

EMISIONES DE ÓXIDO NITROSO EN PASTURAS ACTIVAS DEL TRÓPICO HÚMEDO, BAJO DIFERENTES FUENTES DE FERTILIZANTES NITROGENADOS EN COSTA RICA

Mabel Arcos Acosta¹, Diego Tobar López², Andrés Vega Fonseca³.

¹I.A., Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño. Colombia. mabell.arcos0106@gmail.com

²MSc. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza-CATIE. Costa rica. dtobar@catie.ac.cr

³MSc. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza-CATIE. Costa rica. Andres.Vega@catie.ac.cr

RESUMEN

El cambio climático constituye uno de los principales desafíos a los que se enfrenta la humanidad. El Panel Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC) atribuye un 22% de las emisiones globales al sector Agrícola, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU). En América Latina, la ganadería aporta 66% (7,1 Gt CO₂eq año⁻¹), donde el ganado vacuno para producción de carne y leche emiten 41 y 29% respectivamente. En Costa Rica el sector ganadero representa 25% de las emisiones nacionales; 18% corresponden a óxido nitroso (N₂O). Este se conoce como “el GEI olvidado”, pues las investigaciones son escasas y las emisiones se estiman con el uso de factores por defecto del IPCC. En el contexto de contribuir con la brecha en investigación al respecto, el objetivo de este estudio fue determinar el flujo de emisiones de N₂O en pasturas activas del trópico húmedo, mediante la técnica de la cámara cerrada (Closed-Chamber Technique o CCT). Se estableció un ensayo con cuatro tratamientos: Control, Biofertilizante, Urea+inhibidor y Fertilizante Convencional. Los flujos de emisión de N₂O, presentaron variaciones entre tratamientos y día de muestreo. Cuando se aplicó Biofertilizante se obtuvieron factores de emisión de 0.76%, ligeramente superiores a los obtenidos con fertilización convencional y la urea+inhibidor con 0.32%. Los factores que afectaron la emisión de N₂O, fueron la precipitación y las características del suelo. Este estudio aporta información sobre las emisiones de N₂O de la ganadería lechera y a su vez, los resultados contribuyen al desarrollo de factores de emisión nacionales.

PALABRAS CLAVE: factor de emisión, fertilización, ganadería, óxido nitroso, pasturas.

ABSTRACT

Climate change is one of the main challenges that confront humanity. The IPCC attributes 22% of global emissions to agriculture, forestry and other land uses (AFOLU). In Latin America, livestock contributes 66% (7.1 Gt CO₂eq year⁻¹), where cattle for meat and milk production emits 41 and 29% respectively. In Costa Rica, the livestock sector represents 25% of national emissions; 18% corresponds to nitrous oxide (N₂O). This is known as "the forgotten GHG", because research is limited and emissions are estimated using IPCC default factors. In the context of contributing to the research gap in this regard, the objective of this study was to determine the optimal sampling time and flow of N₂O emissions in active pastures of the humid tropics, using the closed camera technique or CCT. An assay was established with four treatments: Control, Biofertilizer, Urea + inhibitor and Conventional Fertilizer. When Biofertilizer was applied, emission factors of 0.76% were obtained, slightly higher than those obtained with conventional fertilization and urea+inhibitor with 0.32%. The factors that affected N₂O emission were precipitation and soil. This study provides information on N₂O emissions from dairy farming and, in turn, the results contribute to the development of national emission factors.

Key Words: emission factor, fertilization, livestock, nitrous oxide, pastures.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye uno de los principales desafíos globales a los que se enfrenta la humanidad en este siglo, pues amenaza en medida creciente las infraestructuras, los procesos productivos y los ecosistemas. Por lo tanto, si se mantienen las tendencias actuales, se pueden comprometer los sistemas de soporte de vida del planeta y las perspectivas de supervivencia de una gran parte de especies, incluyendo la nuestra (Tudela, 2012). Dentro de los objetivos de desarrollo sostenible, los países se comprometieron a reducir las emisiones de los diferentes sectores productivos (CEPAL, 2016). Según los últimos datos sobre emisiones globales de gases de efecto invernadero recopilados en el año 2014, se estimó una cantidad de 52,7 Gt de CO₂e (Rogel *et al.*,

2015). Siendo los principales gases de efecto invernadero, el vapor de agua, el dióxido de carbono CO₂, el metano CH₄ y el óxido nitroso N₂O.

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) atribuye un 22% de las emisiones globales al sector Agrícola, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU) y para América Latina, encontraron que la ganadería es el sector que más aporta, 66 % (7,1 Gt CO₂eq año⁻¹) sobre las emisiones globales del sector AFOLU; siendo el subsector de ganado vacuno para producción de carne y leche, el de mayor porcentaje de emisiones con un 41 y 29% respectivamente (IPCC, 2014). Las principales fuentes de GEI en la ganadería son: la fermentación entérica, el uso de la tierra y los cambios en la utilización de la tierra: 36 %, la gestión del estiércol: 31 %, la producción animal: 25 %; la producción de piensos, la elaboración y el transporte un porcentaje del 7 % y 1 %, respectivamente, (Lorente, 2010).

En Costa Rica, la ganadería representa una de las principales fuentes de ingresos, es parte fundamental de la cultura, la economía, el paisaje y la biodiversidad costarricense. Esta cubre una quinta parte del territorio nacional con 1,4 millones de hectáreas, integrada por aproximadamente 37500 fincas en las que se estima que hay 1,45 millones de animales. Genera empleo, servicios ecosistémicos, oportunidades de desarrollo para el medio rural, asegura al consumidor nacional la carne, derivados lácteos y aporta de manera significativa a la oferta exportable del país (MAG, 2013).

Mediante la aplicación de las Medidas de Mitigación Nacionalmente Apropriadas (NAMA), Costa Rica pretende alcanzar un potencial de mitigación de 12,93 millones de toneladas de CO₂eq en los próximos 15 años, a través del fortalecimiento de la cadena productiva bovina, el fortalecimiento del sistema MRV (medición, revisión y verificación). Para lograr mayor productividad y rentabilidad en el negocio ganadero: menos emisiones de GEI por unidad de producto (MAG, 2013),

El N₂O se conoce como “el GEI olvidado”, pues en algunos países las investigaciones para este gas son escasas. A pesar de su bajo forzamiento radiactivo de 3.03x10⁻³ (W m² ppb⁻¹), su elevada eficiencia absorbiendo radiación infrarroja y su elevado tiempo de vida en la atmósfera vida útil estimada de 131 ±10 años (Prather *et al.*, 2012, citado en IPCC, 2013), hacen que su capacidad de calentamiento sea trescientas veces mayor a la del CO₂ en un período de 100 años (IPCC, 2013).

