

UNIVERSIDAD NACIONAL

"Campus Omar Dengo"

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

ESCUELA DE QUIMICA

EMISIÓN DE ÓXIDO NITROSO Y METANO EN PASTURAS ACTIVAS
EN LA ZONA DE VIDA DEL TROPICO HÚMEDO EN COSTA RICA

Trabajo sometido a consideración del Tribunal Examinador de la Escuela de
Química, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en
Química Industrial, bajo la modalidad de artículo científico

Bach. Katherine Arce Rodríguez

Tutor: PhD. Diego Tobar López

Asesores: M.Sc. José Pablo Sibaja Brenes

Máster. Sergio Ramírez Amador

Heredia, Costa Rica

Enero, 2023

Contenidos

Resumen.....	2
ANTEPROYECTO	3
I. Introducción	3
I.I. Antecedentes y Justificación	3
II. Marco teórico.....	4
2.1. Gases de Efecto Invernadero, problemática ambiental.	4
2.2. Fuentes de emisión	6
2.3. Mitigación de GEI.....	9
III. Objetivos	10
3.1 Objetivos general	10
3.2 Objetivos específicos.....	10
IV. Metodología	10
4.1. Área de estudio.....	10
4.2. Diseño experimental y muestreo de GEI.....	10
4.3. Recolección de muestras	12
4.4. Análisis de muestra	13
4.5. Análisis estadístico.....	14
4.6. Elaboración de un artículo científico.....	14
Artículo científico	15
V. Emisiones de óxido nitroso y metano en pasturas activas en la zona de vida bosque húmedo tropical en Costa Rica	15
5.1. Resumen.....	15
5.2. Introducción	15
5.3. Resultados y Discusión	17
5.3.1. Comparación de emisiones por tipo de fertilizantes	17
5.3.2. Emisiones de N ₂ O en las pasturas con diferentes fertilizantes.....	18
5.3.3. Emisiones de CH ₄ en las pasturas fertilizadas.....	20
5.3.4. Integración de las emisiones de N ₂ O y CH ₄ en las pasturas fertilizadas	22
5.3.5. Contenido de carbono y nitrógeno edáficos	23
5.3.6. Recomendaciones para la reducción de emisiones de N ₂ O y CH ₄	25
5.4. Conclusiones	26

5.5. Agradecimientos	27
5.6. Referencias bibliográficas	27

Índice de Tablas

Tabla 1. Tratamiento y dosis utilizadas de fertilizante urea, biofertilizante y fertilizante convencional (Abopasto).....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2. Comparaciones de las emisiones promedio de N ₂ O y CH ₄ entre los tres tipos de fertilizantes empleados en el manejo de pasturas en el trópico húmedo de Costa Rica.....	18
Tabla 3. Porcentajes de carbono y nitrógeno edáficos obtenidos en el inicio y tras los diferentes tratamientos.....	24

Índice de Figuras

Figura 1. Proceso de nitrificación y desnitrificación en el suelo.....	7
Figura 2. Vías de liberación del metano en el suelo a) suelo inundado b) suelo aireado.....	8
Figura 3. Ubicación de las cámaras y tratamientos en la parcela. T0: control, Ta: fertilizante convencional (Abopasto), Tb: biofertilizante, Tu: urea+inhibidor.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4. Promedios de flujos obtenidos de mg N ₂ O m ⁻² h ⁻¹ en las pasturas, con los diferentes fertilizantes en 81 días de muestreo. Las barras verticales significan el error estándar (p<0,05)	20
Figura 5. Promedios de flujos obtenidos de mg CH ₄ m ⁻² h ⁻¹ en las pasturas, con los diferentes fertilizantes en 81 días de muestreo. Las barras verticales significan el error estándar (p<0,05)	22

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Ley de gases ideales.....	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 2. Cálculo de Tasa flujo.....	¡Error! Marcador no definido.

Resumen

El presente trabajo final de graduación fue realizado bajo la modalidad de artículo científico titulado Emisión de los Gases de Efecto Invernadero, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y monóxido de dinitrógeno (N₂O), según la fertilización con urea y biofertilizante en las pasturas en la finca comercial del CATIE, fue publicado en el Revista Biotecnológica en el sector Agropecuario y Agroindustrial de la Universidad de Cauca, Colombia.

Este trabajo se realiza con la finalidad de contribuir con los investigadores del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), cuantificando las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) producidos en el suelo donde se encuentran estas pasturas. Con estos análisis los investigadores pueden comparar la producción de los GEI

entre las pasturas fertilizadas con urea, las biofertilizadas y las no fertilizadas y a su vez, conocer la relación del carbono y el nitrógeno contenido en el suelo. La información obtenida, formará parte de los inventarios nacionales de los GEI que realiza el CATIE, en conjunto con el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) junto con el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Esta investigación pertenece a un proyecto más extenso titulado “Desarrollo de sistemas de producción ganaderos competitivos con bajas emisiones de GEI en América Central”, en donde no solo muestrean y cuantifican las emisiones de los GEI que se producen en el suelo por pasturas, sino también las emisiones de estos gases en el ganado vacuno.

