



Instituto Nacional de Innovación y
Transferencia en Tecnología Agropecuaria

ALCANCES TECNOLÓGICOS

REVISTA DEL INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA EN TECNOLOGÍA AGROPECUARIA

EDICIÓN ESPECIAL SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

VOLUMEN 12

NÚMERO 2

AÑO 2018



ALCANCES TECNOLÓGICOS

REVISTA DEL INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA EN TECNOLOGÍA AGROPECUARIA

EDICIÓN ESPECIAL SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

VOLUMEN 12

NÚMERO 2

AÑO 2018

Revista bienal del Instituto Nacional de Innovación y
Transferencia en Tecnología Agropecuaria

INTA-Costa Rica

Directora:

Ing. Laura Ramírez Cartín, INTA-Costa Rica

Editora:

Ing. Kattia Lines Gutiérrez, INTA-Costa Rica

Biometrista:

Ing. Beatriz Sandoval Carvajal, INTA-Costa Rica

Comité Editorial:

Ing. Laura Ramírez Cartín, INTA-Costa Rica

Ing. Kattia Lines Gutiérrez, INTA-Costa Rica

Ing. Carlos Cordero Morales, INTA-Costa Rica

Ing. Juan Mora Montero, INTA-Costa Rica

Ing. Francisco Arguedas Acuña, INTA-Costa Rica

Ing. Nevio Bonilla Morales, INTA-Costa Rica

Ing. Roberto Camacho Montero, INTA-Costa Rica

Grupo Asesor:

Carlos Chaves Villalobos, EARTH – Costa Rica

Danilo Pezo Quevedo, ILRI – Uganda

Flor Araya Sandí, Agronomía Mesoamericana

José Alberto Torres Moreira,
Trabajador independiente – Costa Rica

Luis Villegas Zamora, MAG – Costa Rica

Olman Quirós Madrigal, UCR – Costa Rica

Oscar Bonilla Bolaños, UNED – Costa Rica

Pedro Argel Montalvo,
Trabajador independiente – Costa Rica

Ricardo Guillén Montero, MAG – Costa Rica

Rodolfo Araya Villalobos, Agronomía Mesoamericana

Walter Peraza Padilla, UNA – Costa Rica

Walter Ruiz Valverde, UCR – Costa Rica

630

A Alcances tecnológicos / Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. -- Vol. 1, no.1 (2003-). -- San José, C.R.: INTA, 2003. BIANUAL.

ISSN 1659-0538 (impresa)

ISSN 2215-5481 (en línea)

1. AGRICULTURA. 2. INVESTIGACION. 3. COSTA RICA

Foto de portada: Ing. Sergio Abarca Monge (INTA) y equipo.

Diseño gráfico y diagramado: Handerson Bolívar Restrepo.

Impresión: Impresiones el Unicornio.



ALCANCES TECNOLÓGICOS

REVISTA DEL INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA EN TECNOLOGÍA AGROPECUARIA

EDICIÓN ESPECIAL SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

VOLUMEN 12

NÚMERO 2

AÑO 2018

ARTÍCULOS

Carbono orgánico del suelo y variación del nitrógeno en fincas ganaderas de cría <i>Sergio Abarca-Monge, Francisco Arguedas-Acuña, Roberto Soto-Blanco</i>	05-13
Emisión de metano entérico en ganado Brahman en el trópico de Costa Rica <i>Roberto Soto-Blanco y Sergio Abarca-Monge</i>	15-23
Carbono orgánico, nitrógeno y densidad aparente en suelos de fincas con ganadería bovina de cría <i>Sergio Abarca-Monge, Roberto Soto-Blanco, Francisco Arguedas-Acuña</i>	25-29
Momento óptimo del día para muestrear óxido nitroso en el trópico muy húmedo de Costa Rica <i>Francisco Arguedas-Acuña; Jorge Jiménez-Araya; Sergio Abarca-Monge</i>	31-44
Emisión de metano por fermentación entérica en vacas bajo pastoreo de lechería tropical <i>Sergio Abarca-Monge; Roberto Soto-Blanco1; Cristóbal Villanueva-Najarro</i>	45-53
Balance de gases de efecto invernadero en lecherías especializadas de Costa Rica <i>William Sánchez-Ledezma</i>	55-70
INFORMACIÓN PARA LOS AUTORES	71-75
REVISORES TÉCNICOS	77

CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO Y VARIACIÓN DEL NITRÓGENO EN FINCAS GANADERAS DE CRÍA

Sergio Abarca-Monge¹, Francisco Arguedas-Acuña¹, Roberto Soto-Blanco¹

RESUMEN

Carbono orgánico del suelo y variación del nitrógeno en fincas ganaderas de cría. Las pasturas tropicales son de reciente data. A diferencia del bosque natural, predominan las plantas tipo C4. Los métodos para medir adición de carbono orgánico del suelo (COS), se basan en la profundidad a la que el suelo está siendo afectado en su almacén de carbono (C) por la gestión de la cobertura actual. La sostenibilidad de las pasturas está relacionada a la disponibilidad de nitrógeno (N) y su relación con el C, donde el orden de suelo también interacciona con el potencial de retención de C y N. Durante el 2017, se estudiaron las diferencias entre bosque y pastura de 11 fincas ganaderas de carne en dos órdenes de suelo (Inceptisoles y Ultisoles) a cinco profundidades en capas de 20 cm. Las variables fueron: Densidad Aparente (DA), concentración de C y N, masa del COS y nitrógeno total (N_t), niveles de discriminación de isótopos 13 y 15 de C y N respectivamente ($\delta^{13}\text{C}$) y ($\delta^{15}\text{N}$) en raíces y suelo y proporción de carbono orgánico aportado por la pastura después de la deforestación al carbono orgánico total del suelo (COT). Se observó que el aporte de COS de las plantas C4 de las pasturas fue en los primeros 20 cm, así como también se observaron diferencias entre Inceptisoles y Ultisoles en relación al almacenamiento de COS. Los valores de $\delta^{15}\text{N}$ fueron más altos en la pastura que en el bosque evidenciando un elevado reciclaje. En conclusión, el aporte del COS a la COT de la pastura se realiza en los primeros 20 cm de profundidad. Por lo tanto, se infiere que la génesis del suelo influyó sobre la capacidad del suelo para almacenar carbono.

Palabras clave: carbono, suelo, pasturas tropicales, adición.

INTRODUCCIÓN

Es conocida la importancia de los suelos bajo pasturas tropicales en relación con las remociones de Carbono atmosférico (Guo y Gifford 2002), cuando se manejan en forma adecuada y se utilizan especies de plantas mejoradas con metabolismos fotosintético tipo C4 (Fisher *et al.* 1994). No obstante, existe incertidumbre del grado de aporte de C por parte de las pasturas, en relación

al contenido preexistente en el suelo (McSherry y Ritchie 2013). En Costa Rica, las áreas de pastura son de reciente data, donde la mayor parte de los suelos bajo pastoreo pasó de bosque a pastura en los últimos dos tercios del siglo XX (Velkamp 1993). La composición florística del bosque tropical húmedo y muy húmedo de acuerdo con las zonas de vida de Holdridge (1978), en las áreas de pastura actuales

1 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. sabarca@inta.go.cr, farguedas@inta.go.cr, rsoto@inta.go.cr

fue de plantas dicotiledóneas de hoja ancha donde predominó el metabolismo fotosintético C3 (Meinzer 1978). Por lo tanto, mediante la técnica de discriminación $d^{13}C$, es posible conocer la dinámica del C en los suelos con coberturas de gramíneas bajo pastoreo, las cuales son C4 con anatomía Kranz y se caracterizan por un alta eficiencia en fijación de C (Ehleringer 1991); dada esta condición, su sistema fotosintético discrimina menos que las plantas C3 el isótopo de carbono 13 (Farquhar 1983).

Por otra parte, el N es el principal elemento limitante de las pasturas (Ghannoum y Conroy 1998), el ^{15}N se considera un isótopo pesado que se incorpora en las cadenas tróficas, concentrándose conforme se asciende en las pirámides de las cadenas alimenticias (Rodríguez-Graña y Szteren 2013). Mediante el rastreo en el suelo y las plantas que crecen en forma natural es posible conocer su

abundancia e interpretación y conocer mejor la dinámica del N, ya que en la medida que en un ecosistema se reduce la disponibilidad de isótopo ^{14}N , se produce un incremento del isótopo ^{15}N (Craine et al 2015). La abundancia natural de la relación isotópica $^{14}N/^{15}N$ ha sido utilizada satisfactoriamente en pasturas tropicales para la evaluación de los ciclos de nitrógeno en estos sistemas (Valle de la Mora *et al.* 2003).

El objetivo de este estudio fue observar la deposición de carbono y nitrógeno al suelo de pasturas en relación con la vegetación original, con el fin de obtener una aproximación de la profundidad de muestreo en pasturas para los inventarios de remociones de carbono en los balances de Gases de Efecto Invernadero (GEI), además de comprender mejor la dinámica del N en las pasturas cuando presenta un adecuado manejo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron 11 fincas en igual número de cantones de seis provincias de Costa Rica, de las cuales 10 eran del programa piloto de monitoreo de la Corporación de Fomento Ganadero (CORFOGA) y una correspondió a la pastura del modelo de

ceba de machos en la Estación Experimental Los Diamantes (EELD) del INTA. En el Cuadro 1 se presenta la ubicación, el orden de suelo y la especie predominante de pasto para las fincas bajo estudio.

Cuadro 1. Localidad, ubicación de las fincas, sitios de muestreo y especie de pasto. Costa Rica. 2017.

Localidad	Finca	Orden	Muestra en bosque		Muestra en pasto		Especie de pasto
La Cruz	1	Inceptisol	N11.1225	W085.5689	N11.1214	W085.5694	<i>B. decumbens</i>
Hojancha	2	Inceptisol	N09.9683	W085.4039	N09.9681	W085.4003	<i>B. brizantha</i>
Garabito	3	Ultisol	N09.56553	W084.54254	N09.57098	W084.54099	<i>B. erecta</i> x <i>B. mutica</i>
S. Mateo	4	Ultisol	N09.95806	W084.50304	N09.95895	W084.50296	<i>B. brizantha</i>
Golfito	5	Inceptisol	N08.64687	W082.95738	N08.61032	W083.03407	<i>C. nlemfuensis</i>
B. Aires	6	Ultisol	N09.06977	W083.27712	N09.07061	W083.28102	<i>B. brizantha</i>
Upala	7	Ultisol	N10.90389	W085.05546	N10.90514	W085.05507	<i>P. maximun</i> (Mombaza)
S. Carlos	8	Ultisol	N10.68194	W084.43134	N10.68222	W084.43085	<i>B. brizantha</i>
Turrialba	9	Ultisol	N09,89972	W083,571667	N09,91389	N083,575833	<i>B. erecta</i> (Tanner)
Sarapiquí	10	Inceptisol	N10.33819	W083.97085	N10.33516	W083.96745	<i>B. brizantha</i>
Pococí	11	Inceptisol	N10.22245	W083.77363	N10.24741	W083.76902	Hbd Brachiarias (Cayman)

Todas las fincas se consideraron con un buen manejo de pasturas de acuerdo con las prácticas recomendadas en el plan piloto de ganadería de carne de la Estrategia para la Ganadería Baja en Carbono en Costa Rica (MAG 2015), y se clasificaron en dos grupos de acuerdo al orden de suelo, donde las fincas ubicadas en Ultisoles presentaban terrenos con pendiente (ondulada o quebrada) (Abarca 2018) y suelo color rojizos o amarillentos en la primera capa de 20 cm de (Velkamp 1993). Las fincas en Inceptisoles fueron con suelos planos y oscuros.

Entre febrero y abril de 2017 se realizaron 22 calicatas a 1,40 m de profundidad, a las cuales se les tomó muestras en tractos de 20 cm para determinación de la concentración (%) de C y N así como la masa almacenada de carbono orgánico de suelo (COS) y nitrógeno total (N_t) en términos de Mg ha⁻¹ (t/ha) (Velkamp 1993), Densidad aparente (DA) en valores de Mg/m³ (Alvarado y Forsythe 2005), raíces y suelo para determinación del isótopos de ¹³C y ¹⁵N, en unidades de discriminación de 0/00 $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (Arias, 2015; Craine *et al.* 2015).

Los análisis de concentración de C y N del suelo se realizaron en el Laboratorio de Suelos del INTA, y la determinación de DA en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), en suelo con partículas $\leq 2,0$ mm.

Para la estimación de la COS y N_t del suelo por hectárea en una lámina de 20 cm suelo se sigue utilizó a la siguiente ecuación:

$$\text{COS} / \text{Nt} = \text{Cs} / \text{Ns} * \text{Ls} * \text{DA} * 10^4$$

Donde:

COS = Carbono Orgánico Suelo (Mg ha⁻¹)

Nt = Nitrógeno Total (Mg ha⁻¹)

Cs = Concentración de carbono en el suelo (g/g)

Ns = Concentración de Nitrógeno en el suelos (g/g)

Ls = Lámina de suelo (cm)

DA = Densidad Aparente (Mg/ m³)

Las preparación de muestras para determinación de isótopos, que incluyó: separación de raíces, secado, molienda encapsulado en estaño y envasado, se realizó en los laboratorios del INTA y el CATIE, todo de acuerdo con los requisitos para la terminación de isotópicos $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ del Laboratorio de Isotopos Estables (SIF por sus siglas en inglés) del Departamento de Ciencia de las Plantas de la Universidad de California, donde se analizaron los análisis por espectrometría de masas de radio isótopos (IRMS por sus siglas en inglés). La abundancia natural en suelo y raíces de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ fueron calculados por el mismo laboratorio de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\delta^{13}\text{C} / \delta^{15}\text{N} (0/00) = [(R_{\text{muestra}} / R_{\text{estándar}}) - 1] \times 1000,$$

Donde:

R = proporción de ¹⁵N / ¹⁴N o ¹³C / ¹²C de la muestra y estándar

Estándar: Nitrógeno atmosférico y VPDB para carbono.

La estimación del aporte COS de la pastura (COS^P) al COT del suelo bajo pastura (COT^P) se realizó solamente por finca, profundidad y orden del suelo. Para el cálculo del remanente COS del bosque (COS^B) y el COS^P se utilizó el procedimiento sugerido por Velkamp (1993), mediante la siguiente fórmula:

$$\text{COT}^{\text{P}} * \delta^{13}\text{C}_{\text{P}} = \text{COS}^{\text{B}} * \delta^{13}\text{C}^{\text{B}} + \text{COS}^{\text{P}} * \delta^{13}\text{C}^{\text{RP}}$$

Donde:

COT^P = COS total de la pastura,

COS^B = COS del bosque,

COS^P = COS del pasto,

$\delta^{13}\text{C}^{\text{P}}$ = Valor de $\delta^{13}\text{C}$ del pasto,

$\delta^{13}\text{C}^{\text{B}}$ = Valor de $\delta^{13}\text{C}$ del bosque,

$\delta^{13}\text{C}^{\text{RP}}$ = Valor de $\delta^{13}\text{C}$ de raíces del pasto.

Las pasturas estudiadas, no tenían registro de aplicaciones de enmiendas orgánicas al suelo, ni están en suelos calcáreos; por lo tanto, se asumió que COT^P estaba constituido por dos facciones principales de COS: remanente del bosque; y el

aportado por los pastos y otras plantas de la pastura constituyendo el COS^B y COS^P respectivamente.

Las variables analizadas fueron, cobertura de suelo, orden de la finca y profundidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Densidad Aparente

Se presentaron diferencias únicamente para efectos simples ($p < 0,0079$) en las variables cobertura vegetal y orden de suelo. La diferencia en la profundidad 0-20 cm con respecto a las demás fue altamente significativa ($p < 0,0001$).

Cuadro 2. Efecto de la cobertura, orden y profundidad del suelo sobre la densidad aparente (g/cm^3). Costa Rica. 2017.

Cobertura DA (g/cm^3)		Error Estándar
Pastura	1,19a	0,02
Bosque	1,11b	
Orden		
Inceptisoles	1,10a	0,02
Ultisoles	1,20b	
Profundidad (cm)		
0-20	0,99a	0,03
20-40	1,17b	
40-60	1,19b	
60-80	1,19b	
80-100	1,21b	

No obstante, a esta profundidad (0-20 cm) se presentó una interacción ($p < 0,05$) con la cobertura (Cuadro 3) donde el bosque presentó el valor más bajo de DA, mientras la pastura no fue diferente entre el bosque y el resto de las profundidades de ambas coberturas, aunque con una tendencia a una menor compactación.

Cuadro 3. Efecto de la interacción cobertura por profundidad del suelo sobre la densidad aparente (g/cm^3). Costa Rica. 2017.

Cobertura	Profundidad (cm)	DA (g/cm^3)
Pastura	0-20	1,10ab
Pastura	20-40	1,23a
Pastura	40-60	1,20a
Pastura	60-80	1,21a
Pastura	80-100	1,22a
Bosque	0-20	0,89b
Bosque	20-40	1,11a
Bosque	40-60	1,18a
Bosque	60-80	1,18a
Bosque	80-100	1,20a
Error Estándar		0,05

Los valores de DA son concordantes con los reportados por Alvarado y Forsythe (2005) para los órdenes de suelo de Costa Rica.

Carbono Orgánico

Según el cuadro No. 4, no se observaron diferencias entre coberturas y orden de suelos para la concentración de C, esta variable solamente presentó diferencias a la profundidad 0-20 cm con respecto a las otras profundidades.

Cuadro 4. Efecto de la profundidad del suelo sobre la concentración de Carbono (%). Costa Rica. 2017.

Profundidad (cm) %		Error Estándar
0-20	7,30a	0,33
20-40	5,83b	
40-60	5,70b	
60-80	5,57b	
80-100	5,42b	

En relación con la masa de COS sin y con corrección por DA, no se observó diferencias para las variables en estudio, los promedios fueron: $39,20 \pm 11,57$; $36,30 \pm 10,67$; $36,77 \pm 9,58$ Mg/ha para las pasturas sin corregir y corregidas por la densidad aparente del bosque y el bosque respectivamente. Los valores para pasturas fueron menores que los reportados a las mismas profundidades por Fisher *et al.* (1994) en la sabana pero similares a los observados por Carvajal *et al.* (2009) en los paisajes andinos, ambos en Colombia; y proporcionalmente concordantes con los reportados en pasturas del trópico muy húmedo de Costa Rica por INTA-COROFGA (2013) y Hernández *et al.* (2014) a 10 cm y a 5 cm de profundidad respectivamente.

Contenido de Nitrógeno

No se observaron diferencias entre coberturas, aunque si entre órdenes ($P < 0,039$), con promedios de $0,16 \pm 12$ y $0,13 \pm 10\%$ de N para Inceptisoles y Ultisoles respectivamente. La profundidad mostró diferencias ($P < 0,0001$) entre el estrato 0-20 cm y el resto de estratos, así como la interacción cobertura*profundidad ($P < 0,0489$) entre bosque, pasto y las demás profundidades de ambas coberturas.

Cuadro 5. Efecto de la cobertura y profundidad del suelo sobre la concentración de Nitrógeno (%). Costa Rica. 2017.

Cobertura	Profundidad (cm)	N (%)
Pastura	0-20	0,26a
Pastura	20-40	0,12c
Pastura	40-60	0,12c
Pastura	60-80	0,10c
Pastura	80-100	0,08c
Bosque	0-20	0,36b
Bosque	20-40	0,16c
Bosque	40-60	0,12c
Bosque	60-80	0,09c
Bosque	80-100	0,08c
Error Estándar		0,02

Estos valores son menores a los observados en la región andina de Colombia a la misma profundidad (Carvajal *et al.* 2009) pero similares a los reportados por Weintraub *et al.* (2016) en los bosques de Costa Rica. El N_t corregido por DA no presentó diferencias con respecto a cobertura y orden, no obstante, mostró diferencias ($p < 0,0001$) con respecto a la profundidad (Cuadro 5).

Cuadro 6. Masa de Nitrógeno total (Mg/ha/20 cm) a diferentes profundidades. Costa Rica. 2017.

Profundidad (cm) Mg/ha	Error Estándar	
0-20	5,29a	
20-40	3,04b	
40-60	2,78bc	0,25
60-80	2,14bc	
80-100	1,90c	

La interacción cobertura profundidad también presentó diferencias ($p < 0,0167$), Cuadro 6. La tendencia a la reducción de N_t con respecto a la profundidad fue mayor en el bosque que en la pastura, lo que sumado a que este ecosistema presenta mayor nivel de nitrógeno en la primera capa con respecto a la pastura, indica una alta posibilidad de que el suelo de bosque en las primeras capas posea mejores mecanismos de retención de N que la pastura.

Cuadro 7. Masa de Nitrógeno total (Mg/ha/20cm): interacción cobertura por cada 20 cm de profundidad. Costa Rica. 2017.

Cobertura	Profundidad (cm)	Nt (Mg/ha)
Pastura	0-20	4,46 b
Pastura	20-40	2,61cd
Pastura	40-60	2,86cd
Pastura	60-80	2,32cd
Pastura	80-100	2,02cd
Bosque	0-20	6,11 a
Bosque	20-40	3,47bc
Bosque	40-60	2,70cd
Bosque	60-80	1,97cd
Bosque	80-100	1,78 d
Error Estándar		0,35

Relación Carbono Nitrógeno

En forma general no se obtuvieron diferencias para las coberturas y el orden de suelo, aunque se observó una tendencia a una menor (30 %) relación C:N en los suelos con cobertura de bosque y Ultisoles (15 %) (Cuadro 8). Los valores están en el rango observado para bosques húmedos en Puerto Rico por Von Fischer y Tieszen (1995).

Cuadro 8. Relación C:N valores promedio por cobertura y orden. Costa Rica. 2017.

Cobertura Relación C:N	Error Estándar
Pastura 16,03	3,97
Bosque 23,16	
Orden	Error Estándar
Inceptisoles 21,20	3,97
Ultisoles 18,03	

Se observaron diferencias ($p < 0,0181$) según la profundidad, donde la lámina 0-20 cm presenta una baja relación C:N y luego un incremento moderado en las dos capas intermedias y más fuertemente en las de mayor profundidad.

Cuadro 9. Relación C:N variación con la profundidad. Costa Rica. 2017.

Profundidad (cm)	Relación C:N	Error Estándar
0-20	6,78 a	2,28
20-40	14,36ab	
40-60	14,82ab	
60-80	34,24b	
80-100	27,77ab	

Variación de la discriminación de isótopo ^{13}C

Se observaron diferencias ($p < 0,0002$) para $d^{13}\text{C}$ del suelo entre coberturas, las interacciones cobertura por orden ($p < 0,0048$) y cobertura por profundidad ($p < 0,0225$) (Cuadro 10).

Partiendo del hecho de que entre menos negativo sea el valor $d^{13}\text{C}$ hay una menor discriminación sobre este isótopo, lo cual implica una mayor deposición de carbono de plantas C4 al suelo, se puede inferir que la diferencia observada en los primeros 20 cm de suelo entre la pastura y el bosque de las fincas estudiadas se debe mayormente a la contribución de las plantas que constituyeron las pasturas.

Cuadro 10. Discriminación de ^{13}C del suelo. Costa Rica. 2017.

Cobertura	$d^{13}\text{C}$	Error Estándar	
Pastura	-21,77a	0,44	
Bosque	-24,71b		
Cobertura Orden			
Pastura Inceptisoles	-22,09a	0,65	
Pastura Ultisoles	-21,45a		
Bosque Inceptisoles	-25,65b		
Bosque Ultisoles	-22,69a		
Cobertura Profundidad (cm)			
Pastura 0-20	-19,13		1,03
Pastura 20-40	-21,93		
Pastura 40-60	-22,20		
Pastura 60-80	-22,78		
Pastura 80-100	-22,80		
Bosque 0-20	-25,67		
Bosque 20-40	-23,98		
Bosque 40-60	-23,77		
Bosque 60-80	-23,62		
Bosque 80-100	-23,82		

En cuanto a $\delta^{13}\text{C}$ de raíces entre coberturas se observaron diferencias ($p < 0,0001$) para $\delta^{13}\text{C}$ con promedios de $-17,38 \pm 5,40$ y $-29,46 \pm 1,79$ para pastura y bosque respectivamente, confirmando la contribución al carbono del suelo de las plantas tipo C4 que constituyen las pasturas en las fincas del estudio. También se obtuvieron diferencias ($p < 0,05$) para la interacción cobertura por orden (Cuadro 11) donde las pasturas presentan diferencias entre órdenes mientras el bosque no. El valor más negativo de pasturas en Ultisoles puede estar asociado a una mayor presencia de raíces provenientes de arvenses arbustivas observadas durante el estudio en estas pasturas.

Cuadro 11. Discriminación de ^{13}C de las raíces. Costa Rica. 2017.

Cobertura	Orden	$\delta^{13}\text{C}$	Error Estándar
Pastura	Inceptisoles	-16,15a	1,00
Pastura	Ultisoles	-20,30b	1,84
Bosque	Inceptisoles	-30,18c	1,19
Bosque	Ultisoles	-29,59c	1,30

Se observó una tendencia no significativa menos negativa de $\delta^{13}\text{C}$ en las raíces en las cinco profundidades en los suelos con pastura, indicando la posibilidad de deposición de carbono, producto de las raíces de pastos a mayor profundidad.

Variación de la discriminación de isótopo ^{15}N

Con respecto a $\delta^{15}\text{N}$ del suelo no se observaron diferencias para las variables en estudio, el promedio general fue $5,77 \pm 1,60 \delta^{15}\text{N}$, concordando con los valores reportados por Weintraub *et al.* (2016) para los suelos de zonas bajas de los bosques de Costa Rica. Partiendo del hecho de que este promedio es relativamente alto (Craine *et al.* 2015), es posible inferir que tanto los ecosistemas pastura y bosque en las zonas de vida tropicales están expuestos a un bajo ingreso de N al suelo, que de acuerdo Weintraub *et al.* (2016), se hace mayor en el bosque a medida que la precipitación y la temperatura se incrementa. Donde es posible que suceda en la misma medida con la pastura. No obstante lo anterior, se observaron diferencias ($p < 0,0001$) en cuanto a los contenidos de $\delta^{15}\text{N}$ de las raíces; para la pastura el valor promedio se situó en $4,10 \pm 1,25$

mientras en el bosque fue de $1,25 \pm 1,20$, indicando claramente una mayor utilización de ^{15}N por parte de las pasturas en relación al bosque, lo que sugiere que la necesidad de N en la pastura es mayor, posiblemente debido a que su ciclo corto (días) de utilización requiere de una extracción constante, mientras con el bosque los requerimientos son a un mayor plazo.

Considerando, que las pasturas de las fincas bajo estudio no recibieron aportes externos de nitrógeno que pudiera enriquecer los niveles de $\delta^{15}\text{N}$ en la forma que se observa, el reciclaje de N fue mayor en el ecosistema pastura donde posiblemente las excretas tuvieron un rol importante.

Aporte de la pastura al COS^{P} .

No se observaron diferencias para profundidad en relación con la COT^{P} ni del aporte de COS^{P} al COT^{P} . El orden de suelo mostró diferencias en COT^{P} ($p < 0,0001$) pero no en COS^{P} , para ambas variables se observaron diferencias entre fincas ($p < 0,0025$) con una alta variabilidad (Cuadro 12).

Cuadro 12. Cantidad de COT^{P} en una capa de 20 cm y el aporte porcentual del COS^{P} a esta. Costa Rica. 2017.

Variable	Orden de suelo	COT^{P} (mg/ha)	COS^{P} (% de COT^{P})
Sitio			
La Cruz	Inceptisol	31,61 cd	42,24 abcd
Hojancha	Inceptisol	42,31 abc	35,43 cd
Garabito	Ultisol	33,60 bcd	57,55 ab
San Mateo	Ultisol	34,44 bcd	52,83 abc
Golfito	Inceptisol	22,76 c	31,95 c
B. Aires	Ultisol	54,06 a	48,63 abcd
Upala	Ultisol	40,52 abc	47,44 abacd
San Carlos	Ultisol	44,22 abc	48,16 abcd
Turrialba	Ultisol	30,66 cd	59,64 a
Sarapiquí	Inceptisol	50,33 ab	36,29 cd
Pococí	Inceptisol	46,71 abc	39,88 bcd
Error Estándar		3,54	3,71
Orden de suelos			
	Inceptisol	45,35 a	47,76 a
	Ultisol	31,83 b	43,54 a
Error Estándar		1,42	1,59

La densidad aparente fue la variable dependiente que se asoció más con los parámetros estudiados como: cobertura, orden de suelo y profundidad. Además correlacionó significativamente ($p < 0,0001$) el N, N_i e influyó en la relación C:N ($p < 0,0025$), tanto en el bosque como en la pastura. La correlación ($p < 0,0015$) entre el ¹⁵Ns y ¹⁵Nr en la cobertura de pastura sugiere una alta dependencia del nitrógeno de reciclaje en las pasturas en comparación con el bosque. El COS en ambas coberturas está influenciado ($p < 0,0015$) por la DA y este a su vez tiende a tener influencia en la relación C:N.

Los niveles de d¹³C semejantes del bosque en Ultisoles y la pastura sugieren la posibilidad de que fueron bosques secundarios por regeneración natural y que posiblemente décadas atrás tuvieron plantas tipo C4 durante el proceso de la expansión de la frontera agrícola. Así mismo, un d¹³C mayor en pasturas en Ultisoles pero no menos negativo que el bosque de ese mismo orden indica la posibilidad de una mayor cantidad de plantas pioneras propias de los procesos sucesionales a bosque, que en términos prácticos tradicionales sugieren un mayor costo de mantenimiento en términos de control de arvenses en pasturas en suelos de este orden,

donde podrían tener un alto potencial el establecimiento de sistemas silvopastoriles con arbustos y árboles autóctonos, propios de los procesos de sucesión de estas zonas de vida y este tipo de suelos.

En conclusión, para estudios de determinación de adicionalidad de COS en cobertura de pasturas, se recomienda realizar la corrección por DA del particulado $\leq 2,0$ mm con respecto a la condición de cobertura natural en este caso de bosque. Así mismo, la profundidad de muestreo de acuerdo con d¹³C para el suelo gestionado por la actividad de cría bovina estuvo mayormente en un rango de 0-20 cm de profundidad. El aporte de COS^P se considera bajo para realizar incrementos de productividad en fincas ubicadas en Ultisoles aunque se observó una tendencia a una mayor parte del COS^P al COT en estos suelos. El reciclaje de N es importante en las pasturas, no obstante, las cantidades podrían no ser lo suficientes para incrementos de productividad. Las pasturas tradicionales con una composición florística tipo herbácea y botánica tendiente a mantener una sola especie de pastura podría no ser tan productiva en suelos tipo Ultisol.

