

Emisiones de óxido nitroso y metano en pasturas activas en la zona de vida bosque húmedo tropical en Costa Rica*

Emissions nitrous oxide and methane in active pastures in the tropical humid forest living zone in Costa Rica

ARCE-RODRÍGUEZ, KATHERINE¹; SIBAJA-BRENES, JOSÉ²; RAMÍREZ-AMADOR, SERGIO³; VEGA-FONSECA, ANDRÉS⁴; TOBAR-LÓPEZ, DIEGO⁵

Historial del artículo

Recibido para evaluación: 25 de Enero 2022

Aprobado para publicación: 15 de Marzo 2023

* Proyecto de investigación origen: “Desarrollo de Sistemas de Producción Ganaderos Competitivos con Bajas Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en América Central” FTG/RF-14652-RG. Financiación: Fontagro. Finalización: marzo, 2018.

- 1 Escuela de Química, Universidad Nacional de Costa Rica, Bach. Química Industrial. Costa Rica. <https://orcid.org/0000-0002-0455-767X>
- 2 Laboratorio de Química de la Atmósfera, Escuela de Química, Universidad Nacional de Costa Rica. MSc. Química Industrial. Costa Rica. <https://orcid.org/0000-0002-7056-2717>
- 3 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. MSc Química Industrial. Costa Rica. <https://orcid.org/0000-0003-3264-1411>
- 4 Programa de Agricultura, Agroforestería y Ganadería, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. MSc. Agronomía. Costa Rica. <https://orcid.org/0000-0002-7524-8380>
- 5 Programa de Agricultura, Agroforestería y Ganadería, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. MSc Biología. Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-0741-9974>

Correspondencia: kparcer92@gmail.com

Cómo citar este artículo

ARCE-RODRÍGUEZ, KATHERINE; SIBAJA-BRENES, JOSÉ; RAMÍREZ-AMADOR, SERGIO; VEGA-FONSECA, ANDRÉS; TOBAR-LÓPEZ, DIEGO. Emisiones de óxido nitroso y metano en pasturas activas en la zona de vida bosque húmedo tropical en Costa Rica. Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, v. 21, n. 2, 2023, p. 130-145. Doi: <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n.2.2023.1610>

RESUMEN

El manejo activo de los pastos incide en la productividad animal y en los procesos biogeoquímicos del suelo, el ciclaje de nutriente, donde la gestión de los pastos es un factor relevante para mantener estos procesos biogeoquímicos, productividad y el flujo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El objetivo principal del presente estudio fue evaluar las emisiones de GEI provenientes de tres tipos de fertilizantes (convencional, urea+inhibidor y biofertilizante) empleados para el mantenimiento de pasturas en la producción lechera en el trópico húmedo de Costa Rica, con el fin de identificar medidas de mitigación que contribuyan a la reducción de emisiones de GEI en el sector agropecuario y a la Contribución Nacionalmente Determinada (CND) de Costa Rica. El diseño experimental correspondió a un diseño en bloques completamente aleatorizado, donde con tres repeticiones por tratamiento (control, biofertilizante, urea+inhibidor y fertilizante convencional), el total de muestras correspondió a 497 muestras, durando el periodo de 81 días. La medición de las cantidades de metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y el análisis de contenido de carbono y nitrógeno se realizó a una profundidad de -10 cm para tomar la muestra de suelo y ser analizadas mediante un método instrumental de oxidación seca. Los promedios de estas mediciones fueron: 0,104 $\text{mgN}_2\text{O-N/m}^2/\text{día}$ y 0,037 $\text{mgCH}_4\text{-C/m}^2/\text{día}$. Las emisiones de los GEI durante el monitoreo estuvieron influenciadas por procesos de metanogénesis, desnitrificación, nitrificación y respiración. Además, el biofertilizante (biol) fue el fertilizante que presentó las menores emisiones de GEI considerando también las concentraciones de Carbono y Nitrógeno en el suelo.

ABSTRACT

The active management of pastures affects animal productivity and soil biogeochemical processes of the soil, nutrient cycling, where pastures management is a relevant factor to maintain these biogeochemical processes, productivity, and the flow of Greenhouse Gas emissions. Greenhouse (GHG). The main objective of this study was to evaluate the GHG emissions from three types of fertilizers (conventional, urea and biofertilizer) used for the maintenance of pastures in dairy production in the humid tropics of Costa Rica, in order to identify measures of mitigation that contribute to the reduction of GHG emissions in the agricultural sector and that contribute to the NDC of the country. The experimental design corresponds to a completely randomized block design, where with three repetitions per treatment (Control, Biofertilizer, Urea and Conventional Fertilizer), the total of samples corresponds to 497 samples, during a period of 81 days. Measurement of the amounts of methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O). The analysis of the Carbon and Nitrogen content was performed at a depth of -10 cm to take the soil sample and analyze it by means of an instrumental method of dry oxidation. The mean values of these measurements were as follows: 0,104 $\text{mgN}_2\text{O-N/ m}^2/\text{day}$ and

PALABRAS CLAVES:

Cámaras estáticas; Fertilizantes; Flujos de GEI; Ganadería; Mitigación; Metano; Óxido nitroso; Pasturas; Trópico.

KEY WORDS:

Fertilizers; GHG flows; Animal husbandry; Mitigation; Methane; Nitrous oxide; Static cameras; Pastures; Tropic.

0,037 mgCH₄-C/m²/day. GHG emissions during monitoring were influenced by processes of methanogenesis, denitrification, nitrification and respiration. The biofertilizer (biol) presented the lowest GHG emissions given considering the concentrations of Carbon and Nitrogen in the soil.

INTRODUCCIÓN

El sector ganadero es uno de los principales rubros económicos en Centroamérica; en el caso de Costa Rica, contribuye con el 9,4 % del PIB nacional. Al mismo tiempo, es una de las principales fuentes de emisiones de GEI, principalmente por la fermentación entérica de los animales (Secretaría Ejecutiva De Planificación Sectorial Agropecuaria, SEPSA, 2020). Entre las estrategias de mitigación que se tiene, se encuentra el mejoramiento de la dieta de los animales, mediante el manejo de sistemas silvopastoriles, la gestión de pastos, fertilizantes y estiércol; medidas que contribuyen a reducir las emisiones de GEI (Ocas, 2019).

Sin embargo, para mantener la productividad de los animales, es necesario mejorar la gestión de los pastos, debido a que el uso inapropiado (sobrepastoreo) conlleva a una pérdida en la calidad de los pastizales; esto es, a una baja productividad animal y un impacto negativo al ambiente, como es la reducción en las funciones y servicios ecológicos, pérdida de nutrientes del suelo, erosión, degradación del suelo, disminución de captura y almacenamiento de carbono, aumento en las emisiones de GEI, entre otros (Morales *et al.*, 2019). En el caso de la ganadería, contribuye con 14,5 % de las emisiones globales, aportes del 44 % de metano, 29 % de óxido nitroso y 25 % de dióxido de carbono. La fermentación entérica es la principal contribuyente de emisiones de metano; para las emisiones de óxido nitroso el manejo del estiércol, su aplicación y depósito directo (25,9 %), la producción de alimento (21,1 %), el cambio de uso de suelo (9,2 %), la postproducción (2,9 %) y el uso de energía (Mottet, 2017 y Organización De Las Naciones Unidas Para La Alimentación Y La Agricultura (FAO, 2018).