Al alrededor de 1,5 Tg de nitrógeno son emitidas a la atmósfera cada año como N₂O, a través de procesos de nitrificación y denitrificación, movilizados por fertilizaciones nitrogenadas en cultivos agrícolas (Ciampitti, 2005); siendo la denitrificación el principal responsable de la formación de este gas. Estos procesos tienen mayor probabilidad de ocurrir cuando se usan fertilizantes sintéticos o se aplican fertilizantes orgánicos a base de desechos vegetales y animales (Gonzales *et al.*, 2007). Dentro de los sistemas agropecuarios, las praderas son consideradas la mayor fuente de N₂O, debido a las excreciones de estiércol y orina por parte de los animales a través de los cuales se eliminan entre el 75 y el 90% del N consumido por los animales en pastoreo (Luo *et al.*, 2010). En el sector lechero costarricense se aplican grandes cantidades de nitrógeno (hasta 500 kg/ha), para estimular el crecimiento de los pastos y aumentar la carga animal (Montenegro y Abarca, 2001). Este sector se ha constituido en una fuente significativa de emisiones de GEI, representando un 25% de la emisiones nacionales (MAG, 2015). De ese porcentaje las emisiones de metano por fermentación entérica representan el 15%, mientras que las emisiones de óxido nitroso, el 18% del total de emisiones nacionales expresadas en Gg de CO₂eq (Chacón *et al.*, 2009).

En América Central la experiencia en la medición de N₂O es escasa, debido a los costos del desarrollo de experimentos a largo plazo. Las emisiones de N₂O se han estimado con el uso de factores por defecto de IPCC 2006 o por el factor de emisión propuesto por el instituto meteorológico nacional. Esto evidencia la necesidad de obtener datos de emisiones enfocados en el manejo de las fincas, características climáticas y geografía de la zona, para un diagnóstico con menor incertidumbre. En este contexto, el objetivo de este estudio fue determinar el flujo de emisiones de óxido nitroso en pasturas activas del trópico húmedo, bajo diferentes fuentes de fertilizantes nitrogenados, en la finca agrocomercial del Centro Agronómico Tropical de Investigación Y Enseñanza-CATIE.

METODOLOGÍA

Sitio de Estudio. El estudio se realizó en el área de lechería del de la Finca agrocomercial del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), en el cantón de Turrialba (Figura 1). Con una altitud de 646 msnm, clima tropical, temperatura media anual de 22.9 °C y una precipitación promedio de 2854 mm al año. Posee una superficie de 532 hectáreas; 35 de estas dedicadas a la producción lechera, área con suelos francos

(capa de 0-25 cm: 45.1% arena, 30.8% limo, 24.1% arcilla) y un pH de 5,6. Se maneja con un sistema de producción sostenible y sello de calidad Rainforest Alliance, otorgado por la Red de Agricultura Sostenible (RAS). Cada aparto tiene una extensión de 5000 m², lo que facilita el uso de un sistema rotacional de pastoreo, que comprende un día de ocupación y 26 días de descanso. Cuenta con razas de buen comportamiento adaptativo a las condiciones del trópico: Jersey, Sahiwal, Senepol, y T40, con una carga de 3,5 UA ha¹.

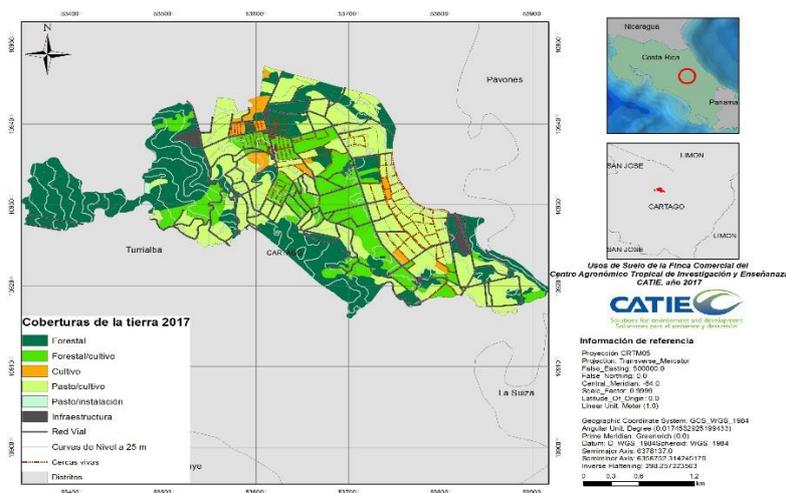


Figura 1. Finca agrocomercial del Centro Agronómico Tropical de investigación y Enseñanza-CATIE, ubicada en el cantón de Turrialba, Costa rica (Pulido, 2017).

Tratamientos. Se manejaron tres tratamientos más un control, para un total de cuatro tratamientos (Cuadro 1), esto con el fin de observar el comportamiento de las emisiones a través de la aplicación de diferentes fertilizantes orgánicos y químicos en la pastura. Las dosis se calcularon de acuerdo a la dosis manejada en la finca en kg/ha en las pasturas y partiendo de esta dosis se calculó la cantidad adecuada para un metro cuadrado.

Cuadro 1. Tratamientos y dosis utilizadas para cada cuadrante, en la medición de emisiones de N₂O en pasturas activas de la finca agrocomercial del CATIE.

Tratamiento	Composición	Dosis/cuadrante	Dosis/ha	Características
T1	Control	-	-	-
T2	Biofertilizante (L)	2.5	25000 m ³	Biol Vacuno
T3	Urea+inhibidor (kg)	0.0092	92	NITRO XTEND
T4	Fer. convencional (kg)	0.0092	92	ABOPASTO 24-12-6-7(S)

En los dos cuadrantes se distribuyó el tratamiento seleccionado y se aplicaron 0,45 g dentro de la base de la cámara y 8,75 g fuera de la base para completar la dosis calculada por cuadrante (9,2 g), esto para fertilizantes químicos y para el fertilizante orgánico se aplicó 0,123 ml dentro de la base y 2377 ml fuera de la base, para un total de 2.5 L por cuadrante, con base en la dosis manejada en la finca en kg/ha en las pasturas.