LITERATURA CITADA

Abarca, S. 2018. Capacidad de carga de la finca ganadera bovina. Revista Universidad Técnica Nacional. 20 (81). En prensa.

Alvarado, A; Forsythe, W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica (en línea). Consultado 22 ene. 2018. Agronomía Costarricense 29(1):85-94. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/436/43629109.pdf>

Arias, C. 2015. Gramíneas perennes C3 y C4 para la producción de bioenergía en ambiente Mediterráneo (en línea). Tesis Ph. D. Barcelona, España, Universidad de Barcelona. Consultado 22 ene. 2108. Disponible en http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/68632/1/CVA_TESIS.pdf

Carvajal, A.; Feijoo, A.; Quintero, H.; Rondon, M. 2009. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno en paisajes andinos colombianos. Revista de la Ciencia del Suelo Nutrición Vegetal 9(3):222-235.

Craine, J; Brookshire, E; Cramer, M; Hasselquist, J; Kaba, K; Marin-Spiotta, E; Wang, L. 2015. Ecological interpretations of nitrogen isotope ratios of terrestrial plants and soils. Plant and Soil 396(1-2):1-26.

Ehleringer, J; Sage, R; Flanagan, L; Pearcy, R. 1991. Climate change and the evolution of C4 photosynthesis. Trends in Ecology & Evolution 6(3):95-99.

- Farquhar, G. 1983. On the Nature of carbon isotope discrimination in C4 species. *Functional Plant Biology* 10(2):205–226.
- Fisher M; Rao, I; Ayarza, C; Lascano, C; Sanz, J; Thomas, R; Vera, R. 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas (en línea). *Nature* 371:236-238. Consultado 22 ene. 2018. Disponible en <https://www.nature.com/articles/371236a0>
- Guo, L; Gifford, R. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis. *Global Change Biology* 8(4):345-360.
- Hernández, M; Abarca, S; Soto, R. 2014. Evaluación de pasto *Brachiaria* híbrido cv Cayman, en pastoreo en el trópico muy húmedo de Costa Rica. *Revista Universidad Técnica Nacional* 16 (70):48-54.
- Holdridge, L. 1978. *Ecología basada en zonas de vida*. San José, Costa Rica, 216p.
- INTA (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria; CORFOGA (Corporación de Fomento Ganadero). 2013. Informe 2013. Valoración servicios ecosistémicos en fincas ganaderas de cría. San José, Costa Rica. 21p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2015. Estrategia de ganadería baja en carbono en Costa Rica (en línea). San José, Costa Rica. 109 p. Consultado 22 ene 2018. Disponible en <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00366.pdf>
- McSherry, E; Ritchie, M. 2013. Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. *Global Change Biology* 19(5):1347-1357.
- Meinzer, FC. 1978. Observaciones sobre la distribución taxonómica y ecología de la fotosíntesis C4 en la vegetación del noreste de Centroamérica. *Revista de Biología Tropical* 26(2): 359-368.
- Ghannoum, O; Conroy J. 1998. Nitrogen deficiency precludes a growth response to CO2 enrichment in C3 and C4 *Panicum* grasses. *Australian Journal of Plant Physiology* 25(5):627- 636.
- Rodríguez Graña, L.; Szteren, D. 2013. Los isótopos y las cadenas alimentarias. *Ecología trófica en ambientes acuáticos*. *Uruguay Ciencia* 16:29-31.
- Valles de la Mora, B; Cadisch, G; Aluja Schunemann, A. 2003. Comparación de metodologías de isótopos para evaluar fijación de N atmosférico y su destino en suelos y plantas. *Agrociencia* 37(2):117-128.
- Veldkamp, E. 1994. Organic carbon turnover in three tropical soil under pasture after deforestation. *In: soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropic of Costa Rica*. Tesis Ph.D. Wageningen, Holanda, Wageningen University. 117 p.
- Von Fischer, J; Tieszen, L. 1995. Carbon isotope characterization of vegetation and soil organic matter in subtropical forest in Luquillo, Puerto Rico. *Biotrópica* 27(2):130-148.
- Weintraub, S; Cole, R; Schmitt, C; All, J. 2016. Climatic controls on the isotopic composition and availability of soil nitrogen across mountainous tropical forest. *Ecosphere* 7(8):1-13.

EMISIÓN DE METANO ENTÉRICO EN GANADO BRAHMAN EN EL TRÓPICO DE COSTA RICA

Roberto Soto-Blanco¹ y Sergio Abarca-Monge¹

RESUMEN

Emisión de metano entérico en ganado Brahman en el trópico de Costa Rica. En Costa Rica la producción bovina es la más difundida de las actividades agropecuarias, con la mayor área en uso agrícola bajo cobertura de pastizales (INEC 2014). Se realizaron dos experimentos para medir la emisión de metano de la fermentación entérica de bovinos cebú en la Estación Experimental Los Diamantes (EELD) del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), entre noviembre de 2015 y febrero de 2017 en una zona de vida de Bosque Muy Húmedo Tropical Basal Holdridge (1978). El primero fue con vacas cebú adultas de la raza Brahman pastoreando Ratana (*Ischaemum indicum*); el segundo con machos Brahman en crecimiento en pasturas de Cayman híbrido (Hernández *et al.* 2014) en Pastoreo Racional Voisin con 42 días de rebrote. En el caso de los machos la carga animal durante la evaluación inició con 1,67 y finalizó con 2,47 UA ha⁻¹ año⁻¹. Los factores de conversión fueron 6,1% y 4,6% de EB a metano y las emisiones en relación con el consumo de MS fueron de 20,0 y 14,5 g CH₄/kg MS para vacas en Ratana y machos en Cayman respectivamente.

Palabras clave: Factor Conversión Metano, Emisión Metano, Metano Brahman.

INTRODUCCIÓN

Los gases con efecto invernadero (GEI) se producen mediante procesos o mecanismos naturales, que han permitido a través del tiempo mantener una temperatura cálida en el planeta (González *et al.* 1999). Sin embargo, después de la revolución industrial se han evidenciado aumentos en la concentración de GEI en la atmósfera, situación que se asocia a efectos negativos en el medio ambiente, como aumento en la temperatura de la tierra y del océano, el descongelamiento de glaciares, aumento en el nivel del mar e incidencia

de fenómenos naturales extremos como sequías y exceso de lluvia (Friedrich-Wilhelm y Werner 2008; Shallcross *et al.* 2007).

Los GEI más relevantes son el dióxido de carbono (CO₂) el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), los cuales tienen un potencial de calentamiento de 1, 21 y 310, respectivamente (IPCC 2006). El metano además de que posee un mayor poder de calentamiento que el CO₂, su tiempo de vida media en la atmósfera es de diez años (Moss *et al.* 2000;

¹ Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. rsoto@inta.go.cr, sabarca@inta.go.cr.

Niggli *et al.* 2009). Dentro del sector agropecuario, el CO₂ es generado en su mayoría por la combustión de combustibles fósiles (gasolina y diesel) utilizados en el equipo agrícola, el CH₄ por la fermentación entérica que ocurre en el tracto digestivo de los rumiantes, y el N₂O por el uso de fertilizantes nitrogenados en las actividades agrícolas (Cicerone y Oremland 1988). A nivel global se estima que las actividades agropecuarias producen el 25 % de las emisiones de GEI, donde aproximadamente la mitad corresponden directamente a procesos pecuarios. Los bovinos son los animales que emiten la mayor emisión por su proceso de digestión (fermentación entérica), donde liberan metano, sumado a su cantidad y distribución geográfica global, dada la privilegiada habilidad de convertir pastos y forrajes en leche y carne (IPCC 2014).

Mediante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), varios países han unido esfuerzos en busca de mitigar las emisiones de GEI de origen antropogénico. Un ejemplo es el tratado de Kioto celebrado en 1997, donde 196 países se comprometieron a realizar el inventario nacional de GEI y a reducir las emisiones en un 5% con respecto a las emisiones de 1990 (Lascano y Cárdenas 2010). Costa Rica como país firmante de la convención, ha realizado tres inventarios nacionales utilizando la metodología propuesta por el Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático, (IPCC por sus siglas en inglés), el cual ha definido cuatro categorías como fuentes de emisión de GEI: energía; procesos industriales; agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU) y desechos. De acuerdo con el inventario de 2010, la emisión de GEI de Costa Rica fue de 8788,84 Gg de CO₂ equivalente, siendo el sector energía (combustibles y gases), desechos e industria, responsables del 80,6, 15,7 y 9,1% respectivamente. Mientras que el sector AFOLU aportó un valor negativo (-473,29 Gg), debido a las grandes fijaciones de carbono que mantuvo (MINAE 2014). Dentro del total de metano emitido por AFOLU, la ganadería es responsable del 84%, sin embargo, mediante el componente leñoso, fija el 48 % del CO₂ emitido por los otros sectores (INM 2014). Algunos investigadores coinciden que, en Costa Rica los sistemas de producción bovina y de rumiantes en general, son los que tienen el mayor potencial de reducir las emisiones de GEI (Abarca 2013).

En Costa Rica la producción bovina es la más difundida de las actividades agropecuarias, con la mayor área en uso agrícola bajo cobertura de pastizales (INEC 2014). Ésta aporta aproximadamente el 20% de las emisiones del país, (2,3 millones de toneladas anuales de CO₂ e) por sus procesos de producción (MINAE 2014). Por otra parte, se observa que el ganadero dedica tiempo a la protección de los bosques, la biodiversidad y el agua de sus fincas (Abarca 2014), siendo una actividad muy natural.

La variación en las emisiones de metano de los bovinos depende de la proporción de energía bruta contenida de los alimentos (EB) (RNC 2000) que utilicen los microorganismos del rumen en sus procesos metabólicos, incorporen en su biomasa y puedan liberar en forma de ácidos grasos, lo que se conoce como energía digestible (ED) (Ribeiro *et al.* 2015). Se estima que entre un 2 a un 12% de la EB contenida en los alimentos se pierde como metano (Johnson y Johnson 1995).

Se han realizado pruebas para estimar las emisiones de metano de la fermentación entérica desde hace varios años (Hegarty 1999) principalmente con el fin de mejorar la nutrición de los animales, no obstante, la mayoría de las investigaciones han sido en latitudes diferentes a las tropicales, donde las razas de bovinos utilizadas no son comunes en el trópico y han sido alimentadas con granos y forrajes.

En algunos casos no se ha correlacionado la emisión con indicadores de producción durante los ensayos, ocasionando que los datos sean semejantes a los observados con dietas de otras latitudes e incluso a las estimadas por IPCC (2006), pero sin vinculación al crecimiento y producción de los animales. Estas investigaciones son interesantes entre pares de investigadores, pero generan muy poco aporte sustantivo a la realidad productiva, además pueden inducir a la toma de decisiones productivas erróneas cuando se está en un ambiente tropical.

Actualmente la ganadería bovina, tiene el reto de incrementar la productividad al menor costo posible y con la menor emisión de GEI (Montenegro y Abarca 2001). Favorablemente en los sistemas ganaderos del trópico húmedo, los animales interactúan con una gran cantidad de biomasa proporcionada por

los árboles, arbustos, pastos y forrajes que existen en el ecosistema (Sorio 2012); que además de suministrar beneficios nutritivos a los animales, son capaces de retener gran cantidad de dióxido de carbono, siendo en algunos casos, mayor que la cantidad emitida por el mismo sistema de producción. Ante esta situación, se hace necesario cuantificar la retención y emisiones de CO₂ equivalente en estos sistemas, con la finalidad de determinar

su balance y en caso negativo, buscar alternativas tecnológicas y de manejo, que permitan reducir la emisión e incrementar la fijación de carbono.

El cuadro 1 presenta valores de emisión de metano de animales de razas cebuínas y algunos cruces alimentados con pastos tropicales y relación con la digestibilidad del forraje ofrecido, donde se observa una gran variabilidad entre investigaciones.

Cuadro 1. Emisión de metano obtenida por diferentes autores en ambientes y con pastos tropicales. Costa Rica. 2017.

Tipo de animal	Peso Vivo (Kg)	Alimentación	DIVMS (%)	Emisión (g CH ₄ /a/d)	Localización	Referencia
Holstein - Cebú	373 ± 37	<i>Brachiaria</i> no fertilizada	41-50	179	Brasil	Pedreira <i>et al</i> 2009
Nelore	40 2± 52	Heno de <i>B. brizantha</i> rebrote 15 días	64	133	Brasil	Moysés 2007
Nelore	40 2± 53	Heno de <i>B. brizantha</i> rebrote 45 días	63	138	Brasil	Moysés 2007
Nelore	40 2± 54	Heno de <i>B. brizantha</i> rebrote 90 días	63	134	Brasil	Moysés 2007
Holstein - Cebú	374	<i>B. decumbens</i> sin fertilizar		190,5	Brasil	Primavesi <i>et al</i> 2004
Cruce	500	<i>B. brizantha</i>		98	África	Neto <i>et al</i> 2009
Cebú	329 ± 38	Estabulado con heno <i>Digitaria decumbens</i>	63,3	181,5	Costa Rica	INTA, 2015
Cebú	329 ± 39	Estabulado con heno <i>Brachiaria arrecta</i>	47,4	110,4	Costa Rica	INTA, 2015
Cebú	329 ± 40	Estabulado con heno Comercial	47,5	125,8	Costa Rica	INTA, 2015

MATERIALES Y MÉTODOS

Las mediciones se llevaron a cabo en el área de ganadería de la Estación Experimental Los Diamantes (EELD), ubicada en Guápiles, cantón de Pococí, provincia de Limón; entre noviembre de 2015 y febrero de 2017. La zona de vida de acuerdo con la clasificación de Holdridge (1978) corresponde a Bosque Muy Húmedo Tropical Basal, con una precipitación anual de 4332 mm y una temperatura diaria promedio de 24,6 °C. Se realizaron dos experimentos en el mismo período: el primero fue con vacas cebú adultas multíparas de la raza Brahman pastoreando Ratana (*Ischaemum indicum*) con una carga animal de 2,0 UA/ha/año, con tres días de ocupación y 33 días de rebrote. El segundo grupo, con machos Brahman en crecimiento en pasturas de pasto Cayman híbrido de especies del género *Brachiaria* (Hernández *et al.* 2014) con tres años de

establecido, en Pastoreo Racional Voisin (PRV) con 42 días de rebrote, la carga animal durante la evaluación inició con 1,67 y finalizó con 2,47 UA ha⁻¹ año⁻¹. En ambos casos la Unidad Animal (UA) fue definida en 450 kg de peso vivo y no se utilizó ningún tipo de fertilización durante el período de evaluación.

Selección y manejo de los animales

Se seleccionaron 16 animales; ocho hembras y ocho machos en crecimiento con un peso vivo promedio al inicio de las mediciones de 524,0 ± 43,3 y 358,6 ± 24,9 kg respectivamente, los cuales previamente recibieron adiestramiento para mejorar su docilidad y poner los collares recolectores de

gases en sus cuellos con facilidad. Se tomaron muestras cada 33 días. El único alimento que consumieron los animales fue el forraje cosechado durante el pastoreo y la suplementación mineral ofrecida a libre voluntad. El acceso al agua fue sin restricción y los animales pastorearon con un buen confort y sin stress. Los animales seleccionados pastorearon con sus pares de hato, dentro del número y manejo normal de cada grupo.

Medición de metano

La medición de metano se realizó mediante la técnica del hexafluoruro de azufre (SF₆), la cual consistió en poner a nivel de rumen un tubo de permeación conteniendo SF₆. La tasa de liberación del SF₆ fue determinada por regresión lineal para cada tubo, los cuales se pesaron en forma semanal durante dos meses y medio previamente a ser implantados en el rumen de los animales. Para el muestreo se instaló un tubo colector al vacío y ergonómicamente diseñado en el cuello del animal, el cual fue conectado a un capilar que se situó por medio de un gamarrón (bozal) en el morro del animal (Westberg *et al.* 1998 y MPI 2014). Esta técnica permitió el pastoreo libre y sin limitaciones de los animales, garantizando un comportamiento y bienestar adecuado y natural. Se utilizó un tubo colector de gases por día de pastoreo. El metano y SF₆ contenidos en el tubo colector se determinaron por cromatografía de gases en el laboratorio del INTA de Costa Rica. Se asumió que las tasas de emisión de SF₆ y CH₄ eran exactamente iguales, entonces las diluciones también fueron idénticas. La mezcla de los gases se debió a los movimientos de los animales y del mismo rumen. Por lo tanto, la tasa de emisión del metano (Q_{CH_4}) puede ser calculada por la medición de la concentración de CH₄ y SF₆, así como la tasa de liberación de SF₆ (Q_{SF_6}):

$$Q_{CH_4} = Q_{SF_6} \times [CH_4] / [SF_6] \text{ (Westberg et al. 1998).}$$

Degradación “in situ” y calidad nutritiva

Para la determinación de la degradación “in situ” de los forrajes que consumieron los animales a los que se les midió la emisión de CH₄ por medio de la técnica del FS6, se utilizaron cuatro novillos con cánula ruminal, con un peso aproximado de 350 kg, los cuales se mantuvieron pastoreando las mismas pasturas que los animales de medición directa de CH₄, así como en las mismas condiciones agroecológicas y de manejo. El período de incubación fue de 48 horas, con material molido a 2 mm (5 g de forraje) en bolsas de nylon de aproximadamente 17,0 cm de largo por 9,0 cm de ancho, con un poro de 52μ, de acuerdo con la técnica descrita por Orskov *et al.* (1980). El cálculo de degradación para la materia seca (MS) se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ degradación ruminal} = (Cantidad\ inicial + Cantidad\ residual) / Cantidad\ inicial * 100$$

Estimación del consumo voluntario de materia seca

El consumo voluntario se estimó mediante la técnica de marcadores externos utilizando óxido crómico (Cr₂O₃) como marcador (Mejía 2002). A los animales se les suministró una dosis de 10 g d⁻¹ de Cr₂O₃ durante 7 días consecutivos, tomando muestras de heces directamente del recto del animal a partir del quinto día. A las muestras de forraje y heces se les determinó carbono (C) y nitrógeno (N) mediante un análisis realizado en el laboratorio ubicado en el CATIE.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Vacas con manejo tradicional en pasturas de *Ratana* (*Ischaemum indicum*)

La calidad nutritiva de la pastura se presenta en el cuadro 2. Los contenidos de Proteína Cruda (PC) y Fibra Detergente Neutro (FDN), son concordantes con los observados por Villalobos (2010) para este tipo de pastura en condiciones de trópico muy húmedo y edad de rebrote similar.

Cuadro 2. Calidad nutritiva de la pastura de *Ratana* (*Ischaemum indicum*). Guápiles, Costa Rica. 2017.

En el forraje ofrecido	EB	PC	FDN	Degradación ruminal
	MJ/kg MS	%	%	%
Promedio	18,2	13	56,7	54,3
Desviación estándar	0,3	1,5	3,2	12,2

Durante el período experimental las vacas mantuvieron una condición corporal, estado sanitario y reproductivo muy bueno pese a su edad (7 - 9 años). En relación con la emisión de CH₄, se observó diferencias significativas entre períodos de medición pero no entre vacas. El promedio de emisión fue de 204,5 g CH₄ vaca⁻¹ día⁻¹, siendo ligeramente mayor a la observada por INTA (2015); Pedreira *et al.* (2009) y Primavesi *et al.* (2004) con animales de pesos inferiores (entre 329 y 374 kg) a los utilizados en esta evaluación, en el primer caso con una digestibilidad de forraje ofrecido mucho mayor (63,3 %) y en el último con una semejante (50 %) al valor determinado en la pastura utilizada en esta investigación. Al relacionar la emisión por unidad de peso vivo, se observó que bajo las condiciones del presente estudio, se obtuvo una relación más baja (0,39 g CH₄ kg PV⁻¹) que las obtenidas por INTA (2015), Pedreira *et al.* 2009 y Primavesi *et al.* (2004) pero similar a la obtenida por Moysés (2007) con animales cebú de la raza Nelore.

Cuadro 3. Emisión de metano de vacas en pastura de *Ratana* (*Ischaemum indicum*) Guápiles, Costa Rica. 2017.

Variable	Unidades	Promedio	Desviación estándar
Consumo de materia seca	Kg/animal/día	11,8	1,0
	%Peso Vivo	2,2	0,1
Emisión de metano	g/vaca/día	204,5	148,3
	g/kg MS	20,0	12,0
Energía bruta convertida a metano	%	6,1	3,9

En hembras adultas de las razas cebú, el comportamiento por la jerarquía del hato y el estado fisiológico del animal (celo, parto, amamantamiento) juegan un papel importante en el consumo voluntario y la calidad de la MS a las que tienen acceso, lo que genera una mayor variación entre y dentro de animales en igualdad de disponibilidad forrajera, lo que explicaría observar variaciones de emisión para una misma vaca durante el período de evaluación. Lo anterior sumado a la variación en la oferta de forraje, de acuerdo con la época del año y las condiciones de lluvia intensa en la zona.

Machos en crecimiento en pasturas de Cayman (*Brachiaria híbrido*)

La disponibilidad de forraje en MS, su degradación ruminal a 48 horas, así como los contenidos de PC y FDN se presentan el cuadro 4. Estos son concordantes con los obtenidos por Hernández *et al.* (2014) para la misma pastura.

Cuadro 4. Disponibilidad de materia seca y calidad nutritiva de Cayman. Guápiles, Costa Rica. 2017.

Forraje ofrecido	MS	EB	PC	FDN	Degradación ruminal
	kg MS ha ⁻¹	MJ kg MS ⁻¹	%		
Promedio	6211	18,0	9,6	56,6	59,7
Desviación estándar	2612	0,4	1,9	5,3	4,3

El consumo promedio estimado de MS fue de 12,8 kg MS a⁻¹ d⁻¹, siendo equivalente a 24,0 g kg⁻¹ peso vivo (2,4% PV) semejante al reportado por Detmann *et al.* (2014) de 24,8 y 21,8 g/kg en general y animales en crecimiento respectivamente. Los consumos de MS observados se asociaron a una alta disponibilidad forrajera (3,5 - 4,7 t/ha/pastoreo) durante todo el período de evaluación, al relacionar esta alta oferta de forraje con su calidad, se podría presumir que el potencial de selección de los animales pudo influir en una mejora de la calidad del forraje consumido, especialmente en los contenidos de PC y valores de degradación ruminal.

El factor de conversión de EB consumida a energía liberada en forma de CH₄ en vacas de la raza Brahman en condiciones de trópico muy húmedo y consumiendo pasto Ratana (*I. indicum*) fue de 6,1%, siendo menor al 6,5% que establece IPCC (2006) como promedio para animales en pastoreo. Por otro lado, el factor de conversión de EB consumida a energía liberada en CH₄ para machos en crecimiento de la raza Brahman en condiciones de trópico muy húmedo consumiendo pasto Cayman (*Brachiaria híbrido*) fue de 4,6%, siendo 29,2% menor al que establece IPCC (2006) como promedio para animales en pastoreo e incluso más bajo del 5,5% que establece como límite inferior.

La pastura de pasto Cayman independientemente del manejo, suministró mejor calidad y cantidad de alimento que la de Ratana.

La relación entre el nitrógeno consumido y el excretado concuerda con lo reportado por Moran y Vercoe (2009), que sugieren que el ganado cebú podría tener una mayor digestibilidad verdadera del nitrógeno y un menor metabolismo fecal que las razas originarias de Europa. Así mismo, la proporción de nitrógeno excretado en el presente estudio concuerda con lo reportado por Kennedy (2013). En relación con los valores de carbono excretados, estos concuerdan con los reportados por Pelster *et al.* (2016) en pasturas tropicales del este de África.

Cuadro 5. Estimación de materia seca carbono y nitrógeno, consumidos y excretados. Guápiles, Costa Rica. 2017.

Forraje	MS		C		N	
	Consumo	heces	Consumo	heces	Consumo	Heces
Kg MS a ⁻¹ d ⁻¹						
Promedio	12,8	2,1	5,7	2,1	0,17	0,09
Desviación estándar	2,4	1,0	1,0	0,4	0,03	0,02

De acuerdo con Van Soest (1994) el consumo de forrajes esta inversamente relacionado con el tiempo de retención y la degradación de la MS en el rumen. Por otro lado, se encontraron diferencias en relación con el consumo y tasa de pasaje con animales de diferentes razas, donde la raza Bon (criollo colombiano) obtuvo como norma en varias localidades y calidad de pasturas tropicales un mayor consumo y una menor velocidad de pasaje (Giraldo *et al* 2013).

De acuerdo con Oliveira *et al.* (1980), comparando animales *Bos taurus* y *Bos indicus*, alimentados con pasto Napier (*Pennisetum purpureum*) obtuvo un mayor consumo y producción de heces en animales *B. taurus*, con respecto a los *B. indicus*, no obstante, estos últimos presentaron mayor variación diaria.

El contenido de EB del forraje fue inferior en un 6,6% al sugerido por NRC (2001) de 4,4 Mcal/kg MS y semejante a los valores reportados por Cardona *et al.* (2002) para pasturas tropicales en Colombia y Cota *et al.* (2014) con *Brachiaria brizantha* en Brasil.

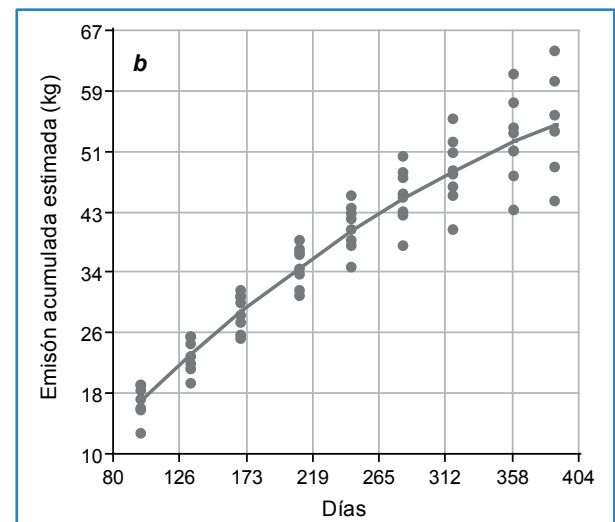
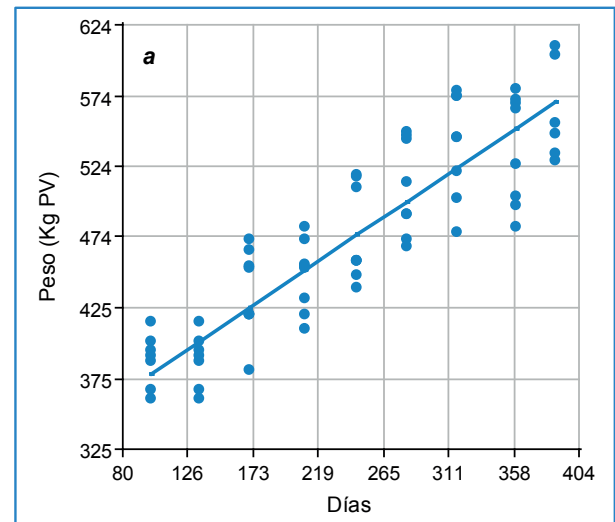
Cuadro 6. Emisión de gramos de metano en machos pastoreando Cayman (*Brachiaria híbrido*) Guápiles, Costa Rica. 2017.

Variable	Unidades	Promedio	Desviación estándar
Consumo de materia seca	Kg/animal/día	12,8	2,4
	% PV	2,6	0,2
Emisión de metano	g/animal/día	168,5	127,7
	g/kg MS	14,5	9,4
Energía bruta convertida a metano	%	4,6	3,0

Los contenidos de EB de los forrajes fueron menores a los indicados en la literatura convencional, basada en dietas con granos y forrajes de otras latitudes.

Aún cuando las emisiones en promedio no fueron elevadas en ninguna etapa de crecimiento de los animales, la conversión de EB a CH₄ fue mayor en etapas tempranas y no fue lineal durante el período de evaluación. La evaluación se realizó en las condiciones más naturales posibles, lo que se refleja en las buenas ganancias de peso obtenidas en los animales en crecimiento alimentados con pasto Cayman y el buen estado de las vacas que consumieron pasto Ratana.

En general, el promedio de emisión diaria por animal para el período estudiado fue bajo. No se observó tendencia o relación significativa entre la emisión y el peso vivo durante el período de crecimiento de los animales. El promedio general para emisión en relación con el consumo de alimento se consideró adecuado.



Incremento de PV (a) y emisión de CH₄ acumulada (b) en función de los días de PRV en pasto Cayman. Guápiles, Costa Rica. 2017.

Durante el período de estudio, se observó una tendencia lineal significativa ($p < 0,0001$) para la ganancia de peso, la cual mantuvo una tasa de incremento de 0,670 kg/día, mientras la emisión de CH₄ acumulada mantuvo una tendencia también significativa incremental pero cuadrática, lo que sugiere que a medida que los animales crecieron y alcanzaron mayor peso y edad, incrementaron la eficiencia de conversión de la energía del pasto. No obstante, es posible que en edades tempranas cercanas al destete, la eficiencia de conversión del pasto sea relativamente baja, produciendo mayor cantidad de CH₄ en relación con el consumo de MS y al PV, sugiriendo la posibilidad de que a estas edades iniciales, los animales Brahman no aprovechan eficientemente la energía suplida por el pasto en condiciones tropicales.