En los pastizales, principalmente en fincas lecheras del trópico húmedo de Costa Rica, los ganaderos emplean diferentes fertilizantes nitrogenados que permiten mantener su productividad. Sin embargo, si el manejo de ellos no sigue con un plan de fertilización, por lo que podrían generar emisiones de N₂O y su manejo inadecuado de las pasturas, puede conllevar a aumentar estas emisiones. Las cuantificaciones son un poco difíciles, debido a los procesos fisicoquímicos que tiene el nitrógeno en el suelo, el cual pasa por un proceso de nitrificación donde el amonio (NH₄) liberado en la descomposición de los residuos orgánicos se transforma en nitratos (NO₃); esta oxidación continua hasta el proceso de desnitrificación originando la liberación de óxido nitroso (N₂O), principal fuente de emisión de GEI (Núñez *et al.*, 2021).

En el caso del metano, posee un efecto de absorción calórico de 30 veces más que el CO₂ y, en el caso de N₂O, 288 veces mayor que el CO₂; por ello su importancia para tener métodos de medición claros, con el fin de reducir la incertidumbre de cuánto son las emisiones de estos gases causantes importantes del calentamiento global (Santacoloma, 2011; Garzón y Cárdenas, 2013).

La caracterización y la cuantificación del flujo de GEI permitieron comparar la emisión de estos con respecto a los suelos fertilizados en diferentes días del año u horas del día. Estos datos fueron importantes en las estrategias de mitigación y la contabilidad global, así como el modelo del cambio climático. A pesar de que los estudios individuales fueron de carácter informativo a escala local, se generó mucho valor agregado para contribuir con el conocimiento global sobre el intercambio gaseoso entre el paisaje y la atmósfera. Es de suma importancia recolectar datos e informar de manera segura la longevidad de estos, con una base de conocimientos más amplia; esto influye en la mejora de las prácticas metodológicas para garantizar la calidad de los datos y permite la extensión de los resultados más allá de los estudios directos (Jaime *et al.*, 2019; Davison *et al.*, 2014).

Basado en lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del uso de tres fertilizantes en pastizales de *Brachiaria sp.*, sobre el flujo de dos GEI (N₂O y CH₄), para contribuir a la reducción de emisiones de GEI en el sector agropecuario y buscar soluciones alternativas para el manejo de pastos, ratificados en el acuerdo de París (Ministerio De Ambiente Y Energía De Costa Rica, MINAE, 2015).

MÉTODO

Mediante la metodología de la técnica de la Cámara Cerrada para el monitoreo de flujos de los GEI, basado en el protocolo sugerido por Rochette y Eriksen (2008), en el CATIE, se generó un protocolo para la instalación del experimento y cronograma de muestreo (Rochette *et al.*, 2008).

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la granja comercial del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica (09°53'38" N y 83°39'28" O), altitud 600 msnm, temperatura media de 22 °C, humedad relativa 90,4 % y precipitación media anual de 2 636 mm. Los suelos son de origen aluvial, clasificados como típicos humitropeptos, halosíticos e isohipertérmicos y de textura franco-arcillosa, en una zona ecológica de bosque premontano húmedo.

En la zona de producción lechera, hay un total de 28 potreros con una extensión de 5 000 m²/potrero, con un sistema de pastoreo rotativo, incluyendo un día de ocupación y 27 días de descanso. Las razas vacunas predominantes son Jersey, Sahiwal y Senepol, con una densidad de pastoreo de 3,5 UA/ha⁻¹ y una producción lechera de 18 kg/vaca*día. La finca cuenta con la certificación de ganadería sostenible de Rain Forest-Alliance.

Diseño experimental y muestreo de GEI

Se emplearon cámaras estáticas fabricadas con materiales de policloruro de vinilo (PVC), con un diámetro externo de 24 cm y 38 cm de altura, con una tapa acrílica con diseño circular; esta última, con dos agujeros: uno con un septum de caucho utilizado para introducir el termómetro y el otro, para el dispositivo (acople con rosca para gases, manguera pequeña, llave de tres pasos y una jeringa de polipropileno de 50 mL), con el fin de asegurar la toma de muestra sin ventilación interna. Para el aislamiento térmico, las cámaras se forraron con una membrana aislante de espuma de polietileno aluminizada de 9 mm de espesor, para evitar la radiación proveniente del sol y el calentamiento de las cámaras.

Se instalaron las bases de PVC de las cámaras a una profundidad de suelo de -10 cm, las cuales se colocaron un día antes del muestreo, con el fin de que se reestablecieran las condiciones del suelo que ha sido perturbado durante el establecimiento de la base.

En la evaluación, se emplearon las dosis para el manejo de pastos de la finca comercial del CATIE, expresadas en kg/ha⁻¹ (Cuadro 1).

Cuadro 1. Tratamiento y dosis utilizadas de fertilizante urea+ inhibidor, biofertilizante y fertilizante convencional (Abopasto).

Tratamiento	Dosis	Dosis/ cuadrante	Dosis/ha en la pastura al año	Número de aplicaciones al año	%d e N por fertilizante
T0	Control	-	-		0
Tb	Biofertilizante (L)	2,5	25000 L	12	35%
Tu	Urea + inhibidor (kg)	0,0022	22,8 kg	2	46%
Ta	Abopasto (24(N)-12(P)-6(K)-6(MgO)-7(S)-0,4(Zn)) (kg)	0,0022	22,8 kg	2	24%

Por tratarse de un experimento controlado, el pasto se cortó simulando la rotación del potrero, con el fin de conocer el impacto de la poda sobre las emisiones (simulando el pastoreo del animal, cada 28 días). Además, en el desarrollo del experimento, se utilizó un diseño de bloques completamente aleatorio, de tal manera que en cada fila y en cada columna hubiera solo una repetición de cada tratamiento (Figura 1).

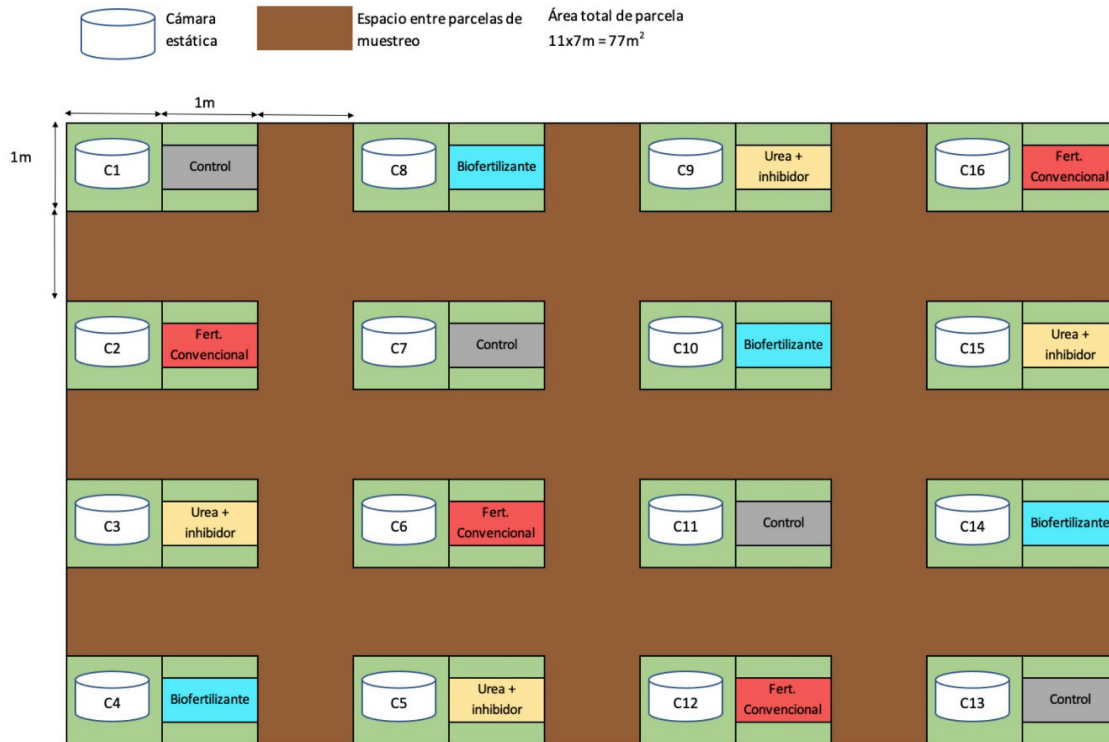


Figura 1. Ubicación de las cámaras y tratamientos en la parcela. T₀: control, T₁: fertilizante convencional (Abopasto), T₂: biofertilizante, T₃: urea+inhibidor.