Este estudio fue financiado por el CATIE (Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza) y el laboratorio de suelos del MAG-INTA (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia Tecnología Agropecuaria).

ANTEPROYECTO

I. Introducción

I.I. Antecedentes y Justificación

La problemática del efecto invernadero y el cambio climático han sido un fuerte tema de discusión en los últimos años, se pone en duda el comportamiento humano en su entorno y cómo influye en las condiciones climáticas. Tanto en sectores como el de energía, el transporte a base de los combustibles fósiles, la agricultura y la ganadería, han provocado una fuente importante de contaminación global, por esa razón se busca disminuir y mitigar los efectos ambientales provocados por las prácticas masivas, mediante la investigación de nuevas aplicaciones o técnicas para realizar estas actividades con una mayor conciencia ambiental (Lasso, 2010).

El manejo de las pasturas activas incide en la productividad animal y en los procesos biogeoquímicos del suelo, el ciclaje de nutriente, por lo que es la gestión de las pasturas es un factor muy importante para mantener estos procesos y sobre la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) El desafío es mejorar las estrategias de manejo de las pasturas que minimicen las emisiones de metano, mejorando la eficiencia productiva y el proceso de

desnitrificación generación de N_2O (Compactación del suelo, fertilización y excretas de animales) (Martínez-Viera et al., 2010).

El uso de los fertilizantes orgánicos y sintéticos es de gran importancia para el desarrollo agropecuario, muchas de estas prácticas de manejo de suelos son responsables de la emisión de monóxido de dinitrógeno a la atmósfera, es por esto que la necesidad de investigación y monitoreo es relevante para hacer uso adecuado de estos fertilizantes y contribuir con la mitigación de este tipo de gas de efecto invernadero (Núñez et al., 2021).

Es una realidad que es imposible eliminar el uso de los fertilizantes en la producción de las pasturas para la alimentación del ganado vacuno, estos a su vez en la agricultura, son importantes para asegurar la productividad de los cultivos; los fertilizantes químicos estimulan microbios y bacterias en el suelo que pueden convertir el carbono y el nitrógeno en los gases causantes del efecto invernadero (Núñez et al., 2021).

II. Marco teórico

2.1. Gases de Efecto Invernadero, problemática ambiental.

El efecto invernadero es un fenómeno natural que ocurre en la atmósfera y actúa como un filtro radiactivo que deja pasar los rayos solares, en donde algunos de ellos son absorbidos por la superficie terrestre para calentarse y emitir una nueva radiación, la cual es detenida por la atmósfera la que se relaciona con el efecto invernadero. (Martínez et al., 2004).

El balance radiactivo del planeta se encuentra amenazado por impactos negativos que realizan los seres humanos. Los gases de efecto invernadero (GEI) provienen de las fuentes naturales y de las fuentes antropogénicas provocadas por el ser humano como es la producción agropecuaria y el manejo de los residuos, éstas crean un desbalance energético en la atmósfera que conduce a un calentamiento artificial (Lasso, 2010).

Para mitigar efectivamente los GEI y reducir el impacto humano en el cambio climático, se requiere una acción inmediata en cuanto a las políticas y las tecnologías; para esto se establecen compromisos internacionales como el Protocolo de Kyoto para cada país signatario, al cual Costa Rica es perteneciente. A pesar de la preocupación mundial y la evidencia del cambio climático, faltan soluciones globales y distribución de

responsabilidades; muy pocas organizaciones están trabajando en el campo de la agricultura orgánica con la reducción de emisiones y la mejora de la fertilidad del suelo. Para lograr una estrategia exitosa en la reducción de los GEI y los cambios climáticos extremos, se requiere contar con redes internacionales coordinadas y centradas en los problemas y los desarrollos locales en cada región climática y de país. (Castro et al, 2000)

El sector agropecuario contribuye con la producción de alimentos y a la economía de los países, donde el sector ganadero es uno de los principales rubros económicos del país que contribuye con el 9,4 % del PIB nacional y es una de las principales fuentes de emisiones de GEI, principalmente por el manejo de los animales (Informe de gestión del Sector Agropecuario, Pesquero y Rural, 2019-2020). En la ganadería el principal factor de emisiones de GEI proviene de la fermentación entérica (60 %); por esto es importante una adecuada dieta del ganado, por medio de las pasturas y del uso de los fertilizantes, ya que el metano se involucra en las pérdidas a través del eructo. Razón por la cual se considera que estos sistemas de producción animal deben optar por una menor producción de metano. (Carmona et al. 2005).