Diseño experimental. Se utilizó un diseño de bloques completos aleatorizados, de tal manera que en cada fila y en cada columna se ubicó solo una repetición de cada tratamiento, con cuatro repeticiones y cuatro tratamientos, siendo la cámara la unidad experimental (Figura 2).

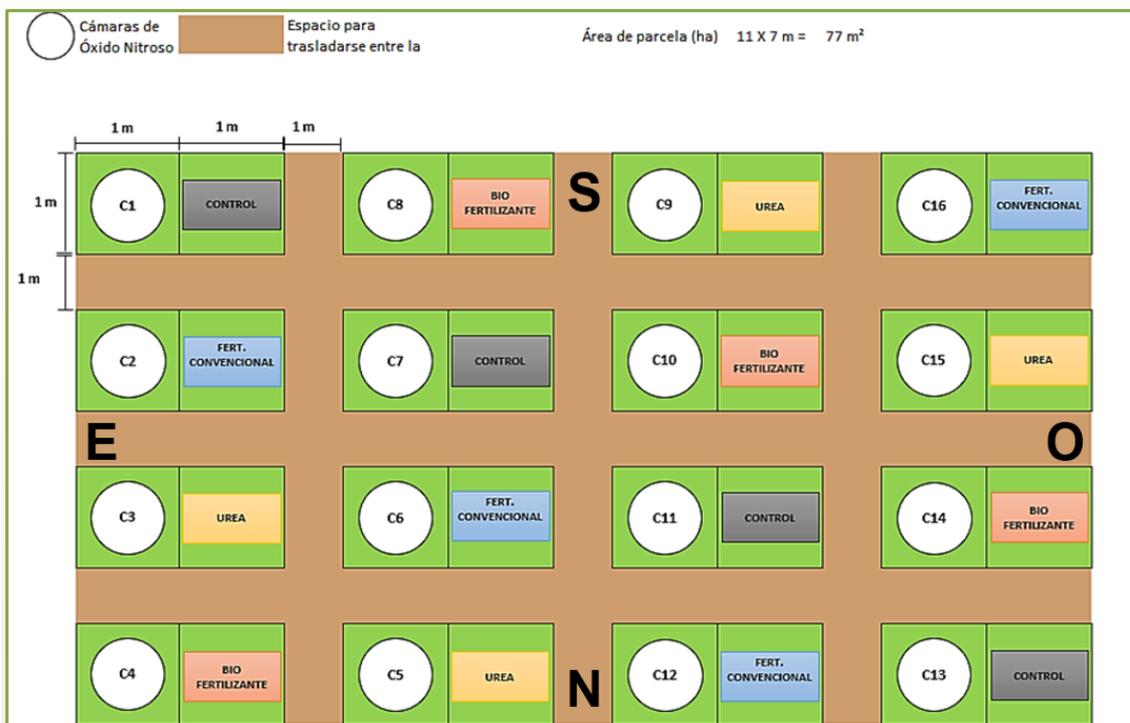


Figura 2. Distribución de los tratamientos y ubicación de las cámaras en la parcela experimental para medición d N₂O en pasturas activas de la finca agrocomercial del CATIE.

Muestreo de óxido nítrico. Se utilizó la técnica de la Cámara Cerrada (Closed-Chamber Technique o CCT) metodología descrita por (Rondón, 2000; Klein y Harvey, 2012). Las cámaras, se confeccionaron en tubo de PVC con un diámetro de 28 cm y 24 cm de altura, tapa acrílica con dos agujeros, uno para el septum de caucho donde se ubicó el termómetro y el otro para el dispositivo (Fitin, manguera, llave de tres pasos, aguja 23X1 y jeringa de 50ml) para la toma de muestra. Las cámaras, se cubrieron con

una membrana de polietileno, logrando así la aislación térmica. Se enumeraron de manera que la misma cámara se utilizó en la parcela equivalente, durante todos los muestreos. La base se elaboró en PVC, con una altura de 9 cm; se estableció a una profundidad de 5 cm en el suelo y 4 cm por encima de este. Al momento de unir la cámara con la base, se aseguró con una liga de neumático, para evitar fugas. La cámara fue cerrada únicamente durante el muestreo, monitoreando que la diferencia entre la temperatura externa e interna, no excediera más de 6°C (Imagen 1).



Imagen 1. Cámara y base de PVC, (Metodología de Rondón, 2000; Klein y Harvey) para la medición de N₂O en la Finca agrocomercial del CATIE (Arcos, 2017).

Procedimiento para la toma de muestras de óxido nítrico. Después de asegurar la cámara sobre la base, se mezcló el aire interno de la cámara, mediante el bombeo de tres jeringas de aire, una vez la muestra fue tomada, se trasvaso a un vial de vidrio de 20 ml (Al cual se le realizó un vacío previo de 2 min) y se conservó en refrigeración hasta llegar al laboratorio. El muestreo se realizó entre las 9 y las 11 de la mañana, con una hora de duración, tomando tres muestras por cámara en tres tiempos diferentes: T0: al instalar la cámara; T20 = 20 minutos; T40 = 40 minutos (Imagen 2).



Imagen 2. Toma de muestras de óxido nítrico en la en la Finca agrocomercial del CATIE (Arcos, 2017).

AL momento de la extracción del gas de la cámara, se registraron variables como: la temperatura interna, externa, la humedad ambiental para cada uno de los tiempos de muestreo. En cuanto al suelo se realizó análisis de textura, densidad aparente, amonio (N-NH⁴⁺), nitrato (NO₃-), pH y humedad, al inicio y final de la investigación, esto con el fin de determinar el efecto sobre las emisiones de N₂O. Las muestras se tomaron de acuerdo al cronograma de pastoreo programado en la finca (Cuadro 2).

Cuadro 2. Cronograma de muestreo de óxido nitroso según el número de días de pastoreo en la en la Finca agrocomercial del CATIE.

No. del muestreo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Días después del pastoreo	1	2	3	4	5	8	10	12	14	16	22
Observaciones	En las 16 cámaras, se tomó una muestra en tres tiempos para cada una y dos blancos; un total de 50 muestras diarias.										

Cobertura vegetal del sitio seleccionado. Se asignó un área de 165 m² con un área efectiva de 77 m², cubierta de pasto Tanner (*B. radicans* N.), el cual se cortó simulando el pastoreo del animal, con el fin de ver el impacto de la poda sobre las emisiones.