Las mediciones iniciaron en el mes de abril y se realizaron por 81 días, iniciando a las 9:00 a.m. y finalizando aproximadamente a las 11:00 a.m. Se llevó la instrumentación y los viales de 20 mL con septum para gases al campo, estos se prepararon previamente con vacío para luego ser llenados con cada muestra. Para la toma de muestra, se consideraron las siguientes recomendaciones:

1. Las cámaras debían estar cerradas únicamente durante el muestreo.
2. La diferencia de la toma de temperatura no debía exceder más de 6 °C (entre la temperatura interior de la cámara con la temperatura exterior).

Este análisis se realizó durante 81 días, los primeros muestreos se llevaron a cabo cinco días seguidos; luego se hicieron cuatro muestreos cada dos días y, por último, se realizaron muestreos cada semana, esto es, durante nueve semanas.

Recolección de muestras

El muestreo se realizó aproximadamente durante una hora, tomando tres muestras por cámara, en tres tiempos diferentes: T_0 : al instalar la cámara; T_{20} = 20 minutos; T_{40} = 40 minutos. Adicionalmente, se tomaron dos muestras de aire fuera de la cámara, pero procurando la misma altura del muestreo para utilizarlas como “blancos” en laboratorio.

Primero, se selló la cámara con el anclaje, creando un ambiente hermético para el inicio de la toma de muestras a través de las cámaras que corresponde al tiempo cero (T_0). La muestra de 30 mL de aire se tomó por medio de la jeringa para trasladarla a un vial de 20 mL de colección con equilibrio de presiones. Se procedió con la siguiente cámara, se repitieron los pasos anteriores de la toma de muestra y se continuó con el mismo procedimiento para todas las cámaras en cada parcela hasta que se completó todo el muestreo de T_0 .

Nuevamente, se realizó el mismo muestreo iniciando en la primera cámara después de 20 minutos del primer muestreo, para así recolectar T_{20} en cada una de las cámaras; se perforó el septum en la parte superior de la cámara con la aguja de la jeringa, de esta manera, se tomaron 20 mL de muestra de aire desde el interior de la cámara y se cerró la llave de paso; luego se retiró la aguja de la jeringa del septum de la cámara. La muestra se transfirió de la misma forma antes mencionada a un vial y se siguieron recolectando las muestras de cada cámara. Se volvió a iniciar para T_{40} , de la misma forma, desde la primera cámara se perforó el septum, se tomaron 20 mL de muestra de aire desde el interior de la cámara y se cerró la llave de paso y se retiró la jeringa del septum de la cámara. La muestra se transfirió al vial y se siguió el mismo procedimiento para todas las cámaras finalizando con el muestreo.

El muestreo se realizó durante cuatro meses, se inició el día de la aplicación de los fertilizantes. Además, se midió la temperatura externa en el momento del muestreo y el contenido de humedad del suelo en el cuadrante donde se ubicaban las cámaras en cada parcela.

Análisis de muestra gaseosas

Se determinó la emisión de los gases, metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), para cada muestra mediante cromatografía de gases, utilizando un cromatógrafo Agilent 7890A que cuenta con un Detector de Captura de Electrones (ECD) para analizar el óxido nitroso y un Detector de Ionización en Llama (FID) para detectar el metano. Las muestras se analizaron con el protocolo recomendado por el fabricante por medio de curvas patrón. Este equipo está ubicado en el Laboratorio del INTA en el Alto de Ochomogo, San Rafael de La Unión, ente que cooperó en el proyecto de investigación.

Una vez determinada las emisiones de los GEI, se procedió a calcular los gramos de N_2O y CH_4 , utilizando la Ley de los gases ideales (Ecuación 1).

$$g N_2O - N = \frac{Pa \times V \times PM \times ppm}{R \times K \times 1000000} \quad (\text{Eq.1})$$

Donde:

Pa= presión, V= volumen, PM= masa molar del gas, R= constante de la ley de gas, K= temperatura, ppm= concentración del gas.

Para obtener el flujo lineal de cada gas, se utilizó la siguiente ecuación en función del área y del tiempo:

$$\text{mg} \frac{\text{N}_2\text{O}}{\text{m}^2 \text{ h}} = \frac{(\text{g } T_{40} - \text{g } T_{20}) + (\text{g } T_{20} - \text{g } T_0) 1000}{(\text{Área} \times \text{Tiempo})} \quad (\text{Eq.2})$$

Donde:

$\text{g } T_{40}$: g $\text{N}_2\text{O-N}$ del T_{40} , $\text{g } T_{20}$ = g $\text{N}_2\text{O-N}$ del T_{20} , $\text{g } T_0$ = g $\text{N}_2\text{O-N}$ del T_0 , Área = Área de la cámara, Tiempo : Tiempo en proporción a la hora tomada.

Una vez concluido este muestreo de la toma de gases, en cada una de las parcelas donde se ubicaron las cámaras estáticas, se cavó un hoyo a una profundidad de 10 cm por medio de una alicata, para tomar la muestra de suelo y ser analizadas mediante un método instrumental de oxidación seca con el equipo LECO CN628.

Se recolectaron dos muestras compuestas de todas las parcelas al inicio del experimento en el cuadrante lateral de la cámara estática, de estas se obtuvo un promedio de carbono y nitrógeno inicial en el área de experimentación. Al final del estudio se recolectaron muestras compuestas en cada parcela fertilizada, obteniendo una muestra compuesta por fertilizante, en total 16 muestras recolectadas al final del experimento. Este proceso se realizó con el fin de obtener el porcentaje de la cantidad de C y N remanente almacenado en el suelo tras la aplicación de los tres diferentes fertilizantes. De esta manera, se calculó la relación C/N contenida en el suelo fertilizado con urea+inhibidor, biofertilizado, fertilizante convencional y el no fertilizado (Parkin y Venterea, 2010).

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico, se utilizó el programa de INFOSTAT V. 9 (Di Rienzo *et al.*, 2018), en el cual se realizó estadística descriptiva y, posteriormente, se llevó a cabo un análisis de varianza para un diseño de bloques completamente aleatorizado, empleando como covariable la temperatura externa y humedad del suelo, con el fin de determinar si presentaba diferencias significativas entre estadística, entre las emisiones de GEI y los tres tipos de fertilizantes evaluados. La comparación de medidas se hizo mediante prueba de media de Fisher (Di Rienzo *et al.*, 2018).