Sin embargo, uno de los problemas que se tiene para mantener una buena calidad de leche y carne, es el manejo de las pasturas ya que, un mal manejo ocasiona con el tiempo una pérdida en su potencial productivo, estas pasturas degradadas tienen una menor capacidad para capturar y acumular carbono, presentan una mayor emisión de CH₄ por kilo de producto animal y la pérdida de biodiversidad. Todo esto contribuye a que las pasturas degradadas sean más vulnerables a los impactos del cambio climático (Pezo et al., 2019). Al mismo tiempo contribuyen al aumento de las emisiones de GEI provenientes por cambios de uso del suelo, por buenas prácticas en el manejo de las pasturas y en el uso racional de los fertilizantes. (Montenegro y Abarca, 2001).

El manejo y la aplicación excesiva de fertilizantes en el cultivo o en las pasturas da lugar al lavado de nitratos y a emisiones de N₂O y NH₃ especialmente a partir de la urea, provocando contaminación de todos los agroecosistemas (Martínez-Viera et al., 2010). La abundancia de compuestos nitrogenados en los mantos acuíferos, en conjunto con altos niveles de fósforo, como consecuencia del lavado, hace que en todos los reservorios donde van a desembocar estas corrientes subterráneas se produzca el efecto llamado eutroficación, que consiste en el

crecimiento anormal de microorganismos, que agotan el oxígeno disuelto en el agua y producen la muerte masiva de peces y otros organismos acuáticos (Martínez-Viera et al., 2010).

2.2. Fuentes de emisión

El contenido actual del óxido nitroso en la atmósfera es de aproximadamente 0,3 ppm. A escala global, los suelos son la fuente más importante de óxido nitroso con una emisión de 65 % del total de las emisiones mundiales. Las emisiones anuales de N_2O proceden de tierras agrícolas y pastizales, por lo que son difíciles de cuantificar y la incertidumbre que rodea los inventarios nacionales y las estimaciones mundiales de las emisiones de N_2O agrícolas sigue siendo elevado (Jones et al., 2011).

El contenido actual del óxido nitroso (monóxido de dinitrógeno) en los suelos son la fuente más importante de óxido nitroso con una emisión de 65% del total de las emisiones mundiales provenientes del sector agrícola. Las emisiones anuales de N_2O proceden de tierras agrícolas y pastizales, por lo que son difíciles de cuantificar y la incertidumbre que rodea los inventarios y las estimaciones mundiales de las emisiones de N_2O agrícolas sigue siendo elevada (Jones et al., 2011). Este se asimila al manejo de fertilizantes nitrogenados que, al asimilarse las pasturas, pasa por un proceso de nitrificación donde se produce amonio (NH_4), transformándolo a nitrato (NO_3^-), y originando la conversión al óxido nitroso (N_2O), por medio de los procesos de desnitrificación (Figura 1), el cual este gas es la principal fuente de emisión de GEI (Pastrana et al., 2011).

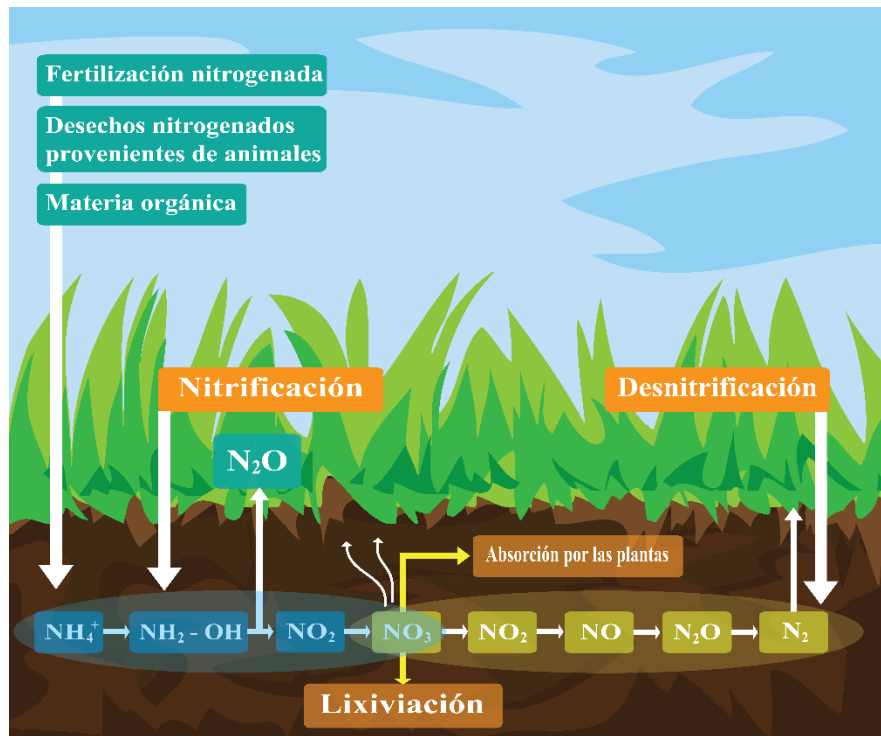


Figura 1. Proceso de nitrificación y desnitrificación en el suelo.

