

EFECTO DE LA ÉPOCA CLIMÁTICA EN LA EMISIÓN DE N₂O DE UN SUELO TROPICAL BAJO PASTOREO

Johnny Montenegro-Ballester¹, Eduardo Barrantes-Guevara², Sylvia Ivankovich-Cruz³

RESUMEN

Efecto de la época climática en la emisión de N₂O de un suelo tropical bajo pastoreo. La aplicación de fertilizantes nitrogenados incrementa la emisión del N₂O, lo cual también parece estar influenciada por las condiciones de clima, sin embargo, esta información es muy escasa en el trópico. El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de diferentes épocas climáticas en la emisión de óxido nitroso proveniente del suelo cubierto por una mezcla de gramíneas bajo pastoreo. Esta investigación se realizó en un sistema de producción de leche ubicado en Cartago, Costa Rica. Las evaluaciones se efectuaron durante cuatro diferentes condiciones climáticas: 1. época seca, 2. transición de época seca a la lluviosa, 3. época lluviosa y 4. transición de época lluviosa a la seca. En un aparcadero se caracterizó la mezcla de gramíneas pastoreada y su manejo. Con cámaras estáticas colocadas aleatoriamente, se recolectaron muestras gaseosas, también se recolectaron muestras de suelo para determinar la humedad. La emisión de N₂O-N fue menor ($P < 0,001$) durante la época seca y en la transición a la lluviosa. Las mayores emisiones ($P < 0,001$) se presentaron durante la época lluviosa y el nivel de humedad del suelo influyó en ella. La emisión anual estimada fue de $2,40 \pm 0,21$ kg de N₂O-N ha⁻¹ año⁻¹, lo cual representa 0,42% del nitrógeno aplicado. Este valor es inferior al sugerido por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) para estimar las emisiones de óxido nitroso. Se demostró la importancia de considerar en el trópico las épocas climáticas en el desarrollo de factores de emisión nacional.

Palabras clave: Gases con efecto invernadero, ganado de leche, cambio climático, mitigación, factor de emisión.

ABSTRACT

Nitrogen fertilization increases the emission potential of N₂O, which could be influenced by climatic conditions. However, this information is very scarce in the tropics. The objective of this research was to determine the effect of different climatic seasons in the emission of nitrous oxide coming from a soil covered by a mixture of grasses under grazing. This research was established in a specialized milk production system in Cartago, Costa Rica. The evaluations were carried out in four different climatic seasons: 1. dry season, 2. transition from dry to rainy season, 3. rainy season, and 4. transition from rainy to dry season. A paddock was selected, and the mixture of grass and its management was characterized. Using static chambers placed randomly in

1 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) - Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Barrio Aranjuez, San José, Costa Rica. jmontenegro@inta.go.cr, jmontenegro@imn.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0001-8526-570X>).

2 Universidad Técnica Nacional, Dirección de Investigación y Transferencia, Sede Atenas ebarrantes@utn.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0002-0383-3388>).

3 Lechera Ucrania, Gerente propietaria, Cartago, Costa Rica, sivankovich@masey.com (<https://orcid.org/0000-0001-6381-4595>).

the paddock, gaseous samples were collected. The emission of N₂O-N was lower ($P < 0.001$) during summer season, and the transition to the rainy season. The highest emissions ($P < 0.001$) occurred during the rainy season, when was demonstrated the influenced of soil moisture in the emission. The estimated annual emission was 2.40 ± 0.21 kg of N₂O-N ha⁻¹ year⁻¹, which represents 0.54% of the applied nitrogen. This value is lower than that suggested by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) to estimate nitrous oxide emissions. The importance of considering the climatic conditions in the tropic when developing national emission factors was demonstrates.

Keywords: Greenhouse gases, dairy cows, climate change, mitigation, emission factors.

INTRODUCCIÓN

El óxido nitroso (N₂O) es un importante gas que contribuye con el calentamiento global del planeta porque tiene un poder infrarrojo 310 veces superior al CO₂ (IPCC 2006). Por esta razón es uno de los gases con efecto invernadero (GEI) que debe ser cuantificado por los países firmantes del Protocolo de Kyoto, entre los cuales se encuentra Costa Rica.

Existen diferentes fuentes que evidencian que la adición de fertilizante nitrogenado a los suelos agrícolas incrementa el potencial de emisión del N₂O (Stehfest y Bouwman 2006; Snyder *et al.* 2009). Por esta razón el desarrollo de la agricultura ha sido directamente relacionado con el incremento atmosférico de este compuesto.