Análisis de información. Las muestras fueron analizadas por cromatografía de gases, mediante detector de captura de electrones para conocer las concentraciones de N₂O. Los cálculos de flujo de N₂O se realizaron a través de una plantilla en Excel y los datos estadísticos se realizaron mediante modelos mixtos lineales, con el software INFOSTAT. Después de cuantificar la concentración de los GEI en partes por millón, se procedió a calcular los gramos de N₂O en función del área y tiempo. Para obtener el flujo lineal en mg N₂O-N/m²/h se realizó la siguiente ecuación:

$$\text{mgN}_2\text{O-N /m}^2\text{/h} = \frac{(\text{g T40} - \text{g T20}) + (\text{gT20} - \text{g T0}) * 1000}{\text{Área} * \text{Tiempo}}$$

g T40 = g N₂O-N del T40

g T20 = g N₂O-N del T20

g T0 = g N₂O-N del T0

Área = Área de la cámara

Tiempo = Tiempo en proporción a la hora tomada.

Así mismo se realizó el ejercicio de determinación de factores de emisión, como ejercicio comparativo, respecto a los factores de emisión del IPCC 2006.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características del suelo y la pastura. Se realizó análisis de suelo y se tomaron datos de materia seca de la pastura del sitio al inicio y final del muestreo (Cuadro 3).

Cuadro 3. Características del suelo y la pastura para los diferentes tratamientos en el área de lechería de la Finca agrocomercial del CATIE para el año 2017.

ÉPOCA	INICIO DEL ESTUDIO				FINAL DEL ESTUDIO			
SUELO (Franco)	Control	Fertilizante Convencional	Urea+inhibidor	Biol	Control	Fertilizante Convencional	Urea+inhibidor	Biol
N-NH ₄ ⁺ mgN/kg	6,2	5,4	5,6	8,8	4,9	3,8	3,5	3,7
N-NO ₃ ⁻ mgN/kg	5	8,5	7,2	6,7	3,8	6,5	4,1	6,5
C.I.C	13,67	10,47	11,13	11,2	12,62	10,51	11,71	14,3
pH	5,7	5,3	5,4	5,6	5,9	5,5	5,7	5,9
PASTURA								
% M.S	12,5	22,11	18,01	18,1	29,3	37,73	36,09	38,4

Amonio (N-NH₄⁺). El contenido inicial de N-NH₄⁺ en el suelo fue 6.2 mgN/kg para el control, 5.4 mgN/kg en el fertilizante convencional, 8,8 mgN/kg para el Biofertilizante y 5.6 mgN/kg para urea+inhibidor, respectivamente (Cuadro 3). El tratamiento con Biofertilizante mostró valores superiores respecto a los otros tratamientos 8.8 mgN/kg, en la etapa inicial, pues el origen del N₂O en los purines vacunos procede mayoritariamente de la urea y el ácido úrico que son fuentes rápidamente degradables; lo cual coincide con lo reportado por Sommer *et al.*, 2004, quienes encontraron altas tasas de emisión inmediatamente después de la aplicación de purines al suelo, con más de 50% del total de las emisiones acontecidas dentro de las primeras 24 horas; emisiones que fueron disminuyendo paulatinamente hasta llegar a 3.7 mgN/kg. Así también se estima que la aplicación de urea+inhibidor puede llegar a retrasar la transformación de la N-amida a N-amoniacal de 7 a 14 días; esto no sucedió en la parcela con este tratamiento, donde el contenido de amonio fue más alto respecto al fertilizante convencional. Esta situación se dio posiblemente debido a las bajas precipitaciones registradas durante el muestreo y lo reportado por Sommer *et al.*, 2004, (citado por Martínez *et al.*, 2014), quien afirma que la aplicación de urea con inhibidor en un suelo húmedo durante un periodo seco no suele reducir significativamente las emisiones.

Nitrato (NO₃⁻). Respecto al contenido de nitratos en el suelo, se encontró que el mayor registró 8.5 mgN/kg, se obtuvo de la parcela con fertilizante convencional a pesar del bajo

contenido de N (24% en su fórmula); esto respecto a la urea que con registro de 5.6 mgN/kg a pesar del 46% de N en su fórmula; lo cual puede deberse al inhibidor, cuya función es retrasar la amonificación, permitiendo al N del fertilizante permanecer más tiempo en el suelo en forma de N-amoniacal (Sommer *et al.*, 2004). Así mismo se pudo observar que el contenido de NO₃⁻, en todas las parcelas disminuyó considerablemente hacia final del muestreo (cuadro 3). Teniendo en cuenta que en los últimos días de rotación, el crecimiento vegetativo de la pastura está en pleno desarrollo; es posible que la disminución de nitratos pudo deberse en parte al consumo de la planta y también al consumo de la biota del suelo la planta y también al consumo de la biota del suelo, o es lavado por el riego o las precipitaciones que desde septiembre a marzo oscilaron entre 90-98mm en ambas temporadas (Aruani *et al.*, 2007).

pH. El pH inicial del suelo fue 5,5 y presentó variaciones al momento de aplicar los tratamientos. A lo largo del período de muestreo se trabajó con valores que oscilaron entre 5.3 a 5.9. Siendo el más alto el pH de la parcela tratada con el biol al final del muestreo (Cuadro 3). Para los cuatro tratamientos se registró un incremento leve del pH al transcurrir los días de muestreo, siendo el Biofertilizante el más representativo pasando de 5.6 a 5.9. Ramos *et al.*, 2008, reportan que el pH óptimo es de 7.0 a 8.0, por su efecto limitante en la actividad microbiana.

Disponibilidad de materia seca. La productividad de la pastura (*B. radicans* N.), fue mayor con el fertilizante convencional, seguido de la urea+inhibidor y el biol (Cuadro 4).

Cuadro 4. Comparación de la disponibilidad de materia seca (g MS/m²), con la aplicación de diferentes tratamientos de fertilización en pasturas activas de la finca agrocomercial del CATIE.