Fuente: Creación propia

En el suelo, el metano (CH_4) está involucrado en dos procesos microbianos, la metanogénesis que es un proceso anaeróbico responsable de la producción del CH_4 y la metanotrofía que es favorecida por las condiciones aeróbicas en el suelo que es responsable de la oxidación del gas. (Tate et al, 2015). El proceso se lleva a cabo según el tipo de suelo; en suelos inundados (Figura 2, a), la zona anóxica (anaeróbica) que se encuentra en las regiones cercanas de las raíces vivas de las plantas, es donde ocurre la degradación que se lleva a cabo cuando la concentración de sulfatos disminuye, este proceso requiere potenciales redox bajos (falta de oxígeno en el suelo inundado). En estas condiciones predomina la metanogénesis de la reducción del CO_2 con el H_2 , generando productos orgánicos simples como formiato, hidrógeno, metanol, dióxido de carbono y acetato, que actúan como sustratos para las bacterias metanogénicas y son metabolizados rápidamente. Estas bacterias son procariontas que producen un hidrocarburo, el metano como principal producto, éste se libera en disolución y se da un transporte controlado por la vegetación, asciende por el parénquima de las plantas (Torres et al, 2005).

En los suelos aireados (figura 2, b) existen condiciones aeróbicas y los procesos igualmente se llevan a cabo por medio de microorganismos; las bacterias metanótrofas oxidan CH_4 a CO_2 , usando oxígeno como aceptor de electrones, y liberando al gas a través del espacio poroso del suelo. La mayor pérdida de metano a la atmósfera se produce cuando la concentración en el suelo o en el sedimento es más alta que la presión hidrostática de la capa de agua que se superpone, formando burbujas de gas que pueden escapar a la superficie por ebullición (Torres et al, 2005).

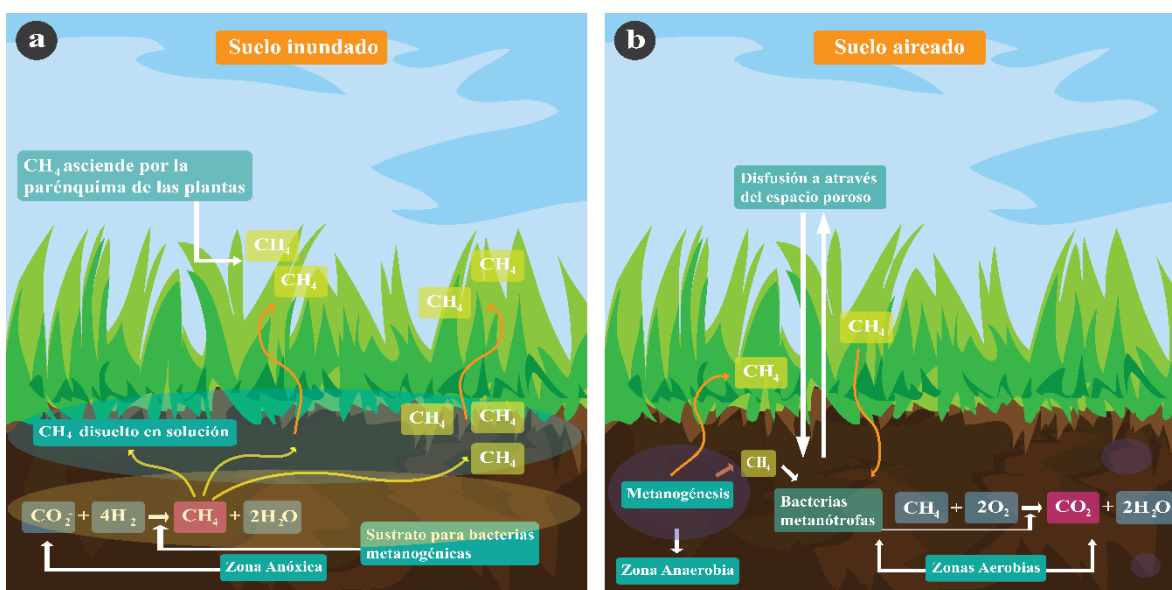


Figura 2. Vías de liberación del metano en el suelo a) suelo inundado b) suelo aireado.

Fuente: Creación propia.

El metano (CH_4) está involucrado en dos procesos microbianos, la metanogénesis que es un proceso anaeróbico responsable de la producción del CH_4 y la metanotrofía que es un proceso favorecido por las condiciones aeróbicas en el suelo y que es responsable de la oxidación del gas (Tate et al., 2015).

El CH_4 posee un agravante potencial de calentamiento global y es más nocivo que el CO_2 , el metano juega un papel clave en la química atmosférica al afectar significativamente los niveles de ozono, vapor de agua, radicales de hidroxilo y otros compuestos (Wuebbles y Hayhoe, 2002).

2.3. Mitigación de GEI

Mediante el manejo de buenas prácticas ganaderas y sistemas silvopastoriles, se espera la reducción en el uso de fertilizantes nitrogenados los cuales inciden en las emisiones de óxido nitroso y la micro biota del suelo, influyen en la importancia del metano y el dióxido de carbono emitidos por el suelo y las pasturas (Lasso, 2010).