RESULTADOS

Comparación de emisiones por tipo de fertilizantes

Se presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los fertilizantes y las emisiones promedio día de N_2O y CH_4 , siendo mayores para el fertilizante convencional, seguido por el biofertilizante y de menor valor fueron los de la urea+inhibidor (Cuadro 2). Estos factores son regulados por el clima, la vegetación y parámetros físico-químicos del suelo (densidad, carbono orgánico y uso del suelo), los cuales influyen en procesos biológicos, aumentan o disminuyen las tasas de nitrificación y desnitrificación dentro de un rango preciso (Chen *et al.*, 2008; Matthews *et al.*, 2010), donde algunos estudios han evidenciado que las emisiones de N_2O se han aumentado principalmente en períodos lluviosos (Orwin *et al.*, 2010).

El promedio de emisiones durante el periodo de muestreo (Cuadro 2) fue bajo, no obstante, al comparar las emisiones obtenidas durante las primeras dos semanas, estos promedios fueron similares a los observados por Arguedas *et al.* (2018), apreciando que las emisiones más altas se presentan durante las primeras semanas y las emisiones van a estar dependiendo del tipo de fertilizante empleado.

Cuadro 2. Comparaciones de las emisiones promedio de N₂O y CH₄ entre los tres tipos de fertilizantes empleados en el manejo de pasturas en el trópico húmedo de Costa Rica.

Tratamiento	mg N ₂ O/ha/día	mg CH ₄ /ha/día
Control	0,022 ± 0,004a	0,009 ± 0,0004 ^a
Urea+ inhibidor	0,033 ± 0,004b	0,009 ± 0,0004a
Biofertilizante	0,044 ± 0,004c	0,013 ± 0,0004b
Fer. Convencional	0,054 ± 0,004d	0,016 ± 0,0004c

Se concluye el ±Error estándar es incluido y letras distintas entre columnas significan diferencias significativas (p≤ 0,05).

Emisiones de N₂O en las pasturas con diferentes fertilizantes

El flujo de N₂O se presenta en la figura 2, los tratamientos presentaron variaciones durante los días de muestreo y aumentaron las emisiones durante las primeras 2 semanas y posteriormente a partir del día 25 los valores de emisiones fueron bajos y muy similares, esta tendencia es parecida en otros estudios realizados en zonas templadas por el Instituto Nacional De Investigación Agropecuaria (2016). En el presente estudio se aprecia que, en los primeros días, el flujo de las emisiones fue bajo (0,0107 mg N₂O-N m⁻² d⁻¹), lo que se puede relacionar con el nitrógeno proveniente de los fertilizantes en estas pasturas, pero la lixiviación por la pluviosidad de la zona siempre está presente. En el décimo día, se observó un aumento de las emisiones, llegando el día 12 a una emisión de 0,4142 mg N₂O-N m⁻² d⁻¹, donde el mayor flujo de N₂O emitido fue con el tratamiento de fertilizante convencional; seguido del tratamiento con biofertilizante y luego urea. La urea fue el fertilizante que aporta la mayor cantidad de nitrógeno al suelo, ya que está constituida por un 46 % de nitrógeno, pero los cambios de temperatura, humedad y pH del suelo podrían contribuir con la pérdida rápida del nitrógeno en forma de amonio o nitratos solubles o por la volatilización de este en forma de gas N₂O, sin embargo, en este estudio, esta emisión de N₂O para la urea fue menor que la habida con los demás fertilizantes (Montenegro, 2019).

El fertilizante convencional ocasionó la mayor emisión de N₂O, esto puede estar relacionado con los procesos de nitrificación y desnitrificación, donde el N₂ atmosférico puede ser oxidado a N₂O. La rápida volatilización desde el suelo se debió a cambios de la temperatura y al contenido de agua (donde la humedad relativa aumentó de 67 a 79 %), los cuales afectaron la magnitud de las pérdidas del nitrógeno, por lo que lo que se verificó que, para este fertilizante, estas pérdidas de N ocasionaron una mayor emisión del gas N₂O (Núñez *et al.*, 2021).

Se han desarrollado prácticas de manejo tendientes a disminuir los procesos de pérdida de nitrógeno del sistema suelo/planta, dentro de las que se pueden mencionar: el ajuste de la dosis de fertilizante (Pagani *et al.*, 2008), la elección de la fuente del nitrógeno, el momento y método de aplicación (Randall y Sawyer, 2006) y la utilización de fertilizantes de liberación lenta (Ferraris *et al.*, 2009). El uso de inhibidores de la actividad ureásica ha mostrado ser efectivo para reducir las pérdidas por volatilización desde urea aplicada en superficie (Sainz *et al.*, 1999). Otros materiales que ayudaron a retener el nitrógeno en el suelo son los polímeros solubles en agua de alto peso molecular, ya que recubrieron la urea ya aplicada y retarda los procesos de volatilización y nitrificación (Torres, 2019).

El biofertilizante (biol) se obtuvo de forma líquida de un digestor donde ocurre la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos, el cual posee un alto contenido de nitrógeno (35 %). A partir del segundo día hasta el décimo de muestreo, el N no fue convertido en su totalidad en N₂O, como lo muestra la figura 2. Este gas tuvo una baja emisión, teniendo una relación similar entre la adición de urea y el control. En estos casos, posiblemente, el nitrógeno fue absorbido por las plantas y por el suelo. Esta afirmación se comprobó con la medición de C y N edáficos, donde en el biofertilizante obtuvo mayores porcentajes de C y N comparado con los demás fertilizantes. Esto puede estar relacionado a que el biofertilizante redujo el impacto ambiental en cuanto a la emisión de los GEI, en comparación con los fertilizantes convencionales, debido a que con el biofertilizante se puede obtener una mayor concentración del nitrógeno en el suelo, lo cual ha sido evidenciado en otros estudios desarrollados para a evaluación de fertilizantes a nivel industrial (Jaime *et al.*, 2019).

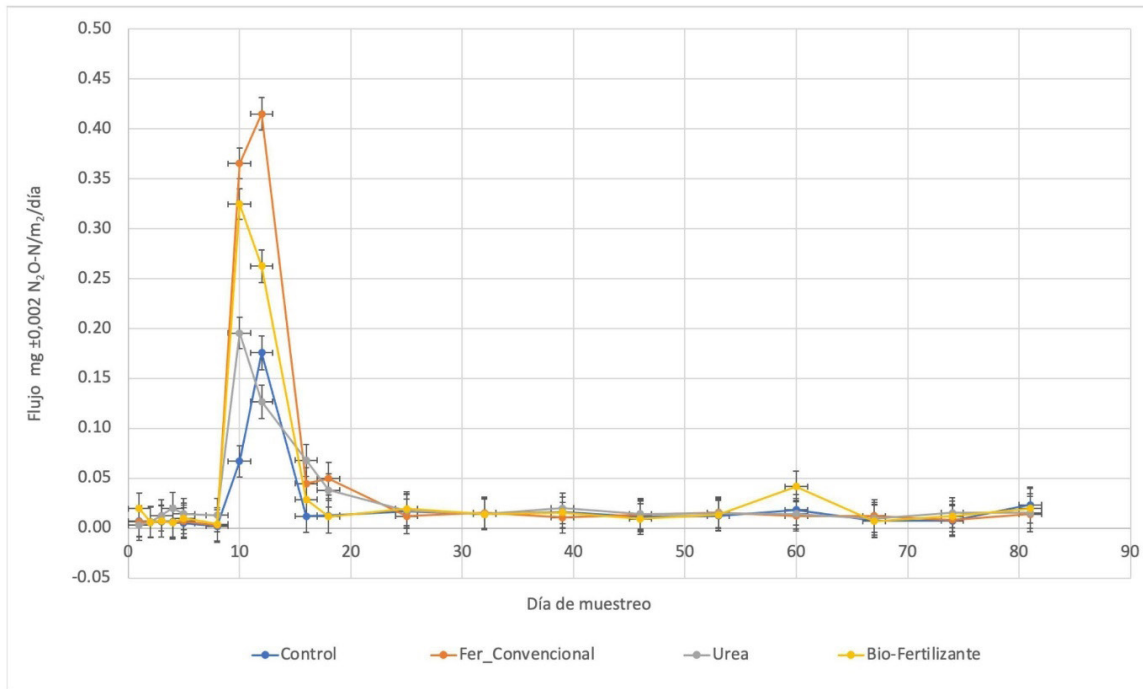


Figura 2. Promedios de flujos obtenidos de $\text{mg N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$ en las pasturas, con los diferentes fertilizantes en 81 días de muestreo. Las barras verticales significan el error estándar ($p < 0,05$).