Tratamiento	Materia Seca (g MS/m ²)	Flujo m gN ₂ O/m ² /hora
Control	211,6	0,15
Biofertilizante	240,5	0,28
Urea+inhibidor	252,3	0,23
Fer. convencional	279,3	0,28

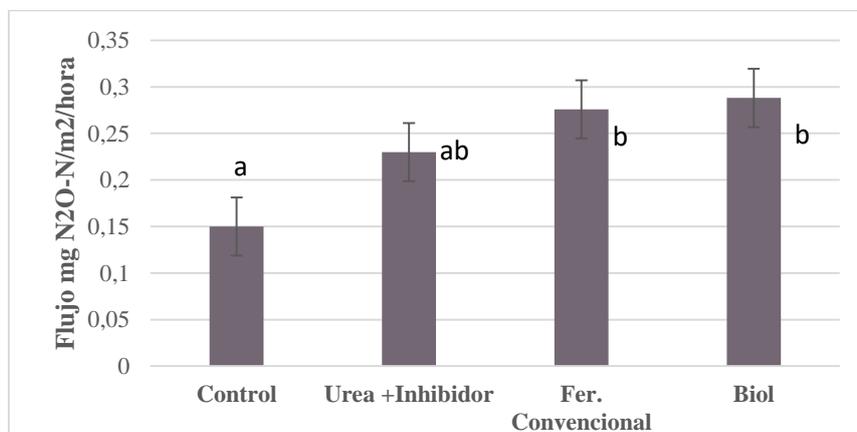
Aunque los valores de producción de la pastura con la urea+inhibidor y el Biofertilizante, fueron más bajos que los obtenidos con el convencional; es importante tener en cuenta que el uso de urea+inhibidor, para la liberación lenta de N en el suelo, permite una

absorción eficiente por las plantas, pues el % de N disponible favorece a incrementar las productividades de pasturas por más tiempo, tal como lo han evidenciado otros autores como Vistoso *et al.*, 2012, quien reportó el incremento en la producción de materia seca entre 6-7%, respectivamente. Para efectos de esta investigación se aplicó una dosis de 92kg/ha de fertilizante convencional, obteniendo un rendimiento de materia seca de 2793 kg/ha para *B. radicans* N, resultando en rendimiento bastante eficiente, pues Pastrana *et al.*, 2011, reporta un rendimiento de materia seca de 2.645 kg ha⁻¹ con una fertilización nitrogenada de 300 kg ha⁻¹; para *B. humidicola*, que es una especie de considerada de alto rendimiento en materia seca.

En cuanto a la emisión de N₂O, Rao *et al.*, 1996 y Subbarao *et al.*, 2009, (Citados por Pastrana *et al.*, 2011), demostraron que la especie de pastura tropical *B. humidicola*, tiene la capacidad de inhibir la nitrificación en suelos ácidos permitiendo por tanto, reducir las emisiones de GEI's a la atmósfera. Indican que la inhibición se debe a que las plantas de *B. humidicola*, liberan exudados a través de las raíces, fenómeno denominado inhibición de la nitrificación biológica (INB). Los exudados liberados son un compuesto denominado "brachialactona"; este inhibidor contribuye con un 60% a 90% de la actividad inhibitoria, en la rizósfera de esta gramínea tropical.

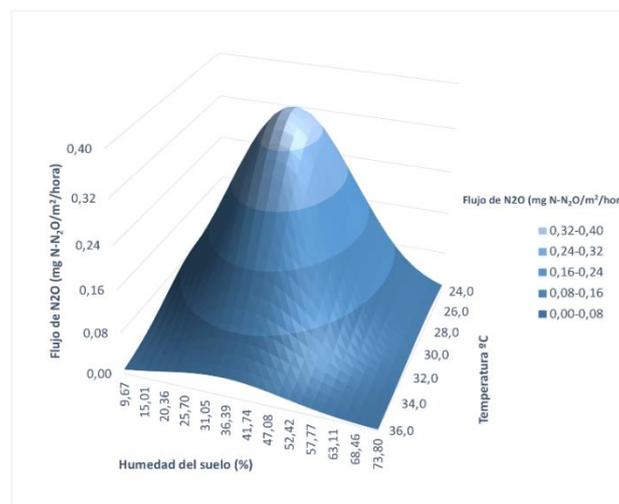
Flujos de emisión de N₂O

Tratamientos. En el campo experimental, los flujos de emisión de N₂O durante el período de muestreo de 28 días (período de descanso de las pasturas) presentaron variaciones entre tratamientos y día de muestreo (Grafica 1), apreciando que se presentaron diferencias entre tratamientos (al 95% de confianza), donde los valores más altos fueron en el Biofertilizante (biol) y urea+inhibidor (Cuadro 5).



Grafica 1. Flujo promedio acumulado de N₂O para un período de 28 días (periodo de descanso de la pastura) entre tratamientos en pasturas activas de la finca agrocomercial del CATIE. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (P<0.05), con un nivel de confianza al 95%.

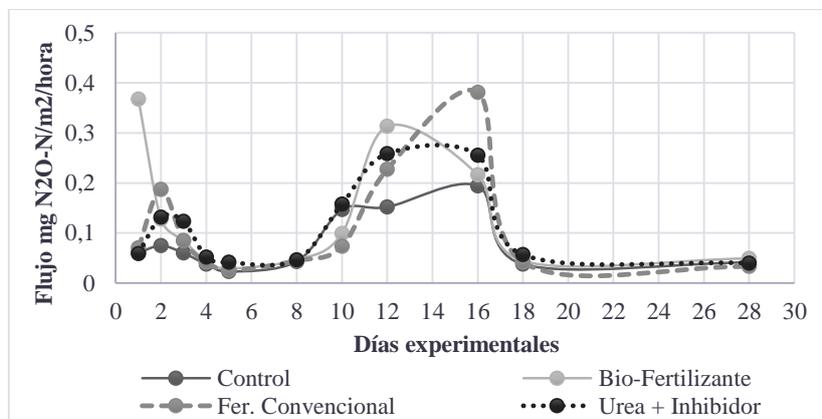
El flujo de N₂O, evidencio que los picos de mayor emisión están influenciados por parámetros ambientales de temperatura ambiente y la humedad del suelo. Estos parámetros son uno de los factores más influyentes en la emisión de N₂O así como el manejo del suelo; las tasas de desnitrificación y la cantidad de N₂O emitido suelen ser variables y en gran medida dependen de las características del suelo y las condiciones climatológicas (Dal al *et al.*, 2003). Se visualiza un leve aumento de las emisiones de óxido nitroso después de cada fertilización incluso, en el testigo respecto al contenido de humedad del suelo.