Una de las actividades donde la aplicación de fertilizantes químicos nitrogenados es una práctica común es la producción especializada de leche. En estos sistemas se aplican fertilizantes químicos nitrogenados a las pasturas para incrementar la cantidad de biomasa producida por las gramíneas en pastoreo. Sin embargo, la aplicación de N conlleva la formación y liberación de N₂O (Montenegro y Herrera, 2013), incrementando su concentración en la atmósfera y en consecuencia, contribuyendo con el calentamiento global.

En este sentido, investigaciones realizadas en el trópico han determinado la emisión de este gas proveniente del suelo bajo diferentes pasturas fertilizadas en sistemas de producción ganadera (Veldkamp *et al.* 1998; Montenegro y Abarca 2001; Montenegro y Herrera 2013; Pastrana *et al.* 2013; Piotto 2016).

En Costa Rica, diferentes especies de gramíneas y mezclas de algunas de ellas son utilizadas bajo pastoreo en los sistemas de producción especializada de leche, sin embargo, hasta la fecha no existe información relacionada con la emisión de N₂O en pasturas compuestas de dos o más especies creciendo de manera conjunta. Por ello, se requiere realizar investigación para determinar no solo la emisión de este gas, sino también determinar con mejor precisión la contribución del sector lechero a este problema global del cambio climático.

La cantidad, la fuente y el momento de la aplicación del fertilizante nitrogenado, son factores importantes que afectan tanto las respuestas al crecimiento de las pasturas como la emisión de N₂O (Bouwman *et al.* 2002; Wile *et al.* 2014). Además, condiciones del suelo como el contenido de humedad, favorecen la formación y liberación de este gas (Rowlings *et al.* 2016). Existe información previa que muestra la influencia de las estaciones climáticas en los niveles de emisión del N₂O en diferentes latitudes (Du *et al.* 2006; van der Weeden *et al.* 2016), pero en Costa Rica no existe este tipo de información.

El efecto del clima en la emisión del N₂O en pasturas ubicadas a través de Europa, fue indicado por Flechard *et al.* (2007). Diversos estudios han demostrado que la emisión de este gas está directamente relacionada con el clima (Wang *et al.* 2016) y diferentes variables del suelo (humedad, compactación, Yan *et al.* 2016). De igual manera Kiese *et al.* (2003) demostraron que en el trópico las variaciones en la emisión

de este gas están estrechamente relacionadas con la lluvia, la cual influye directamente en la humedad del suelo, factor condicionante para la formación de este gas. La lluvia es la variable que marca cambios en las estaciones climáticas en el trópico, y al variar tanta la cantidad como la intensidad de la misma entre regiones, en consecuencia, la emisión de este gas también varía significativamente entre regiones, cultivos y manejo agronómico (Grace *et al.* 2016).

Sin embargo, de acuerdo con el procedimiento de cálculo para la emisión de GEI con base en el nivel 1 del Panel Intergubernamental de Cambio

Climático (IPCC por sus siglas en inglés, 2006), la emisión de N₂O corresponde al 1% del nitrógeno (N) aplicado como fertilizante, lo cual no estaría considerando variables como las mencionadas anteriormente.

Con base a lo anteriormente descrito, el objetivo del presente trabajo consistió en caracterizar la emisión de óxido nitroso de un suelo bajo pastoreo en el trópico en un sistema de producción de leche especializada en Cartago, Costa Rica, en diferentes épocas climáticas, y estimar la emisión anual de este gas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación

La investigación se desarrolló en el 2017 en una finca lechera comercial con pastoreo intensivo ubicada a 1700 msnm en el distrito de Cot, del cantón de Oreamuno de Cartago, Costa Rica. La temperatura y precipitación anual promedio es de 16°C y 2245 mm respectivamente (IMN 2008); la zona se clasifica como bosque húmedo montano bajo (Holdridge 1979). Existe una época seca bien marcada con cuatro y medio meses de duración. Los suelos son de origen volcánico, franco arcilloso y de topografía ondulada.

Caracterización del sistema de producción

La pastura estuvo constituida por una mezcla de estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) y kikuyo (*Kikuyuochloa clandestina*), en proporción 50:48 respectivamente (determinada con el método de rango en peso seco de Haydock y Shaw 1975) y con el pastoreo de 60 vacas Holstein en apartos de 3500 m² durante medio día y 22 días de descanso, para una carga animal de 7,1 UA ha⁻¹.

Cada aparto recibió luego del pastoreo el fertilizante nitrogenado (23 kg de urea, 46% N), para un total anual de 483 kg N ha⁻¹. Adicional al fertilizante químico, como parte del manejo normal de la finca, se aplican purines al salir las vacas de pastorear, para un total anual de 96 kg N ha⁻¹. Esta cantidad se obtuvo multiplicando la concentración de nitrógeno en los purines aplicados (0,06±0,01%), por el volumen aplicado (4600 l), por la cantidad de rotaciones en el año.