Emisiones de CH_4 en las pasturas fertilizadas

Se ha demostrado con respecto al flujo biogénico de GEI, que la magnitud y dirección de los flujos puede variar entre ecosistemas, debido a las condiciones ambientales específicas del hábitat, variaciones en la humedad del suelo y el tipo de cubierta vegetal, esto afecta los procesos oxidativos (actividad de bacterias aeróbicas o anaeróbicas); conllevando y favoreciendo procesos de nitrificación y metanogénesis (Santos *et al.*, 2022).

Altas precipitaciones reducen la aireación en los suelos y aumentan los flujos de metano a la atmósfera, se ha reconocido que el aspecto más crítico a destacar en los estudios de flujos de metano está relacionado con los contenidos de humedad en el suelo, debido a sus efectos sobre la oxidación del metano. Durante las temporadas de lluvias, especialmente en las regiones donde ocurren altas precipitaciones, el metano se filtra a la atmósfera, debido a las condiciones anaeróbicas que se desarrollan en el suelo. Estos flujos de metano solo disminuyen y es negativo cuando se reduce la saturación, a causa de la disminución de la precipitación (mayor presencia de oxígeno), favoreciendo los procesos oxidativos para la absorción o secuestro de metano por las bacterias aeróbica (Carvajal *et al.*, 2020).

Respecto a la emisión de CH_4 obtenidas con los diferentes tratamientos en las pasturas (Figura 3), se observó el mayor valor de $0,019 \text{ mg CH}_4\text{-C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ en los primeros días del fertilizante convencional, siendo estas emisiones mayores que en los demás tratamientos. En el décimo día de muestreo, se mostró un aumento en los valores obtenidos de urea+inhibidor desde $0,013$ hasta $0,094 \text{ mg CH}_4\text{-C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, la fertilización nitrogenada por lo general inhibe la oxidación del metano. Sin embargo, en algunos casos, la fertilización con nitrógeno no es inhibitorio de metano y en casos raros puede incluso estimular la oxidación del metano (Pastrana *et al.*, 2011). Visscher *et al.*, (2007) manifestaron la alta influencia del nitrógeno inorgánico en la oxidación microbiana del CH_4 y lo extremadamente complejo de las reacciones a tal punto de no entenderlas completamente. Esto es porque el nitrógeno

inorgánico puede actuar como inhibidor de nutrientes y de microorganismos metanotrófos. El papel del nitrógeno en las emisiones CH_4 , depende del pH, el tipo de metanotrófos de la forma y la concentración de nitrógeno presente (NH_4^+ , NO_2^- o NO_3^-), por tanto se puede explicar el comportamiento del mayor flujo de metano.

Estos procesos microbiológicos edáficos del suelo pueden responder, por lo general, de manera exponencial a la temperatura, duplicando aproximadamente su actividad por cada $10\text{ }^\circ\text{C}$ de incremento en la temperatura del suelo, lo cual incrementa la actividad de los organismos tanto autótrofos como heterótrofos en el suelo (Chanda *et al.*, 2014).

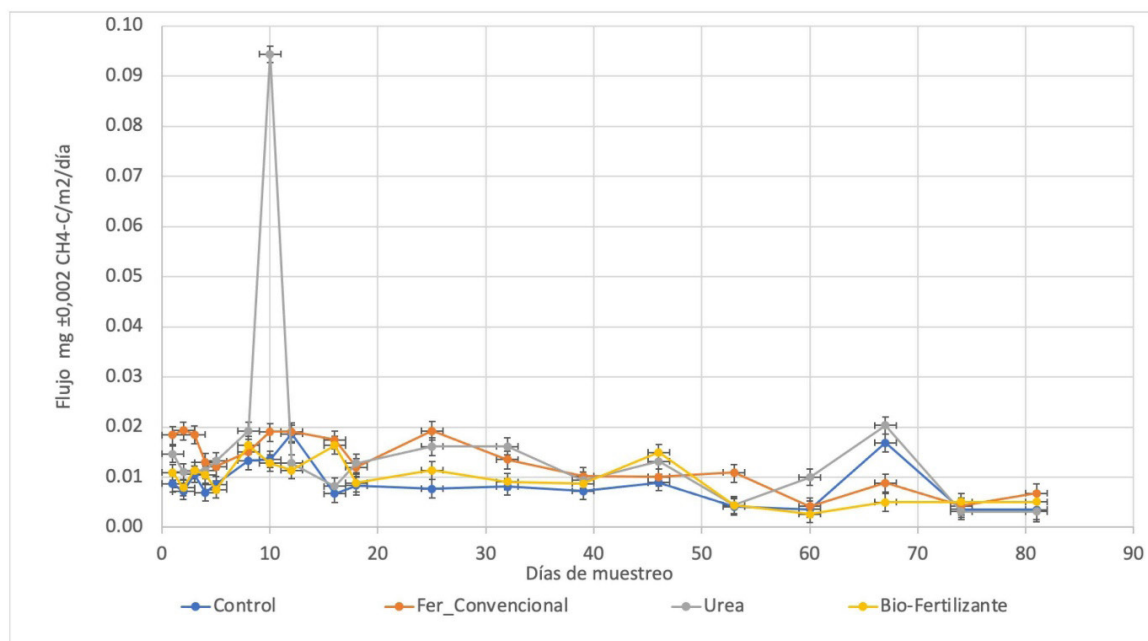


Figura 3. Promedios de flujos obtenidos de $\text{mg CH}_4\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ en las pasturas, con los diferentes fertilizantes en 81 días de muestreo. Las barras verticales significan el error estándar ($p < 0,05$).

Integración de las emisiones de N_2O y CH_4 en las pasturas fertilizadas

Al comparar los muestreos del día 8 al día 12, donde las tomas de muestra se realizaron cada dos días, se encontró un aumento de las emisiones de los gases N_2O y CH_4 (figuras 2 y 3) en los tres fertilizantes y en el control. En estos días el incremento de la humedad relativa fue un factor que contribuyó con el aumento de las emisiones, ya que se observó que la humedad relativa fue más alta, alcanzando un valor de 79 % comparado con el promedio a lo largo del muestreo de 72 %. A mayor humedad, disminuyó el nivel de oxígeno en el suelo, ya que el oxígeno es desplazado por el agua, transformando el ambiente en anaerobio, lo cual favorece el proceso de desnitrificación y metanogénesis. Por tales motivos, se explicaron los picos altos con emisiones de flujos $0,414$ y $0,095\text{ mg N}_2\text{O-N m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ de los días 8 al 12 de muestreo (Liu *et al.*, 2018).