Grafica 2. Flujo de emisión de N₂O, humedad del suelo y temperatura ambiental en pasturas activas de la finca agrocomercial del CATIE

La relación de estas dos variables evidenció que los picos de mayor emisión se presentan cuando en el ambiente se tiene una temperatura entre 27 a 28,5 °C y la humedad del suelo se encuentra entre 31–40% (Grafica 2). Este registro coincide con el estudio de Davidson, *et al.*, 2000, quien evaluó la respuesta de suelos secos y húmedos con respecto a las emisiones de N₂O; encontrando que la humedad es proporcional a la emisión de N₂O, cuanto mayor es el % de humedad, las emisiones de N₂O se incrementan.

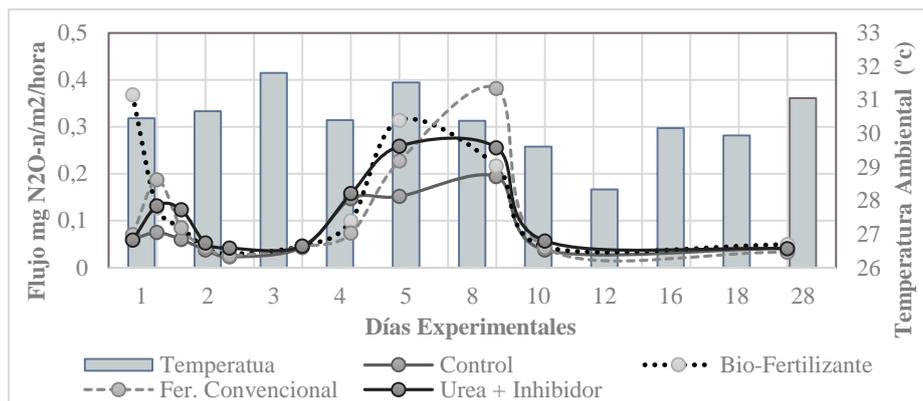
Día de muestreo. Durante los dos días posteriores al pastoreo y la aplicación de los tratamientos, se dio el primer evento significativo de emisión. Este comportamiento es influenciado por la disponibilidad de nitrógeno aplicado y la actividad microbiana incrementada. La disminución de la curva de emisión en el cuarto día de descanso, coincide con el rebrote del pasto. El resultado obtenido para el tratamiento de Urea +inhibidor, coincide con la teoría de Trenkel 2010, quien estima que la aplicación de urea con inhibidor puede llegar a retrasar la transformación de la N-amida a N-amoniacal de 7 a 14 días. Se puede observar que a partir del día 8 después del pastoreo, la emisión de N₂O aumenta considerablemente hasta el día 18, donde empieza a decrecer y presenta un comportamiento lineal (Grafica 3).



Grafica 3. Flujo de emisión de N₂O respecto a los días después de pastoreo en pasturas activas de la finca agrocomercial del CATIE.

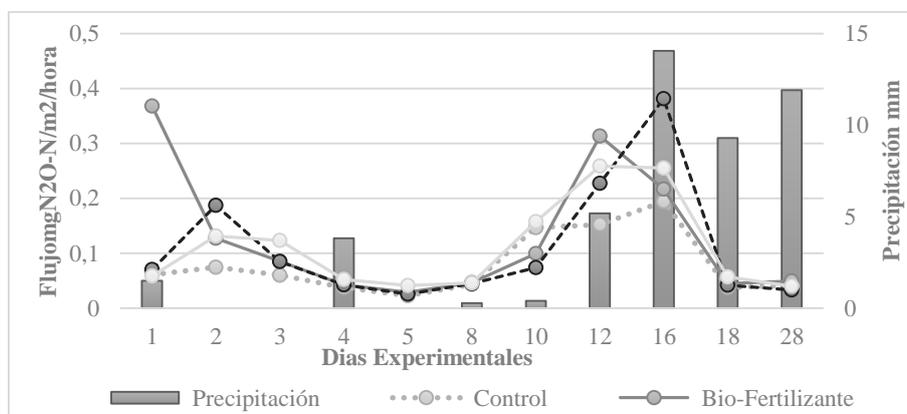
VARIABLES CLIMÁTICAS

Temperatura ambiental. Durante los 6 meses de muestro, la temperatura ambiental, osciló entre 27,5 y 31,3 °C. La temperatura afecta significativamente la actividad microbiana del suelo; Ramos *et al.*, 2008, reportan que la temperatura óptima para que ocurra la desnitrificación por procesos microbiológicos y por consiguiente el aumento de las emisiones de N₂O, está por arriba de los 30 °C. Teniendo en cuenta que el 91% de los datos de temperatura registrados a lo largo del desarrollo del muestreo se encuentran por debajo de las reportadas, se asume que este factor influyó en la disminución de las emisiones de N₂O (Grafica 4).



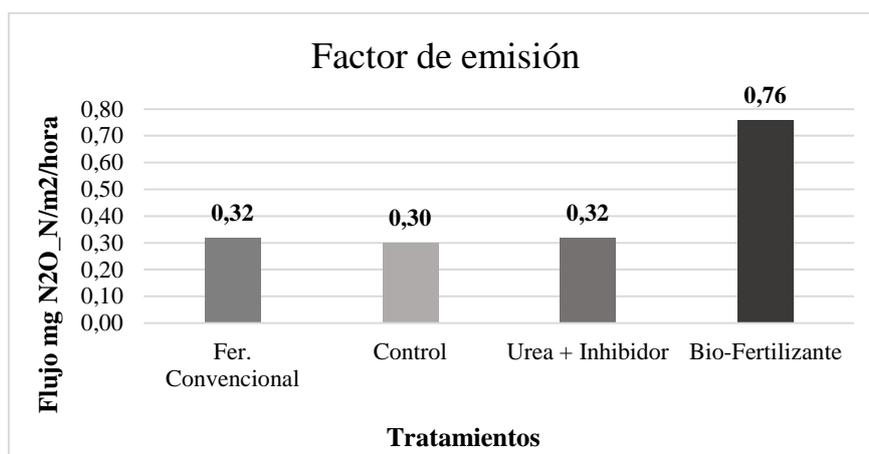
Grafica 4. Flujo de emisión de N_2O respecto a la temperatura ambiental en pasturas activas de la finca agrocomercial del CATIE.