LITERATURA CITADA

- Abarca, S. 2013. Cambio climático y mitigación en fincas lecheras. *Revista Universidad Técnica Nacional* 15(63):28-31.
- Abarca, S. 2014. Servicios eco sistémicos en fincas ganaderas. *Biodiversidad: Fauna* (en línea). Horizonte Lechero. 3 ed. Ciudad, país. Paginación. Consultado 20 mar. 2017. Disponible en https://issuu.com/proleche/docs/revista_horizonte_diciembre_2014
- Cardona, M; Sorza, J; Posada, S; Carmona, J; Ayala, S; Alvarez, O. 2002. Establecimiento de una base de datos para la elaboración de tablas de contenido nutricional de alimentos para animales (en línea). *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 15(2):240-246. Consultado 20 mar. 2017. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3242962>
- Cicerone, R; Oremland, R. 1988. Biogeochemical aspects of atmospheric ethane. *Global Biogeochem* (en línea). *Cycles* 2:299-327. Consultado 20 mar. 2017. Disponible en http://web.altagenetics.com/mexico/DairyBasics/Details/9486_Ganaderia-bovina-y-emision-de-gases-de-efecto-invernadero.html
- Cota, O; Figueiredo, D; Branco, R; Magnani, E; Ferreira, C; Freitas, L; Zerlotti, M. 2014. Methane emission by Nelore cattle subjected to different nutritional plans (en línea). *Tropical Animal Health and Production* 46(7):1229-1234. Consultado 20 mar. 2017. Disponible en <https://link.springer.com/article/10.1007/s11250-014-0632-3>
- Detmann, E; Valente, E; Batista, E; Huhtanen. 2014. An evaluation of the performance and efficiency of nitrogen utilization in cattle fed tropical grass pastures with supplementation (en línea). *Livestock Science* 162:141-153. Consultado 20 mar. 2017. Disponible en [http://www.livestockscience.com/article/S1871-1413\(14\)00083-3/pdf](http://www.livestockscience.com/article/S1871-1413(14)00083-3/pdf)
- Friedrich-Wilhelm, G; Werner, P. 2008. Climate development in the last century-global regional. *International Journal of Medical Microbiology* 298:5-11.
- González, BF; Rodríguez, H. 1999. Proyección de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), Colombia 1998-2010. *Revista Académica Colombiana de Ciencias* 23(89):497-505.
- Giraldo, L; Carulla, J; Calle, M. 2013. Metabolismo digestivo de razas bovinas (bon, Holstein, cebú) en pasturas tropicales de calidad contrastante. *In: Consideraciones sobre el mejoramiento genético y factores asociados en bovinos criollos colombianos y grupos multirraciales*. Campos, R; Durán, CV (eds.). Bogotá, Colombia. p.103-127.
- Hegarty, R. 1999. Mechanisms for competitively reducing ruminal methanogenesis. *Australian Journal of Agricultural Research*. 50(8):1299-1305.
- Hernández, M; Abarca, S; Soto, R. 2014. Evaluación de pasto *Brachiaria* híbrido cv Cayman, en pastoreo en el trópico muy húmedo de Costa Rica. *Revista Universidad Técnica Nacional* 16(70):48-54.
- Holdridge, L 1978. *Ecología basada en zonas de vida*. San José, Costa Rica. 216 p.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, CR). 2014. VI Censo Nacional Agropecuario (en línea). San José, Costa Rica. Consultado 19 may. 2016. Disponible en <http://inec.cr/censos/censo-agropecuario-2014>
- INTA (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria). 2015. Determinación de la emisión de metano en novillos Brahman en el ecosistema de bosque seco tropical de Costa Rica Montenegro, J; Barrantes, E (eds.). (Informe). INTA/UGIT. 23p.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático), 2006. Directrices para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (en línea). *In Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra*. Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol (Cap.10). Hayama, Japón. 10.31-10.34. Consultado 20 mar. 2017. Disponible en <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático), 2014. Cambio climático 2014: Informe de síntesis. (en línea). *In Pachauri, RK; Meyer, LA* (eds.). Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza, 157 p. Consultado 20 mar. 2017. Disponible en https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- Johnson, K., Johnson, D. 1995. Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science* 73:2483-2492.
- Kennedy, WK. 2013. Nitrogen Metabolism in *Bos indicus* and *Bos taurus* cattle consuming low – quality forage. Tesis Mag. Sc. Texas, Estados Unidos de América. Texas A&M University. 76 p.

- Lascano, CE; Cárdenas, E. 2010. Alternatives for methane emissions mitigation in livestock systems. *Revista Brasileira de Zootecnia* 39:175-182.
- Mejía, HJ. 2002. Consumo voluntario de forrajes en pastoreo. *In Acta Universitaria* 12(3):56-65. Irapuato México. Universidad de Guanajuato. Instituto de Ciencias Agrícolas.
- MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía). 2014. Inventario nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono 2010. San José, Costa Rica. 64 p.
- Montenegro, J; Abarca S. 2001. Importancia del sector agropecuario costarricense en la mitigación del calentamiento global. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica. 96 p.
- Moran, JB; Vercoe, J.E. (2009). Some factors affecting apparent nitrogen digestibility of roughage diets fed to cattle. *The Journal of Agricultural Science* 78(2):173-177.
- Moss, A; Jouany, J; Newbold, J. 2000. Methane production by ruminants: its contribution to global warming. *Animal. Zootechnique* 49:231-253.
- MPI (Ministry for Primary Industries New Zealand). 2014. Guidelines for use of sulphur hexafluoride (SF6) tracer technique to measure enteric methane emissions from ruminants. 166p. Consultado 16 mar. 2018. Disponible en <https://globalresearchalliance.org/wp-content/uploads/2012/03/SF6-Guidelines-all-chapters-web.pdf>
- Moysés, C. 2007. Emissão de metano por bovinos Nelore ingerindo *Brachiaria brizantha* em diferentes estádios de maturação. Tesis Mag. Sc. Sao Paulo, Brasil. Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo. 67 p.
- Niggli, U; Fliebbach, A; Hepperly, P; Scialabba, N. 2009. Low Greenhouse gas Agriculture: Mitigation and adaptation potential of sustainable farming systems. *FAO Review* (2009) Roma (Italia). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (en línea). Consultado 12 jun. 2018. Disponible en <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/010/ai781e/ai781e00.pdf>
- NRC (National Research Council), 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. Ciudad, Estados Unidos de Norte América. 353 p.
- Oliveira, M; Veiga, J; Rocha, U. 1980. Estudo comparativo da ingestão de alimentos eliminacao fecal em *Bos taurus e Bos indicus*. *Revista Facultada de Veterinaria, Universidad Sao Pablo* 17: 19-27.
- Orskov, ER; Hovell, RO; Mould, F. 1980. Uso de la técnica de la bosa de nylon para la evaluación de los alimentos. *Producción Animal Tropical* 5(3):213-233.
- Pedreira, M; Primavesi, O; Aparecida Lima, M; Frighetto, R; de Oliveira, S; Berchielli, T. 2009. Ruminant methane emission by dairy cattle in Southeast Brazil. *Scientist Agriculture* 66(6):742-750.
- Pelster, D; Gisore, B; Koske, J; Goody, J; Korir, D; Rufino, D; Butterbach-Bahl, K. 2016. Methane and nitrous oxide emission from cattle excreta on an East African grassland. *Journal Environmental Quality* 45(5):1531-1539.
- Primavesi, O; Shiraishi, R; Pedreira, M; de Lima, M; Berchielli, T; Barbosa, P. 2004. Metano entérico de bovinos leiteiros em condições tropicais brasileiras. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 39(3):277-283.
- Ribeiro PLG; Machado FS; Campos MM; Guimaraes RG; Tomich TR; Larissa G Reis LG; Pharm; Cassius C. 2015. Enteric methane mitigation strategies in ruminants: a review. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 28:124-143.
- RNC (National Research Council), 2000. Agriculture Nutrient. Subcommittee on Beef Cattle Nutrition Committee on Animal Nutrition Board on Requirements of Beef Cattle. 7th Ed. National Academies Press, Washington, D.C, Estados Unidos de Norte América. 232 p.
- Shallcross, D; Khalil, M; Butenhoff, C. 2007. The atmospheric methane sink. *In Greenhouse Gas Sink*. Reay, DS; Hewitt, CN; Smith, KA; Grace, J. (eds.). Wallingford, UK. CAB International.
- Sorio, H. (2012). Pastoreo Voisin. Teorías-Prácticas-Vivencias (3 ed.). Passo Fundo: Meritos. Brasil. 298 p.
- Van Soest, P. 1994. Nutritional Ecology of the Ruminant. 2 ed. Ithaca. New York Comstock Cornell University Press. 476p.
- Villalobos, E. 2010. Respuesta del pasto *Ratana (Ischaemum indicum)* a la fertilización nitrogenada y edad de rebrote. Tesis Ing. Agr. San Carlos, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 45 p.
- Westberg, HH; Johnson, KA; Cossalman, MW; Michal, JJ. 1998. A SF6 tracer technique: methane measurement from ruminants. Washington State University. Pullman, Washington, Estados Unidos de América. 40 p.

CARBONO ORGÁNICO, NITRÓGENO Y DENSIDAD APARENTE EN SUELOS DE FINCAS CON GANADERÍA BOVINA DE CRÍA

Sergio Abarca-Monge¹, Roberto Soto-Blanco¹, Francisco Arguedas-Acuña¹

RESUMEN

Carbono orgánico, nitrógeno y densidad aparente en suelos de fincas con ganadería bovina de cría. Las pasturas tienen un alto potencial de remoción de carbono cuando son manejadas adecuadamente. En Costa Rica, hay poca información sobre los contenidos de carbono (C) y nitrógeno (N) del suelo, así como sobre el nivel de compactación con respecto a la vegetación natural en las pasturas. Entre febrero 2015 y abril 2017, se realizaron muestreos de suelos a 10 cm de profundidad para observar la concentración de C y N, la Masa de Carbono Orgánico del Suelo (COS) y Nitrógeno Total (N_t), así como la Densidad Aparente (Da) entre 0 y 10 cm de profundidad en 38 fincas de ganadería bovina de cría, distribuidas en todo el país con diferentes grados de pendiente. No se observaron diferencias para las concentraciones de C y N en bosque en relación con la pendiente. Aunque en suelos con pasturas se observaron diferencias con promedios de 1,96, 1,40 y 1,32 % C para pendientes planas, onduladas y quebradas respectivamente. La concentración de N y la Da mostraron diferencias entre bosque (0,38 % y 1,02 g.cm⁻³) y pastura (0,27 % y 0,93 g.cm⁻³). Se concluye que los contenidos de COS son semejantes en pasturas y bosque, donde los contenidos de N y la Da influyen de manera importante en la relación carbono: nitrógeno (C:N) de la pastura.

Palabras clave: pasturas tropicales, densidad aparente, carbono del suelo.

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, normalmente las remociones de carbono atmosférico se asocian al crecimiento de árboles, en bloques forestales que por lo general son de una misma especie exótica y al crecimiento sucesional en su estado de bosque secundario. No obstante, algunas experiencias de remoción de carbono en fincas ganaderas sugieren que el suelo, bajo un manejo de pasturas adecuado, sería la

mejor fuente de remoción de C de estos sistemas de producción (Abarca 2016). Estudios recientes indican que a nivel global, el solo reducir las emisiones de Gases con Efecto Invernadero (GEI), bajo los esquemas de negocios de la vida moderna actual no es viable, se requiere una remoción extensa de carbono atmosférico a corto plazo para mantener el calentamiento global a niveles menores

1 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. sabarca@inta.go.cr, rsoto@inta.go.cr, farguedas@inta.go.cr

de 2 °C según lo previsto en el Acuerdo de París. La mejor alternativa, aunque insuficiente, incluye la captura de carbono en los sistemas agrícolas mediante la fertilización nitrogenada y la intensificación del riego (Boysen *et al.* 2017).

Por otra parte, FAO (2002), indica que hay más cantidad de C en el primer metro de suelo, que en toda la biomasa terrestre y que este puede acumularse o mineralizarse de acuerdo a su manejo. En los suelos, se encuentran tanto las formas orgánicas como las inorgánicas del C; lo habitual es que el uso y la gestión de la tierra (manejo) tengan un impacto mayor sobre los depósitos de C orgánico. En consecuencia, los métodos que se utilizan en las determinaciones de C en suelos, son dirigidos al C orgánico (IPCC 2006). El manejo de las coberturas del suelo tiene incidencia en los contenidos de COS a través de los cambios en la existencia de C, producto de los aportes de la materia orgánica. Se ha observado que los suelos convertidos a pasturas perennes bien manejadas, incrementan los contenidos del carbono orgánico (Guo y Gifford 2002). En sistemas silvo-pastoriles de España Scott *et al.* (2011), encontraron cantidades de COS entre 20,0 a 41,2 t.ha⁻¹, en los primeros 25 cm de profundidad, donde los agregados de 250 a 2000 μm fueron los que retuvieron más carbono.

En la zona tropical muy húmeda de Costa Rica, se han encontrado diferencias en los contenidos de carbono orgánico en el perfil del suelo, entre pasturas nativizadas (*Axonopus*) y mejoradas (*Brachiaria sp.*);

así como entre órdenes de suelo contrastantes (Andisol e Inceptisol) (Veldkamp 1994). Más recientemente, en la misma zona de vida, se ha observado en pasturas de Cayman®, que el pastoreo con periodos adecuados de rebrote (42-45 días) y de ocupación cortos (2-3 días máximo), incrementaron rápidamente los contenidos de C (Hernández *et al.* 2014). A pesar del potencial de remoción de C en suelos bajo pasturas, un sondeo realizado en el 2013 (INTA-CORFOGA 2014), mostró que el 81% de las muestras tomadas en pasturas, presentaron contenidos bajos de carbono en suelo.

Recientemente, Costa Rica ha inscrito ante la Convención de Cambio Climático de Naciones Unidas, la Acción de Mitigación Nacionalmente Adecuada (NAMA) en ganadería bovina (Costa Rica 2015). Observando un alineamiento con la carbono neutralidad que ha sido la forma costarricense de realizar la mitigación; entendida bajo la definición de la norma INTE 12-01-06:2011 (INTECO 2011), que permite relacionar las remociones de carbono y emisiones de GEI de las organizaciones productivas para establecer un resultado neto en Dióxido de Carbono Equivalente (CO₂ e), en este caso en los terrenos de fincas ganaderas, donde hay bosques, árboles dispersos y suelos gestionados con gran potencial de retener carbono, estableciendo un balance entre las emisiones de GEI y las remociones de carbono.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron 38 fincas ganaderas de cría de ganado bovino, distribuidas en 19 cantones rurales de las siete provincias de Costa Rica, cuyos suelos pertenecen a los órdenes: Inceptisol (18), Ultisol (12), Andisol (4) y Alfisol (4). En todas las fincas se estudiaron dos coberturas de suelo (bosque y pasto), con diferentes topografías, altitudes y regímenes de precipitación; valoradas por técnicos de la Corporación de Fomento Ganadero (CORFOGA),

el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA); con un manejo adecuado de pasturas dentro del entorno de cada sitio. En las mismas se tomaron muestras de suelo para la determinación de la concentración de C y N, la masa de carbono orgánico del suelo (COS), el N_t, y la Da.

Cuadro 1. Altitud, precipitación y topografía de las fincas evaluadas. Costa Rica. Febrero 2015 y abril 2017.

Altitud (msnm)	Precipitación (mm)	Topografía			Total
		Plana	Ondulada	Quebrada	
0-500	1500-2000	1		2	3
	2000-2500	4		1	5
	2500-3000		1	1	2
	3000-3500	5			5
	3500-4000	1	3	1	5
	4000-4500	2	1		3
500-1000	2000-2500		1		1
	2500-3000		3	2	5
	3500-4000		2	3	5
	>4500	1	1		2
1000-1500	2000-2500			1	1
1500-2000	2500-3000			1	1
Total de fincas		14	12	12	38

Los muestreos se realizaron siempre en la época de menor precipitación, entre febrero 2015 y abril 2017. Dado que las fincas tenían diferente grado de pendiente, se procedió a valorar la topografía presente utilizando el cuadro 2, donde se indican los rangos de pendiente normalmente utilizados por los ganaderos para uso del pastoreo, con un sentido más fisiográfico de acuerdo con ecólogos del calibre de Odum, Barret, Holdridge y Tosi.

Cuadro 2. Escala de pendientes para evaluar la topografía en fincas ganaderas. Costa Rica. Febrero 2015 y abril 2017.

Tipo	Pendiente %
Plano	0-10
Ondulado	10-25
Quebrado	> 25

Adaptado de: INTA CORFOGA 2013 y Abarca 2018.

Las muestras para la determinación de la concentración de C y N, se tomaron con barreno a 20 cm de profundidad. Los análisis de laboratorio se realizaron en el laboratorio de suelos del INTA y de la Universidad de Costa Rica. Para la estimación de la Da se utilizó la técnica del cilindro, de acuerdo con la metodología descrita por Alvarado y Forsythe

2005, utilizando cilindros de 5 cm de largo y 5 cm de diámetro en forma vertical, después de remover la hojarasca. Para la determinación del C y N, se utilizó el método de Dumas (combustión).

Estimación de la cantidad de COS

Para la estimación del carbono de suelo por hectárea, en una lámina de 10 cm de suelo, se siguió el procedimiento establecido por Veldkamp (1994), para suelos y zonas de vida tropicales, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$COS = Cs * Ls * Da * 104$$

Donde:

COS = Carbono Orgánico Suelo ($t \cdot ha^{-1}$)

Cs = Contenido de carbono en el suelo (g.g)

Ls = Lámina de suelo (cm)

Da = Densidad Aparente ($g \cdot cm^{-3}$)

Para obtener el dióxido carbono equivalente ($CO_2 e$), se utilizó la conversión en función de los pesos moleculares del CO_2 y el C (44/12).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La concentración de C no varió significativamente entre los suelos cubiertos con bosque secundario y pastura, el promedio fue de 1,61 %. En relación con la topografía, no se obtuvieron diferencias en el bosque, aunque se observó una tendencia a la reducción en los sitios quebrados, sin embargo, las pasturas en sitios planos ($1,96 \pm 1.71$ %) presentaron diferencias ($p < 0,1$) con respecto a lugares ondulados ($1,40 \pm 0.45$) y quebrados ($1,32 \pm 0.44$); (ver Cuadro 2). La concentración de N fue significativamente mayor ($p < 0,05$) en el bosque que en la pastura y no presentó variación en relación con la topografía para ninguna de las dos coberturas del suelo. Con respecto a la relación C: N, no se obtuvieron diferencias entre el bosque y las pasturas, ni en topografía dentro de las coberturas. Sin embargo, se observó una tendencia hacia el incremento en la pastura, para las tres topografías descritas. La cantidad de COS a 10 cm de profundidad presentó diferencias significativas ($p < 0,001$) entre coberturas y no con respecto a la topografía dentro de las coberturas. La Da varió significativamente ($p > 0,001$) entre coberturas; el bosque presentó diferencias en relación con la topografía y los sitios ondulados y planos, tuvieron la menor compactación ($0,82 \pm 0,24$ y $0,96 \pm 0,15$ g.cm^{-3} respectivamente) mostrando diferencia ($p > 0,05$) con los sitios quebrados ($1,07 \pm 0,14$ g.cm^{-3}).

Trabajos realizados por Oliva *et al* 2017, reportan contenidos más altos (3,29 %) de C que los observados en este trabajo, en sistemas silvopastoriles con *Pinus patula* y forrajes nativos de Perú. En Costa Rica, Weintraub *et al* 2016, trabajando en los bosques de la parte sur del lado del Pacífico de la cordillera de Talamanca, observó que a medida que se sube en la cordillera, se incrementan las concentraciones de C y la relación C:N; el N también se incrementa pero más levemente que el carbono. Así mismo, la relación C:N declina conforme aumentan la temperatura y la precipitación, variables climáticas que aumentan conforme se desciende en altura sobre el nivel del mar, en la región donde se realizó la investigación. En relación a la densidad aparente, Scott *et al* 2011 en sistemas silvopastoriles de Extremadura en España, a una profundidad entre 0-25 cm en suelos con 60 % de limo, reporta valores de $1,30$ g.cm^{-3} , siendo más altos que los

observados en esta investigación para pasturas. No obstante, Hernández *et al* 2014, bajo condiciones de trópico muy húmedo de Costa Rica en pasturas mejoradas y bien manejadas, obtuvieron valores de C, Da y COS concordantes con los obtenidos en este estudio. Así mismo, Ibrahim *et al* 2006, en fincas ganaderas de Costa Rica y Nicaragua, tampoco observaron diferencias entre el bosque secundario y las pasturas con especies mejoradas.

Posiblemente la cantidad de COS no mostró diferencias entre coberturas, debido a que la Da fue mayor en el suelo con pastura y la concentración de C, aunque no estadísticamente significativa, fue lo suficientemente mayor en el bosque para igualar los valores promedio. En concordancia con lo anterior, en la pastura se obtuvo una correlación negativa (-0,85) altamente significativa ($p < 0,001$), indicando que una menor concentración de N produjo una relación C:N mayor, lo que sugiere una menor actividad biológica con respecto al bosque, favoreciendo el almacén de C en suelos con pasturas entre 0-10 cm de profundidad.

Cuadro 3. Concentración de C, N, Relación C:N y cantidad de COS; en suelos de fincas de ganadería bovina de cría en Costa Rica. Febrero 2015 y abril 2017.

Variable	Cobertura	Promedio	LI	LS
Carbono (%)	Bosque	1,74 a	1,50	1,97
	Pastura	1,67 a	1,46	1,87
Nitrógeno (%)	Bosque	0,38 a	0,27	0,49
	Pastura	0,27 b	0,23	0,32
Relación C:N	Bosque	5,76 a	4,48	7,04
	Pastura	6,83 a	5,77	7,89
COS (t.ha⁻¹)	Bosque	15,9 a	14,0	17,8
	Pastura	16,6 a	14,6	17,8
D. Aparente (g.cm⁻³)	Bosque	0,93 a	0,85	1,02
	Pastura	1,02 b	0,98	1,05

Promedios con letra común dentro de una misma variable no son significativamente diferentes ($p > 0,05$). Límites Inferior y Superior del intervalo de confianza α 0,95 % de la media.

En conclusión, las diferencias entre bosque y pastura para las variables estudiadas, se obtuvieron básicamente en la concentración de N y la Da. Aunque no se obtuvieron diferencias significativas en la relación C:N, se observó una tendencia a ser

mayor en la pastura, lo que sugiere un potencial para retener más carbono que el bosque; no obstante, podría ser la mayor limitante para el incremento de productividad de las especies forrajeras que componen las pasturas de este tipo de ganadería

LITERATURA CITADA

- Abarca, S. 2016. Emisión de gases de efecto invernadero y absorción de carbono en fincas ganaderas. *Revista Alcances Tecnológicos* 11(1):71-73.
- Abarca, S. 2018. Capacidad de carga de la finca ganadera bovina. *Revista Universidad Técnica Nacional*. 20 (81):22-25.
- Alvarado, A; Forsythe, W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica (en línea). *Agronomía Costarricense* 29(1):85-94.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2015. NAMA Ganadería. San José, Costa Rica. 27p.
- Boysen, L; Lucht, W; Gerten, D; Heck, V; Lenton, T; Joachim Schellnhuber, H. 2017. The limits to global-warming mitigation by terrestrial carbon removal (en línea). *Earth's Future Journal* 5 (5):417-536. Consultado 5 may. 2017. Disponible en <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016EF000469/full>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra (en línea). Informe sobre recursos mundiales de suelos. N° 96. ISSN 1020-430-X. 61 p. Consultado 18 abr. 2018. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/005/Y2779S/y2779s00.htm>
- Guo, L.; Gifford, R. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis. *Global Change Biology* 8(4):345-360.
- Hernández, M; Abarca, S; Soto, R. 2014. Evaluación de pasto *Brachiaria híbrido* cv Cayman, en pastoreo en el trópico muy húmedo de Costa Rica. *Revista Universidad Técnica Nacional* 16(70):48-54.
- INTECO (Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica). 2016. Gases de efecto invernadero. Parte 1: especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero. Sistema de gestión para demostrar la C-Neutralidad. Requisitos. Norma: INTE/ISO 14064-1:2006. San José, CR. 33p.
- INTA (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria); CORFOGA (Corporación de Fomento Ganadero). 2014. Informe 2013. valoración servicios ecosistémicos en fincas ganaderas de cría. San José, Costa Rica. 21p.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2006. Pastizales (en línea). *In: Directrices para los inventarios nacionales de gases efecto invernadero. Agricultura, silvicultura y otros usos de la Tierra. Capítulo 6.* Consultado 18 abr. 2018. Disponible en http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_06_Ch6_Grassland.pdf
- Oliva, M.; Culqui, L.; Leiva, S.; Collazos, R.; Salas, R.; Vásquez, H.; Maicelo, J. 2017. Reserva de carbono en un sistema silvopastoril compuesto de *Pinus patula* y herbáceas nativa (en línea). *Scientia Agropecuaria* 8(2):149 – 157. Consultado 18 abr. 2018. Disponible en <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>
- Scott, D; Moreno, G; Mosquera M. R; Nair, K.P Nair, V. 2011. Soil carbon storage as influenced by tree cover in the Dehesa cork oak silvopasture of central-western Spain. (en línea). *Journal of Environmental Monitoring* 13:1897. Consultado 18 abr. 2018. Disponible en <http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2011/EM/c1em10059a#divAbstract>
- Veldkamp, E. 1994. Organic carbon turnover in three tropical soil under pasture after deforestation. *In: soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropic of Costa Rica.* Tesis Ph.D. Wageningen, Holanda, Wageningen University. 117 p.
- Weintraub, S; Cole, R; Schmitt, C; All, J. 2016. Climatic controls on the isotopic composition and availability of soil nitrogen across mountainous tropical forest. *Ecosphere* 7(8):1-13.

MOMENTO ÓPTIMO DEL DÍA PARA MUESTREAR ÓXIDO NITROSO EN EL TRÓPICO MUY HÚMEDO DE COSTA RICA

Francisco Arguedas-Acuña¹; Jorge Jiménez-Araya²; Sergio Abarca-Monge¹

RESUMEN

Momento óptimo del día para muestrear óxido nitroso en el trópico muy húmedo de Costa Rica.

El objetivo del estudio fue cuantificar el patrón diario de emisiones de óxido nitroso (N₂O) en una pastura de *Brachiaria* híbrido cv Cayman, en condiciones de pastoreo, en la Estación Experimental Los Diamantes (Guápiles, Costa Rica). Las mediciones se realizaron en setiembre del 2015 con 8 cámaras estáticas, durante 6 días, con muestreos repetitivos cada dos horas (7), distribuidos entre las 6 y las 18 horas. La emisión de N₂O presentó una distribución sesgada a la derecha con una media de $0,12 \pm 0,17$, equivalente a $10,62 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y una mediana de $0,06 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. El patrón de emisión de N₂O a lo largo del día fue heterogéneo con valores entre 0,09 a $0,17 \text{ mg N}_2\text{O m}^{-2}$. La emisión de N₂O, se analizó mediante un modelo lineal mixto asumiendo una distribución Lognormal. Los promedios por hora mostraron un patrón no lineal, con un ligero descenso entre las 6 y 8 horas, seguido de una tendencia ascendente hasta las 16 horas, para volver a disminuir hasta las 18 horas. Las mayores emisiones por hora fueron de 0,06 (14 horas) y de 0,07 (16 horas) $\text{mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$; que difirieron significativamente ($p < 0,05$) con respecto a las horas de la mañana (de las 6 a las 10 horas). También hubo una variación significativa en los patrones de emisión en tiempo de diferentes días y cámaras. Se concluyó que para el sitio evaluado, no hay un tiempo único de mayor emisión de N₂O. Esto sugiere que, para fines prácticos, se puede usar un rango de medición de emisiones entre las 10 y las 16 horas.

Palabras clave: Gases Efecto Invernadero, Óxido Nitroso, Pastoreo Bovinos, Pastos, Trópico muy Húmedo.

La investigación, se enmarcó dentro del proyecto denominado “Desarrollando sistemas de producción ganaderos competitivos con bajas emisiones de gases de efecto invernadero en América Central”, financiado por FONTAGRO-Nueva Zelanda y liderado para Centroamérica por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) (CATIE 2015).

- 1 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. Edafólogo Investigador en Cambio Climático farguedas@inta.go.cr, Coordinador Cambio Climático sabarca@inta.go.cr.
- 2 Universidad Nacional, Escuela de Medicina Veterinaria. Estudiante de Posgrado Producción Animal. jmnzaraya@gmail.com

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, la ganadería de carne representa el rubro económico más importante del sector agropecuario. Se considera una actividad estratégica por su condición de proveedora de alimentos básicos para la población. Además, ocupa una gran parte del recurso tierra, ya que el 69 % de las áreas de suelo agropecuario se encuentran bajo pasturas permanentes (Holmann *et al.* 2007).

Según datos del Censo Agropecuario Nacional (INEC 2015), en nuestro país se registran 1 278 817 millones de cabezas vacunos, de las cuales el 42,1 % están dedicadas a la producción de carne y 32,0 % al doble propósito. Asimismo, un 43,4 % del territorio nacional, corresponde a pasturas.

A nivel mundial, el sector pecuario representa una fuente significativa de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), al generar dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nítrico (N₂O) a lo largo del proceso productivo. El ganado contribuye con el cambio climático al emitir GEI, sea directamente, por ejemplo a través de la fermentación entérica o el estiércol; o indirectamente a través de las actividades desarrolladas para la producción de granos, necesarios para elaborar los piensos y la conversión de bosques en pastizales (Steinfeld *et al.* 2009).

El óxido nítrico es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 310 veces mayor al dióxido de carbono y su permanencia en la atmósfera es de 130 años (Di y Cameron 2006). En magnitud, el N₂O ocupa el tercer lugar en cuanto a emisión de los gases de efecto invernadero que se emiten a la atmósfera, provenientes de los procesos de producción animal (Abarca 2013).

Según Oenema *et al.* (2005), se estima que entre el 30 y 50 % de las emisiones de N₂O globales en agricultura, provienen de los desechos de la producción animal, que contribuyen aproximadamente con 1,5 Gt del gas emitido. De este total, un 41 % proviene de la orina y heces de animales en pastoreo, que no se utilizan o cuantifican como fertilizantes ni se tratan de manera alguna, sino que quedan depositados sobre las pasturas o campos naturales. Otro 27 % proviene de fuentes indirectas mediante la volatilización, que en parte entran a la

atmósfera en forma de amoníaco y óxidos de nitrógeno; y luego retorna a los suelos por deposición atmosférica, aumentando así la producción de óxido nítrico. Un 19 % proviene de residuos de animales en los establos y lugares de acumulación, otro 10 % por aplicación de los desechos animales a la tierra, y un 3 % por la combustión de las heces. Según el mismo estudio, en lo que se refiere a los animales, la ganadería bovina de carne aporta el 44 % de las emisiones, seguido por el ganado bovino lechero con el 16 %, ovinos con el 12 %; porcinos con 9 % y aves con el 6 %.