Los sistemas ganaderos llevan a cabo un importante uso del suelo, las principales fuentes de su emisión de GEI según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) son de metano, procedente de la fermentación entérica del ganado bovino y del estiércol, las emisiones directas de óxido nitroso procedentes del estiércol y de los fertilizantes en el suelo (IPCC, 2006) y su refinamiento realizado por el IPCC 2019.

Basado en lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del uso de tres fertilizantes en pasturas de *Brachiaria* sp. sobre el flujo de tres GEI (N_2O y CH_4), donde sus emisiones son importantes para identificar medidas de mitigación que contribuyan a la reducción de emisiones de GEI en el sector agropecuario y contribuir a los NDC (Contribución Nacionalmente Determinada) ratificado en el acuerdo de París (Minae, 2015) y la búsqueda de alternativas para el manejo de las pasturas y brindar soluciones para lograr la meta país de una ganadería con bajas emisiones y coeficiente (Chacón et al., 2015). La caracterización y la cuantificación del flujo de GEI, permite hacer una comparación de la emisión de éstos con respecto a los suelos fertilizados en diferentes días del año u horas del día. Estos datos son importantes en las estrategias de mitigación y la contabilidad global y el modelo del cambio climático. A pesar que los estudios individuales son de carácter informativo a escala local, se genera mucho valor adicional 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 éstos, 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 (Collier et al., 2014).

III. Objetivos

3.1 Objetivos general

Estudiar las emisiones de óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4), por la aplicación de tres tipos de fertilizantes para la generación de medidas de mitigación y de recuperación de las pasturas activas en el trópico húmedo de Costa Rica.

3.2 Objetivos específicos

1. Analizar las emisiones de óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4), según el tipo de fertilizante (Fertilizante convencional, úrea y biofertilizante) empleado para el manejo de pasturas.
2. Determinar la relación de C/N en el suelo según el tipo de fertilizante que se emplea para el manejo de las pasturas activas.
3. Desarrollar medidas de mitigación que contribuyan con la reducción de las emisiones de óxido nitroso en el manejo de las pasturas.

IV. Metodología

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).

4.1. 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 ($09^{\circ}53'38''$ N y $83^{\circ}39'28''$ 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, hallosíticos 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.

4.2. 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} (Tabla 1).

Tabla 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	%de N por fertilizante
T ₀	Control	-	-		0
T _b	Biofertilizante (L)	2,5	25000 L	12	35%
T _u	Urea + inhibidor (kg)	0,0022	22,8 kg	2	46%
T _a	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 3).