Las diferencias de las temperaturas internas de las cámaras y la temperatura externa pudieron afectar el aumento de las emisiones de los GEI, ya que, según la metodología, la diferencia de estas temperaturas no debe sobrepasar los $6\text{ }^\circ\text{C}$; hecho que ocurrió los días de muestreo 8 al 12, obteniendo diferencias de hasta $20\text{ }^\circ\text{C}$, el cual aumentaría las emisiones de gases de efecto invernadero. En el estudio realizados por Stevenson (1982), apreció que el contenido de N del suelo decrece dos o tres veces por cada aumento de $10\text{ }^\circ\text{C}$ en la temperatura media anual en zonas climáticas cálidas, ya que el nitrógeno es convertido en el gas amoníaco NH_3 al aumentar la temperatura (Silva, 1998).

Como en todos los ensayos de los diferentes fertilizantes, los ciclos para liberación de estos dos gases en estudio dependen del tamaño de las poblaciones bacterianas presentes en el suelo. Las emisiones de los dos gases pudieron ser afectadas probablemente por la combinación compleja de temperatura, concentración de nitratos, aireación, contenido de humedad y las posibles contaminaciones entre las parcelas fertilizadas, ya que estas estuvieron separadas cada una a una distancia de un metro, es decir, se pudo haber dado la formación de lixiviados entre los fertilizantes en las parcelas en época lluviosa (Chalco *et al.*, 2018).

En cuanto a las emisiones de N_2O , pudieran estar relacionadas mayormente con la fertilidad del suelo, ya que las emisiones que se muestran son mucho mayores a las de CH_4 , las emisiones de este gas están relacionadas a procesos anaeróbicos del suelo (Núñez *et al.*, 2021).

Contenido de carbono y nitrógeno edáficos

Generalmente, los porcentajes de nitrógeno son mucho menores que los porcentajes de carbono en un suelo (Parra, 2004), como lo observado en este estudio (Cuadro 3), con valores de 4,03 % y 0,39 % al inicio de la experimentación. Estos datos fueron referencia para conocer el factor de C/N (10,33), el cual aumentó al final del muestreo en todos los fertilizantes, por el efecto de fertilización del suelo. En el caso del fertilizante convencional, la relación C/N pasó de 10,33 a 11,26, ya que el porcentaje de N de este tratamiento fue igual al del control, se puede esperar que el N adicionado por este fertilizante fue tomado por los microorganismos para sus procesos productivos. Este fertilizante fue el que generó una mayor emisión de gases N_2O , como se muestra en la figura 2, donde la bajas concentraciones de los elementos C y N pueden estar relacionados con la emisión y volatilización de nitrógeno en N_2O (Morales *et al.*, 2018).

Caso contrario fue el del biofertilizante, se evidenció que este obtuvieron mayores concentraciones en el suelo, ya que los porcentajes de C aumentaron de 4,03 % a 4,64 % y, de igual forma, los porcentajes de N 0,39 % a 0,42 %, ya que este fertilizante está compuesto en su mayoría por biol, producto de un proceso de dieta para ganado de recolección de residuos orgánicos en un mini reactor. En el caso del control, la relación C/N aumentó luego de los tratamientos pasó 10,33 a 10,43 esto puede estar sucediendo por lixiviación por medio de lluvia de las parcelas cercanas, ya esta parcela no fue fertilizada (Pérez, 2018).

Cuadro 3. Porcentajes de carbono y nitrógeno edáficos obtenidos en el inicio y tras los diferentes tratamientos.

Variable	Inicio	Finalización del experimento			
		Control	Urea- inhibidor	Fer. Convencional	Biofertilizante
%C	4,03 ± 0,1a	4,38 ± 0,01b	4,61 ± 0,01c	4,39 ± 0,02b	4,64 ± 0,04c
%N	0,39 ± 0,02a	0,42 ± 0,01ab	0,43 ± 0,01c	0,39 ± 0,01bc	0,42 ± 0,01abc
C/N	10,33	10,43	10,72	11,26	11,05

Se concluye el ±Error estándar es incluido y letras distintas entre columnas significan diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

Se realizó el análisis de suelo en las parcelas en estudio, para obtener la concentración de iones amonio y nitratos de estos fertilizantes. Este análisis se llevó a cabo en el suelo un día después de aplicado los tratamientos, donde, efectivamente, con el biofertilizante y la urea+inhibidor obtuvieron la mayor concentración de estos iones, como fuente o mayor aporte de nitrógeno al suelo, comparado con los otros tratamientos y el control. La urea+inhibidor con un promedio en las cámaras de 7,16 N- NO_3^- mg N kg^{-1} y 1,20 N- NH_4^+ mg N kg^{-1} ; para el biofertilizante 4,06 N- NO_3^- mg N kg^{-1} , y 2,23 N- NH_4^+ mg N kg^{-1} , esto quiso decir que la mayor captura de N se dio en estos dos fertilizantes, esto porque los dos tienen una importante composición del elemento N (biofertilizante tiene un 35 % N y la urea 46 %) (Jensen *et al.*, 1990; Chua, 2020).

En los días de muestreo del 18 al 81, se observó una menor emisión de N_2O , las contribuciones de los fertilizantes en el suelo por cada cámara en forma de NH_4^+ y NO_3^- se relacionan con el nitrógeno fijado en el suelo y el liberado a la atmósfera en forma de gas (N_2O). Donde la comparación de los iones NH_4^+ y NO_3^- iniciales con

respecto a los iones finales equivale a mayores concentraciones de iones que aportan N al suelo, al final de todo el muestreo, liberando así en menor proporción el óxido nitroso a la atmósfera por procesos de nitrificación y desnitrificación (Figura 4) (Jensen *et al.*, 1990; Chua, 2020).

Recomendaciones para la reducción de emisiones de N_2O y CH_4

Dentro de las estrategias para disminución por la pérdida de nitrógeno, se evidenció que, para N_2O , se pudo realizar la recomendación de ajuste de dosis en los fertilizantes a tipo gramínea al suelo (Pagani *et al.*, 2008).

La tecnología de estabilización de N ha estado disponible para la agricultura comercial por muchos años, el uso de esta ha incrementado debido a los precios más altos del N y al incremento en el uso de urea. Los estabilizadores de nitrógeno inhiben ya sea la nitrificación (nitrapyrin, dicyandiamide [DCD]) o la actividad de la ureasa (NBPT). En el primer caso, se redujo la conversión del N en el fertilizante a nitrato y, en el segundo caso, se redujo el riesgo de volatilización del amonio de la urea (Torres, 2019).

Cuando las condiciones ambientales y de suelo son favorables para la volatilización o para la pérdida de nitrato, el uso de un estabilizador tiene el potencial para incrementar la eficiencia de N. El determinar el lugar correcto puede ser tan importante como determinar la dosis correcta de aplicación. Estas aplicaciones en su mayoría, generalmente, se relacionan con aplicaciones superficiales o sub superficiales de nutrientes, ya sea en banda o al voleo antes o después de la siembra; la eficiencia de recuperación de nutrientes tiende a ser mayor en las aplicaciones en banda, ya que se reduce el contacto con el suelo y la posibilidad de pérdida de nutrientes debido a lixiviación o reacciones de fijación (Osinaga *et al.*, 2018).

Es importante considerar en el diseño de las pasturas o la finca donde se apliquen los fertilizantes, la incorporación de componentes que contribuyan a la remoción de las emisiones de GEI. Entre ellas: establecer árboles multipropósito (sombra, forraje, fruta, semilla, leña, madera, entre otros) (Madrigal *et al.*, 2019). La incorporación del biodigestor para el manejo y aprovechamiento de las excretas y aguas residuales generadas en los corrales es un método importante, ya que, como se observó, las emisiones de metano del biofertilizante son menores comparadas con los demás fertilizantes utilizados en el estudio.