La producción de N₂O está influenciada por múltiples variables como la temperatura, la humedad, la disponibilidad de O₂ y el sustrato. Todos estos factores están regulados por el clima, la vegetación, las propiedades físicas y químicas del suelo (densidad aparente, Carbono orgánico, pH y contenido de arcilla), y las prácticas de manejo agrícola (Chen *et al.* 2008 y Matthews *et al.* 2010).

Estudios en Costa Rica, reportaron resultados variables de emisión de N₂O (Veldkamp *et al.* 1998 y Montenegro y Abarca 2001) en función del tipo de pastura y del manejo. Veldkamp *et al.* (1998), citan promedios anuales de 2,67 kg ha⁻¹ para pasturas tradicionales de ratana (*Ischaemun indicum*), 4,88 kg ha⁻¹ para pasturas combinadas de gramínea (*Brachiaria brizantha*) y leguminosa (*Arachis Pintoii*) y 25,82 kg.ha⁻¹ en pasturas de *Brachiaria decumbens* fertilizadas. Montenegro y Abarca (2001), también encontraron variaciones en la emisión de N₂O por año según el tipo de pasto, de 3,14 kg ha⁻¹ para pasto estrella africana (*Cynodon plecostachyus*), de 2,28 kg ha⁻¹ para el pasto ratana (*Ischaemun indicum*), de 6,80 kg ha⁻¹ para el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y 3,44 kg ha⁻¹ en pasturas de jaragua (*Hyparrhenia rufa*).

Veldkamp *et al.* (1998), mencionan que los factores ambientales son más determinantes que las formas de N del fertilizante en las emisiones de N₂O por las pasturas, por lo tanto, para estimar las emisiones en la agricultura tropical, la estratificación según el régimen de humedad del suelo es más útil que la estratificación de acuerdo a la composición del fertilizante.

En el trópico, se cuenta con poca información precisa sobre gases de efecto invernadero. Este estudio tuvo como objetivo estudiar el patrón diario

de éstas emisiones y establecer el momento del día más propicio para obtener mediciones representativas del flujo promedio diario de la emisión de N_2O .

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de la investigación

El estudio se llevó a cabo en el área de ganadería de la Estación Experimental Los Diamantes (EELD), ubicada en Guápiles, cantón de Pococí, provincia Limón. Según clasificación de Holdridge (1978), la estación se ubica en la zona de vida Bosque Muy Húmedo Tropical Basal, con una precipitación anual de 5585 mm y una temperatura diaria promedio de 25,0 °C. para el año 2015.

De acuerdo con Veldkamp (1993), el suelo del área de la investigación en la Estación Experimental Los Diamantes se denomina Eutric Hapludands, con características ándicas bien desarrolladas, buen drenaje y fertilidad, con un horizonte A de 25 a 45 cm de grosor y un horizonte B con textura franca o franco arenosa.

Mediciones de óxido nítrico

Las mediciones se realizaron en una pastura de *Brachiaria* híbrido cv Cayman de 5 hectáreas, con 21 apartos de 2720 m² cada uno. La pastura se estableció en el 2012 con semilla sexual certificada y manejada mediante pastoreo racional (Voisin), con 2 a 3 días de ocupación y 47 días de rebrote, utilizando una carga animal que osciló entre 2,0 y 3,0 UA.ha⁻¹.año⁻¹.

Para realizar las mediciones de N_2O , se utilizó la técnica de cámaras estáticas (unidades desarmables conformadas por una base o parte inferior que se introduce en el suelo y una tapa o parte superior que posee un termómetro y un punto para muestreo de los gases), de acuerdo con la metodología

descrita por Klein y Harvey (2012). Se utilizaron 8 cámaras cilíndricas confeccionadas en acero inoxidable, cuya parte superior tiene un diámetro de 40 cm y una altura de 38 cm, con una tapa acrílica transparente que permite observar la escala del hidrotérmetro, un punto central para el muestreo y carece de ventilación interna. La otra parte es una base de metal que consta de un anillo con 6 tornillos y una aleta o lámina de acero inoxidable circular de 10 cm de largo, soldada al anillo.

Para realizar el muestreo, 24 horas antes del primer día de medición, se introdujeron en el suelo de la pastura seleccionada, las bases o parte inferior de las cámaras estáticas al azar, a 10 cm de profundidad en el área de un aparto.

Se realizaron muestreos repetidos durante una hora tomando tres muestras por cada cámara en tres tiempos diferentes (0, 20 y 40 minutos). Una vez concluida la hora de muestreo, se retiró la parte superior de las cámaras (no así las bases) con el fin de liberar el gas acumulado, repitiendo el mismo procedimiento una hora después y así sucesivamente durante 6 días de muestreo (2 semanas no consecutivas, con 3 días seguidos por semana).

En el día 1 de las mediciones, se colocaron termómetros en el suelo a la par de las cámaras número 1 y 8, con el objetivo de medir la temperatura interna del suelo. Al momento de iniciar la medición (t_0), se colocó la parte superior de la cámara sobre el anillo y se atornilló rápidamente; mientras ocurría esto, se procedió a tomar la muestra ambiente con una jeringa plástica individual (testigo a t_0) y la muestra interna de gas al t_0 de la cámara número 1, después de mezclar el aire interno de la cámara

mediante la succión y expulsión hacia dentro de la cámara con la jeringa de 50 ml que está conectada al punto de muestreo. Este proceso se repite entre 6 y 7 veces, de tal forma que en la última absorción no se expulsa el aire, se conserva dentro de la jeringa y se cierra el conducto hacia la cámara. Parte de la muestra de gas extraído (20 a 30 ml), se pasa a un vial al vacío devolviendo a la cámara el gas remanente no utilizado en la jeringa. Los viales con gas se mantienen en un recipiente a temperatura controlada (10-15°C), los cuales posteriormente se llevan al laboratorio para su respectivo análisis.

Transcurridos de 2,0 a 2,5 minutos, se debe realizar el mismo proceso para la cámara número 2 y así sucesivamente hasta concluir en la cámara número 8, momento donde termina el primer periodo de muestreo (t_0); paralelamente se registró la hora exacta cuando se colocó la parte superior de la cámara sobre el anillo de cada una de las bases, con el fin de no superar los 20 minutos entre el muestreo de la cámara número 1 y la número 8.

EL segundo periodo de muestreo (t_{20}) inicia en la cámara número 1, a los 20 minutos exactos después de haber tapado esa cámara. Antes de que se cumpla el tiempo, se toma la muestra ambiente nuevamente (testigo a t_{20}) y tomamos también la muestra t_{20} de la cámara número 1, al tiempo justo. Se siguen tomando las muestras del t_{20} de las demás cámaras hasta la número 8, tratando de hacerlo a los 20 minutos exactos de la anterior muestra (t_0). Se procede igual para el tercer periodo muestreo a los 40 minutos (t_{40}), con todas las cámaras utilizadas (no olvidando tomar al inicio la muestra ambiente). El proceso se realizó por dos o más personas, para poder cumplir con los tiempos establecidos entre cada etapa o tiempo de muestreo.

Horas de medición

En el trópico la temperatura ambiente diaria, presenta el periodo más frío del día en la madrugada (entre las 3 y 4 horas) y el más caliente al iniciar la tarde (entre las 12 y 13 horas), reduciéndose paulatinamente durante el resto de la tarde y noche. Esta misma variación se espera en el suelo, aunque en menor magnitud; por lo tanto, se consideró que el periodo de mayor emisión de N_2O se presentaría entre las 6 y 18 horas.

Según la metodología de Klein y Harvey (2012), el modelo para el cálculo de la emisión de N_2O a partir de las mediciones de concentraciones es el siguiente:

$$gN_2O - N = \frac{P \times V \times PM * ppm}{R \times T \times 1000000}$$

Donde:

$g N_2O-N$	=	Emisión N_2O-N
P	=	Presión atmosférica, 100 kPa
V	=	Volumen de la cámara, en m^3
PM	=	Peso molecular del nitrógeno N_2 (28 $g.mol^{-1}$)

$$mg N_2O.m^2.h = \frac{(g_{t40} - g_{t20}) + (g_{t20} - g_{t10}) \times 1000}{m^2 \times h}$$

ppm	=	Concentración del cromatógrafo de gases ($mg.g^{-1}$)
R	=	Constante de los gases ideales (8.3482 $mol.kg^{-1}$)
T	=	Temperatura promedio en °K

El modelo anterior se implementó en los diferentes tiempos (0, 20 y 40 minutos) variando las ppm, obteniendo 3 estimados de emisión a partir de los cuales se calculó el flujo por hora mediante interpolación, de acuerdo con la siguiente fórmula (Klein y Harvey 2012):

Análisis estadístico

Se realizó un análisis exploratorio mediante estadística descriptiva obteniendo los valores de tendencia central y dispersión para cada variable por medio del programa estadístico SAS (SAS Institute 2009). Además se realizó un análisis de correlación entre la humedad relativa y las temperaturas (interna y externa) de las cámaras en los tiempos 0, 20 y 40 minutos con relación a la concentración del N.

Posteriormente, los datos de concentración de N₂O fueron analizados mediante un modelo lineal mixto generalizado, utilizando el procedimiento GLIMMIX del programa estadístico SAS (SAS Institute 2009).

El modelo ajustado fue el siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 H + \beta_3 C + \beta_4 (D \times H) + \beta_5 (D \times C) + \beta_6 (C \times H) + \beta_7 H(D \times C) + \varepsilon$$

Donde:

Y	=	Variable de respuesta: emisiones de N ₂ O. Se exploró el ajuste de distintas distribuciones de probabilidad y se seleccionó la más adecuada.
β_0	=	Media general
D	=	Día (día 1 hasta día 3)
H	=	Hora (6 a 18 horas)
C	=	Cámara (C #1 hasta C #8, y testigo [muestra ambiente])
$D \times H$	=	Día x hora,
$D \times C$	=	Día x cámara,
$C \times H$	=	Cámara x hora,
$H(D \times C)$	=	Efecto aleatorio de hora anidado dentro de día y cámara. Se asumió una estructura de covarianza autoregresiva de primer orden entre las mediciones realizadas a lo largo de un mismo día en una misma cámara.
ε	=	Error residual aleatorio (NID, 0, 1).

Con base en el modelo anterior se obtuvieron estimados de ajuste del modelo y estimados de significancia estadística para todos los efectos evaluados. Para las diferentes categorías de los efectos fijos que se determinaron como significativos ($p < 0,05$), se realizaron pruebas de comparación de medias independientes (**Tukey-Duncan-Fisher-LSD**) y se conformaron grupos homogéneos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis estadístico descriptivo

Una vez realizada la recolección, edición y tabulación de datos, se contó con 16 variables (Cuadro 1). Según se observa, las temperaturas internas obtenidas tienden a ser superiores a las temperaturas externas en los diferentes tiempos de medición, con diferencias de +2,3, +3,7 y +4,1 °C para los tiempos 0, 20 y 40 minutos, respectivamente. Estas temperaturas corresponden a las cámaras número 1 y número 8. Se observa además, un ligero incremento del promedio para ambas temperaturas (externa e interna) entre los minutos 0 y 40, lo que refleja la tendencia normal al incremento de temperatura a lo largo del día hasta llegar al punto máximo.

Cuadro 1. Promedio (\bar{X}), Mediana (Me), Desviación estándar (DE), Valores Mínimos (Min), Máximos (Máx) e Intervalo de Confianza al 95%, para las variables obtenidas a partir del estudio. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

Variable	n	\bar{X}	Me	DE	Mín	Máx	Intervalo de confianza 95%	
							Inf	Sup
Temp. Interna Cámara 0 min (°C)	81	31,2	30,3	4,09	24,0	41,5	30,3	32,1
Temp. Externa Cámara 0 min (°C)	81	28,9	29,0	2,91	21,9	35,1	28,3	29,6
Temp. Interna Cámara 20 min (°C)	81	32,7	32,3	4,81	24,9	48,0	31,7	33,8
Temp. Externa Cámara 20 min (°C)	81	29,0	28,8	3,09	21,7	37,2	28,4	29,7
Temp. Interna Cámara 40 min (°C)	81	33,4	32,9	5,16	25,1	53,2	32,2	34,5
Temp. Externa Cámara 40 min (°C)	81	29,3	28,6	3,22	22,1	38,3	28,6	30,0
Humedad Relativa 0 min (%)	79	86,5	90,0	13,6	50,0	99,0	83,4	89,5
Humedad Relativa 20 min (%)	79	92,6	95,0	7,6	73,0	99,0	90,9	94,3
Humedad Relativa 40 min (%)	79	94,5	99,0	6,5	72,0	99,0	93,5	96,4
Concentración N ₂ O 0 min (ppm)	369	0,53	0,38	0,32	0,00	1,44	0,50	0,56
Concentración N ₂ O 20 min (ppm)	369	0,61	0,41	0,36	0,03	1,68	0,58	0,65
Concentración N ₂ O 40 min (ppm)	369	0,71	0,45	0,42	0,29	2,09	0,66	0,75
Emisión N ₂ O (mg.m ⁻² .hora ⁻¹)	369	0,12	0,06	0,17	0,00	1,15	0,10	0,14

De acuerdo con los datos meteorológicos registrados para la zona, las temperaturas ambientales promedio de los días 2, 3 y 4 de setiembre (2015), correspondientes a la primera semana de medición, fueron respectivamente de 26,0, 26,4 y 26,5 °C. Mientras que, para los días 28, 29 y 30 de setiembre (2015), de la segunda semana de medición, se registraron temperaturas de 28,2, 28,3 y 28,3°C (CORBANA 2016).

En cuanto a la humedad relativa se observó una tendencia similar a la temperatura, con un aumento progresivo conforme al avance de los minutos dentro de cada hora. Por otra parte, la humedad ambiental promedio para el mes de setiembre 2015, fue de 88,9 % (CORBANA 2016).

Con respecto a la concentración del gas N₂O, también se observó una tendencia hacia el aumento a lo largo de los tres tiempos de muestreo, lo cual es de esperar debido a su acumulación durante el tiempo que se mantuvo la cámara sellada. La concentración del gas presentó una correlación positiva y significativa (0,14; $p < 0,05$), con la temperatura interna de la cámara, y una correlación negativa y significativa (-0,13; $p < 0,05$) con la temperatura externa de la cámara. Estas correlaciones, aunque significativas, fueron de baja magnitud. La

correlación con la humedad relativa fue muy baja (-0,03) y no significativa ($p = 0,68$).

En relación con la emisión de N₂O, el valor promedio fue de 0,12±0,17 mg N₂O. m⁻² h⁻¹ (Cuadro 1), equivalente a 10,62 kg ha⁻¹ año⁻¹. Cabe notar además, que el valor de la media duplicó el valor de la mediana (Me=0,06). Esto se debe a que la distribución de probabilidad de esta variable es muy sesgada a la derecha, como se aprecia en el histograma de la Figura 1. El sesgo positivo de la variable emisión de N₂O ha sido previamente descrito por otros investigadores (Veldkamp *et al.* 1998; Venterea *et al.* 2012) y debe ser considerado a la hora del análisis estadístico. Aunque la gran mayoría de los valores de emisión observados durante el día son menores a 0,15 mg N₂O m⁻¹ h⁻¹, existe un amplio rango de valores superiores, hasta un máximo de 1,15 mg N₂O m⁻¹ h⁻¹, que ocurren esporádicamente. Por esta razón, es importante que para el estudio de esta variable se reporten ambas medidas de tendencia central (media y mediana). Por otra parte, la variable de emisión de N₂O no se ajustó a una distribución Normal, lo que tiene implicaciones para su análisis por medio de modelos lineales, según se describirá más adelante. La distribución que mejor se ajustó a esta variable fue la Log-Normal, según se muestra en la Figura 1.

Estudios previos realizados en pasturas tradicionales bajo pastoreo extensivo, mencionan rangos de emisión de N_2O entre 0 y $2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, mientras que en pasturas fertilizadas con manejo intensivo, los rangos de emisión superan los $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Dalal *et al.* 2003).

En Costa Rica, estudios realizados han reportado resultados variables de emisión de N_2O , principalmente en función del tipo de pastura y del manejo (Veldkamp *et al.* 1998; Montenegro y Abarca 2001). Se han reportado promedios anuales de emisión de N_2O de $2,67 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para pasturas tradicionales

de pasto Ratana (*Ischaemun indicum*), $4,88 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para pasturas combinadas de gramínea (*Brachiaria brizantha*) y leguminosa (*Arachis pintoii*) y $25,82 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en pasturas bajo programas de fertilización (*Brachiaria decumbens*), por parte de Veldkamp *et al.* 1998. En otro estudio realizado por Montenegro y Abarca (2001) se reportaron valores de emisión de $3,14 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para el pasto Estrella africana (*Cynodon plectostachyus*), $2,28 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para pasto Ratana (*Ischaemun indicum*), $6,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y $3,44 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en pasturas de jaragua (*Hyparrhenia rufa*).

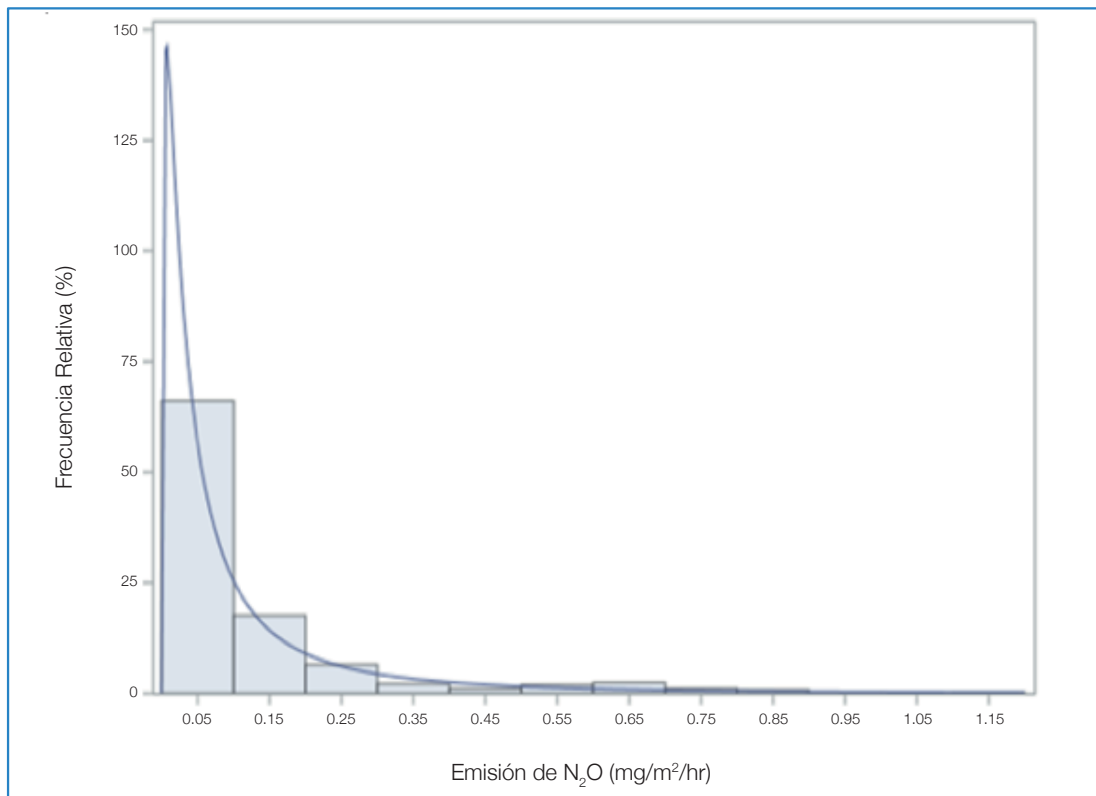


Figura 1. Histograma de frecuencias relativas de la variable emisión de N_2O ($\text{mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) con ajuste por distribución LOG-normal (Theta= 0, sigma= 1,41, zeta= -2,9). Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

El valor encontrado en el presente estudio es mayor a otros valores reportados con pasturas no fertilizadas. Un factor que pudo causar los altos niveles de emisión de N_2O observados en el presente estudio, fue el pastoreo con una carga animal relativamente alta (2,5- 3,0 UA/ha) y el tipo de suelo de la estación (Eutric Hapludands), un suelo con tendencia ándica, fértil, de buen drenaje y con horizontes profundos (Veldkamp 1993). En la primera semana (días 1, 2 y 3), las mediciones iniciaron 3 días después de que los animales dejaron

el potrero, mientras que en la segunda semana (días 4, 5 y 6) las mediciones se realizaron el día posterior al pastoreo de los animales. Se han reportado emisiones de $9,64 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en asociaciones de gramínea/leguminosa bajo pastoreo, mientras que en las zonas no pastoreadas, la emisión fue de $1,97 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; esto por Sagar *et al.* 2003. El pastoreo redundo en una mayor disponibilidad de nitrógeno en el suelo, producto del material que excretan y orinan los animales. Esto es influenciado además por la interacción natural de las condiciones

ambientales propias de la zona, como altas temperaturas y humedad, que también presentaron condiciones apropiadas para la producción de N₂O. De acuerdo con Montenegro y Abarca (2001), el N₂O que proviene de las excretas líquidas y sólidas de los animales puede ser mayor que el que proviene del nitrógeno del fertilizante. En el presente estudio, los valores de emisión observados tienden a ser mayores a los reportados en pasturas con manejo extensivo, pero menores a los reportados en pasturas fertilizadas con manejo intensivo.

En la Cuadro 2, se observa la tendencia de los promedios de emisión de N₂O en relación con el paso de los días de medición. En la semana 1 (días 1, 2 y 3) la emisión promedio fue de 0,17 mg m⁻² h⁻¹, más del doble de la semana 2 (días 3, 4 y 5), que presentó una emisión promedio de 0,07 mg m⁻² h⁻¹. Esta diferencia puede deberse a que las condiciones ambientales variaron considerablemente entre ambas semanas. Por ejemplo, observamos que los días 1, 2 y 3 de la primera semana de muestreo contaron con una precipitación variable de 0,4, 49,4 y 23,8 mm respectivamente, para un promedio de 23,7 mm; mientras que los días 4, 5 y 6 correspondientes a la segunda semana, presentaron precipitaciones de 0, 20,4 y 2,3 mm respectivamente, para un promedio de 7,57 mm (CORBANA 2016).

Otros estudios han reportado emisiones de N₂O altamente fluctuantes en función de la hora, el día, la época, la temperatura, el sitio, el tipo de suelo o el manejo (Veldkamp *et al.* 1998, Sagar *et al.*, 2003 y Rowlings *et al.* 2010). Se menciona que los picos de emisión de N₂O son altamente episódicos y tienden a coincidir con eventos de altas precipitaciones seguidas por alto contenido de humedad en el suelo (Veldkamp *et al.* 1998 y Sagar *et al.* 2003). El contenido de agua en los poros del suelo determina la disponibilidad de O₂, el cual a su vez favorece la tasa de nitrificación y desfavorece la tasa de desnitrificación. Cuando el espacio poroso es ocupado por agua (water-filled pore space -WFPS) entre un 30 y 60 %, se maximiza la producción de N₂O mediante la nitrificación, mientras que cuando supera el 60 % se favorece la producción de N₂O mediante la desnitrificación (Veldkamp *et al.* 1998).

Cuadro 2. Promedio (\bar{X}), Mediana (Me), Desviación estándar (DE), valores Mínimos (Min) y Máximos (Máx) y Límites de Confianza 95 % para la variable emisión N₂O (mg m⁻² h⁻¹) en función de los días de muestreo. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

Semana	Día	n	\bar{X}	Me	DE	Límites de Confianza 95 %	
						Inferior	Superior
1	1	63	0,27	0,16	0,28	0,20	0,34
1	2	62	0,13	0,11	0,10	0,10	0,15
1	3	62	0,10	0,05	0,12	0,07	0,13
2	4	60	0,04	0,02	0,05	0,02	0,05
2	5	59	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05
2	6	63	0,14	0,05	0,19	0,09	0,19

En la Cuadro 3, se observa la tendencia en promedio de la emisión de N₂O durante las horas del día. La emisión se mantuvo estable en las primeras horas del día (entre las 6 y 12 horas) con valores de 0,09 mg, posteriormente aumentó aproximadamente un 95 % hasta un máximo de 0,19 mg en las horas de la tarde (entre las 14 y 15 horas) y finalmente disminuyó de nuevo a 0,13 mg a las 18 horas.

Estas variaciones pueden estar ligadas a las condiciones de temperaturas normales presentes durante el día en la zona de medición, ya que la temperatura aumentó a partir de las 8 horas hasta encontrar un máximo entre las 12 y las 16 horas; para posteriormente presentar una disminución hasta el siguiente día.

La temperatura al igual que otros procesos biológicos, aumentan las tasas de nitrificación y desnitrificación dentro de un rango preciso. A mayor temperatura se favorece una mayor proporción de N₂O de la nitrificación. La temperatura de los suelos aumenta la emisión de N₂O, al menos hasta 37 °C, pero la proporción de N₂O disminuye con temperaturas cada vez mayores, por encima de 37 °C (Dalal *et al.* 2003).

Cuadro 3. Promedio (\bar{X}), Mediana (Me), Desviación Estándar (DE), valores Mínimos (Min) y Máximos (Máx) y Límites de Confianza 95 % para la variable emisión N_2O ($mg\ m^{-2}\ h^{-1}$) en función de las horas del día. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

Hora	n	\bar{X}	Me	DE	Límites de Confianza 95%	
					Inferior	Superior
6	52	0,09	0,06	0,10	0,06	0,11
8	53	0,09	0,04	0,16	0,05	0,14
10	52	0,09	0,05	0,12	0,06	0,12
12	54	0,09	0,05	0,18	0,04	0,14
14	51	0,17	0,11	0,20	0,11	0,23
16	53	0,19	0,08	0,25	0,12	0,26
18	54	0,13	0,07	0,15	0,09	0,17

En el cuadro 4, se observa la emisión promedio de N_2O en las distintas cámaras del muestreo. Se observan diferencias considerables entre algunas de las cámaras, desde 0,09 hasta 0,19 $mg\ m^{-2}\ h^{-1}$, todas superiores al testigo (0,05), como era de esperar. Las variaciones entre cámaras, exceptuando al testigo, pueden estar ligadas a múltiples factores, entre ellos factores microambientales tales como: la cantidad de excretas y orina en los potreros después del pastoreo, zonas de encharcamiento por lluvias, efecto de la humedad ambiental en el momento de la medición ó la variación en temperaturas debido a los puntos donde se encuentren colocadas las cámaras en el potrero de medición; dado que puede haber un efecto de sombra o una total exposición a la radiación solar (Montenegro y Abarca 2001).

En general, la tasa de desnitrificación se eleva con el aumento del contenido de NO_3 en el suelo, cuando hay condiciones adecuadas para la desnitrificación (por ejemplo, alta humedad) y cuando factores como la temperatura y el carbono orgánico disponible no son limitantes (Dalal *et al.* 2003). En la mayoría de los casos, cuando hay presencia de reducción de Nitratos (en N_2), la misma se produce como resultado de una relación N_2O/ N_2 más alta a contenidos similares de humedad y oxígeno.

Cuadro 4. Promedio (\bar{X}), Mediana (Me), Desviación Estándar (DE), valores Mínimos (Min) y Máximos (Máx) y Límites de Confianza 95 % para la variable emisión N_2O ($mg\ m^{-2}\ h^{-1}$) en función de las cámaras. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

Número Cámara	n	\bar{X}	Me	DE	Límites de Confianza 95 %	
					Inferior	Superior
1	41	0,13	0,06	0,17	0,07	0,18
2	42	0,19	0,12	0,22	0,12	0,26
3	41	0,13	0,08	0,15	0,08	0,18
4	41	0,18	0,08	0,25	0,10	0,25
5	42	0,12	0,05	0,18	0,06	0,18
6	42	0,10	0,08	0,09	0,07	0,13
7	41	0,11	0,06	0,16	0,05	0,16
8	40	0,09	0,05	0,13	0,05	0,13
Testigo	39	0,05	0,01	0,13	0,00	0,09

Análisis por modelo mixto lineal

Debido a la distribución marcadamente sesgada de la emisión de N_2O (Figura 1), se consideró más apropiado el empleo de una distribución Log-Normal como base para el modelo lineal. El modelo convergió de manera satisfactoria, observándose un efecto altamente significativo y significativo de los factores analizados, con excepción de la interacción cámara \times hora (P: 0,95).

Cuadro 5. Valores de significancia para efectos incluidos en el modelo estadístico de regresión. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

Efecto	Pr > F
Día	<0,0001
Hora	<0,01
Cámara	<0,0001
Día \times hora	<0,0001
Día \times cámara	<0,0001
Cámara \times hora	0,95

Las medias marginales de la emisión de N_2O en escala logarítmica (Figura 2), muestran una tendencia decreciente entre los días 1 y 3 de la primera semana, mientras que durante los días 4 al 6 de la segunda semana se observa un crecimiento. Las medias de los días (1, 2) difieren significativamente ($p < 0,05$) con respecto a las medias de los días (3, 6) y (4, 5). El rango de emisión en la escala original ($mg N_2O m^{-2} h^{-1}$) osciló entre 0,02 [2,7183^(-3.926)] y 0,15 [2,7183^(-1.909)]. Según se mencionó previamente, en los días de muestreo de la primera semana se presentaron mayores temperaturas, humedad y precipitaciones, lo que pudo influir en estos resultados. La combinación de un suelo con textura fina, alta humedad, altas temperaturas y disponibilidad de N; fácilmente contribuye a que se produzcan emisiones de N_2O sustanciales, en el sistema de pasturas y leguminosas tropicales, como lo menciona Rowlings *et al.* (2010).