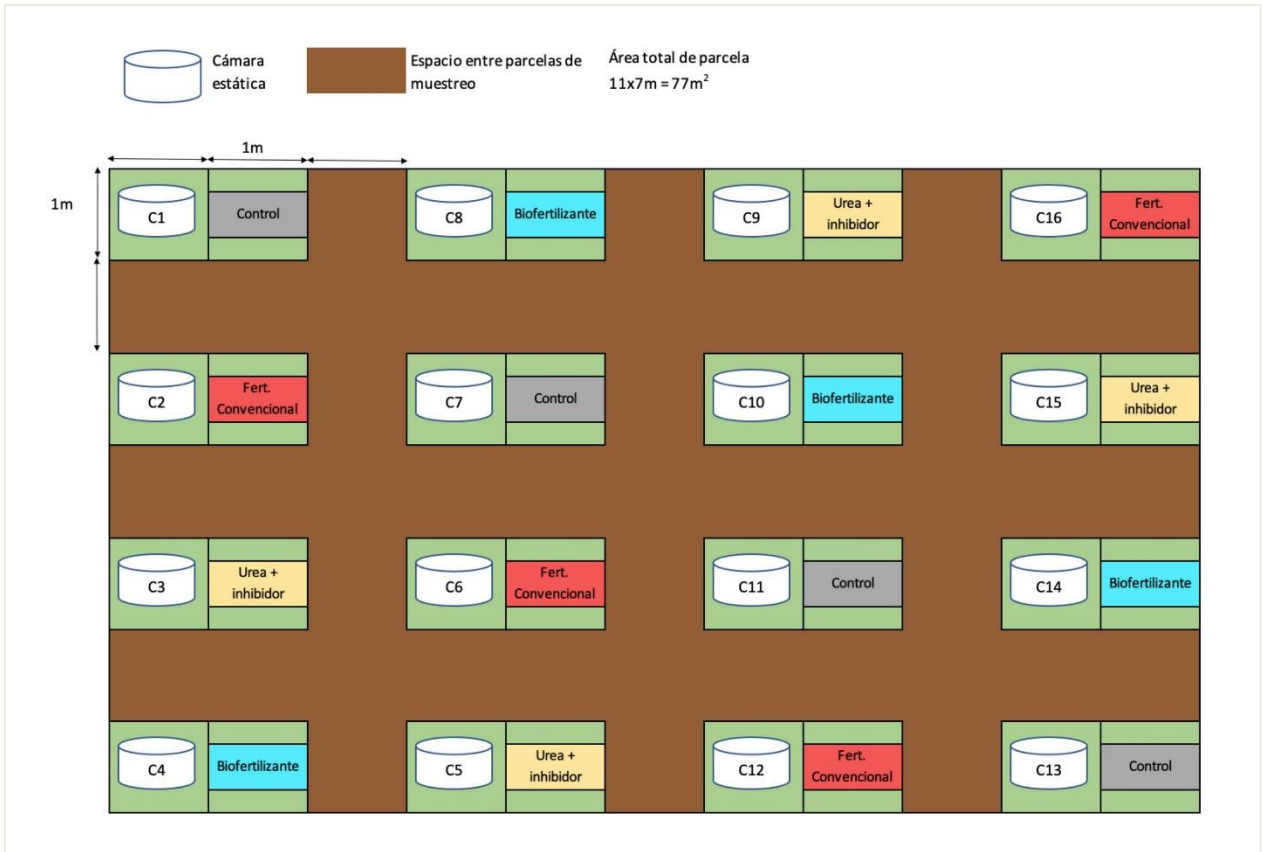


Figura 3. Ubicación de las cámaras y tratamientos en la parcela. T0: control, Ta: fertilizante convencional (Abopasto), Tb: biofertilizante, Tu: urea+inhibidor.

Las mediciones se realizaron por 81 días, iniciando en el mes de abril, con una duración por día desde las 9:00 h a.m. y finalizando aproximadamente a las 11:00 h 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 cerrada únicamente durante el muestreo.
2. La diferencia de la toma de temperatura no debía exceder más de $6 \text{ }^\circ\text{C}$ (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.

4.3. Recolección de muestras

El muestreo fue por un periodo de una hora, se obtuvieron 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 a la misma altura del muestreo para utilizarlas como “blancos” en laboratorio.

Primeramente, se selló la cámara con el anclaje, creando un ambiente hermético y se inició con la toma de muestras a través de las cámaras este 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 .

Después de 20 minutos del primer muestreo, se toman las siguientes muestras iniciando en la primera cámara nuevamente, 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

4.4. Análisis de muestra

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).

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

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:

$$\text{mg} \frac{\text{N}_2\text{O}}{\text{m}^2} \frac{1}{\text{h}} = \frac{(\text{g T}_{40} - \text{g T}_{20}) + (\text{g T}_{20} - \text{g T}_0) 1000}{(\text{Área} \times \text{Tiempo})} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:

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.

Una vez concluido este muestreo de la toma de gases, en cada una de las parcelas donde se ubicaron las cámaras estáticas, se cava 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).

4.5. 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).

4.6. Elaboración de un artículo científico

Con base a los incisos anteriores y los resultados obtenidos se llevó a cabo la elaboración de un artículo científico titulado “Emisión De Óxido Nitroso y Metano En Pasturas Activas en la zona de vida del Trópico Húmedo En Costa Rica”, el cual fue publicado en Revista

Bioteconológica en el sector Agropecuario y Agroindustrial, el cual fue aceptado el 08 de noviembre del 2023.

Artículo científico

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

5.1. Resumen

El manejo activo de los pastos incide en la productividad animal y en los procesos biogeoquímicos del suelo, el ciclaje de nutrientes, 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, durante 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: $0,104 \text{ mgN}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y $0,037 \text{ mgCH}_4\text{-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. 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.

PALABRAS CLAVE: Cámaras estáticas; Fertilizantes; Flujos de GEI; Ganadería; Mitigación; Metano; Óxido nitroso; pasturas; trópico.

5.2. 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 N_2O 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 (NH_4) liberado en la descomposición de los residuos orgánicos se transforma en nitratos (NO_3^-), esta oxidación continua hasta el proceso de desnitrificación originando la liberación de óxido nitroso (N_2O), 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 CO_2 y, en el caso de N_2O , 288 veces mayor que el CO_2 ; 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).

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 (N_2O y CH_4), 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).

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).

5.3. Resultados y Discusión

5.3.1. 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 (Tabla 2). Estos factores son regulados por el clima, la vegetación y parámetros fisicoquímicos 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 percutidos lluviosos (Orwin et al., 2010).

El promedio de emisiones durante el periodo de muestreo (Tabla 2) fueron bajas, 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.

Tabla 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).

5.3.2. 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 N_2O , esto puede estar relacionado con los procesos de nitrificación y desnitrificación, donde el N_2 atmosférico puede ser oxidado a N_2O . 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 se verificó que, para este fertilizante, estas pérdidas de N ocasionaron una mayor emisión del gas N_2O (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 N_2O , 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 la evaluación de fertilizantes a nivel industrial (Jaime et al., 2019).