Precipitación. De manera general la precipitación durante el estudio fue escasa, considerando que el promedio de lluvias en la zona es de 2854 mm por año. Se registraron precipitaciones aisladas al final de cada mes, lo cual coincidió con los últimos días de rotación. En el 54 % de los días de muestreo, la precipitación fue casi nula con 0 mm a 1.5 mm totales, mientras que las más altas y relativamente similares se presentaron en los días finales del muestreo con 14,05 mm. Las precipitaciones fueron más frecuentes e intensas en el mes de mayo llegando a 55 mm, lo cual aumento el promedio general de los días de muestreo de los meses de enero, febrero, marzo y abril donde las precipitaciones mensuales no sobrepasaron los 4 mm. En la gráfica se observa que las emisiones en picos altos de lluvias antecedidos de leves precipitaciones, son altas debido al intercambio gaseoso originado por infiltración, pero posteriormente disminuyen por saturación de humedad en el suelo, lo que podría explicar los bajos flujos de los últimos días de muestreo (Grafica 5).



Grafica 5. Flujo de emisiones de N_2O respecto a precipitación en pasturas activas de la finca agrocomercial del CATIE.

Factores de emisión. Dentro de las recomendaciones del IPCC (2007), se deben realizar experimentos para medir los factores de emisión de N_2O , debido al grado de incertidumbre que se tiene con respecto a la emisión de GEI que se genera con el uso de los diferentes fertilizantes, en el cual el factor de emisión que se utiliza para el cálculo de emisiones de gases se emplea el valor por defecto de 0,01 kg de N_2O -N/kg de NH_4 -N y NO_x -N depositado. Los factores de emisión estimados se encuentran por debajo del valor por defecto reportado por el IPCC para esta forma de N (1%) (Grafica 6).



Gráfica 6. Factores de emisión estimados según los flujos de N_2O en pasturas activas de la finca agrocomercial del CATIE.

Los factores de emisión registrados durante el periodo de estudio, favorecen a reducir la incertidumbre y estimulan una mejor cuantificación de las emisiones provenientes de las fincas ganaderas (IPCC 2006) y del mismo modo, contribuyen a mejorar los cálculos de la huella de carbono de las fincas o producto. El estudio experimental, en especial los biofertilizantes (biol), ~~apreció~~ ^{aprecia} que puede tener una mayor emisión de N_2O , frente a los fertilizantes sintéticos, sin embargo, se debe considerar que los fertilizantes sintéticos tiene una huella de carbono más alta, debido a que su producción implica la generación de otros gases de efecto invernadero, además estos son importados y transportados dentro del país hasta los sitios de consumo (Stoessel *et al.*, 2012). El ciclo de vida de la producción de estos productos en comparación con los abonos orgánicos, visibiliza el gran impacto de los químicos.

CONCLUSIONES

Los estudios de óxido nitroso, permitieron ajustar los protocolos y metodologías para la cuantificación de N₂O, con el uso de cámaras estáticas de flujo cerrado. Los resultados obtenidos, son relevantes para comprender la importancia del manejo de las pasturas y para analizar el flujo de N₂O.

La fertilización nitrogenada con fertilizante convencional en dosis de 92kg/ha, es eficiente en el aumento de materia seca para *B. radicans*, generando un rendimiento de 2793 kg/ha; siendo una dosis menor a las aplicadas en el sector lechero costarricense que alcanzan hasta 500 kg/ha, con menores rendimientos.

Las emisiones de N₂O según distintos autores se relacionan directamente con la presencia de precipitación y la disponibilidad humedad del suelo. La ausencia de precipitaciones durante el muestreo, pudo contribuir a una baja en la emisión de flujos de N₂O.

Este estudio arrojó que la estimación de los factores de emisión de óxido nitroso, son valores muchos más bajos lo recomendado por el IPCC (1%) en cuanto a la cuantificación de emisiones para uso de fertilizantes en el sector ganadero; siendo 0,76% para el Biofertilizante, 0,32% para el Fertilizante convencional y la urea+inhibidor respectivamente.

RECOMENDACIONES

Es fundamental realizar estudios adaptados a las condiciones de cada zona y sistema productivo, pues como se observó en este estudio, las emisiones de N₂O son sensibles a diferentes variables.

Se recomienda realizar el estudio en diferentes años y épocas del año, para abarcar la temporada seca y la temporada lluviosa; disminuyendo así el efecto de la variabilidad temporal del clima del trópico, sobre las emisiones. Así como también incluir las variables climáticas en el análisis estadístico para encontrar una mejor interacción Clima-emisión.

AGRADECIMIENTOS

A FONTAGRO/NUEVA ZELANDA, por el financiamiento para el desarrollo del presente estudio.

ANEXOS



Imagen 3. Parcela experimental para medición de N_2O en pasturas activas de la finca agrocomercial del CATIE. (Arcos, 2017)



Imagen 4. Determinación de materia seca para *Brachiaria radicans*. (Arcos, 2017)



Imagen 5. Mediciones del flujo de N_2O en pasturas activas de la finca agrocomercial del CATIE. (Arcos, 2017)



Imagen 6. Rotulación y vacío de viales para muestreo de N₂O

Sitio		Finca CATIE, Potrero VP 3								Fecha												
Cámara	ID	No. Vial	Hora	Temperatura		% Hum Amb	% Hum Suelo	ID	No. Vial	Hora	Temperatura		% Hum Amb	% Hum Suelo	ID	No. Vial	Hora	Temperatura		% Hum Amb	% Hum Suelo	
				Int.	Ext.						Int.	Ext.						Int.	Ext.			Int.
C1	3832	T0						3833	T20						3834	T40						
C2	3835	T0						3836	T20						3837	T40						
C3	3838	T0						3839	T20						3840	T40						
C4	3841	T0						3842	T20						3843	T40						
C5	3844	T0						3845	T20						3846	T40						
C6	3847	T0						3848	T20						3849	T40						
C7	3850	T0						3851	T20						3852	T40						
C8	3853	T0						3854	T20						3855	T40						
C9	3856	T0						3857	T20						3858	T40						
C10	3859	T0						3860	T20						3861	T40						
C11	3862	T0						3863	T20						3864	T40						
C12	3865	T0						3866	T20						3867	T40						
C13	3868	T0						3869	T20						3870	T40						
C14	3871	T0						3872	T20						3873	T40						
C15	3874	T0						3875	T20						3876	T40						
C16	3877	T0						3878	T20						3879	T40						
Amb.	3880	Blan 1													3881	Blan 2						

Imagen 7. Formato de campo para la toma de muestras de N₂O.