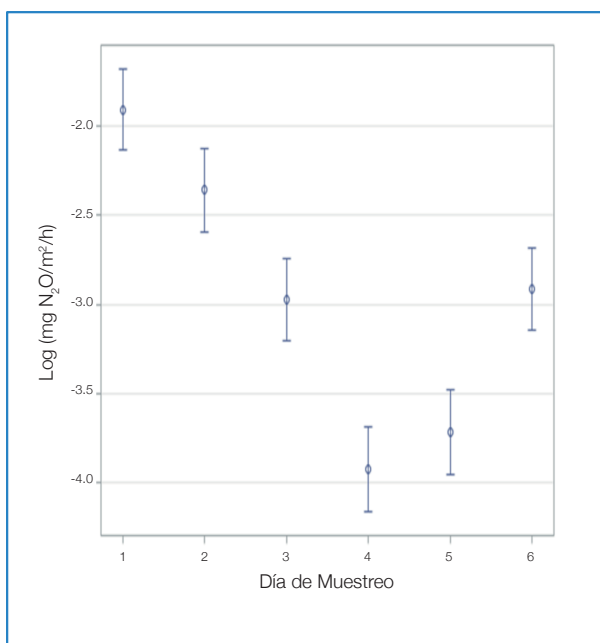


Figura 2. Medias Marginales e Intervalo de Confianza al 95 % para la variable emisión de N_2O , [$\log (mg N_2O m^{-2} h^{-1})$], en función de los días muestreados. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

La Figura 3, muestra las medias marginales de emisión de N_2O en función de la hora del día. Las emisiones muestran un patrón no lineal, con un pequeño descenso en el valor entre las 6 y las 8 horas del día, para luego mostrar una tendencia

creciente hasta las 16 horas; donde se observa el pico de mayor valor de emisión, coincidente con las horas de mayor temperatura, para descender el valor nuevamente a las 18 horas. Las mayores medias marginales (0,06 y 0,07 $mg N_2O$) se registraron a las 14 y 16 horas del día respectivamente, ellas difieren significativamente ($p < 0,05$) de las medias obtenidas entre las 6 y 10 horas.

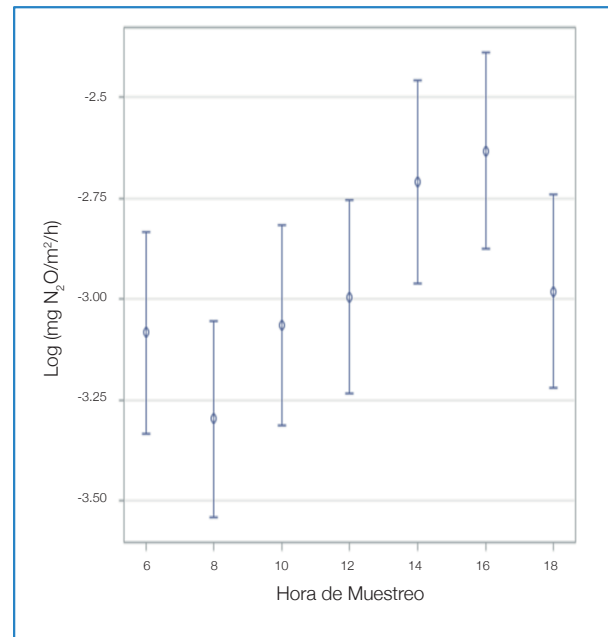


Figura 3. Medias Marginales e Intervalo de Confianza al 95 % para la variable emisión de N_2O , [$\log (mg N_2O.m^{-2}.h^{-1})$], en función de las horas del día. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

En la Figura 4, se visualizan las medias marginales de emisión por cámara. Como era de esperar el testigo se mantiene con mediciones significativamente inferiores ($p < 0,05$) a las demás cámaras. Las mediciones de las cámaras son bastantes similares entre sí, aunque algunas difieren significativamente entre sí. Como por ejemplo, las cámaras 2 y 6 que difieren ($p < 0,05$), con respecto a las cámaras 5 y 8. Estas variaciones, pueden estar asociadas a fluctuaciones en las condiciones específicas de las cámaras dentro del potrero, tales como la humedad, el tipo de suelo y la temperatura (Montenegro y Abarca 2001).

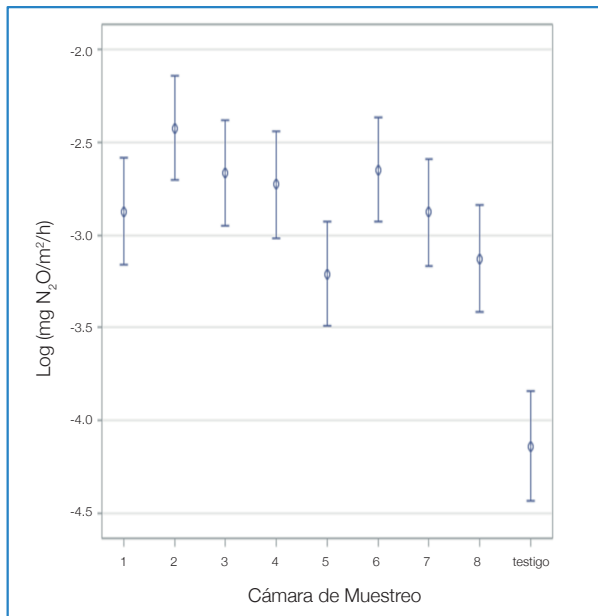


Figura 4. Medias Marginales e Intervalo de Confianza al 95 % para la variable emisión de N₂O, [$\log(\text{mg N}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$], en función de las cámaras y el testigo. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

La Figura 5, muestra las medias marginales de emisión de N₂O en función de la hora, para cada una de las cámaras y el testigo. Se observa que las tendencias a lo largo de las horas no difieren significativamente ($p>0,05$) entre cámaras, según se reportó en la Cuadro 1. Los patrones observados son fluctuantes, aunque la mayoría de las cámaras tiende a mostrar un comportamiento no lineal, descrito anteriormente, con aumentos de emisión hacia las 14 y 16 horas. Además, como era de esperar, la línea del testigo está siempre por debajo de las demás, tal y como se observó en la Figura 4. Se puede observar que la emisión mantiene una constante en la producción de óxido nitroso durante un periodo comprendido entre las 10 y las 16 horas.

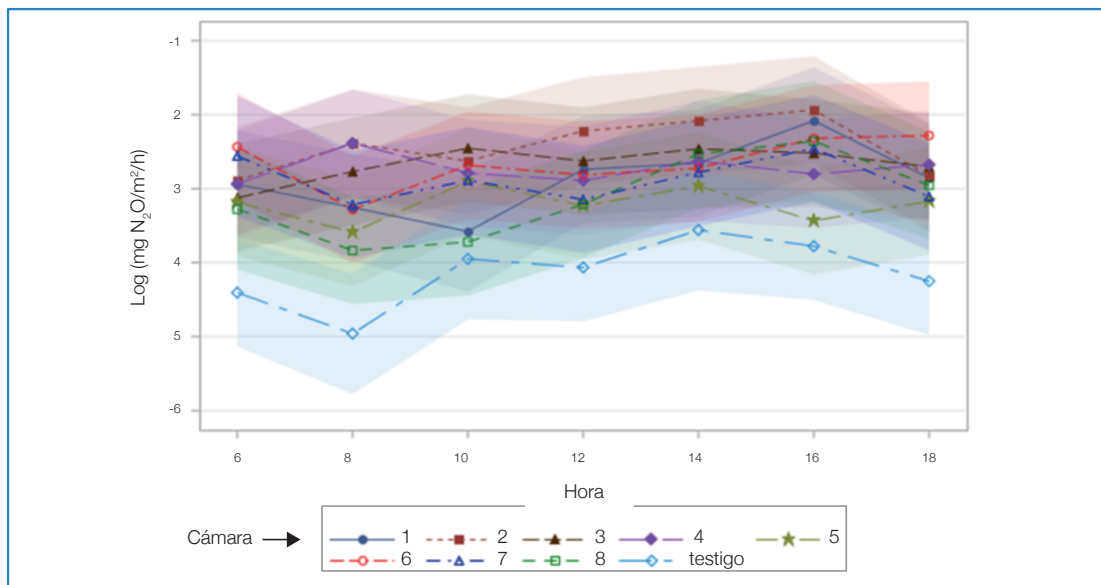


Figura 5. Medias Marginales e Intervalo de Confianza al 95 % para la variable emisión de N₂O, [$\log(\text{mg N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1})$], en función de la hora para cada una de las cámaras y el testigo. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

En la Figura 6, se muestran las medias marginales de emisión de N₂O por cámara en función de los días de muestreo. Como se esperaba, la línea del testigo se mantiene casi siempre por debajo de las demás. La mayoría de las cámaras mostraron un patrón no lineal similar al descrito en la Figura 2, con mediciones más altas en los primeros 3 días, marcada reducción en los días 4 y 5 y un ligero incremento en el día 6. Dos de las cámaras

(4 y 6) muestran una medición inusual en el día 4, presentando valores menores que el testigo, lo cual nos indica que el ciclo del nitrógeno presenta cierta disminución en la emisión, en parte de su proceso, para posteriormente retomar la producción de N₂O con tendencia hacia el alza. Asimismo, la cámara 6 fue la que presentó mediciones más uniformes a lo largo de todos los días evaluados.

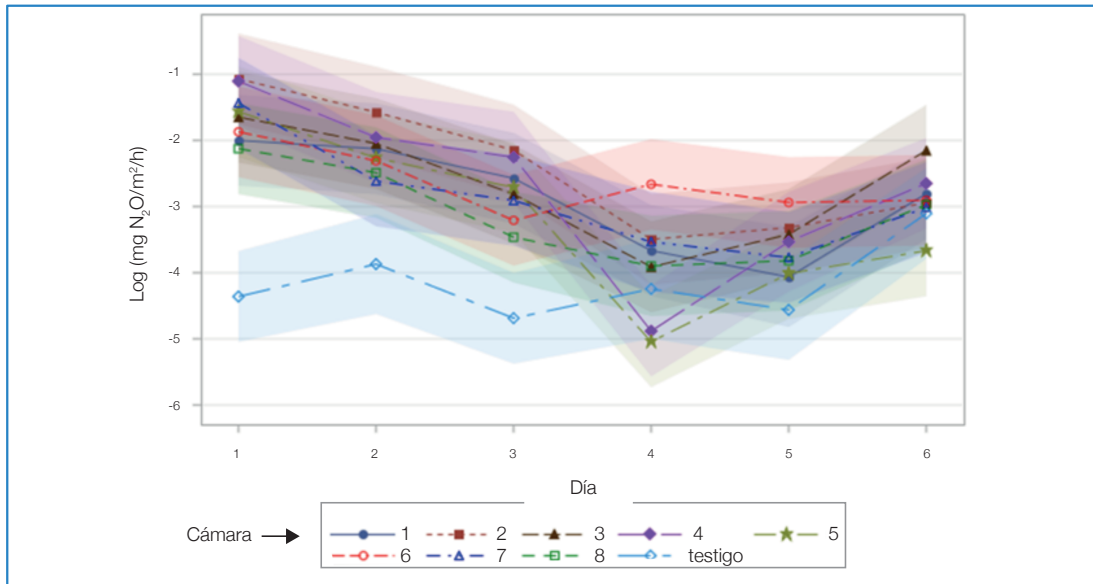


Figura 6. Medias Marginales e Intervalo de Confianza al 95 % para la variable emisión de N₂O [log (mg N₂O.m⁻².h⁻¹)], en función de los días para cada una de las cámaras y el testigo. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

En la Figura 7, se muestran las medias marginales de la emisión de N₂O según el día y la hora. La tendencia general descrita en la Figura 3, no se cumple para todos los días. En el día 1, el pico de emisión se observó a las 16 horas, mientras que en los días 2, 5 y 6 ocurrió a las 14 horas y los días 3 y 4 a las 18 y 12 horas, respectivamente.

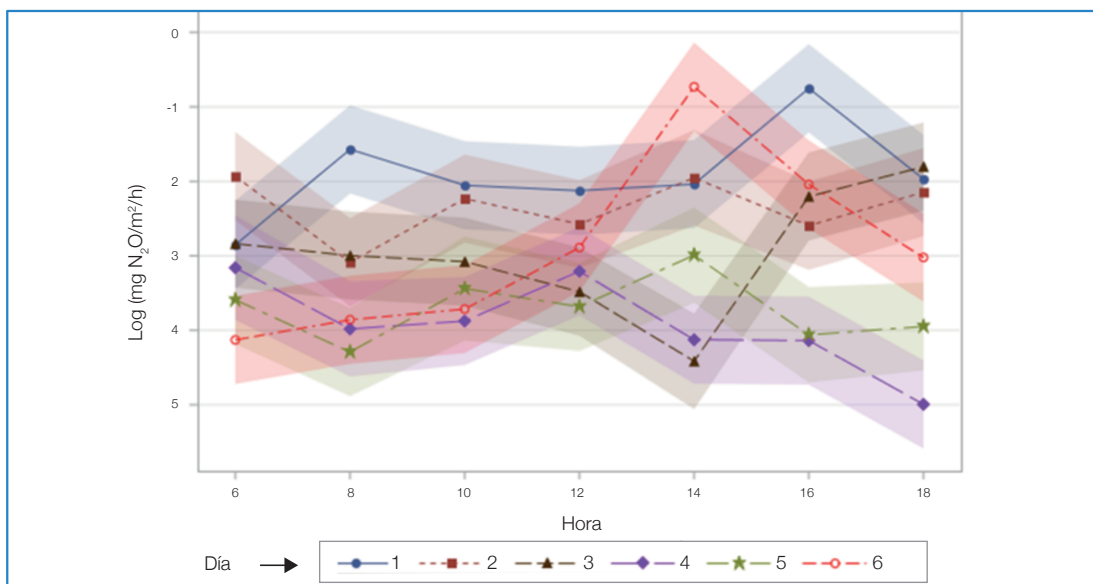


Figura 7. Medias Marginales e Intervalo de Confianza al 95 % para la variable emisión de N₂O [log (mg N₂O.m⁻².h⁻¹)], en función de las horas para cada uno de los días. Pococí, Limón; 2015.

Esta variabilidad sugiere, que no es posible determinar una única hora óptima que represente el promedio de emisión. El rango de variación en temperatura a lo largo del día, es bajo a nivel local, en comparación con otras regiones del mundo. Por lo anterior, lo ideal es realizar las mediciones entre las 10 y las 16 horas; a diferencia de otras partes del mundo, donde se define más claramente el punto máximo de emisión.

En general, el promedio de emisión de N₂O obtenido (0,12±0,17 mg N₂O m⁻² h⁻¹, equivalente a 10,62 kg ha⁻¹ año⁻¹), es superior a otros valores reportados previamente (2,28 - 3,14 - 3,44 - 6,80 kg ha⁻¹ año⁻¹, para ratana, estrella africana, jaragua y kikuyo respectivamente; Montenegro y Abarca 2001) en sistemas de pastoreo bajo modalidades de manejo extensivas.

La investigación nos muestra que la posible combinación de distintos factores como tipo de pastoreo, carga animal, tipo de suelo y condiciones climáticas de la zona, son los causantes de las variaciones en la emisión de N₂O obtenidas. El suelo podría ser el mayor precursor en la emisión, debido a

que las condiciones lluviosas alternadas con etapas cortas de escasa precipitación, características de la zona Caribe y que pueden beneficiar a las bacterias desnitrificadoras, que están en una constante reactivación cuando bajan los encharcamientos (en horas), creando picos de emisión durante lapsos cortos de tiempo.

El estudio demostró que existe variación significativa en la emisión de N₂O en función de las variables: día, hora y cámara. Las diferencias entre días parecen estar ligadas mayormente a diferencias en precipitación y humedad del suelo. Las diferencias entre horas se ligan mayormente a cambios en el patrón de temperatura. La diferencia entre cámaras se asocia principalmente a las diferencias en microclima entre diferentes sitios dentro de la pastura.

La mayor emisión se presenta a partir del tercer día de haber abandonado los animales el potrero, producto de una acumulación de excretas y lixiviados de origen animal, los cuales en conjunto con la interacción de factores ambientales provocan un pico de emisión de N₂O como parte del proceso de desnitrificación.

LITERATURA CITADA

- Abarca, MS. 2013. Cambio climático y mitigación en fincas lecheras. Revista Universidad Técnica Nacional. (63):28-31.
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 2015. Medición de óxido nitroso en Costa Rica (en línea). Turrialba, Costa Rica. 2 p. Consultado 10 nov. 2015. Disponible en <http://www.catie.ac.cr/es/catie-noticias/943-miden-oxido-nitroso-en-pasturas-de-costa-rica>
- Chen, D; Li, Y; Grace, P; Mosier, AR. 2008. N₂O emissions from agricultural lands: a synthesis of simulation approaches. *Plant and Soil* 309(1-2):169–189.
- Dalal, R; Wagan, W; Robertson, P; Parton, W. 2003. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. *Australian Journal of Soil Research* 41:165-195.
- Di, HJ; Cameron, KC. 2006. Nitrous oxide emissions from two dairy pasture soils as affected by different rates of a fine particle suspension nitrification inhibitor, dicyandiamide. *Biology and Fertility of Soils*. 42(6): 472–480.
- Holdridge, L. 1978. Ecología basada en zonas de vida. San José, Costa Rica. 216 p.
- Holmann, F; Rivas, L; Pérez, E; Castro, C; Schuetz, P; Rodríguez, J. 2007. La cadena bovina en Costa Rica: identificación de temas críticos para impulsar su modernización, eficiencia y competitividad. CIAT, Cali, Colombia. 70 p.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional). 2016. Temperatura y humedad promedio zona atlántica (en línea). San José, Costa Rica. 2 p. Consultado 20 ago. 2016. Disponible en <https://www.imn.ac.cr/web/imn/inicio>

- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). 2015. Censo Agropecuario Nacional (en línea). San José, Costa Rica. 179 p. Consultado 11 nov. 2015. Disponible en <http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx>
- Klein, C; Harvey, M. 2012. Nitrous Oxide Chamber Methodology Guidelines. New Zealand. Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases (en línea). Wellington, Nueva Zelanda. 146 p. Consultado 11 nov. 2015. Disponible en http://globalresearchalliance.org/wp-content/uploads/2015/11/Chamber_Methodology_Guidelines_Final-V1.1-2015.pdf
- Matthews, R.D., Chadwick, D.R., Retter, A.L., Blackwell, M.S.A., Yamulki, B. 2010. Nitrous oxide emissions from small scale farmland features of UK livestock farming systems. *Agric. Eco. & Env.* 136:192-198.
- Montenegro, J; Abarca, S. 2001. Importancia del sector agropecuario costarricense en la mitigación del calentamiento global. MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería); IMN (Instituto Meteorológico Nacional). San José, Costa Rica. 138 p.
- Oenema, O; Wrage, N; Velthof, G.L; Van Groenigen, J.W; Dolfing, J; Kuikman, P.J. 2005. Trends in global nitrous oxide emissions from animal production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72(1): 51-65.
- Rowlings D; Grace, P; Kiese, R; Scheer, C. 2010. Quantifying N₂O and CO₂ emissions from a subtropical pasture. *In* World Congress on Soil Science. Soils solution for a changing world (19, 2010, Brisbane, Australia).Memoria. p. 199-201.
- SAS Institute. 2009. The SAS system for Windows. Release 9.4. SAS Inst. Cary, North Carolina, Estados Unidos de América. 5121 p.
- Saggar, S; Andrew, RM; Tate, KR; Hedley, CB; Rodda, NJ; Townsend, JA. 2004. Modelling nitrous oxide emissions from dairy-grazed pastures. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 68(3):243-255.
- Steinfeld, HP; Gerber, T; Wassenaar, V; Castel, M; Rosales, F; de Haan, C. 2009. La larga sombra del ganado – problemas ambientales y opciones. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), Roma, Italia. 464 p.
- Veldkamp, E. 1993. Soil Organic Carbon Dynamics in Pastures Established After Deforestation in the Humid Tropics of Costa Rica. Tesis Ph.D. Wageningen, Holand. Wageningen University. 35 p.
- Veldkamp, E; Keller, M; Núñez, M. 1998. Effect of management on N₂O and NO emissions from soils in the humid tropics of Costa Rica. *Global Biogeochemical Cycles* 12(1): 71-79.
- Venterea, RT; Parkin, TB; Cárdenas, L; Petersen, SO; Pedersen, AR. 2012. Data analysis considerations. *In*: de Klein, C; Harvey, M, (eds.). Nitrous oxide chamber methodology guidelines. Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases. Wellington, New Zealand. p. 95-121.

EMISIÓN DE METANO POR FERMENTACIÓN ENTÉRICA EN VACAS BAJO PASTOREO DE LECHERÍA TROPICAL

Sergio Abarca-Monge¹; Roberto Soto-Blanco¹; Cristóbal Villanueva-Najarro²

RESUMEN

Emisión de metano por fermentación entérica en vacas bajo pastoreo de la lechería tropical. La investigación se realizó de octubre de 2015 a abril de 2017, en una zona de Bosque Húmedo Transición a Muy Húmedo Premontano, con una precipitación anual que fluctúa entre los 2700 y los 3000 mm y una temperatura diaria promedio de 22,3°C. Se seleccionaron 16 vacas en producción las cuales se dividieron en tres grupos raciales, vacas Jersey (*Bos taurus*), híbridas *Bos taurus x Bos indicus* (F1 vacas Jersey x Gyr o Sahiwal) y un triple cruce (Jersey x Holsetin x Sahiwal). Se tomaron muestras un día cada 28 días durante 16 meses en una pastura de *Panicum maximum* var. Mombaza. La medición de metano (CH₄) se realizó mediante la técnica del hexafluoruro de azufre (SF₆). El consumo voluntario de materia seca (MS) se estimó mediante óxido crómico. Se observaron diferencias estadísticas para el periodo de lactancia entre las vacas F1 y la *B. taurus*. Las vacas del triple cruce se situaron en un nivel intermedio. Con respecto al periodo seco, los tres grupos mostraron diferencias en el consumo de materia seca. Las proporciones de pasto consumidas de la ingesta total fueron: 39,6; 48,6 y 43,0% para *B. taurus*, F1 y triple cruce, respectivamente. La emisión diaria de metano no presentó diferencias estadísticas entre grupos raciales para vacas lactando. Se observó para las vacas en periodo seco una reducción ($p < 0,01$) del triple cruce con respecto a los otros dos grupos raciales. Se estimó para el periodo de lactancia, un factor de conversión promedio de $6,5 \pm 1\%$ y para las vacas secas de $9,7 \pm 4,0$; $7,8 \pm 1,8$ y $6,6 \pm 1,8\%$ para *B. taurus*, F1 y triple cruce respectivamente, existiendo diferencias significativas entre el primero y el tercero, el segundo no se diferenció de los otros dos grupos.

Palabras claves: lechería tropical, emisión de metano, técnica del hexafluoruro de azufre.

1 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. INTA. Costa Rica. Investigadores. sabarca@inta.go.cr, rsoto@inta.go.cr

2 Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. CATIE. Costa Rica. Investigador. cvillanu@catie.ac.cr

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica la producción bovina es la más difundida de las actividades agropecuarias y con la mayor área en uso agrícola bajo cobertura de pastizales (INEC 2015). Aporta aproximadamente el 20% de las emisiones del país, (2,3 millones de toneladas anuales de CO₂ e) por sus procesos de producción y la principal fuente de emisión es la fermentación entérica (Abarca 2016).

La variación en la emisión de CH₄ de los bovinos depende de la proporción de energía que utilicen los microorganismos del rumen en sus procesos metabólicos e incorporen en su biomasa y la puedan liberar en forma de ácidos grasos, del total de energía consumida en los alimentos (Ribeiro *et al.* 2015); a esto se le conoce como energía digestible (ED), la cual es una proporción del total de energía contenida en los alimentos que se define como energía bruta (EB) (NRC 2001). Se estima que entre un 2 a un 12% de la EB contenida en los alimentos se pierde como CH₄ (Johnson y Johnson 1995).

En general, se considera que los pastos tropicales están asociados con mayores emisiones de

CH₄ por unidad de consumo de materia seca (DMI por sus siglas en inglés), que las gramíneas de zonas templadas debido a una mayor lignificación y menor tasa posterior de paso de la alimentación (Kurihara *et al.* 1999). De acuerdo con Archimède *et al.* (2011), realizaron un metanálisis de 22 estudios y concluyeron: que las emisiones de CH₄ fueron un 12% mayor para los rumiantes alimentados con pastos C4 (tropicales), que para aquellos alimentados con pastos C3 (templados). Su análisis empleó una variedad de técnicas, incluida la técnica del SF₆ y una gama de especies de ganado, incluyendo ovejas y cabras. Por otra parte, Charmley *et al.* (2016) trabajando solamente en ganado bovino, con cámaras metabólicas, mostraron claramente que la emisión de CH₄ de la fermentación entérica no fue mayor para el ganado *Bos indicus* alimentado con gramíneas C4, que la del ganado *Bos taurus* alimentado con pastos C3. Además, que la concentración de EB en dietas con pastos C4 fue de 17,7 MJ / kg de MS siendo un 4% menor que el estándar de 18,4 MJ / kg de MS observado en la zona templada, las emisiones también fueron 5% menores en clima sub tropical donde se utilizó *B. indicus* con respecto al clima templado con *B. taurus*.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en el área de ganadería de la finca comercial del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en Turrialba, de octubre de 2015 a abril de 2017. La zona de vida de acuerdo con la clasificación de Holdridge (1978), corresponde a un Bosque Húmedo en Transición a Muy Húmedo Premontano; con una precipitación anual entre 2700 a 3000 mm y una temperatura diaria promedio de 22,3°C (Abarca 2008).

Manejo de los animales

Se seleccionaron 16 vacas en producción, las cuales se dividieron en tres grupos raciales; el primero constituido por cinco vacas Jersey (*B. taurus*), el segundo grupo con seis animales híbridos *B. taurus* x *B. indicus* (F1 vacas Jersey x Gyr o Sahiwal) y el tercer grupo con cinco vacas fue un triple cruce (Jersey x Holstein x Gyr o Sahiwal). Se tomaron muestras un día cada 28 días durante 16 meses. Para todos los días de muestreo, las vacas se alimentaron de una pastura de *Panicum maximum* var. Mombaza y recibieron el manejo y la dieta normal de la finca lechera de CATIE, que consistió en concentrado, soya, melaza, citropulpa y pasto de corte, durante los periodos de ordeño.

El diseño experimental utilizado en forma independiente para vacas en producción y vacas secas fue el siguiente:

$$yijkl = \mu + ri + vjj + mk + \epsilonijk$$

Donde:

μ = Media general

ri = Efecto de grupo racial ($i=1, 2, 3$)

vjj = Efecto de vaca en grupo racial ($j= 1, 2, \dots, 6$)

mk = Efecto de muestreo ($k= 1, 2, \dots, n$)

ϵijk = Error experimental

Medición de metano

La medición de CH₄ se realizó mediante la técnica del hexafluoruro de azufre (SF₆), la cual consistió en poner a nivel de rumen un tubo de permeación conteniendo SF₆. La tasa de liberación del SF₆ fue determinada por regresión lineal para cada tubo, los cuales se pesaron una vez por semana durante dos meses previamente a ser implantados en el rumen. Para el muestreo se instaló un tubo colector al vacío (collar), ergonómicamente diseñado, en el cuello del animal, al cual fue conectado un capilar que se situó por medio de un gamarrón (bozal) en el morro del animal (Westberg *et al.* 1998 y MPI 2014).

Esta técnica permitió el libre pastoreo, sin limitaciones a los animales, garantizando un comportamiento y bienestar adecuado y natural durante el pastoreo. Se utilizó un collar por animal por 24 horas durante el día de medición. El CH₄ y SF₆ contenidos en el collar, se determinaron por cromatografía de gases en el laboratorio de GEI del Instituto de Investigación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).

Se asumió que las tasas de emisión de SF₆ y CH₄ eran iguales, así como la dilución. La mezcla de los gases se debió a los movimientos de los animales y del mismo rumen; por lo tanto la tasa de emisión del CH₄ (Q CH₄) pudo ser calculada por la medición de la concentración de CH₄ y SF₆ así como la tasa de liberación de SF₆ (Q SF₆) de acuerdo con la metodología establecida por Westberg *et al.* (1998) mediante la siguiente fórmula:

$$Q_{CH4} = Q_{SF6} \times [CH4] / [SF6]$$

Estimación del consumo voluntario

Óxido crómico (Cr₂O₃)

El consumo voluntario de materia seca (MS) se estimó mediante la técnica de marcadores externos (Mejía 2002), utilizando óxido crómico. A los animales se les suministró una dosis de 10 g d⁻¹ de Cr₂O₃ durante 7 días consecutivos, tomando muestras de heces directamente del recto del animal a partir del quinto día. Luego se preparó una muestra compuesta por animal a la cual se le determinó la concentración de Cr₂O₃ mediante la digestión nítrico perclórica y la determinación por absorción atómica del cromo. A las muestras de forraje y heces se les determinó carbono (C) y nitrógeno (N).

La cantidad de heces y el consumo de MS se estimaron mediante las siguientes fórmulas y de acuerdo a la calidad nutricional del pasto Mombaza descrito en el cuadro 1.

Heces (kg MS) = Cromo total consumido (g) / Concentración de cromo en las heces (g/kg)

Consumo de MS = Heces / Indegradabilidad de la dieta * 100

Cuadro 1. Calidad nutritiva de la pastura de *Mombaza (Panicum maximum)*. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2017.

En el forraje ofrecido	Energía Bruta (EB)	Proteína Cruda (PC)	Fibra Detergente Neutro (FDN)	Degradación ruminal
	MJ/kg MS	%		
Promedio	18,1	11,1	57,6	56,6
Desviación estándar	0,5	1,7	3,7	4,3

La producción de leche se midió a intervalos de siete días y las vacas se pesaron una vez al mes. Todos los animales recibieron el manejo normal de la finca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Consumo de Materia seca

El consumo de MS, su tiempo de retención en el rumen y la calidad, están íntimamente ligados a la emisión de metano (Tyrrell y Moe 1972; Johnson y Johnson 1995). Se observó que la alimentación de las vacas entre el periodo de lactancia y seco fue diferente y contrastante, tal y como se puede notar en el cuadro 2. Mientras las vacas lactando recibieron una alta suplementación, las vacas secas estaban exclusivamente en pastoreo, por lo tanto, se analizó por separado el consumo para cada periodo por grupo racial. En el cuadro 2, también se observan los promedios de consumo de MS.

Cuadro 2. Consumo de Materia Seca (MS) por periodo y grupo racial. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 2017.