CONCLUSIONES

Por medio del análisis de suelo, se observa que las relaciones de C/N con los diferentes tratamientos aumentaron con respecto a la relación C/N inicial sin tratamiento, debido al aporte de N de los fertilizantes, aun ocurriendo la emisión de estos como GEI concluido el tiempo de muestreo como N_2O .

Se observó que el biofertilizante aplicado en las parcelas fue el fertilizante que emitió la menor cantidad de N_2O y CH_4 a lo largo del análisis y el que presentó los mayores porcentajes de C y N, siendo la mejor alternativa para mejorar el aporte de nitrógeno en el suelo.

Las emisiones del N_2O de los tratamientos de las parcelas con fertilizante convencional fueron los más significativos en cuanto los flujos generados, siendo el fertilizante que más contribuye con la emisión de N_2O . Por su parte, la urea tuvo una contribución relevante en las emisiones de metano, donde este fertilizante es más susceptible a los cambios de humedad en el suelo que los demás tratamientos.

Se comprobó a lo largo del muestreo que el biofertilizante fue el que obtuvo emisiones de metano más bajas comparado con los otros, así se concluye, de igual forma, como se comprobó con las emisiones de óxido nitroso, que es la mejor opción para su uso.

En el caso de los fertilizantes con urea+inhibidor y biofertilizantes, son una alternativa para sustituir los fertilizantes convencionales, que pueden ser empleados como una estrategia de mitigación al cambio climático para el manejo de las pasturas.

AGRADECIMIENTOS

Al CATIE, por todas las facilidades otorgadas para realizar este trabajo, en cuanto al equipo y las herramientas necesarias. Al INTA por permitir el uso de sus instalaciones y equipo cromatográfico para realizar las mediciones y el análisis de las muestras. Un agradecimiento a la Revista y las personas revisoras anónimas por sus oportunas revisiones que ayudaron a mejorar la versión final del escrito.

REFERENCIAS

- ABARCA-MONGE, SERGIO; ARGUEDAS-ACUÑA, FRANCISCO; SOTO-BLANCO, ROBERTO. Carbono orgánico del suelo y variación del nitrógeno en fincas ganaderas de cría. *Alcances Tecnológicos*, v. 12, n. 2, 2018, p. 7 - 16.
<https://doi.org/10.35486/at.v12i2.86>
- ARGUEDAS-ACUÑA, FRANCISCO; JIMÉNEZ-ARAYA, JORGE; ABARCA-MONGE. Momento óptimo del día para muestrear óxido nitroso en el trópico muy húmedo de Costa Rica. *Alcances Tecnológicos*, v. 12, n. 2, 2018, p. 33 - 46.
<https://doi.org/10.35486/at.v12i2.90>
- CARVAJAL, M. E, SANTOS, J. L. C, TORRES, J. C; ATENCIA, J. D. C. M; BARRIOS, C. I. J; DEL PILAR HURTADO, M. Flujos de metano en suelos con coberturas de pastos en el norte de Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, v. 31, 2020, p. 291-309. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v31n2/2215-3608-am-31-02-00291.pdf>
- CHALCO-VERA, JORGE-ELÍAS. Emisiones de gases efecto invernadero en caña de azúcar en Tucumán, Argentina: incidencia del quemado del rastrojo y la fertilización nitrogenada [Tesis en Ciencias Biológicas]. Tucumán (Argentina): Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Agronomía y Zootecnia, 2018, 109 pp.
<https://notablesdelaciencia.conicet.gov.ar/handle/11336/84668>
- CHANDA, ABHRA; AKHAND, ANIRBAN; MANNA, SUDIP; DUTTA, SACHINANDAN; DAS, INDRANI; HAZRA, SUGATA; DADHWAL, V.K. Measuring daytime CO₂ fluxes from the inter-tidal mangrove soils of Indian Sundarbans. *Environmental Earth Sciences*, v. 72, n. 2, 2014, p. 417-427.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-013-2962-2>
- CHEN, D.; LI, Y.; GRACE, P.; MOSIER, A. R. N₂O emissions from agricultural lands: a synthesis of simulation approaches. *Plant and Soil*, v. 390, 2008, p. 169-189.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-008-9634-0>
- CHUA-VALERO, TUALEE-YAZMIN. Desnitrificación del suelo bajo dos tratamientos de riego para estimar el rendimiento y emisión de metano en arroz [Tesis Ingeniería Agrícola]. Lima (Perú): Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ingeniería Agrícola, 2020.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4416>
- COSTA RICA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGÍA DE COSTA RICA (MINAE). Contribución prevista y determinada a nivel nacional de Costa Rica. San José (Costa Rica): 2015, 19 pp.
- COSTA RICA. SECRETARÍA EJECUTIVA DE PLANIFICACIÓN SECTORIAL AGROPECUARIA (SEPSA). Informe de gestión del Sector Agropecuario, Pesquero y Rural (Mayo 2019- Abril 2020). San José (Costa Rica): 2020, 69 pp.
<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/D10-11111.pdf>

- DAVIDSON, E; KANTER, D. Inventarios y escenarios de emisiones de óxido nitroso. Cartas de investigación ambiental. 2014, 9.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/10/105012>
- DI-RIENZO, J.; CASANOVES, F.; BALZARINI, M.; TABLADA, M.; ROBLEDO, C. Grupo InfoStat. 2018. <http://www.infostat.com.ar> [consultado el 10 de febrero de 2022].
- FERRARIS, GUSTAVON.; COURETOT, LUCRECIA A.; TORIBIO, MIRTA. Pérdidas de nitrógeno por volatilización y su implicancia en el rendimiento del cultivo de maíz: Efectos de fuente, dosis y uso de inhibidores. *Informaciones Agronómicas* v. 43, 2009, p.19-22.
[http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/B5B2034B84BF8FF6852579950075F445/\\$FILE/19.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/B5B2034B84BF8FF6852579950075F445/$FILE/19.pdf)
- GARZÓN, J.E.; CÁRDENAS, E.A. Emisiones antropogénicas de amoníaco, nitratos y óxido nitroso: compuestos nitrogenados que afectan el medio ambiente en el sector agropecuario colombiano. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, v. 60, n. 2, 2013, p. 121-138.
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/remevez/article/view/40671>
- ITALIA. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA (FAO). Soluciones ganaderas para el cambio climático. 2018.
<https://www.fao.org/3/I8098ES/i8098es.pdf> [consultado el 10 de febrero de 2022].
- JAIME-CALDERÓN, FRANKLIN-ECUADOR.; CASTRO-GUERRA, JORGE-WILLIAM; ORLANDO-LUCIO, DIOMEDES-AUGUSTO. Impacto ambiental provocado por el inadecuado uso de fertilizantes químicos en cultivos de maíz. *UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*, v. 3, n. 1, 2019, p. 61-72.
<https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v3.n1.2019.128>
- JENSEN, M.H.; LOMSTEIN, E.; SORENSEN, J. Flujo bentónico de NH_4^+ y NO_3^- después de la sedimentación de una floración de fitoplancton de primavera en Aarhus Bight, Dinamarca. *Progreso de la Ecología Marina*, v. 61, 1990, p. 87-96.
- LIU, YI; LI, YUEFEN, HARRIS-PAUL; CÁRDENAS, LAURA; DUNN, ROBERT; SINT, HADEWIJ; MURRAY, PHIL; LEE, MICHAEL; WU, LIANHAI. Modelización de la variación espacial a escala de campo en la escorrentía de agua, la humedad del suelo, las emisiones de N_2O y la biomasa herbácea de una pradera de pastoreo utilizando el modelo SPACSYS. *Geoderma*, v. 315, 2018, p. 49-58.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.029>
- MADRIGAL-REYES, SUSANA; CRISTÓBAL-ACEVEDO, DAVID; HERNÁNDEZ-ACOSTA, ELIZABETH; ROMO-LOZANO, JOSÉ-LUIS. Influencia de la cobertura, pendiente y profundidad, sobre el carbono y nitrógeno del suelo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, v. 10, n. 51, 2019, p. 201-223.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i51.113>
- MATTHEWS, R.D.; CHADWICK, D.R.; RETTER, A.L.; BLACKWELL, M.S.A.; YAMULKI, B. Nitrous oxide emissions from small scale farmland features of UK livestock farming systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 192-198 pp.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880909003429>
- MONTENEGRO- BALLESTERO, JOHNNY. Respuesta polinómica de la emisión de óxido nitroso en plantaciones de café de Costa Rica. *Tropical Journal of Environmental Sciences*, v. 15, n. 1, 2019, p. 1-24.
<https://doi.org/10.15359/rca.53-2.1>
- MORALES-MORALES, EDGAR-JAVIER.; RUBÍ-ARRIAGA, MARTÍN; LÓPEZ-SANDOVAL, JOSÉ-ANTONIO; MARTÍNEZ-CAMPOS, ÁNGEL-ROBERTO; MORALES-ROSALES, EDGAR-JESÚS. Urea (NBPT) una alternativa en la fertilización nitrogenada de cultivos anuales. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, v. 10, n. 8, 2019, p. 1875-1886.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v10i8.1732>
- NÚÑEZ-RAMOS, PEDRO-ANTONIO; GARCÍA-LAGOMBRA, GREGORIO; ROSARIO, JOAQUÍN; ASENCIO-CUELLO, VÍCTOR-JOSÉ. Mediciones de óxido nitroso (N_2O) en suelo manejado bajo pastoreo con bovinos de leche. *Terra Latinoamericana*, v. 39, 2021, p. 39.
<https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.813>

