. Banff, Alberta, Canada. pp. 226-228.
- Minami, K.; Gourdriaan, J.; Lantinga, E.; Kimura, T.; Baker, M. 1993. Significance of grasslands in emission and absorpction of greenhouse gases. Grasslands for our world. (New Zealand). 444-450, 60 ref.
- MINSON, D.J. 1990. Forage in Ruminant Nutrition. Academic Press. San Diego, California, USA. pp. 483.

- Moe, P.W.; Tyrrell, H.F. 1979. Methane Production in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*. 62 (10): 1583-1586.
- Montenegro, J.; Abarca, S. 2001. Importancia del sector agropecuario costarricense en la mitigación del calentamiento global. Ministerio de Agricultura y Ganadería: Instituto Meteorológico Nacional. 137p.
- Mora, V. 1990. Efecto de la frecuencia de corte sobre el valor nutritivo y rendimiento de tres gramíneas en la zona atlántica de Costa Rica. Tesis Lic.Agronomía. U.C.R. Turrialba. Costa Rica. 67p.
- Mosier, A.; Kroeze, C, 1999. Contribution of Agroecosystems to the Global Atmospheric N₂O Budget. *In* Desjardins, R.; Keng, J.C.; Haugen-Kozyra, K., eds. Reducing nitrous oxide emissions from agroecosystems. International N₂O workshop held. Marzo 3-5, 1999. Banff, Alberta, Canada. pp 3-15.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). 1999. Biomass burning and global change. http://asd-www.larc.nasa.gov/biomass_burn/biomass_burn.html
- Paul, J. 1999. Nitrous oxide emission resulting from animal manure management. *In* Desjardins, R.; Keng, J.C.; Haugen-Kozyra, K., eds. Reducing nitrous oxide emissions from agroecosystems. International N₂O workshop held. Marzo 3-5, 1999. Banff, Alberta, Canada. pp 216-225.
- Preston, T.R.; Leng, R.A. 1989. The green house effect and its implications for world agriculture. The need for environmentally friendly development. *In* *Livestock Research for Rural Development*. 1(1): 23-30.
- Sanderson, M.A.; Stair, D.W.; Hussey, M.A. 1997. Physiological and morphological responses of perennial forages to stress. *Advances in agronomy* 59: 171-224.

- Serrão, E.A.S. and Toledo, J. (1992) Sustaining Pasture-based Production Systems for the Humid Tropics. In: Downing, T.E., Pearson, H.A. and Garcia-Downing, C., (Eds.) Development or Destruction: The Conversion of Tropical Forest to Pasture in Latin America, pp. 257-280. Westview Press, Boulder.
- Shibata M., Terada F.; Iwasaki K.; Kurihara M.; Nishida T. 1993. Estimation of methane production. Abstract Animal Science and Technology. 64(8):790-796.
- Thomas, R. J., Lascano, C.E., Sanz, J.I., Ara, M.A., Spain, J.M.; Vera, R.R., Fisher, M.J. 1992. The Role of Pastures in Production Systems. Chapter 8. *In* Pastures for the Tropical Lowlands. C.I.A.T. Cali, Colombia. 238 p.
- USDA Global Change Fact Sheet. 1998. Soil carbon sequestration: Frequently asked questions. USDA. www.usda.gov/oce/gcpc/sequeste.htm.
- Van der Griten, P.; Baayen, M.T.; Villalobos, L.; Dwinger, R.H.; Mannetje, L.T. 1992. Utilisation of kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*) pastures and dairy production in a high altitude region of Costa Rica. Tropical Grasslands 26:255-262.
- Van Soest, P. 1994. Nutritional ecology of the ruminant. 2nd ed. Comstock Cornell University Press, Ithaca, New York.
- Veldkamp, E.; Davidson, E.; Erickson, H.; Keller, M.; Weitz, A. 1999. Soil nitrogen cycling and nitrogen oxide emissions along pasture chronosequence in the humid tropics of Costa Rica. Soil Biology and Biochemistry. 31:387-394.
- Veldkamp, E. Keller, M., Nuñez, M, 1998. Effects of Management on N₂O Emissions from Pasture Soils in the Humid Tropics of Costa Rica. Global Biogeochemical Cycles 12, 71-79.

- Veldkamp, E. 1994. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. *Soil Science Society American Journal*. 58:175-180
- Veldkamp, E. 1993. Soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropics of Costa Rica. Tesis de Ph. D., Universidad de Wageningen, NL. 117 p.
- Velthof, G.; Jarvis, S.; Stein, A.; Allen, A.; Oenema, O. 1996. Spatial variability of nitrous oxide fluxes in mown and grazed grassland on a poorly drained clay soil. *Soil Biol. Biochem.* 28(9):1215-1225.
- Viquez A.; Portilla L. 1993. Protección de Cuencas Hidrográficas. Diagnóstico cantón de Alvarado. Convenio MIRENEM - IFAM. 82p.
- Westberg, H.; Lamb, B.; Johnson, K. 1994. Methane emissions from Ruminant Livestock. Western Regional Center Director's Report.
<http://nigec.ucdavis.edu/publications/annual94/westgec/project18.html>.
- Wilkerson, V.A.; Casper, D.P. 1995. The prediction of methane production of Holstein cows by several equations. *Journal of Dairy Science*. 78 (11):2402-241

ANEXOS.