Grupo racial	Consumo diario de MS (kg)						
	Periodo	Vacas en lactación			Vacas secas		
		n	Promedio	Error Estándar	n	Promedio	Error Estándar
<i>B. taurus</i>		50	14,9 a	0,8	8	6,9 a	0,07
F1		52	17,5 b	0,7	23	8,9 b	0,04
Triple Cruce		50	15,8 ab	0,8	14	7,7 c	0,05
Promedio general		152	16,3	0,5	45	7,8	0,4

Medias con igual letra no difieren significativamente ($p>0,05$)

En relación con los grupos raciales se observaron diferencias estadísticas ($p>0,05$) para el periodo de producción entre las vacas F1 y las *Bos taurus*. Las vacas del triple cruce se situaron en un nivel intermedio, sin diferencias entre los otros dos grupos. Con respecto al periodo seco, los tres grupos mostraron diferencias en el consumo de MS. Lo anterior es importante porque en este periodo las vacas estuvieron exclusivamente en pastoreo, lo que se convierte en un indicador de la habilidad de los grupos raciales para alimentarse de pasturas tropicales del tipo C4 (Angharad 2016). En este caso se observó, que a mayor encaste con cebú mayor consumo de pasto Mombaza.

Alimentación durante el periodo de lactancia

Las vacas en lactancia de igual forma para los tres grupos raciales, recibieron en promedio 9 kg de suplementos, adicionales al pasto del pastoreo, de acuerdo con el desglose del cuadro 3.

Cuadro 3. Alimentos suplidos a las vacas en producción. CATIE, Turrialba. Costa Rica. 2017.

Alimentos	Consumo (kg MS/v/d)
Concentrado	5,35
Harina de soya	0,34
Melaza	0,53
Citropulpa	1,97
Pasto de corte	0,81
Total	9,00

En el cuadro 4, se observa la estimación de consumo de pasto durante el periodo de lactancia para cada grupo racial, mostrando diferencias significativas ($p>0,05$) entre los tres grupos raciales, al igual que ocurrió en el periodo seco con una dieta de solamente pasto.

Cuadro 4. Consumo estimado de pasto de pastoreo en las vacas lactando. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 2017.

Grupo racial	Consumo de pasto (kg MS/v/d)
<i>B. Taurus</i>	6,2 ± 0,5 a
F1	7,4 ± 0,4 b
Triple cruce	6,8 ± 0,5 c

Medias con igual letra no difieren significativamente ($p > 0,05$)

En términos generales las proporciones de pasto consumidas de la ingesta total fueron: 39,6; 48,6 y 43,0% para *Bos taurus*, F1 y Triple cruce, respectivamente.

Emisión de metano por día

En relación a la emisión diaria de CH₄, no se observaron diferencias estadísticas entre grupos raciales para vacas lactando, aunque el triple cruce emitió 5,9 y 11,5% menos CH₄ que el *Bos Taurus* y el F1 respectivamente. Igualmente se observó para el periodo seco una reducción ($p < 0,01$) del triple cruce con respecto a los otros dos grupos raciales (ver cuadro 5), siendo concordante con lo observado por Charmley *et al.* (2016), en relación con la menor emisión observada en animales encastados *B. taurus* x *B.indicus* en ganado de carne en el norte de Australia.

Cuadro 5. Emisión diaria de CH₄ por vaca por día y grupo racial, durante los periodos de lactancia y seco. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 2017.

Periodo	Emisión de metano (g/v/d)					
	Lactancia			Seco*		
Grupo Racial	n	Promedio	Error Estándar	n	Promedio	Error Estándar
<i>B. taurus</i>	50	271,7	37,9	8	219,3 a	24,9
F1	62	288,8	32,7	23	221,2 a	14,7
Triple Cruce	50	255,5	20,6	18	166,2 b	19,8
Promedio general	162	265,7	16,6	45	203,8	15,7

* Medias sin letras o igual letra en la misma columna no difieren $p > 0,05$

Emisión de metano por peso metabólico

Con respecto al periodo de lactancia, no se observaron diferencias entre grupos raciales, no obstante, el triple cruce emitió en promedio 10% menos por unidad de peso metabólico que las vacas de los otros dos grupos raciales. En relación con el periodo seco, las vacas del triple cruce mostraron diferencias ($p < 0,05$), con respecto a las de los otros grupos (ver cuadro 6), concordando con Vercoe (1970) en relación con el metabolismo del *B. indicus* y los cruces con *B. taurus*.

Cuadro 6. Emisión de CH₄ por unidad de peso metabólico. CATIE Turrialba Costa Rica, 2017.

Periodo	Emisión de metano (g CH ₄ /kg PV ^{0,75})					
	Lactancia			Seco*		
Grupo Racial	n	Mean	Error Estándar	n	Mean	Error Estándar
<i>B. taurus</i>	50	3,0	0,4	8	2,5 a	0,2
F1	62	3,0	0,4	23	2,1 ab	0,1
Triple Cruce	50	2,7	0,2	14	1,7 b	0,2
Promedio General	162	2,97	0,18	45	2,1	0,2

* Medias con igual letra en la misma columna no difieren $p > 0,05$

Relación entre emisión de metano y consumo de materia seca

Para el periodo de lactancia, se observó en general un nivel de emisión bajo tal y como se observa en el cuadro 7; concordando con Kurihara *et al.* (1999) en relación con la reducción de la emisión de CH₄ con dietas altas en grano. No se obtuvieron diferencias significativas entre grupos raciales, aunque hubo una tendencia a la reducción en el triple cruce con respecto a las vacas *Bos taurus* y F1. Para el periodo seco se observó una

diferencia significativa ($p < 0,05$) de las vacas del triple cruce con respecto a las de los otros dos grupos raciales (ver cuadro 7). Los datos de emisión de CH₄ en relación con el consumo de MS (g/kg) durante el periodo de lactancia, son concordantes con los estimados en la mayoría de las investigaciones (Charmley *et al.* 2016). No obstante, las emisiones del periodo seco son mucho mayores concordando con Archimède *et al.* (2011) sobre el incremento de la emisión en relación a animales alimentados con pastos tropicales.

Cuadro 7. Relación entre la emisión de CH₄ y el consumo de materia seca en vacas lecheras. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 2017.

Periodo	Emisión de metano (g CH ₄ /kg MS)					
	Lactancia			Seco*		
Grupo racial	n	Promedio	Error Estándar	n	Promedio	Error Estándar
<i>B. taurus</i>	50	17,0	1,6	15	31,7 a	3,1
F1	62	17,6	1,3	27	25,3 ab	1,8
Triple cruce	50	16,5	1,6	18	21,5 b	2,0
Promedio general	162	17,0	1,1	45	25,3	2,0

* Medias con igual letra en la misma columna no difieren $P > 0,05$

Producción de leche y su relación con la emisión de metano

Se observó una menor producción de leche diaria en *Bos taurus* ($p < 0,01$) con respecto a las vacas de los otros dos grupos raciales. En lo concerniente a la emisión de CH₄, no se encontraron diferencias significativas, sin embargo el triple cruce mostró una tendencia a la menor emisión, siendo de 15,6 y 10,1% respecto a las vacas del *Bos taurus* y el F1, tal y como se observa en el cuadro 8.

Cuadro 8. Producción de leche diaria y emisión de CH₄ por kg de leche. CATIE, Turrialba, Costa, Rica. 2017.

Grupo Racial	n	Producción de leche (kg/v/d)*		Relación: metano/leche (g CH ₄ /kg leche)	
		Promedio	Error Estándar	Promedio	Error Estándar
<i>B. taurus</i>	35	16,6 a	0,67	16,8	2,0
F1	52	18,7 b	0,54	17,9	1,7
Triple Cruce	35	18,2 b	0,66	15,1	2,0
Promedio general	121	18,0	0,53	16,8	1,3

* Medias sin letras o igual letra en la misma columna no difieren $P > 0,05$

Estimación del factor de emisión

Un aspecto básico en los inventarios de gases de efecto invernadero (GEI) es la utilización de factores de emisión que reflejen datos lo más cercano posible a la realidad que se desea representar. Aunque normalmente se conoce poco de la mecánica del cálculo, los supuestos y datos que se utilizan para realizar los inventarios en vacas de leche (un tema crucial en lechería tropical), son los factores de conversión para el periodo seco y de lactancia. En este caso, el factor de conversión se estimó como la porción de la energía bruta consumida que se convirtió a metano (Y_m) (Cuadro 9) de acuerdo con la metodología sugerida por IPCC, 2006.

Cuadro 9. Factor de conversión de energía bruta a metano (Y_m) en vacas lecheras. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 2017.

Vacas Lecheras	Y_m
Periodo de lactancia	5,2 ± 0,7
Periodo seco*	
<i>Bos taurus</i>	9,7 ± 4,0 a
F1	7,8 ± 1,8 ab
Triple cruce	6,6 ± 1,8 b

* Medias sin letras o igual letra en la misma columna no difieren $p > 0,05$

Se estimó para el periodo de lactancia un factor de conversión de $5,2 \pm 0,7\%$ de la EB ingerida transformada a CH_4 , mientras que para el periodo seco de estas mismas vacas, la variación y su promedio fueron altos para las vacas *Bos taurus*, una menor variación pero aún con valores relativamente altos, se dió en el caso de las vacas F1. En las vacas de triple cruce, el promedio fue semejante al sugerido por IPCC (2006), con una variación semejante a la de las vacas F1 de acuerdo a lo observado en el cuadro 9.

De acuerdo con la clasificación de lecherías, Vargas-Leitón *et al.* (2006) la finca lechera comercial del CATIE, ubicada en Turrialba, se ubica entre el conglomerado de especializadas semi-intensivas. Este conglomerado lo componen un 25% de los hatos de Costa Rica y corresponde a lecherías con ganado especializado, ubicadas en zonas altas de la Cordillera Volcánica Central, en suelos de tipo

Andisol, con precipitaciones anuales promedio de 2700 mm. No obstante, dicha lechería se ubica a 640 msnm, con una temperatura posiblemente mayor al promedio del conglomerado, por lo que las especies de pasto predominantes son de la familia Poaceae con mecanismos de asimilación del carbono de las plantas tipo C4, que de acuerdo con Van Soest (1994), se caracterizan por contenidos bajos de carbohidratos solubles y altos niveles de FDN y lignina.

El cantón de Turrialba en las últimas décadas, reporta incrementos en la precipitación anual de aproximadamente 3000 mm y una temperatura media diaria de 25°C, con humedad relativa del 80%, así como una disminución de la radiación solar, especialmente por interferencia de nubes (Abarca 2008). Lo que supone una mayor pérdida de confort para los animales de razas lecheras especializadas desarrolladas para climas templados y con selección genética dirigida hacia una mayor conversión de granos a leche. Por otra parte, bajo estas condiciones climáticas, se considera la posibilidad de incrementos en las estructuras anatómicas de sostén de las plantas C4, que de acuerdo con Sánchez (2007), reducen la calidad nutritiva para una eficiente producción, y son producto del incremento de la temperatura (Del Pozo 2002) y la reducción de luz (James 1995).

En relación con la variación del consumo de pasto de piso durante el periodo de lactancia y seco, los tres grupos mostraron en diferente proporción un efecto sustitutivo del pasto de piso por la suplementación, durante la lactancia. Las vacas *Bos taurus*, fueron las que menor sustitución tuvieron (0,7 kg MS), posiblemente debido al bajo consumo de pasto de piso que mostraron, seguidas del triple cruce (0,9 kg MS), y una fuerte sustitución se observó en las vacas F1 (1,5 kg MS). Posiblemente estas diferencias estén relacionadas a la proporción de sangre cebuina, que podría influir en la anatomía y función del tracto digestivo adaptándolo mejor al consumo de pastos semejantes a los presentes durante la evolución de este tipo de animal en los climas tropicales (Kennedy 2013). La mayor emisión observada en *B. taurus* durante el periodo seco posiblemente se deba a una menor tasa de recambio del rumen, producto del reducido consumo de pasto de piso mostrado por estas vacas.

El factor de conversión a CH₄ por unidad de EB consumida obtenido para vacas lactando de 5,2 ± 0,7%, fue semejante al observado mediante la misma técnica utilizada en este estudio en Uruguay por Ciganda *et al.* (2016) para animales en pastoreo con pasturas mejoradas, así como al límite inferior establecido por IPCC (2006) para vacas en pastoreo. Así mismo, el valor de 6,6 ± 1,8% para las vacas secas del triple cruce fue semejante al de IPCC (2006) y al observado en pasturas naturales y degradadas en Uruguay (Ciganda *et al.* 2016). Por otra parte, los factores de conversión para vacas secas F1 y *B. taurus*, exclusivamente a pastoreo en pasturas C4, fueron ligeramente mayores y altos respectivamente, en relación a los del IPCC (2006) para vacas en pastoreo. Los contenidos de energía digestible (ED) de la ingesta de las vacas en lactancia estuvieron adecuados, y el uso de concentrado, melaza y otros alimentos secos harinosos,

mejoraron del valor nutritivo de la dieta produciendo una reducción de la emisión de CH₄.

Teniendo como marco los considerandos anteriores, se puede indicar que para el caso de esta investigación, el encaste indicado por los registros de vacas lecheras vacas Jersey () x Gyr o Sahiwal (Holstein con un promedio de 25% de sangre *Bos indicus* lechero fue el tratamiento más eficiente; ya que mostró un adecuado consumo de MS, un incremento significativo en el consumo de MS del pastoreo con respecto al grupo de vacas de raza especializada y la menor emisión de CH₄ por día, y por unidad de peso metabólico, por unidad de materia seca consumida y por unidad de leche producida. Así mismo, cuando estuvieron en pastoreo exclusivamente (periodo seco), fueron las vacas con la menor emisión de CH₄.

LITERATURA CITADA

Abarca, S. 2008. Cambio Climático: Cuantificación de la variación del clima en Turrialba en el último medio siglo. *Alcances Tecnológicos* (6)1:85-95

Abarca, S. 2016. Emisión de gases de efecto invernadero y absorción de carbono en fincas ganaderas. *Alcances Tecnológicos* 11(1):3-16

Archimède, H; Eugène, M; Marie-Magdeleine, C; Boval, M; Martin, C; Morgavi, D; LeComte, P; Doreau, M. 2011. Comparison of methane production between C3 and C4 grasses and legumes (en línea). *Animal Feed Science and Technology* (166–167):59–64. Consultado 20 mar. 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.003>

Angharad, L. 2016. Seasonal composition of tropical C4 grasses, and its influence on rumen prokaryotic diversity in relation to methane production from beef cattle in the northern Australian rangelands (en línea). Tesis Ph. D. Queensland, Australia. University of Queensland. Consultado 20 mar. 2018. Disponible en <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:390478>

Charmley, E; Williams, S; Moate, Hegarty, P; Herd, R; Oddy, H; Reyenga, P; Staunton, K; Anderson, A; Hannah, M. 2016. A universal equation to predict methane production of forage-fed cattle in Australia (en línea). *Animal Production Science*. 56:169–180. Consultado 20 mar. 2018. Disponible en <http://www.publish.csiro.au/an/AN15365>

Ciganda V; Dini Y; Romero C; Mariotta J; Cajarville C. 2016. Emisión de metano entérico en bovinos de carne bajo condiciones representativas bajo pastoreo en Uruguay: pasturas implantadas vs campo natural degradado (en línea). *Revista INIA* (45):49 –52. Consultado 19 may. 2018. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/5801/1/Revista-INIA-Uruguay.-n.-45.-p.-49-52.-2016.pdf>

Del Pozo, RP. 2002. Bases ecofisiológicas para el manejo de los pastos tropicales. *Revista de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos* 32(2):109 – 137.

Holdridge, L 1978. *Ecología basada en zonas de vida*. San José, Costa Rica. 216p.

- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, CR). 2015. VI Censo Nacional
- Agropecuaria (en línea). San José, Costa Rica. Consultado 19 may. 2016. Disponible en <http://inec.cr/censos/censo-agropecuaria-2014>
- IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático), 2006. Directrices para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (en línea). *In* Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol. (4,10, 2006, Ginebra, Suiza). Consultado 20 mar. 2018. Disponible en <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- James, C.1995. Efecto de cuatro niveles de luz en la producción de biomasa y calidad nutritiva de cinco especies forrajeras en el trópico húmedo de Costa Rica. Tesis Ing. Agr. Turrialba, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 84p.
- Johnson, K, Johnson, D. 1995. Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science* 73(8):2483–2492.
- Kennedy, WK. 2013. Nitrogen Metabolism in *Bos indicus* and *Bos taurus* cattle consuming low – quality forage (en línea). Tesis Mag. Sc. Texas, Estados Unidos de Norteamérica..Texas A&M University. Consultado 20 mar. 2018. Disponible en <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/151030>
- Kurihara, M; Magner, T; Hunter, R; McCrabb, G.1999. Methane production and energy partition of cattle in the tropics. *British Journal of Nutrition*. 81(3):227–234
- Mejía, HJ. 2002. Consumo voluntario de forrajes en pastoreo. *In* Acta Universitaria 12(3):56-65. Irapuato México. Universidad de Guanajuato. Instituto de Ciencias Agrícolas.
- MPI (Ministry for Primary Industries New Zealand). 2014. Guidelines for use of sulphur hexafluoride (SF6) tracer technique to measure enteric methane emissions from ruminants. *In* Curso de Capacitación Investigación en Sistemas Ganaderos y Medición de Gases de Efecto Invernadero (2015). Lambert, MG (ed.). Memoria. Remehue – Osorno, Chile. INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias). 166 p
- NRC (National Research Council), 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. Washington, Estados Unidos de América. 132 p
- Ribeiro PLG; Machado FS; Campos MM; Guimaraes RG; Tomich TR; Larissa G Reis LG; Pharm Cassius C. 2015. Enteric methane mitigation strategies in ruminants: a review. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 28(2):124-143.
- Sánchez JM. 2007. Utilización eficiente de las pasturas tropicales en la alimentación del ganado lechero. *In* XI Seminario de pastos y forrajes en sistemas de producción animal (2007). UCR (Universidad de Costa Rica). San José, Costa Rica. p. 14-30.
- Tyrrell, F; Moe, P. 1972. Net energy value for lactation of a high and low concentrate ration containing corn silage (en línea). *Journal of Dairy Science* 55(8):1106–1112. Consultado 20 mar. 2018. Disponible en [http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(72\)85632-7/abstract](http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(72)85632-7/abstract)
- Van Soest, P. 1994. Nutritional Ecology of Ruminant. 2 ed. Cornell University. USA. 479 p.
- Vargas Leitón B; Solís-Guzmán O; Sáenz-Segura F; León-Hidalgo H. 2013. Caracterización y clasificación de hatos lecheros en Costa Rica mediante análisis multivariado (en línea). *Agronomía Mesoamericana* 24(2):257-275. Consultado 20 mar. 2018. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/437/43729228003.pdf>
- Westberg, H; Johnson, K; Cossalman, M; Michal, J. 1998. A SF6 tracer technique: methane measurement from ruminants. Washington State University. Pullman, Washington, Estados Unidos de América. 40 p.

BALANCE DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN LECHERÍAS ESPECIALIZADAS DE COSTA RICA

*William Sánchez-Ledezma*¹

RESUMEN

Balace de gases de efecto invernadero en lecherías especializadas de Costa Rica. El objetivo de este estudio fue realizar el balance de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en sistemas de lechería especializados representativos de la zona alta de la Región Central de Costa Rica, provincia de Cartago, ubicados en sitios agroecológicamente diferentes, entre 1800 y 2700 m de altitud, en las coordenadas 9°94'12" y 9°89'96" latitud norte y 83°85'15" y 83°87'80" longitud oeste, en pisos altitudinales de montano a montano bajo y zonas de vida de bosque húmedo a muy húmedo. La investigación se realizó durante un periodo de un año consecutivo (2014), utilizando la metodología propuesta por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) en el 2006. Se cuantificó la fijación de carbono en el suelo, en los árboles de las cercas vivas y dispersos en potreros y bosque y las emisiones de metano (CH₄), óxido nitroso N₂O y dióxido de carbono (CO₂) generadas por los rumiantes, el estiércol, los fertilizantes nitrogenados, los combustibles fósiles y la electricidad. Se utilizó el dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) como unidad de medida, determinando el balance de GEI mediante la diferencia entre la cantidad CO₂ eq fijado y el emitido por el sistema. Se evidenció que los sistemas de lechería especializados evaluados, presentan un balance negativo de GEI, debido a que no fue posible cuantificar la fijación de carbono fijado en el suelo durante el corto periodo de evaluación (un año). Sin embargo, se demostró que el componente leñoso, conformado por el área de bosque, los árboles dispersos, las pasturas y las cercas vivas, retiene más del 50 % del carbono emitido por los mismos sistemas. Además, se concluyó que las emisiones de carbono se podrían reducir, con una adecuada estructuración del hato, desechando los animales improductivos y optimizando la fertilización nitrogenada.

Palabras clave: metano, dióxido de carbono, óxido nitroso, carbono equivalente.

¹ Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. wsanchez@inta.go.cr. San José, Costa Rica.

INTRODUCCIÓN

Los Gases de Efecto Invernadero (GEI) se producen mediante procesos o mecanismos naturales, que han permitido a través del tiempo mantener una temperatura cálida en el planeta (González y Rodríguez, 1999). Sin embargo, después de la revolución industrial se han evidenciado aumentos en la concentración de los GEI en la atmósfera, situación que se asocia a efectos negativos en el ambiente, como el aumento en la temperatura de la tierra y del océano, el descongelamiento de los glaciares, el aumento en el nivel del mar e incidencia de fenómenos naturales extremos como sequías y exceso de lluvia (Friedrich-Wilhelm y Werner, 2008; Shallcross *et al.*, 2007).

El dióxido de carbono (CO₂) el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) son los gases más relevantes que conforman los GEI, los cuales tienen un potencial de calentamiento de 1,21 y 310, respectivamente (IPCC, 2006). A pesar de que el metano posee un mayor poder de calentamiento que el CO₂, su tiempo de vida media en la atmósfera es de diez años (Moss, 2000; Niggli *et al.*, 2009). Dentro del sector agropecuario, el CO₂ se genera en su mayoría por la combustión de combustibles fósiles (gasolina y diesel) utilizados en el equipo agrícola, por su parte, el CH₄ se genera por la fermentación que ocurre en el tracto digestivo de los animales, y el N₂O por el uso de fertilizantes nitrogenados en las actividades agrícolas (Cabrera *et al.*, 2010).

Mediante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), varios países han unido esfuerzos en busca de mitigar las emisiones de GEI de origen antropogénico. Un ejemplo es el tratado de Kioto celebrado en 1997, donde 196 países se comprometieron a realizar el inventario nacional de GEI y a reducir las emisiones en un 5% con respecto a las emisiones de 1990 (Lascano y Cárdenas, 2010). Costa Rica, como país firmante de la convención, ha realizado tres inventarios nacionales utilizando la metodología propuesta por el Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (por sus siglas en inglés, IPCC), el cual ha definido las siguientes cuatro categorías como fuentes de emisión de GEI: a) energía; b) procesos industriales y uso de productos; c) agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU) y d) desechos. En el último inventario llevado a cabo

en Costa Rica en el año 2010, se encontró que la emisión de GEI a la atmósfera fue de 8788,84 Gg de CO₂ equivalente, siendo los sectores de energía (combustibles y gases), industria y desechos los responsables del 80,6, 9,1 y 15,7% de las emisiones, respectivamente, mientras que el sector AFOLU aportó un valor negativo (-473,29 Gg) debido a las grandes fijaciones de carbono que mantiene (IMN, 2014). Dentro del total de metano emitido por el AFOLU, la ganadería es responsable del 84% sin embargo, mediante el componente leñoso el sector fija el 48% del CO₂ emitido por los otros sectores (IMN 2014).

Algunos investigadores coinciden que en Costa Rica los sistemas de producción bovina y de ruminantes en general, son los que tienen el mayor potencial de reducir las emisiones de GEI (Abarca, 2013; Botero, 2013), habiéndose encontrado una gran mayoría de las fincas ganaderas en balance positivo, es decir, fijando más GEI de los que emiten.

Actualmente, la ganadería bovina de Costa Rica tiene el reto de incrementar la productividad al menor costo posible y con la menor emisión de GEI. En los sistemas ganaderos del trópico húmedo, los animales interactúan con una gran cantidad de biomasa proporcionada por los árboles, arbustos, pastos y forrajes que existen en el ecosistema, que además de suministrar beneficios nutritivos a los animales son capaces de retener gran cantidad de dióxido de carbono, siendo en algunos casos mayor que la cantidad emitida por el mismo sistema de producción. Ante esta situación, se hace necesario cuantificar la retención y emisiones de CO₂ equivalente en los sistemas de lechería especializada, con la finalidad de determinar su balance y, en caso de que éste sea negativo (mayores emisiones que capturas), buscar alternativas tecnológicas y de manejo que permitan reducir e incrementar la emisión y fijación de carbono, respectivamente.

El objetivo del estudio fue realizar el balance de gases con efecto invernadero (GEI) en tres sistemas de lechería especializados, representativos de la zona alta de la Región Central de Costa Rica, mediante la cuantificación del CO₂ eq que fijan y emiten los principales componentes que interactúan en los sistemas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en tres fincas comerciales representativas de la Región Central de Costa Rica, ubicada en la Cordillera Volcánica Central del país, específicamente en las localidades de Cot, Santa Rosa y San Juan de Chicué, de los cantones de Oreamuno y Central, provincia de Cartago.

Las fincas seleccionadas se ubican en sitios agroecológicamente diferentes, entre 1800 y 2700 m de altitud, entre las coordenadas 9°94'12" y 9°89'96" latitud norte y 83°85'15" y 83°87'80" longitud oeste, en pisos altitudinales de montano a montano bajo, con zonas de vida de bosque húmedo a muy húmedo (Bolaños y Watson, 1993). Los suelos son profundos de origen volcánico del orden de los Andisoles.

En las tres fincas, predomina el pasto kikuyo (*Kikuyuochloa clandestina*) como especie principal que es consumido en pastoreo rotacional, con aprovechamientos de medio día a intervalos de 30 días de descanso. Las praderas seleccionadas para el estudio se establecieron hace aproximadamente 20 años y reciben una fertilización a base de 250, 50 y 50 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente. La dosis anual de N se administró durante la estación lluviosa, distribuida en fracciones iguales después de cada rotación, mientras que la dosis de fósforo y de potasio se distribuyó en partes iguales entre el inicio de la estación lluviosa (junio) y la estación seca, cuatro meses después (octubre).

Para realizar el balance de GEI, se cuantificó la cantidad de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) emitido y fijado (t/año) por finca, por hectárea, por vaca lactante y por kilogramo de leche producido, esto mediante las ecuaciones propuestas por la directriz del IPCC (2006). Se utilizó el dióxido

de carbono equivalente (CO₂ eq) como unidad de medida, con el fin de emplear la misma disposición de medida para las fijaciones y emisiones por los sistemas.

En cuanto a la emisión de los GEI, se cuantificó la producción de CH₄, N₂O y CO₂ producidos por la fermentación en el tracto digestivo de los rumiantes, manejo del estiércol, la fertilización nitrogenada de las pasturas y el uso de los combustibles fósiles y de electricidad. Se utilizó la metodología propuesta por el IPCC (2006), niveles 1 y 2, según la directriz del capítulo 10 (Emisiones del ganado y manejo de desechos sólidos y líquidos). El nivel 1 es el método más simple, donde se aplican los factores de emisión al grupo de animales, mientras que en el nivel 2 se considera el peso de los animales, la etapa fisiológica, el manejo, la alimentación, el nivel de producción y otros factores relacionados con la emisión. Para estimar la fijación de CO₂ eq se consideraron los siguientes cuatro componentes: el suelo, las cercas vivas, los árboles y arbustos dispersos en las pasturas y el bosque secundario (con escasa perturbación antropológica), considerando la metodología propuesta por Veldkamp (1993), el IPCC (2006), De Melo y Abarca (2008) y Russo (2009). En la Figura 1 se presenta el diagrama del procedimiento y la metodología utilizados para estimar el balance de los GEI.

El estudio se limitó al área física y geográfica donde se ubica cada sistema de producción y durante un periodo de un año productivo. Se incluyeron únicamente las actividades e insumos sobre los cuales se puede intervenir en caso de que sea necesario reducir la emisión de los GEI o incrementar la fijación de carbono durante el proceso productivo.



Fuente: *Adaptado de García (2014).*

Figura 1. Procedimiento y metodología utilizados para estimar el balance de los GEI en tres explotaciones de lechería especializada en la zona alta de Cartago, Costa Rica. 2014.

Estimación de la emisión de los GEI

Como se mencionó anteriormente, para estimar las emisiones de los GEI se cuantificó la producción de CH₄, N₂O y CO₂ emitidos por la fermentación en el tracto digestivo de los rumiantes, la gestión del estiércol, la fertilización nitrogenada de las pasturas y el uso de combustible fósiles y de electricidad.

Fermentación en el tracto digestivo de los animales: Para estimar las emisiones de metano, se utilizó la metodología propuesta por el IPCC (2006) basada en la directriz del nivel 2 del capítulo 10. El hato se agrupó en cuatro categorías (vacas en producción y secas, novillas y terneras). Se tomó en cuenta el peso vivo medio y la ganancia de peso diaria por categoría y, en el caso de las vacas lactantes, la producción y el contenido de grasa en la leche. También se consideró el consumo de alimento balanceado por categoría, así como la energía digestible de este alimento y la digestibilidad de la materia seca (DIVMS) y el contenido en Fibra Neutro Detergente (FND) de la pastura. Los cálculos se realizaron mediante la siguiente ecuación:

$$Fe = [(EB \times Ym \times 365 \text{ días}) \div (55,65 \text{ MJ/kg CH}_4)]$$

Donde:

Fe = Factor de emisión (kg CH₄ animal/año).

EB = Energía bruta (MJ animal/día).

Ym = Tasa de conversión de EB en metano (pasto: 6,5% y concentrado: 3,0%) según IPCC (2006).

Finalmente, la cantidad de CH₄ obtenida se multiplicó por el potencial de calentamiento global del metano (21) para determinar la cantidad de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq).

Gestión del estiércol: Con respecto a las excretas que los animales depositan directamente en la pastura, se utilizó la directriz del IPCC (2006) nivel 1, que indica que en estos casos se debe considerar una emisión de un kg de CH₄ animal/año, debido a que en el trópico húmedo no existe información relacionada sobre la dinámica de las excretas depositadas por los rumiantes en los pastizales.