- OCAS-GONZÁLES, PRESILA-MABEL. Emisión de metano en dos razas de vacunos lecheros (Holstein y Brown swiss) con dos tipos de alimento (pastura y pastura más concentrado) [Tesis Ingeniería Ambiental]. Cajamarca (Perú): Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de Ciencias Agrarias, 2019, 69 pp.
<https://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/3447>
- ORWIN, K.H.; BERTRAM, J.E.; CLOUGH, T.J.; CONDRON, L.M.; SHERLOCK, R.R.; O CALLAGHAN, M.; RAY, J.; BAIRD, D.B. Impact of bovine urine deposition on soil microbial activity, biomass, and community structure. *Applied Soil Ecology*, v.44, 2010, p. 89-100.
- OSINAGA, N.A.; ÁLVAREZ, C.R.; TABOADA, M.A. Efecto de la deforestación y posterior manejo del uso de la tierra sobre las reservas de carbono del suelo en el Chaco sudamericano. *Suelo*, v. 4, n. 4, 2018, p. 251-257.
- PAGANI, AGUSTÍN; ECHEVERRÍA, HERNÁN; SAINZ-ROZAS, HERNÁN; BARBIERI, PABLO. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, v.39, 2008, p. 14-19.
https://www.researchgate.net/profile/Agustin-Pagani/publication/259592028_Dosis_optima_economica_de_nitrogeno_en_maiz_bajo_siembra_directa_en_el_sudeste_bonaerense/links/02e7e52cd44da1bb3b000000/Dosis-optima-economica-de-nitrogeno-en-maiz-bajo-siembra-directa-en-el-sudeste-bonaerense.pdf
- PARKIN, TIMOTHY B.; VENTEREA, RODNEY T. USDA-ARS GRACEnet project protocols, chapter 3. Chamber-based trace gas flux measurements. En FOLLETT, R.F.; *Sampling protocols*. Beltsville, MD (United States of America): 2010, p. 1-39.
<https://www.ars.usda.gov/ARSEUserFiles/31831/2011%20Parkin%20and%20Venterea%20Trace%20Gas%20Protocol%20Revision%20Final.pdf>
- PÉREZ-TORO, WILSON-ANTONIO. Relación C/N en zonas de aplicación de fertilizantes y de absorción de nutrientes en banano Williams [Tesis Ciencias Agrarias]. Bogotá (Colombia): Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, 2018, 93 p.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69513>
- PARRA, J.G. Materia orgánica de suelos bajo encinas. Mineralización de carbono y nitrógeno. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, v. 13, 2004, p. 75-83.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1023212>
- PASTRANA, I., REZA, S., ESPINOSA, M., SUÁREZ, E., & DÍAZ, E. Efecto de la fertilización nitrogenada en la dinámica del óxido nitroso y metano en *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweickhardt. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, v. 12, n. 2, 2011, p. 134-142.
<https://www.redalyc.org/pdf/4499/449945031007.pdf>
- RANDALL, G.W.; SAWYER, J. Aplicación de nitrógeno, formas, tiempos y aditivos (en línea). USA, 2006. http://www.epa.gov/msbasin/pdf/symposia_ia_session6.pdf [Consultado 20 de junio de 2017].
- ROCHETTE, P.Y.; ERIKSEN-HAMEL, N.S. Mediciones en cámara del flujo de óxido nitroso en el suelo: ¿son fiables los valores absolutos? *Revista de la Sociedad de Ciencias del Suelo de América*, v. 72, n. 2, 2008, p. 331-342.
- SAINZ-ROZAS, H.R.; ECHEVERRÍA, H.E.; STUDDERT G.A.; ANDRADE, F.H. Captación y rendimiento de nitrógeno del maíz sin labranza: efecto del inhibidor de la ureasa y del tiempo de aplicación. *Revista Agronómica*, v. 91, 1999, p. 950-955.
- SANTOS, J. L. C.; CARVAJAL, M. R. E.; TORRES, J. C.; ATENCIA, J. M.; GUZMÁN, C. K. F.; PINEDA, J. F. G. Flujos de óxido nitroso en pasturas bajo diferentes dosis de fertilización nitrogenada, norte de Colombia. *Agronomía Costarricense*, v.46, 2022, p 95-109.
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/49871>
- SANTACOLOMA-VARÓN, LUZ-ELENA. Las dietas en las emisiones de metano durante el proceso de rumia en sistemas de producción bovina. *Revista de investigación agraria y ambiental*, v. 2, n. 1, 2011, p. 55-64.
<https://doi.org/10.22490/21456453.913>
- SILVA, A. *La materia orgánica del suelo*. Montevideo (Uruguay): Facultad de Agronomía, Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger, 1998, 34 pp.
- STEVENSON, F. *Humus chemistry: génesis, composition, reactions*. New York (USA): John Wiley & Sons, 1982, 442 pp.

TORRES-ASTETE, PABLO-ANDRÉS. Efecto de un inhibidor de la nitrificación sobre las emisiones de óxido nitroso (N₂O) desde suelos en condiciones de pastoreo [Tesis de en Ciencias Agrarias]. Montevideo (Uruguay): Universidad de la República, Facultad de Agronomía, 2019, 116 pp.

<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/29328>

URUGUAY. INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA. Cambio Climático y Ganadería: Cuantificación y Opciones de Mitigación de las Emisiones de Metano y Óxido Nitroso de Origen Bovino en Condiciones de Pastoreo. Montevideo (Uruguay): 2016, 200 pp.