Resultados de densidad aparente (D.A), materia orgánica (%MO), carbono del suelo (%CS) y carbono acumulado (C.A.) en el suelo, para los tres niveles de finca estudiados.

Id Muestra	D.A. promedio	V. Gastado	% de M.O.	% C.S.	C.A. T/ Ha
AM1/<15/0-20	0.7	3.00	9.73	5.64	78.96
AM1/<15/20-40	0.56	5.80	5.93	3.44	77.06
AM1/<15/40-60	0.72	7.10	4.17	2.42	104.54
AM1/<15/60-100	0.99	7.40	3.76	2.18	215.82
AM2/<15/0-20	0.81	1.60	11.63	6.75	109.35
AM2/<15/20-40	0.66	4.10	8.24	4.78	126.19
AM2/<15/40-60	0.75	6.40	5.12	2.97	133.65
AM2/<15/60-100	0.67	6.30	5.25	3.05	204.35
AM2/>15/0-20	0.84	2.80	10.00	5.80	97.44
AM2/>15/20-40	0.71	5.25	6.68	3.87	109.91
AM2/>15/40-60	0.67	6.10	5.53	3.20	129.04
AM2/>15/60-120	0.83	6.05	5.59	3.24	268.92
MTM1/<15/0-20	0.73	11.90	11.46	6.65	97.09
MTM1/<15/20-40	0.71	2.00	11.09	6.43	182.61
MTM1/<15/40-60	0.72	12.20	11.05	6.41	276.91
MTM1/<15/60-100	0.77	3.30	9.32	5.41	416.57
MTM1/>15/0-20	0.75	9.20	15.12	8.77	131.55
MTM1/>15/20-40	0.68	2.70	10.14	5.88	159.94
MTM1/>15/40-60	0.56	12.60	10.51	6.09	204.96
MTM1/>15/60-100	0.64	3.40	9.19	5.33	314.12
MTM2/<15/0-20	0.77	2.50	10.41	6.04	93.02
MTM2/<15/20-40	0.68	3.90	8.51	4.94	134.37
MTM2/<15/40-60	0.68	4.35	7.90	4.58	186.86
MTM2/<15/60-100	0.67	4.10	8.24	4.78	320.26
MTM2/>15/0-20	0.77	2.60	10.27	5.96	91.78
MTM2/>15/20-40	0.66	3.60	8.92	5.17	136.49
MTM2/>15/40-60	0.61	3.60	8.92	5.17	189.22
MTM2/>15/60-100	0.73	4.10	8.24	4.78	348.94
NG1/<15/0-20	0.81	1.80	11.36	6.59	106.76
NG1/<15/20-40	0.6	2.20	10.82	6.27	150.72
NG1/<15/40-60	0.56	6.00	5.66	3.28	110.21
NG1/<15/60-100	0.44	4.15	8.17	4.74	208.56
NG1/>15/0-20	0.67	2.40	10.54	6.12	81.87
NG1/>15/20-40	0.56	6.75	4.64	2.69	60.26
NG1/>15/40-60	0.46	3.60	8.92	5.17	142.69
NG1/>15/60-100	0.49	6.40	5.12	2.97	145.53
NG2/<15/0-20	0.64	0.10	13.66	7.93	101.38

Id Muestra	D.A. Prom	V. Gastado	% de Mat.Org.	% C.S.	C.A. T/ Ha
NG2/<15/20-40	0.6	3.10	9.59	5.57	133.44
NG2/<15/40-60	0.54	4.60	7.56	4.39	142.24
NG2/<15/60-100	0.55	5.70	6.07	3.52	193.6
NG3/<15/0-20	0.75	8.25	16.41	9.52	142.8
NG3/<15/20-40	0.55	1.55	11.70	6.79	149.38
NG3/<15/40-60	0.58	3.70	8.78	5.09	177.13
NG3/<15/60-100	0.55	5.55	6.27	3.64	200.2
NG3/>15/0-20	0.68	9.95	14.10	8.18	111.25
NG3/>15/20-40	0.5	9.60	14.58	8.46	169.2
NG3/>15/40-60	0.49	3.70	8.78	5.09	149.65
NG3/>15/60-100	0.48	6.40	5.12	2.97	142.56
NG4/>15/0-20	0.84	3.00	9.73	5.64	94.75
NG4/>15/20-40	0.58	5.75	6.00	3.48	80.74
NG4/>15/40-60	0.49	6.90	4.44	2.58	75.85
NG4/>15/60-100	0.55	7.40	3.76	2.18	119.9

AM= agromontero. Finca de nivel bajo de insumos.

MTM= marcomontero. Finca nivel medio de insumos.

NG= noregomez. Finca nivel alto de insumos.

1= apartos sin árboles dispersos.

2= Apartos con árboles dispersos.

< o >15= pendiente menor o mayor al 15%.

0-20, 20-40, 40-60, 60-100= profundidad en el perfil del suelo.