Para cuantificar las emisiones de CH₄ y de N₂O producto del acúmulo de estiércol o elaboración de compost, se utilizó la metodología propuesta por IPCC (2006) nivel 1 y los factores de emisión propuestos por el IMN (2015). El CO₂ no se toma en cuenta por estar en un ciclo biogeoquímico. Los cálculos se realizaron mediante la siguiente ecuación:

$$\text{CH}_4 \text{ o N}_2\text{O-N} = \text{ESa} \times \text{Fe}$$

Donde:

CH₄ = Emisión de CH₄ (kg/año).

N₂O-N = Emisión de N₂O (kg/año).

ESa = Cantidad de estiércol sólido acumulado (kg/año).

Fe = Factor de emisión de CH₄ (4g) y de N₂O (0,3g) kg/ESa (INM, 2015).

El acúmulo de aguas residuales por varios días, producto de la limpieza de las instalaciones de la lechería, también producen metano, óxido nitroso y dióxido de carbono; sin embargo, en las fincas estudiadas no existen acúmulos de estos residuos, por lo que no fueron consideradas en el balance.

La cantidad de CO₂ eq se obtuvo multiplicando el valor obtenido de metano y óxido nitroso por el potencial de calentamiento global de cada gas (21 y 310, respectivamente), de acuerdo con la propuesta del IPCC (2006).

Fertilización nitrogenada: La fertilización nitrogenada de los pastos y los forrajes también emiten óxido nitroso (N₂O), por lo que fue necesario cuantificar la cantidad de nitrógeno aplicado en cada finca durante el año. Posteriormente, se calculó la emisión de N₂O con base en la metodología propuesta por el IPCC (2006) nivel 1, utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{N}_2\text{O-N} = [(\text{NFa} \times \text{Af} \times 0,01) \times (44/14)]$$

Donde:

N₂O-N = Emisión de óxido nitroso (kg/año).

NFa = Cantidad de nitrógeno químico aplicado al suelo (kg/año).

Af = Área fertilizada (ha).

0,01 = Factor de emisión (kg N₂O-N por kg N).

44 = Peso molecular del NO₂.

14 = Peso atómico del nitrógeno.

Posteriormente, la cantidad de CO₂ eq se obtuvo multiplicando el valor obtenido en la ecuación por el potencial de calentamiento global (310) del óxido nitroso (IPCC, 2006).

Combustibles fósiles: El uso de combustibles fósiles en los sistemas ganaderos provoca la emisión de CH₄, N₂O y CO₂ al ambiente. Para determinar las emisiones de dichos gases se utilizó la metodología propuesta por el IPCC (2006) nivel 1, utilizando los factores de conversión propuestos por el IMN (2015), según las características de nuestros combustibles. Los cálculos se realizaron utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{CO}_2 \text{ eq} = \sum (\text{CC} \times \text{EF CO}_2) + \sum (\text{CC} \times \text{EF CH}_4) \times 21 + \sum (\text{CC} \times \text{EF N}_2\text{O}) \times 310$$

Donde:

CO₂ eq = Emisión de CO₂ equivalente por combustibles fósiles (t/año).

CC = Consumo de combustible (litros).

EF = Factor de emisión para el CO₂, CH₄ y N₂O según características del combustible costarricense (CO₂ = gasolina 2,26 y diesel 2,69 kg/litro; CH₄ = gasolina 0,3265 y diesel 0,363 g/litro; y N₂O = gasolina 0,01959 y diesel 0,2178 g/litro (INM, 2015).

21 y 310 = Potencial de calentamiento global del CH₄ y N₂O, respectivamente.

Electricidad: Debido a que en Costa Rica, parte de la electricidad se produce mediante la utilización de energía proveniente de combustibles fósiles (diesel) y éstos emiten CO₂, por lo que es necesario cuantificar el gasto de electricidad en Kwh/año, para finalmente determinar la emisión de CO₂ eq mediante la metodología propuesta por el IPCC (2006) nivel 1. En este caso, se utilizaron los factores de conversión propuestos por el IMN (2015), según las características del combustible de Costa Rica. Los cálculos se realizaron mediante la siguiente ecuación:

$$\text{CO}_2 \text{ eq} = \text{Kwh} \times \text{Fe}$$

Donde:

CO₂ eq = Dióxido de carbono equivalente.

Kwh = Consumo de electricidad (Kwh/año).

Fe = Factor de emisión (0,1170 kg CO₂ eq Kwh; INM, 2015).

Estimación de la fijación de carbono

Para cuantificar la fijación de CO₂ eq para cada explotación lechera, se consideraron los siguientes cuatro componentes: suelo, bosque secundario, árboles y arbustos dispersos en las pasturas y las cercas vivas.

Fijación de CO₂ eq en el suelo: El carbono orgánico total (COT) retenido en el suelo durante un ciclo anual, se determinó mediante la metodología propuesta por el IPCC (2006), incluyendo la densidad aparente del suelo (Veldkamp, 1993). Al inicio y final del año se tomaron tres muestras de 250 g de suelo por finca, a 10 cm de profundidad, para analizar la concentración de materia orgánica (MO), el contenido de carbono y la densidad aparente (Forsythe 1972). El cálculo del COT en el suelo al inicio y al final del año se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{COT} = \% \text{Cs} \times \text{Ls} \times \text{Da} \times 10^4$$

Donde:

COT = Carbono Orgánico Total (t/ha).

Cs = Contenido de carbono en el suelo (g/g).

Ls = Lámina de suelo (cm).

Da = Densidad aparente del suelo.

Posteriormente, se calculó el dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) en cada finca multiplicando el carbono orgánico total obtenido en el suelo por la relación entre el peso molecular del CO₂ y del carbono (44/12), como se presenta en la siguiente fórmula:

$$\text{CO}_2 \text{ eq} = \text{COT} \times (44/12)$$

Donde:

CO₂ eq = Dióxido de carbono equivalente retenido en el suelo (t/ha).

COT = Carbono orgánico total (t/ha)

44 = Peso molecular del CO₂.

12 = Peso atómico del carbono.

Finalmente, por diferencia entre el CO₂ eq existe al final e inicio de año, se determinó el carbono orgánico total retenido durante el ciclo anual.

Fijación de CO₂ eq en el bosque: La estimación del CO₂ eq fijado por el bosque existente en cada finca, se calculó utilizando la metodología propuesta por el IPCC (2006), mediante la siguiente fórmula:

$$\text{CO}_2 \text{ eq} = A \times \text{Tc} \times 0,47$$

Donde:

CO₂ eq = dióxido de carbono equivalente (Mg).

A = Área de bosque secundario (ha).

Tc = Tasa de crecimiento (7,0) (IPCC, 2006).

0,47 = Concentración de carbono en la biomasa (IPCC, 2006).

Fijación de CO₂ eq en los árboles y arbustos dispersos en las pasturas: La estimación del CO₂ eq fijado por los árboles y arbustos dispersos en las pasturas, se realizó mediante la metodología propuesta por Russo (2009). En el área de pastos se seleccionaron tres sectores de dos hectáreas cada uno, representativos en cuanto a densidad de árboles, altura y Diámetro a la Altura del Pecho (DAP). En cada sector se contó el número de árboles, seleccionando cinco para medir la altura del fuste y el DAP. Los cinco árboles fueron seleccionados en una escala de 1 a 5, donde uno representa el árbol de menor altura y DAP y cinco el más alto y de mayor diámetro. La altura de los árboles se midió utilizando un clinómetro, multiplicando la distancia entre el árbol y el clinómetro (12 metros) por el ángulo que registró el clinómetro. Al resultado de esta operación se le sumó la altura entre el nivel del suelo y la posición del clinómetro cuando se realizó la medición del ángulo (altura al ojo).

En cada sector también se contó el número de arbustos, seleccionado cinco para medir la altura y el diámetro. La altura del tronco se midió desde el suelo hasta la primera difusión importante, y el diámetro a 40 cm de altura.

Posteriormente, se estimó el volumen del tronco de los árboles y de los arbustos muestreados utilizando la siguiente fórmula:

$$V_t = \pi \times r^2 \times a$$

Donde:

V_t = Volumen del tronco (m³).

π = Constante.

r = Radio.

a = Altura del tallo.

Seguidamente, se determinó el peso del tronco de cada árbol o arbusto muestreado utilizando la siguiente fórmula:

$$Pt = Vt \times Dm \times Fe$$

Donde:

- Pt = Peso del tronco (kg).
- Vt = Volumen del tronco (m³).
- Dm = Densidad de la madera (0,50) (IPCC 2006).
- Fe = Factor de expansión (ramas y raíces) de la madera (0,30 %; Russo, 2009).

Además se determinó el peso de carbono en el tronco mediante la siguiente fórmula:

$$PCt = Pt \times 0,47$$

Donde:

- PCt = Peso del carbono en el tronco.
- Pt = Peso del tronco.
- 0,47 = Concentración de carbono en la biomasa (IPCC, 2006).

Finalmente, se determinó el CO₂ eq retenido en los árboles y en los arbustos mediante la siguiente fórmula:

$$CO_2 \text{ eq} = PCt \times (44/12)$$

Donde:

- PCt = Peso del carbono en el tronco del árbol o arbusto.
- 44 = Peso molecular del CO₂.
- 12 = Peso atómico del carbono.

Por último, se obtuvo la cantidad total de CO₂ eq fijada por los árboles y arbustos existentes en cada finca multiplicando el CO₂ eq obtenido por árbol o arbusto por la cantidad existente de cada uno.

Fijación de CO₂ eq en las cercas vivas: Para estimar el CO₂ eq almacenado en las cercas vivas, se utilizó la metodología propuesta por De Melo y Abarca (2008), la cual consiste en realizar las siguientes mediciones:

- Total de metros lineales de cerca viva existentes en la finca.
- Cantidad de árboles promedio por metro lineal.
- Altura del fuste del árbol o tronco.

- Diámetro del árbol a la altura de pecho (DAP).
- Densidad estimada de la madera (0,50) (IPCC 2006).
- Concentración de carbono en la biomasa (0,47%) (IPCC 2006).
- Factor de expansión de la madera (0,30%) (Russo 2009).

La cuantificación del total de metros lineales de cerca viva, se realizó mediante el recorrido de los linderos de todas las cercas vivas existentes en cada finca, con el apoyo del GPS. Posteriormente, se seleccionaron tres sectores de 50 metros lineales cada uno, representativos del total, pero diferentes entre sí en cuanto a densidad de árboles, altura y DAP de los mismos. Se consideraron tres categorías: baja, media y alta. En cada sector se seleccionaron diez árboles, a los cuales se les midió la altura del fuste o tronco (eje principal) y el DAP. El volumen del tronco de cada árbol (Vt), el peso del tronco (Pt) y el carbono retenido en éste (PCt), fueron calculados de acuerdo con las ecuaciones anteriormente descritas.

Finalmente, se estimó el dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) por metro lineal, y posteriormente por el total de la cerca viva, mediante las siguientes fórmulas:

$${}^1CO_2 \text{ eq} = PCt \times (44/12) \text{ y } {}^2CO_2 \text{ eq} = {}^1CO_2 \text{ eq} \times TCV$$

Donde:

- ¹CO₂ eq = Dióxido de carbono equivalente retenido por m de cerca viva (kg/m).
- ²CO₂ eq = Dióxido de carbono equivalente retenido por el total de metros lineales de cerca viva (t).
- PCt = Peso de carbono del tronco (kg).
- TCV = Total de metros lineales de cerca viva (m).
- 44 = Peso molecular del CO₂.
- 12 = Peso atómico del carbono.

Una vez estimado el CO₂ eq emitido y retenido en cada finca, se realizó el correspondiente balance de CO₂ eq, mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Balance GEI} = CO_2 \text{ eq fijado} - CO_2 \text{ eq emitido.}$$

Donde:

- GEI = Gas de Efecto Invernadero.
- CO₂ eq = Dióxido de carbono equivalente.

Análisis de laboratorio

Se analizó el contenido de Materia Seca (MS), Materia Orgánica (MO), Carbono (C) y Densidad Aparente (DA) del suelo. El contenido en MS se obtuvo por pérdida de peso tras la desecación de $250 \pm 0,01$ g de suelo húmedo en estufa a 105

°C por 48 horas (AOAC, 1970), la MO mediante el método de Walkey y Black (1934), el contenido de carbono a través del método de combustión directo de LECO (Tabatabai y Bremner, 1970) y la densidad aparente mediante la metodología propuesta por Forsythe (1972).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las fincas analizadas se dedican únicamente a la producción de leche de vaca, mediante un sistema de lechería especializado, en áreas que oscilan entre 17 y 44,8 hectáreas. En la Cuadro 1 se detalla la distribución del uso del suelo en cada sistema de producción.

Cuadro 1. Distribución del uso del suelo (hectáreas) en tres fincas de lechería especializadas en la zona alta de Cartago. Costa Rica. 2014.

Cobertura vegetal	Sistema de producción		
	Cot	Santa Rosa	San Juan de Chicué
Bosque	0	17,0	3,0
Pastura principal	14,0	24,8	27,0
Cultivos forrajeros	3,0	3,0	7,0
Total	17,0	44,8	37,0

Como se observa en Cuadro 1, la finca ubicada en la localidad de Cot no dispone de área de bosque, mientras que en Santa Rosa y en San Juan de Chicué destinan el 38 y el 8 % de la superficie total a bosque, al que se restringe el ingreso de animales principalmente por la alta pendiente. También se observa, que la finca de Cot y San Juan de Chicué destinan más área a cultivos forrajeros (18 y 19 %, respectivamente), en comparación con Santa Rosa, que dedica únicamente el 7 % a dicho recurso.

Con respecto a la población bovina, en el Cuadro 2 se detalla la estratificación del hato, en número de cabezas disponibles en cada finca.

Cuadro 2. Estratificación del hato bovino (número de cabezas) en tres fincas de lechería especializada en la zona alta Cartago. Costa Rica. 2014.

Categoría de animal	Sistema de producción		
	Cot	Santa Rosa	San Juan de Chicué
Terneras menores 1 año	18	50	35
Novillas de 1 a 2,5 años	26	20	50
Vacas secas	27	25	25
Vacas en producción	62	95	105
Total	133	190	215

El porcentaje de animales adultos con respecto al hato total es semejante entre fincas, con valores que oscilan entre el 61 y el 67 %. Sin embargo, el porcentaje de animales adultos en ordeño es mayor en Santa Rosa y en San Juan de Chicué ($80 \pm 1,1$ %) que en Cot (70 %). Lo mismo sucede con la disponibilidad de animales de reemplazo en Santa Rosa y en San Juan de Chicué ($39 \pm 1,9$ %), en comparación con la localidad de Cot (33 %).

En relación con los insumos que emiten GEI al ambiente, en las tres fincas se utilizan fertilizantes nitrogenados, combustibles fósiles (gasolina y diesel) y electricidad como fuente de energía para el funcionamiento de la maquinaria agrícola. La electricidad es considerada como insumo emisor de GEI, debido a que parte de la energía eléctrica de Costa Rica es producida mediante la utilización de hidrocarburos. En la Cuadro 3 se detalla la cantidad de fertilizante, combustible fósiles y electricidad utilizada en cada sistema de producción.

Cuadro 3. Cantidad de nitrógeno, diesel, gasolina y electricidad utilizada en tres fincas de lechería especializada en la zona alta de Cartago, Costa Rica. 2014.

Insumo	Unidad de medida	Sistema de Producción		
		Cot	Santa Rosa	San Juan de Chicué
Nitrógeno	kg/ha/año	400	450	415
Diesel	litros/año	3.410	4.400	5.500
Gasolina	litros/año	1.100	2.750	2.750
Electricidad	Kwh/año	19.800	30.000	33.000

En cuanto a la producción de leche, la finca ubicada en San Juan de Chicué fue la que alcanzó la mayor producción total (958,1 t/año), debido a que es la que cuenta con mayor superficie y número de vacas dedicadas a la actividad. Sin embargo, la

producción de leche por hectárea fue semejante en las tres fincas ($28,3 \pm 38$ t/ha/año). En el Cuadro 4 se detallan los rendimientos de leche registrados en cada finca.

Cuadro 4. Producción de leche por finca, vaca y hectárea en tres fincas de lechería especializada en la zona alta de Cartago.

Sistema de producción	Área de ganadería (ha)	Vacas en producción	Producción de leche		
			Vaca	finca	hectárea
			(kg/día)	(t/año)	
Cot	17,0	62	21	475,2	28,0
Santa Rosa	27,8	95	23	797,5	28,7
San Juan de Chicué	34,0	105	25	958,1	28,1

Emisión de gases de efecto invernadero

En Cuadro 5 se presenta el detalle de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) por componente en cada finca.

Cuadro 5. Emisión de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) en t/año/por fuente de emisión, en tres fincas de lechería especializada en la zona alta de Cartago, Costa Rica. 2014.

Fuente de emisión	Sistema de producción								
	Cot			Santa Rosa			San Juan de Chicué		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Fermentación digestiva	0	11,43	0	0	14,72	0	0	19,44	0
Fertilización nitrogenada	0	0	0,081	0	0	0,162	0	0	0,162
Gestión del estiércol	2,56	0,215	0,005	2,84	0,478	0,019	3,87	0,597	0,024
Combustible	11,02	0,002	0,0001	12,28	0,002	0,0001	19,86	0,003	0,0002
Electricidad	2,32	0	0	3,51	0	0	3,90	0	0
Total	15,90	11,65	0,09	18,63	15,20	0,181	27,63	20,04	0,186

En cuanto a las emisiones de CO₂, el uso de combustibles fósiles fue la principal fuente emisora del gas ($69,0 \pm 2,99$ %), distribuyéndose el resto en partes semejantes entre la gestión del estiércol y el uso de la electricidad. En el caso del CH₄, la principal emisión proviene de la fermentación en el tracto digestivo de los animales ($97,3 \pm 0,69$ %), aportando la gestión del estiércol y el uso de combustibles fósiles menos del $2,7 \pm 0,71$ %. También

se determinó que el $88,9 \pm 1,55$ y el $9,7 \pm 3,76$ % de las emisiones de óxido nitroso, provienen de la fertilización nitrogenada y de gestión del estiércol, respectivamente, aportando el resto por el uso de combustibles fósiles.

De los tres principales GEI (CO₂, CH₄ y N₂O) el dióxido de carbono es el que más se produce en las tres fincas, superando en términos medios al

metano y al óxido nitroso en $5,1 \pm 2,20$ y $20,6 \pm 6,10$ t/año, respectivamente. Sin embargo, al multiplicar las cantidades emitidas de cada gas por su respectivo potencial de calentamiento ($\text{CO}_2 = 1$, $\text{CH}_4 = 21$ y $\text{N}_2\text{O} = 310$), las emisiones de metano expresadas en CO_2 eq, superan en 16 y 7 veces a las de dióxido de carbono y óxido nitroso, respectivamente. En el Cuadro 6 se presenta el detalle de la emisión de CH_4 por finca, hectárea y kilogramo de leche producido, procedente de la fermentación en el tracto digestivo de los animales y de la gestión del estiércol, que son los dos principales contribuyentes.

Cuadro 6. Emisión de metano por finca, por hectárea y kilogramos de leche producidos, en tres fincas de lechería especializada en la zona alta de Cartago. Costa Rica. 2014.

Emisión de metano	toneladas CH_4 /año		CH_4 (g)/ kg leche
	Por finca	Por hectárea	
Fermentación entérica			
Cot	11,43	0,672	24,05
Santa Rosa	14,72	0,529	18,46
San Juan de Chicué	19,44	0,572	20,29
Gestión del estiércol			
Cot	0,215	0,013	0,45
Santa Rosa	0,478	0,017	0,60
San Juan de Chicué	0,597	0,018	0,62
Total			
Cot	11,65	0,685	24,51
Santa Rosa	15,20	0,546	19,06
San Juan de Chicué	20,04	0,590	20,91
Promedio	15,63	0,607	21,49

La finca de Cot produjo la menor cantidad de metano (11,65 t/año), aunque es el sitio donde se emite más CH_4 por hectárea (0,685 t/año) y por kilogramo de leche producido (24,51 g). Las fincas de Santa Rosa y San Juan de Chicué emitieron, en promedio, un $17,1 \pm 4,54$ y un $18,5 \pm 5,34\%$ menos de metano por hectárea y kilogramo de leche, respectivamente, que en Cot. Por su parte, en la finca de Santa Rosa se produjeron menores emisiones de metano (15,20 t/año) que en la de San Juan de Chicué (20,04 t/año); sin embargo, las emisiones por hectárea ($0,568 \pm 0,0311$ t/año) y kilogramo de leche producido ($20 \pm 1,31$ g) fueron semejantes.

Como era de esperar, las vacas en producción emitieron mayor cantidad de metano procedente de la fermentación en el tracto digestivo que las vacas secas y los animales de menor tamaño, como se detalla en la Figura 2.

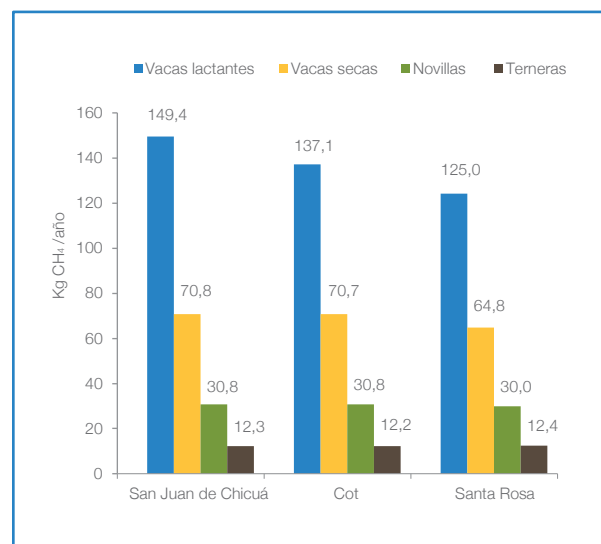


Figura 2. Emisión de metano procedente de la fermentación en el tracto digestivo, según categoría de animal, en tres fincas de lechería especializada en la zona alta de Cartago. Costa Rica. 2014.

En promedio, las vacas en producción emitieron un 50% más de metano que las secas, las cuales a su vez emitieron un 55% y un 82% más de metano que las novillas y las terneras, respectivamente. En Santa Rosa, la emisión de metano por vaca lactante y año (125 kg), fue menor que en Cot (137,1 kg) y en San Juan de Chicué (149,4 kg), diferencias que se mantuvieron en el caso de las vacas secas. Sin embargo, las novillas y las terneras produjeron cantidades similares en las tres fincas.

Balance de gases de efecto invernadero

Como ya se ha mencionado, en el balance se utilizó como unidad de medida el dióxido de carbono equivalente (CO_2 eq), para poder realizar las comparaciones entre los sistemas de producción. En el Cuadro 7 se detalla la emisión y la fijación de CO_2 eq y el balance respectivo de cada sistema.

Cuadro 7. Balance anual de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) en toneladas/año, en tres fincas de lechería especializada en la zona alta de Cartago, Costa Rica. 2014.

Componente	Sistema de producción			Contribución (%)
	Cot	Santa Rosa	San Juan de Chicué	
Emisión de CO₂ eq (t/año)				
Fermentación digestiva	240,1	309,2	408,3	81,6 ± 2,61
Fertilización nitrogenada	25,0	50,1	50,1	10,5 ± 2,05
Gestión del estiércol	6,2	15,9	20,0	3,4 ± 1,07
Combustibles fósiles	11,1	12,3	20,0	3,7 ± 0,49
Electricidad	2,3	3,5	3,9	0,8 ± 0,06
Total	284,7	391,0	502,3	100,0
Fijación de CO₂ eq (t/año)				
Bosque secundario	0,0	126,9	22,0	2,2±3,20
Árboles dispersos	0,0	123,7	238,5	4,8±0,4,39
Cercas vivas	30,8	0	0	1,1±1,85
Suelo	0	0	0	0
Total	30,8	250,6	260,5	100,0
Balance Emisión-Fijación	+ 253,9	+ 140,4	+ 241,8	-
Remoción del componente leñoso (%)	10,82	64,09	51,86	-
Carbono orgánico en el suelo (10 cm)	931,2	1.898,4	2.501,4	-

La fermentación en el tracto digestivo y la fertilización nitrogenada, fueron responsables de la mayor parte de las emisiones de CO₂ eq (81,6 ± 2,61 y 10,5 ± 2,05 %, respectivamente), mientras que la contribución de la gestión del estiércol, el uso de combustible y electricidad no superó el 4 % en cada uno de los casos. Por lo que disponer de una adecuada estructuración del hato, así como optimizar la fertilización nitrogenada; es indispensable para contribuir a reducir las emisiones de GEI por kilogramo de leche producido en cada sistema de producción.

Además, en la finca de Santa Rosa, se produjo menos emisión anual de CO₂ eq por hectárea (14,06 t), vaca (3,26 t) y tonelada de leche producida (0,49 t) que en Cot y San Juan de Chicué (Figura 3), alcanzándose en Cot las mayores emisiones por hectárea (16,75 t) y tonelada de leche (0,60 t) y en San Juan de Chicué las mayores emisiones por vaca (3,86 t).

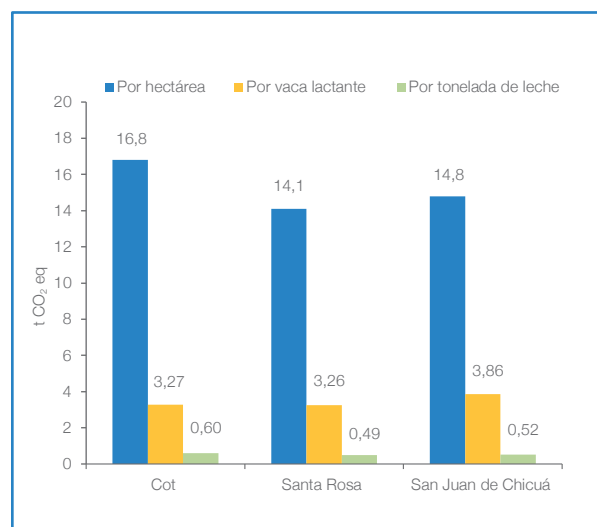


Figura 3. Emisión de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) por hectárea, vaca y kilogramo de leche, en tres fincas de lechería especializada en la zona alta de Cartago, Costa Rica. 2014.

Con respecto a la fijación de CO₂ eq, la contribución del componente leñoso en el caso de Cot fue escasa, debido al único aporte de las cercas vivas, mientras que en Santa Rosa, la fijación de carbono por la biomasa fue repartida en partes iguales entre el bosque (50,4%) y los árboles dispersos en las pasturas (49,6%). En el caso de San Juan de Chicué, los árboles dispersos tuvieron mayor contribución (91,6%) que el bosque (8,4%). En las dos últimas fincas, el componente leñoso retuvo el 64 y el 52%, respectivamente, del CO₂ eq emitido por los mismos sistemas, con capacidad de capturar 5,6 y 7,0 t CO₂ eq ha/año, en el mismo orden. La finca de Cot, capturó en el componente leñoso únicamente el 11% del CO₂ eq emitido, con fijaciones de 1,8 t CO₂ eq ha/año.

Al realizar el balance de GEI, y tomando en cuenta únicamente las fijaciones en el componente leñoso, los valores fueron negativos en las tres fincas. Sin embargo, hay que tener presente que en el suelo de los sistemas se está reteniendo carbono, el cual no fue posible registrar debido al corto ciclo de evaluación (un año), de lo contrario, el balance probablemente se tornaría positivo, ya que en el suelo de los sistemas evaluados existe entre tres y cinco veces el carbono emitido por los mismos sistemas productivos. Otro aspecto importante a resaltar, es que del total de carbono orgánico retenido en el suelo, la mayor parte se encontró en el área de pastura de cada finca.

Las fincas de Santa Rosa y San Juan de Chicué presentan ventaja agroecológica en comparación con la de Cot, debido a que cuentan con áreas de bosques y con seis a ocho árboles por hectárea dispersos en las pasturas, lo que fija grandes cantidades de carbono del ambiente a través del crecimiento de la biomasa, mitigando las emisiones de los GEI producidas por el mismo sistema de producción. Varios autores (Mora, 2001; Mahecha, 2002; Ibrahim *et al.*, 2006; Ibrahim *et al.*, 2007) indican que los árboles en pasturas no inhiben el rendimiento de MS del pasto, pero si mejoran su calidad y aportan múltiples beneficios a los animales y a los recursos naturales.

En cuanto a la estratificación del hato, los tres sistemas de producción disponen de un excesivo número de animales de reemplazo, cantidad que según Villegas (1995) no debe superar el 25% del hato total porque restringe la eficiencia productiva

y económica del sistema, y además acrecienta las emisiones de CH₄. Varias investigaciones realizadas en Costa Rica (Mora, 2001; García, 2014; Iñamagua, 2014) indican que la principal fuente de GEI en los sistemas de lechería es el metano producido en el tracto digestivo de los animales, por lo que está directamente ligado al número de animales que existe en el sistema productivo. Por ello, es necesario disponer de una adecuada estratificación del hato para reducir las emisiones de GEI.

En relación con las emisiones GEI, se determinó que los tres principales gases con efecto invernadero en los sistemas de producción de leche evaluados son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). El primero fue producido, principalmente, por el uso de combustibles fósiles (69%), el segundo como consecuencia esencial de la fermentación en el tracto digestivo de los animales (97%) y el último, a causa de la fertilización nitrogenada de las pasturas y forrajes (88%). Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Mora (2001), García (2014) e Iñamagua (2014) en estudios realizados en sistemas de lechería en Costa Rica.

Las emisiones de metano por vaca lactante oscilaron entre 125 y 149 kg/año, obteniendo la finca de Santa Rosa las menores producciones anuales por hectárea (0,529 t), por vaca en producción (125 kg) y por kilogramo de leche producido (18,46 g). Estos resultados se deben a que en esta finca los animales son de menor tamaño (Jersey), por lo que pesan y consumen menos MS que las Holstein, lo que repercute en una menor emisión de metano por animal. Estos argumentos concuerdan con los brindados por León *et al.* (2012) y Guzman y Sager (2013), que afirman que los bovinos con bajo peso corporal demandan menos consumo de MS y energía que los de mayor peso, por lo que emiten menos CH₄. Mora (2001) también reporta una mayor emisión de metano por vaca (470 g/día) a mayor peso (450 kg PV) y consumo de MS (13,8 kg MS/día), en comparación con vacas de peso entre 350 y 400 kg PV y consumos de 10,8 a 11,2 kg MS/día, respectivamente (388 y 463 g CH₄/vaca/día, en el mismo orden).