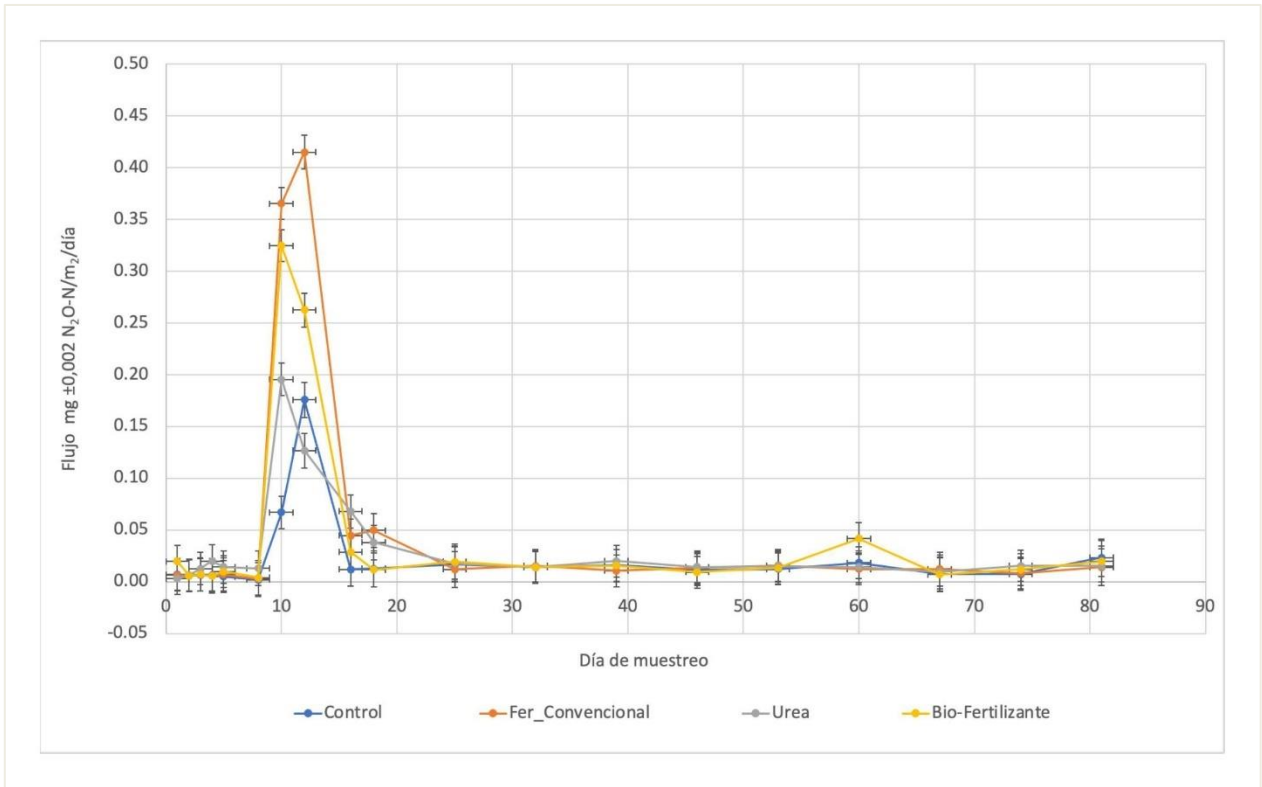


Figura 4. Promedios de flujos obtenidos de mg N₂O m⁻² h⁻¹ en las pasturas, con los diferentes fertilizantes en 81 días de muestreo. Las barras verticales significan el error estándar (p<0,05).

5.3.3. Emisiones de CH₄ 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 CH₄ obtenidas con los diferentes tratamientos en las pasturas (Figura 5), se observó el mayor valor de ,019 mg CH₄-C m⁻² 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 mg CH₄-C m⁻² 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 CH₄ 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 CH₄, depende del pH, el tipo de metanotrófos de la forma y la concentración de nitrógeno presente (NH₄⁺, NO₂⁻ o NO₃⁻), 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 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).