BIBLIOGRAFÍA

- ARUANI, M., Reeb P., Sánchez E., Aun E., (2008). Variación de la concentración de nitratos en un suelo franco limoso del Alto Valle de Río Negro. Recuperado de: http://m.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/1554/aruaniagrarias39-2.pdf
- CEPAL, (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2016). Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. Recuperado de: <http://www.sela.org/media/2262361/agenda-2030-y-los-objetivos-de-desarrollo-sostenible.pdf>
- CHACÓN, A. R.; Montenegro, J.; Sasa, J. (2009). Inventario Nacional de Gases con Efecto Invernadero y Absorción de Carbono en Costa Rica en el 2000 y 2005. San José, Costa Rica, Instituto Meteorológico Nacional. 78 p.
- CIAMPITTI, Ignacio A, Ciarlo, Esteban A, & Conti, Marta E. (2005). Emisiones de óxido nítrico en un cultivo de soja *Glycine max* (L): efecto de la inoculación y de la fertilización nitrogenada. *Ciencia del suelo*, 23(2), 123-131.
- DAVIDSON, E., L. Verchot, H. Cattanio, I. Ackerman and J. Carvalho. (2000). Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry* 48(1):53-69.
- GONZÁLEZ, A. D., & Carlsson-Kanyama, A. (2007). Emisiones de gases de efecto invernadero con alto potencial de calentamiento global: el sector agropecuario. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11, 01-07. Recuperado de: <https://www.mendozaconicet.gob.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2007/2007-t001-a002.pdf>
- IPCC, (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). (2006). Emisiones resultantes de las gestiones del ganado y del estiércol. Directrices del IPCC 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Recuperado de: http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_10_Ch10_Livestock.pdf.
- IPCC, (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). (2007). Cambio climático: Mitigación. En: Metz, B., *et al.*, (Eds.), *Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático*. Prensa de la Universidad de Cambridge. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf

- IPCC, (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). (2013). Forzamiento radiactivo antropogénico y natural. Capítulo 8. 423, 658-740. Prensa de la Universidad de Cambridge. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf
- IPCC, (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). (2014). Resumen para los formuladores de políticas. Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de Trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del IPCC. Cambridge. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf
- KLEIN, C. a. M., & Harvey, M. (2012). Lineamientos de la metodología de la cámara de óxido nitroso. Alianza mundial de investigación sobre gases de efecto invernadero. Recuperado de: https://www.ars.usda.gov/AR5UserFiles/31831/2012%20Chamber_Methodology_Guidelines_Chapter6.pdf
- LORENTE, A. (2010). Ganadería y cambio climático: Una influencia recíproca. Universidad de Alicante (España). Recuperado de: <file:///C:/Users/PCP/Downloads/DialnetGanaderiaYCambioClimaticoUnaInfluenciaReciproca-3419464.pdf>
- LUO, J., C.A.M. de Klein, S.F. Ledgard, S. Saggar., (2010). Opciones de manejo para reducir las emisiones de óxido nitroso de pastos intensamente pastoreados: una revisión. *Ecosistemas de Agricultura y Medio Ambiente* 136, 282-2.
- MAG, (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica) (2015). Estrategia para la ganadería Baja en carbono en Costa rica. Recuperado de: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00366.pdf>
- MAG, (Ministerio de Agricultura y Ganadería, Costa Rica). (2013). Concepto NAMA Fincas Ganaderas. San José, Costa Rica, 12 p.
- MARTÍNEZ, L. J., Salazar, F., Alfaro, M., Rosas, M., Rampoldi, E., & Macías, F. (2014). Factores edafoclimáticos que afectan las emisiones de amoníaco por aplicación de urea y purín de lechería en Andosoles. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 30 (1), 15-28.

- MONTENEGRO, J. y Abarca, S. (2001). Importancia del sector agropecuario costarricense en la mitigación del calentamiento global. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Instituto Meteorológico Nacional. 96 p.
- PASTRANA, I., Reza, S., Espinosa, M., Suárez, E., & Díaz, E. (2011). Efecto de la fertilización nitrogenada en la dinámica del óxido nitroso y metano en *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweickhardt. Revista Corpoica: Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 12(2), 134-142.
- PRATHER, M., Holmes, C., and Hsu, J.: (2012). Reactive greenhousegas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry, Geophys. Res. Lett., 39, doi: 10.1029/2012GL051440.
- PULIDO, A. (2017). Usos de suelos de la Finca Comercial del Centro Agronómico Tropical de investigación y Enseñanza-CATIE. Turrialba, Costa rica. Comunicación personal, 5 de octubre de 2018.
- RAMOS, E., Zúñiga D., Efecto De La Humedad, Temperatura y pH del Suelo. (2008). En La Actividad Microbiana A Nivel De Laboratorio. Ecología Aplicada. Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=34111584015>> ISSN 1726-2216
- ROGEL, J.; Jian, K.; Lowe, J.; Maenhout, G.; Smith, S. (2015). La importancia de las medidas previas a 2020. Informe sobre la disparidad en las emisiones. Recuperado de:https://uneplive.unep.org/media/docs/theme/13/EGR_2015_Technical_Report_ES.pdf
- RONDÓN, M. (2000). Uso del suelo y balance de gases de efecto invernadero en sabanas tropicales colombianas (Tesis de doctorado). Ithaca, NY: Universidad de Cornell.
- SOMMER, S., and N. Hutchings. (2004). Emisiones de amoníaco aplicado en campo. Eur. J. Agron. 15:1-15
- STOESSEL, F., Juraske, R., Pfister, S., y Hellweg, S. (2012). Inventario de Ciclo de Vida, Carbono y Huella hídrica de frutas y verduras: aplicación a un minorista suizo. Ciencia y Tecnología, 46, 3253–3262. 10.1021 / es2030577
- TRENKEL, M. (2010). Fertilizantes de liberación lenta, controlada y estabilizados: una opción para mejorar la eficiencia del uso de nutrientes en la agricultura. 2do. ed. Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA), París, Francia.

TUDELA, F. (2012). Negociaciones internacionales sobre cambio climático: Estado actual e implicaciones para América Latina y el Caribe (en línea). Estudios del cambio climático en América Latina. CEPAL y Cooperación Alemana. Recuperado de: http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37329/S1420809_es.pdf