Los valores de emisión de metano obtenidos por vaca, fueron inferiores a los que reportan Mora (2001) en Cartago (161 kg/año) con vacas lactantes en pastoreo rotacional, mientras que Iñamagua (2014) encontró emisiones inferiores (97,8

$\pm 49,71$ kg/año) en una muestra de 104 fincas en Costa Rica. También los valores encontrados por Montenegro y Abarca (2001) y por el IMN (2014) son inferiores (90,9 y 85,0 kg vaca/año) a los obtenidos en este estudio. Esta discrepancia demuestra que la emisión de metano por parte de los bovinos de leche en Costa Rica es muy variable, debido a que está sujeta a variables de manejo y ambientales, tales como: raza, peso, estado fenológico, manejo, producción de leche y alimentación de los animales; las cuales son muy heterogéneas en los sistemas ganaderos dedicados a la producción de leche existentes en nuestro país.

La emisión total de metano por kilogramo de leche producido varió entre explotaciones, con valores que oscilaron entre 18,46 y 24,05 g, alcanzando las fincas de Santa Rosa y Cot las menores y mayores emisiones, respectivamente, mientras que en San Juan de Chicuá la emisión fue intermedia (20,29 g). Estas diferencias pueden ser explicadas por el hecho de que en Santa Rosa se produce un mayor rendimiento diario de leche por vaca (23 kg) que en Cot (21 kg) y una menor emisión de CH₄ por vaca (125, 137,1 y 149,4 kg/año para Santa Rosa, Cot y San Juan de Chicuá, respectivamente). Las diferencias entre Cot y San Juan de Chicuá se explican porque en la segunda finca la producción diaria por vaca es mayor (25 kg) que en la primera. Los valores obtenidos no estuvieron muy lejos del rango (19 a 22 g CH₄ por kg de leche) reportado por Montenegro y Abarca (2001) al evaluar vacas lactantes pastando estrella y kikuyo en la zona alta de Costa Rica. Sin embargo, Mora (2001) reporta emisiones ligeramente superiores, entre 23,5 y 27,2 g por kg de leche, en vacas pastoreando kikuyo.

Al convertir los tres principales GEI (CO₂, CH₄ y N₂O) a dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq), se determinó que en términos medios, la fermentación en el tracto digestivo y la fertilización nitrogenada fueron responsables de los mayores aportes (81,6 \pm 2,61 y 10,5 \pm 2,05 %, respectivamente), mientras que la gestión del estiércol, el uso de combustible fósiles y la electricidad no superaron el 3,5, 3,7 y 1 %, respectivamente. Al respecto, García (2014) analizó la correlación de 14 variables de manejo con la producción de CO₂ eq, encontrando que el número de vacas lactantes, secas y novillas, fue la variable que presentó mayor correlación positiva con la emisión de CO₂ eq, mientras que el uso de combustibles fósiles y de electricidad fueron las

variables con menor correlación. Velthof *et al.* (1996) también encontraron una correlación positiva entre la fertilización nitrogenada de las pasturas y la emisión de GEI en fincas de lechería.

Las emisiones anuales de CO₂ eq por hectárea (14,06 t) y vaca (4,12 t) encontradas por García (2014) fueron inferiores a las alcanzadas en Cot (16,75 y 4,59 t, respectivamente) y San Juan de Chicuá (14,77 y 4,78 t, en el mismo orden). Otro aspecto importante es que en la finca de Santa Rosa se logró una mejor relación de t CO₂ eq: tonelada de leche producida (0,49:1), en comparación con Cot (0,60:1) y San Juan de Chicuá (0,52:1). Por tanto, parece evidente que las menores emisiones de GEI de la finca de Santa Rosa obedecen al tipo de animal del que disponen, ya que, como se ha indicado, las vacas Jersey consumen menos MS que las Holstein, por lo que emiten menos CH₄ y CO₂ eq.

Con respecto a la fijación de carbono, se determinó que en las tres fincas el CO₂ eq contenido en el suelo a los 10 cm de profundidad superó entre 3,3 y 5,0 veces al CO₂ eq emitido por los sistemas productivos. Sin embargo, en el presente trabajo, debido al corto periodo de evaluación (un año) no fue posible demostrar que gran parte de este carbono es retenido por los mismos sistemas por año, lo que significa que si se pretende determinar la cantidad de carbono retenido en los sistemas ganaderos de la zona alta de nuestro país, probablemente es necesario realizar evaluaciones durante varios años, con mediciones tanto en la época seca como en la lluviosa.

El promedio de CO₂ eq retenido en el suelo fue de 54,9 \pm 12,65 t/ha, valor ligeramente inferior al rango de 55 y 57,1 t/ha encontrado por García (2014) a la misma profundidad en seis fincas estudiadas en la zona alta de Costa Rica. Sin embargo, (Ibrahim *et al.* 2007) reportan que en pasturas degradadas el acúmulo es menor (21,7 t/ha) y mayor cuando el muestreo se realiza entre 0 y 100 cm de profundidad (119,2 t/ha). Una situación semejante ha sido descrita por Mora (2001) al muestrear entre 20 y 60 cm de profundidad (132,2 y 153,4 t/ha, respectivamente). Sin embargo, ninguno de estos autores encontró diferencias de acúmulos de carbono en suelos con pasturas sin o con árboles dispersos.

El componente leñoso también cumplió un papel importante como sumidero de carbono en los sistemas de producción, principalmente en las fincas de Santa Rosa y San Juan de Chicué, donde dicho componente fijó el 63,8 y el 51,9 % del CO₂ eq emitido por los sistemas, respectivamente, mediante el crecimiento de la biomasa del bosque secundario y los árboles dispersos en las pasturas. En estas dos explotaciones se dispuso de una densidad de 8 y 6 árboles por hectárea, según el mismo orden de las fincas. Por el contrario, en la finca de Cot no existe bosque ni árboles dispersos en las pasturas, solamente cercas vivas, las cuales fijaron únicamente el 10,8 % del CO₂ eq emitido por el sistema. Esta situación resalta la importancia de los bosques, los árboles dispersos en las pasturas y las cercas vivas en el equilibrio ambiental de los sistemas ganaderos.

En un estudio realizado por García (2014) sobre el balance de GEI en seis fincas en el trópico húmedo de Costa Rica, con cargas que oscilaron entre 1,1 y 1,7 unidades animal/ha y densidades de 2 a 7 árboles/1000 m² dispersos en las pasturas, áreas de bosque y cercas vivas, se encontraron fijaciones de carbono entre 61 y 166 % del CO₂ eq emitido por los sistemas. En este mismo estudio también se determinó que, de 14 variables analizadas, el diámetro del árbol, la altura y la cantidad de árboles, fueron las variables que presentaron mayor correlación positiva con la fijación de CO₂ eq en los sistemas de producción.

La fertilización nitrogenada es indispensable para optimizar el rendimiento de las pasturas y los forrajes. Sin embargo, el uso excesivo incrementa las emisiones de óxido nitroso y por ende de los gases de efecto invernadero. Por lo tanto, a pesar de que el metano de origen digestivo es el GEI más relevante en los sistemas ganaderos, realizar esfuerzos por reducir emisiones provenientes de

fertilización nitrogenada podría tener resultados a corto plazo si se realiza en fincas con exceso de uso del fertilizante.

El componente leñoso y el suelo son sumideros importantes de carbono orgánico. El primero, mediante una adecuada distribución del bosque, árboles dispersos en las pasturas y cercas vivas, podría capturar más del 50 % del dióxido de carbono equivalente emitido por el sistema, situación que permite un acercamiento al equilibrio ambiental de las lecherías. En el caso del suelo, se requiere realizar evaluaciones a mediano y largo plazo, en diferentes tipos de suelo y épocas del año, así como en condiciones diferentes de manejo de las pasturas, con el fin de cuantificar con mayor exactitud el aporte al sistema.

Las emisiones de gases de efecto invernadero en los sistemas ganaderos, es un fenómeno dinámico y complejo, donde intervienen e interactúan una serie de factores y componentes internos y externos al sistema. Si bien es importante y de interés nacional e internacional la reducción de las emisiones de los GEI por parte del sector, lo es también la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas ganaderos ante la dependencia de fuentes de alimentación externas, los fenómenos globales y el cambio climático.

El gas metano producido por la fermentación entérica de los animales, la fertilización nitrogenada de las pasturas y la gestión del estiércol son responsables del 95 % del total de CO₂ eq emitido por los sistemas de producción de leche, mientras que la contribución del uso de combustibles fósiles y de electricidad no supera el 5 %. En consecuencia, una adecuada estructuración del rebaño y apropiada fertilización nitrogenada, son factores esenciales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero por kilogramo de leche producida.

LITERATURA CITADA

- Abarca, S. 2013. Cambio climático y la mitigación en fincas lecheras. *Revista Universidad Técnica Nacional* (63):28-31.
- Association of Official Analytical Chemist (AOAC). 1970. *Methods of analysis of the official chemist*. 2 ed. Washington, DC, Estados Unidos de América. 1015 p.
- Bolaños, R; Watson, V. 1993. Mapa ecológico de Costa Rica, según el sistema de clasificación de zonas de vida del mundo de L.R. Holdridge. San José, Costa Rica. Centro Científico Tropical. ICE. Escala 1:200.000.
- Botero, R. 2013. El cambio climático y su mitigación en los sistemas agropecuarios tropicales (en línea). Engormex. Consultado 28 set. 2015. Disponible en <http://www.engormix.com/MA-ganaderia-leche/manejo/articulos/cambio-climatico-mitigacion-sistemas-t5069/124-p-0.htm>.
- Cabrera, V; Sols, D; del Corral, J. 2010. Determinants of Technical Efficiency among Dairy Farms in Wisconsin. *Journal of Dairy Science* (93):387-393.
- De Melo y Abarca, 2008. Cafetales para servicios ecosistémicos, con énfasis en el potencial de sumideros de carbono. Informe Final. Turrialba, Costa Rica. 61 p.
- Forsythe, W. 1972. *Manual de Laboratorio de Física del suelo*. Turrialba, Costa Rica. IICA. 216 p.
- Friedrich-Wilhelm, G; Werner, P. 2008. Climate development in the last Century-Global regional. *International Journal of Medical Microbiology* 298(1):5-11.
- García, K. 2014. Propuesta de alternativas de reducción de gases de efecto invernadero (GEI) para los sistemas lecheros de San Joaquín de Tuis de Turrialba. Tesis Mag. Sc. Heredia, Costa Rica. Universidad Nacional de Heredia. 78 pp.
- González, BF; Rodríguez, H. 1999. Proyección de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), Colombia 1998-2010. *Revista Académica Colombiana de Ciencias* 23(89):497-505.
- Guzman, ML; Sager, SL. 2013 Inventario de metano entérico de los sistemas de producción de carne para San Luis en el año 2009. *RIA* 39(1):88-94.
- Ibrahim, M; Mora, J; Rosales, M. 2006. Potencialidades de los sistemas silvopastoriles para la generación de servicios ambientales. Informe de Memoria. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica. 199 p.
- Ibrahim, M; Chacón, M; Cuartas, C; Naranjo, J; Ponce, G; Vega, P; Casasola, F; Rojas, J. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* (45):27-36.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). 2014. Inventario nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono 2010 (en línea). San José, Costa Rica. 64p. Consultado 25 jun. 2015. Disponible en <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/factores-de-emision-gei-quinta-edicion>.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). 2015. Factores de emisión de gases efecto invernadero (en línea). 5 ed. San José, Costa Rica. 9 p. Consultado 25 jun. 2015. Disponible en <http://cglobal.imn.ac.cr/sites/default/files/documentos/factoresemision-gei-2015.pdf>.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). 2008. El clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica. San José, Costa Rica. Comité Regional de Recursos Hídricos. p. 20-23.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. In Dong H; Mangino J; McAllister TA; Hatfield JL; Johnson DE; Lassey KR; de Lima M; Romanovskaya A (eds.). Chapter 10. Emissions from livestock and manure management. Kanagawa, Japan, Institute for Global Environmental Strategies (IGES). 87 p.
- Iñamagua, JP. 2014. Estrategias de alimentación, emisiones de gases efecto invernadero y relación ingresos-costos de alimentación asociados a la producción de leche en fincas productoras de leche de la Cooperativa Dos Pinos, en Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 77 p.

- Lascano, CE; Cárdenas, E. 2010. Alternatives for methane emissions mitigation in livestock systems. *Revista Brasileira de Zootecnia* 39:175-182.
- León, JA; Zamora, HD; León, JA. 2012. Estrategias de mitigación ante el cambio climático en fincas ganaderas altoandinas del departamento de nariño. *Revista Unimar* 59(1):23-38.
- Mahecha, L. 2002. El silvopastoreo: una alternativa de producción que disminuye el impacto ambiental de la ganadería bovina. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 15(2):226-231.
- Montenegro J; Abarca, S. 2001. Importancia del sector agropecuario costarricense en la mitigación del calentamiento global. San José, Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Instituto Meteorológico Nacional (IMN). 96 p.
- Mora, V. 2001. Fijación, emisión y balance de gases de efecto invernadero en pasturas en monocultivo y sistemas silvopastoriles en fincas lecheras intensivas en la zona alta de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 92 p.
- Moss, A. 2000. Methane production by ruminants: its contribution to global warming. *Annales de Zootechnie Journal* 49(3):231-253.
- Niggli, U; Fliebbach, A; Hepperly, P; Scialabba, N. 2009. Low Greenhouse gas Agriculture: Mitigation and adaptation potential of sustainable farming systems. FAO, Roma, Italia. Paginación.
- Russo, R. 2009. Guía práctica para la medición de la captura de carbono en la biomasa forestal. Limón, Costa Rica. Universidad EARTH. 17 p.
- Shallcross, DE; Khalil, MAK; Butenhoff, CL. 2007. The atmospheric methane sink. *In* Reay, DS; Hewitt, CN; Smith, KA; Grace, J (eds.). *Greenhouse Gas Sink*. Wallingford, UK. CAB International. p. 171-183.
- Solano, J; Villalobos, R. 2001. Aspectos fisiográficos aplicados a un bosquejo de regionalización geográfica-climática de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 8(1):26-39.
- Tabatabai, MA; Bremner, JM. 1970. Use of the Leco Automatic 70-Second Carbon Analyzer for Total Carbon Analysis of Soils. *Soil Science Society of America Journal* 34(4):608-610.
- Veldkamp, E. 1993. Soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropics of Costa Rica. Tesis Ph. D. Wageningen, Netherlands. Wageningen University & Research. 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 Biology and Biochemistry* 28(9):1215-1225.
- Villegas, LA. 1995. Actividad lechera. *In* Atlas Agropecuario de Costa Rica. UNED. San José, Costa Rica. p. 459-465
- Walkey, A; Black, AI. 1934. An examination of the Degtjoreff method for determination soil organic matter, and a proposed codification of the cromatic acid titration method. *Soil Science* 37:29-38.

INFORMACIÓN PARA LOS AUTORES

La publicación de la revista Alcances Tecnológicos, se inició durante el año 2003 y es una de las actividades relevantes del área de transferencia de tecnología del INTA, la revista

tiene carácter técnico-científico y se publica un número cada dos años. Se reciben los artículos que cumplan con los requisitos, que sean originales y que no han sido publicados en otra revista.

TIPOS DE DOCUMENTOS RECIBIDOS

Artículos científicos

Se refiere a una investigación detallada con resumen, introducción, materiales y métodos, resultados y discusión y literatura citada. Se debe demostrar la profundidad del estudio y resaltar los méritos del trabajo para su publicación como artículo científico. La extensión máxima es de 30 páginas en Microsoft Word a espacio sencillo y con tipografía Arial 12.

Notas técnicas

Se refiere a una publicación con la misma estructura de un artículo científico, sin su nivel de detalle. La extensión máxima es de 30 páginas.

Revisiones bibliográficas

Son recopilaciones y síntesis del conocimiento existente en un campo específico de interés en las ciencias agrícolas. Se debe incluir resumen, introducción y el contenido. Extensión máxima 30 páginas y con un mínimo de 25 referencias bibliográficas.

Análisis y comentario

Es el análisis de una situación específica, realizado por un especialista con reconocida trayectoria en el campo. Se debe incluir resumen, introducción, el contenido y la literatura citada. Extensión máxima 10 páginas.

Informaciones técnicas

Están enfocadas en aprovechar la amplia experiencia de un especialista en un campo específico. Se debe incluir resumen, introducción, el contenido y la literatura citada. Extensión máxima 15 páginas.

Comunicaciones cortas

Son resultados preliminares de interés para el sector agropecuario. Debe contener introducción, resultados y la literatura citada. Extensión máxima 10 páginas.

RECEPCIÓN DE DOCUMENTOS

1. La recepción de los artículos se hará en el Departamento de Transferencia e Información Tecnológica, teléfono 2231 3991, dirección electrónica comiteeditorial@inta.go.cr
2. La recepción o no de los escritos será competencia del Comité Editorial del INTA, el cual hará una valoración inicial de acuerdo a las normas y procedimientos para la publicación de documentos en la revista Alcances Tecnológicos del INTA.
3. Si el documento presentado es del INTA, el autor principal debe presentar una nota del programa correspondiente en la que se avala su publicación y se indica que no ha sido sometido a publicación en otra revista.
4. Si el documento presentado no es del INTA, el autor principal debe presentar una nota de la institución para la cual labora, en la que se autoriza su publicación y se indica que no ha sido sometido a publicación en otra revista.
5. Si en el documento presentado figuran varios autores, cada uno de ellos debe autorizar por escrito la publicación del documento. Además, deben indicar la aprobación del orden de los autores e indicar autor responsable para correspondencia.
6. Para aceptar o no la publicación el Comité Editorial somete los artículos a revisión. Para esto dispone de una lista de revisores internos y externos.
7. Los artículos son revisados por tres especialistas dos del INTA (revisores internos) y otro de otra institución (revisor externo).
8. Los revisores deben indicar las observaciones en el documento y completar el cuadro de calificación. Pueden utilizar la versión electrónica de control de cambios.
9. Si los autores no aceptan las sugerencias de los especialistas, deben enviar una nota al Comité Editorial explicando las razones; si es necesario el Comité Editorial elegirá otro especialista, el cual fungirá como árbitro.

REVISIÓN Y ACEPTACIÓN DE DOCUMENTOS

1. Los revisores internos tendrán un plazo máximo de un mes para entregar las publicaciones revisadas. A los revisores externos se les sugerirá el mismo tiempo para revisarlo.
2. Cuando el artículo es devuelto por los revisores, el/la editor/a dispondrá de ocho días hábiles para enviarlo a los autores con una nota en la que se indican las correcciones respectivas. Por su parte, los autores contarán con un plazo máximo de 15 días hábiles para hacer las correcciones y devolverlo, a el/la editor/a.
3. Una vez que el artículo es revisado y corregido, lo cual es corroborado por el Comité Editorial, se autoriza su publicación.
4. Luego de aprobada la publicación del artículo por el Comité Editorial, los autores deben revisar exhaustivamente todo el texto, para consentir su publicación.

REDACCIÓN DE LOS DOCUMENTOS

1. En la redacción de los artículos se deben utilizar las normas de la Real Academia Española y las unidades de medida del Sistema Métrico Decimal.
 - Las unidades no llevan punto, se escriben con minúscula y no tienen plural. Algunos ejemplos son: kilogramo (kg), gramo (g), metro (m), hectárea (ha), milímetro (mm), miligramo (mg) litro (l), metros sobre el nivel del mar (msnm).
 - Los elementos (N, P entre otros) y los compuestos químicos (como, por ejemplo: NaOH, NaCl) se escriben con mayúscula.
 - Cuando las unidades no están precedidas por un número, se expresan por su nombre completo sin utilizar su abreviatura. Por ejemplo: metro en lugar de m.
 - Los decimales se indican con coma; los miles y los millones con un espacio. Ejemplo: 8 327 451,25. Los números de cuatro cifras se escriben sin espacios. Ejemplo: 2458.
- En el caso de los números del cero al nueve, cuando no van seguidos de unidades, se escriben con palabra; y números para valores iguales o mayores a 10.
2. Cuando en los artículos se citan productos de origen químico o biológico, se deben utilizar solamente los nombres genéricos. Ejemplos: Terbufos, Oxidemeton Metil. No se acepta el uso de nombres comerciales. Además, los productos mencionados deben estar registrados y aprobados (para el cultivo) en la base de datos del Registro de Insumos y Fiscalización del Servicio Fitosanitario del Estado. Disponible en <https://www.sfe.go.cr/>
3. Los cuadros y figuras que no son propiedad del autor, deben poseer fuente.

FORMATO PARA CADA SECCIÓN DE LOS DOCUMENTOS

Título

Tiene que ser breve, específico, resumido, en mayúscula y en negrita. No más de 14 palabras. Él o los autores deben indicar los nombres científicos en cursiva, cuando consideren que el nombre común no es muy conocido (Agronomía Mesoamericana 2017).

Lo que no se recomienda en los títulos (Araya 2012)¹.

- Estudio sobre.....
- Informe de.....
- Investigación acerca de.....
- Contribución a.....
- Resultados de un estudio sobre.....
- Análisis de los resultados.....

1 Araya R. 06 jun. 2017. Lo que no se usa en los títulos. (entrevista). San José, Costa Rica.

Los nombres científicos (género, especie, cultivar y el nombre del clasificador) deberán ser citados para cada organismo en su primera mención, posteriormente se puede continuar usando el nombre común.

Título resumido

No debe ser mayor a ocho palabras (Agronomía Mesoamericana 2017).

Autor(es)

Se consideran autores los individuos o entidades responsables de los contenidos intelectuales de las publicaciones. El orden en el que se mencionan va de acuerdo con su contribución y aportes en la investigación y se colocan debajo del título. Con una nota al pie de página indicando la institución para la cual labora(n), la dirección postal y electrónica. Se omiten los grados académicos. El número total de autores no debe ser superior a seis.

Resumen

Se coloca después del nombre de los autores y presenta en forma concisa el mensaje del artículo, describiendo brevemente los materiales y condiciones más relevantes del experimento. Debe indicar el año y lugar, los resultados obtenidos y las conclusiones más importantes. Las oraciones usadas deben ser racionales, objetivas y justificar el porqué de la investigación y el objetivo, evitando describir directamente los materiales y métodos. La extensión no debe exceder las 250 palabras a espacio seguido y en un solo párrafo.

Palabras clave

Debajo del resumen se deben incluir de cinco a siete palabras o frases clave, no deben formar parte del título.

Introducción

Define el problema que motiva la investigación y al final de esta sección se indican los objetivos o razones del estudio. Pueden incluirse citas bibliográficas para ayudar a la definición del problema y del trabajo. La extensión de esta debe ser de aproximadamente 350 palabras (MAG 1990).

Materiales y métodos

En esta sección se recomienda describir en forma bien detallada la ubicación, la fecha de inicio y término, el ambiente, los materiales (si se usa equipo de medición, incluir marca y modelo), las técnicas, los tratamientos, el diseño experimental, los análisis estadísticos y las variables a evaluar expuestas con suficiente claridad para que otros científicos puedan repetir el estudio. Si el método es muy conocido, solamente se incluyen referencias bibliográficas aclaratorias; si es nuevo o modificado se debe escribir nuevamente. Escribir en orden cronológico (MAG 1990).

Resultados y discusión

Ambas partes deben ir juntas. Los resultados describen la información generada por la investigación; debe escribirse en forma concisa y siguiendo una secuencia lógica, usando cuadros y figuras, a los cuadros se les debe indicar su enunciado en la parte superior y a las figuras en la parte inferior, en ambos casos, si no son propiedad del autor se les debe anotar la fuente. Las fotografías, se anotan como figuras y su numeración se debe ajustar a la misma secuencia. Los cuadros se presentan sin divisiones internas. Los cuadros y figuras deben estar ubicados inmediatamente después de donde se mencionan, deben ser auto explicativos y la información debe presentarse en forma completa, clara y concisa, de tal forma que no se tenga que recurrir al texto para entender el resultado presentado. Los decimales se deben usar de acuerdo al grado de precisión que se tomaron los datos, si no, se debe redondear apropiadamente. Además de la descripción del contenido de la figura, en el título debe contener el lugar y el año en que se hizo el trabajo de investigación.

En la discusión la estadística se debe usar para explicar las diferencias de los tratamientos, debe usarse como una herramienta para probar la(s) hipótesis propuesta(s), con una base objetiva. Suministrar la significancia de las pruebas.

Se discutirán los resultados obtenidos, comparándolos con otros trabajos afines para dar interpretaciones o hacer deducciones lógicas sobre las diferencias o concordancias encontradas.

En la discusión se debe explicar hasta qué punto los resultados obtenidos contribuyen a la solución del problema (limitantes) y qué puede traducirse en recomendaciones, aplicaciones, sugerencias e hipótesis (MAG 1990).

Conclusiones o consideraciones finales

Van incluidas en la discusión.

Literatura citada

La lista de la literatura citada, para todos los tipos de documentos aceptados, debe estar conformada por no menos de diez citas bibliográficas recientes (90 % de los últimos 10 años), las citas deben reforzar científicamente lo expresado en el documento, además deben ser de fácil acceso para consultar en centros de documentación, bibliotecas o internet. Se deben utilizar las Normas de Redacción (IICA-CATIE) en su 5 edición (IICA y CATIE 2016). Disponible en <http://repiica.iica.int/docs/B4013e/B4013e.pdf>

LITERATURA CITADA

Agronomía Mesoamericana, Costa Rica. 2017. Instructivo para los autores/Instructions for authors. (en línea). San José, Costa Rica. 7 p. Consultado 28 abr. 2017. Disponible en <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/about/submissions#authorGuidelines>

IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Costa Rica); CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica). 2016. Redacción de referencias bibliográficas. 5 ed. San José, Costa Rica. Bibliotecas IICA-CATIE. 79 p.

MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 1990. Normas para la publicación de artículos científicos en la revista investigación agrícola. Investigación Agrícola 4(2):3-6.

REVISORES TÉCNICOS

Nombre	Institución
Agripina Jenkins Rojas	Consultora
Alejandro Zamora Meléndez	UNA
Alfredo Alvarado Hernández	UCR
Alfredo Bolaños Herrera	INTA
Allan González Herrera	UNA
Antonio Bogantes Arias	INTA
Arturo Solórzano Arroyo	INTA
Bernardo Mora Brenes	Consultor
Beatriz Molina Bermúdez	MAG
Beatriz Sandoval Carvajal	INTA
Carlos Boschini Figueroa	UCR
Carlos Cordero Morales	INTA
Carlos Luis Loría Quirós	UCR
Cristina Vargas Chacón	INTA
David Meneses Contreras	MAG
Danilo Pezo Quevedo	Consultor
Dennis Alpízar Monge	INTA
Edwin Orozco Barrantes	INTA
Francisco Álvarez Bonilla	MAG
Gaudy Ortiz Rivera	INTA
Guillermo Araya Umaña	INTA
German Aguilar Vega	INTA
Helga Blanco Metzler	UCR
Iván Calvo Villegas	INTA
Iván Serrano Bulakar	MAG
Jéssica Castillo Cruz	INTA
Jorge Mora Bolaños	INTA
Juan Mora Montero	INTA
Juan R. Mora Camacho	UNA
Laura Brenes Peralta	TEC
Laura Ramírez Cartín	INTA
Ligia López Marín	INTA

Nombre	Institución
Luis Alpízar Oses	INTA
Luis Barrantes Jaikel	INTA
Luis Carrera Hidalgo	INTA
Luis D. Monge Montero	Consultor
Magda González Arroyo	MAG
Manuel Carrera Aguilar	Consultor
María Mesén Villalobos	INTA
Mario Saborío Mora	Consultor
Mauricio Chacón Navarro	MAG
Nevio Bonilla Morales	INTA
Pablo Steven Rodríguez Rodríguez	Consultor
Patricia Quesada Rojas	UCR
Pedro Hernández Fernández	MAG
Rafael Orozco Rodríguez	UNA
Ramón Mexzón Vargas	UCR
Ricardo Guillén Montero	MAG
Roberto Camacho Montero	Consultor
Roberto Ramírez Matarrita	INTA
Roberto Soto Blanco	INTA
Rodolfo Araya Villalobos	Agronomía Mesoamericana
Ruth León González	INTA
Sayra Munguía Ulloa	Consultora
Sergio Abarca Monge	INTA
Steffany Orozco Cayasso	UNA
Stephanie Quirós Campos	INTA
Victoria Arronis Díaz	INTA
Walter Peraza Padilla	UNA
William Villalobos Muller	UNA
William Sánchez Ledezma	INTA
William Meléndez Gamboa	MAG
Yannery Gómez Bonilla	INTA

Dirección de la revista:

Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, oficinas del Ministerio de Agricultura y Ganadería. Sabana Sur, San José, Costa Rica. Dirección electrónica: iramirez@inta.go.cr. Teléfono 22 31 39 91. Plataforma INTA: www.platicar.go.cr web INTA: www.inta.go.cr

Perspectiva de la revista

La revista Alcances Tecnológicos se publicó por primera vez en el año 2003 con el objetivo de transferir las opciones tecnológicas generadas y validadas por el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, que es el instituto oficial de investigación en Costa Rica. Actualmente la revista somete a estudio artículos enviados por profesionales del sector agropecuario en general. La revista está dirigida a extensionistas del sector agropecuario, productores líderes, organizaciones de productores, empresas privadas y estudiantes entre otros.

En línea

ALCANCES TECNOLÓGICOS: revista.inta.go.cr | www.platicar.go.cr

Se agradece a las organizaciones de cooperación técnica y financiera que colaboraron con el desarrollo de las investigaciones y sus resultados, las cuales se presentan en esta edición especial de la Revista Alcances Tecnológicos del INTA, en el tema de cambio climático:

CATIE-Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

CIAT-Centro Internacional de Agricultura Tropical

CNPL-Cámara Nacional de Productores de Leche

CORFOGA-Corporación Ganadera

ICRAF-Centro Mundial de Agroforestería

FONTAGRO-Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria

USAID-Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional



Instituto Nacional de Innovación y
Transferencia en Tecnología Agropecuaria