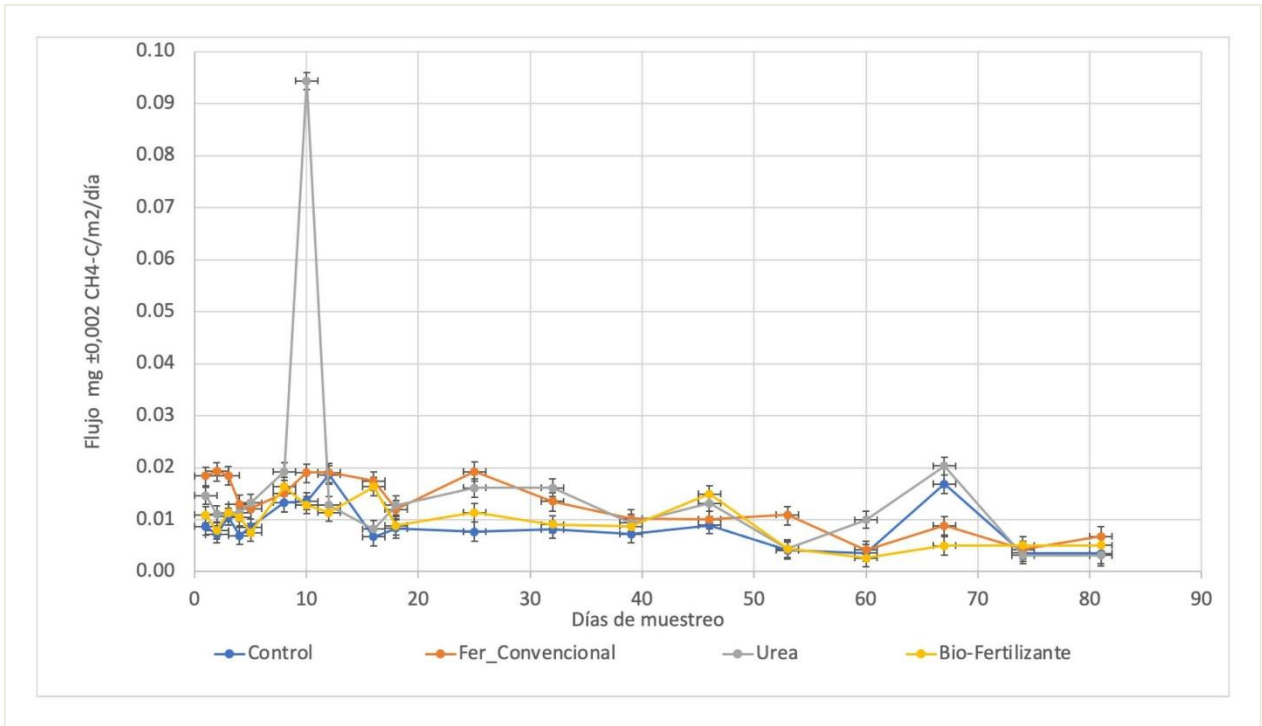


Figura 5. Promedios de flujos obtenidos de $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ en las pasturas, con los diferentes fertilizantes en 81 días de muestreo. Las barras verticales significan el error estándar ($p < 0,05$).

5.3.4. 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 4 y 5) 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 °C; hecho que ocurrió los días de muestreo 8 al 12, obteniendo diferencias de hasta 20 °C, el cual aumentaría las emisiones de gases de efecto invernadero. En el estudio realizados por Stevenson (1982), aprecio que el contenido de N del suelo decrece dos o tres veces por cada aumento de 10 °C en la temperatura media anual en zonas climáticas cálidas, ya que el nitrógeno es convertido en el gas amoníaco NH₃ 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 N₂O, pudieran estar relacionadas mayormente con la fertilidad del suelo, ya que las emisiones que se muestran son mucho mayores a las de CH₄, las emisiones de este gas están relacionadas a procesos anaeróbicos del suelo (Núñez et al., 2021).

5.3.5. 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 (Tabla 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 N₂O, como se muestra en la figura 2, donde las bajas concentraciones de los elementos C y N pueden estar relacionados con la emisión y volatilización de nitrógeno en N₂O (Morales et al., 2018).

Caso contrario fue el del biofertilizante, se evidenció que estos 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).

Tabla 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-NO₃⁻ mg N kg⁻¹ y 1,20 N-NH₄⁺ mg N kg⁻¹; para el biofertilizante 4,06 N- NO₃⁻ mg N kg⁻¹, y 2,23 N- NH₄⁺ 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).

5.3.6. 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.

Para futuras investigaciones de medición de estos gases en otros tipos de usos de la tierra, se puede explorar el uso de sensores de metano y óxido nitroso, lo que permitiría tener una cuantificación en tiempo real y poder tener los experimentos por un mayor tiempo, lo que ayudaría a poder realizar modelos para estimar factores de emisión y apreciar de una manera más clara como es el flujo de gases en los sistemas. Pues uno de las desventajas de las cámaras estáticas es la cantidad de muestras que se llevan al laboratorio lo que hace que su cuantificación sea costosa (Ruiz et al., 2012).

5.4. 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.

5.5. 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.

5.6. Referencias bibliográficas

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, GUSTAVO N.; 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>

IPCC. (2019). Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 10: Emissions form Livestock and Manure Management. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 4, 209. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>

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 NH₄⁺ y NO₃⁻ 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 N₂O 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>

MARTÍNEZ-VIERA, R; DIBUT, B; RIOS, Y. Efecto de la integración de aplicaciones agrícolas de biofertilizantes y fertilizantes minerales sobre las relaciones suelo-planta. Cultivos Tropicales v. 31, n.3, 2010, p. 27-31.

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; ASECIO-CUELLO, VÍCTOR-JOSÉ. Mediciones de óxido nitroso

(N₂O) 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/ARSUserFiles/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) Schweickerdt. 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.

RUIZ, J. R., VARGAS, C. E., VILLARREAL, E., TORRES, E., DÍAZ, D., & UNIVIO, F. Sistema para monitoreo inalámbrico de niveles de gas metano, temperatura y monóxido de carbono en túneles viales. Revista Entérese Boletín Científico Universitario, v. 32, 2012.

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.