Tratamientos

Las evaluaciones se realizaron en cada una de las épocas climáticas que se presentan a lo largo del año, las cuales fueron consideradas tratamientos:

- T1: Época seca.
- T2: Transición de la época seca a la lluviosa.
- T3: Época lluviosa.
- T4: Transición de la época lluviosa a la seca.

En cada época se utilizaron cinco cámaras estáticas para recolectar los gases, las cuales se consideraron las repeticiones.

Muestreo de N₂O

Para capturar y cuantificar la emisión de este gas, se utilizó la técnica de la cámara estática, la cual es mundialmente aceptada y mediante la cual se han obtenido los valores reportados en más del 95% de los estudios realizados (Rochette 2011). Características como costo relativamente bajo, versatilidad en el campo y facilidad de implementación son razones de su amplio uso.

Las muestras gaseosas de N₂O se recolectaron en un aparcamiento típico que representa las características de la pastura y topografía del área de pastoreo (8,1 ha), donde se ubicaron de manera aleatoria cinco cámaras estáticas para la determinación de la emisión del óxido nitroso del suelo en cada una de las épocas climáticas consideradas.

La recolección de las muestras gaseosas se efectuó en cada tratamiento considerando que las mayores emisiones de N₂O se presentan durante los primeros días luego de la salida de los animales del aparcamiento (Montenegro y Herrera, 2013). Por esta razón, en las dos primeras semanas luego de la salida de las vacas del aparcamiento, se muestreó de día por medio hasta el día 11, posteriormente se muestreó cada cinco días. El octavo muestreo se realizó el día anterior a la entrada de las vacas a pastorear nuevamente el aparcamiento. Los muestreos de gases se efectuaron durante la mañana entre las 9 a.m. y el mediodía (Alves *et al.* 2012; Noemí 2016).

Las cámaras estáticas utilizadas tenían 30 cm de altura y 94,2 cm de circunferencia, y provista de un septum por donde se recolectó la muestra gaseosa utilizando una jeringa plástica y trasvasándola inmediatamente a viales de vidrio al vacío y previamente identificados.

En cada cámara y cada día de muestreo, se recolectaron dos muestras de gas, una al momento de colocarla en el campo (t_0) y otra (t_1) 45 minutos después (Berneze *et al.* 2014; Bell *et al.* 2015); ello se hizo basado en muestreos previos que determinaron linealidad del incremento de la concentración en el tiempo de muestreo.

Las muestras gaseosas fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), utilizando un cromatógrafo de gases Agilent (modelo 7890A) equipado con

dos detectores: ionización de llama y de captura de electrones.

La concentración de N₂O en las muestras gaseosas, se determinó por interpolación a partir de curvas de calibración construidas con estándares de concentración conocida y trazable a NIST (Scott-Marrin, Inc., Ca.). Como control de calidad se utilizaron muestras estándar de concentración conocida, las cuales se analizaron intercaladamente con las muestras provenientes del campo.

Emisión como porcentaje del nitrógeno aplicado

La emisión de N₂O-N, para cada época climática, se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación (Sordi *et al.* 2014):

$$E (\%) = \frac{(\text{N}_2\text{O-N emitido}) \times 100}{\text{N aplicado}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde E (%) es la emisión (porcentaje del N aplicado en el fertilizante emitido como N₂O-N), N₂O-N emitido es la cantidad de N determinado en las mediciones realizadas en el campo (kg), y N aplicado es la cantidad de N aplicado con el fertilizante (kg).

Flujo acumulado

El flujo acumulado del óxido nitroso (kg ha⁻¹) para cada época climática se calculó integrando todos los valores con base en el método de integración trapezoidal mediante la función "suma-producto" en Excel. El valor anual se obtuvo multiplicando la emisión diaria promedio de cada época climática por la duración de la misma y sumando los respectivos resultados.

Muestreo de suelo

Para determinar el efecto de la humedad del suelo en la emisión del óxido nitroso se recolectaron muestras (0-10 cm de profundidad) a la par de cada una de las cámaras estáticas cada día de muestreo de gases, utilizándose para ello un barreno tipo holandés. Cada muestra de suelo se

depositó en una bolsa plástica previamente identificada, las cuales fueron trasladadas al laboratorio de suelos del INTA, donde se determinó la humedad por gravimetría. Otro muestreo de suelo se realizó para determinar la densidad aparente mediante el método del cilindro.

Los resultados de la humedad gravimétrica se utilizaron de manera conjunta con la densidad aparente, para determinar el espacio poroso lleno de agua (EPA), forma en la cual se reporta el contenido de humedad del suelo. El EPA utiliza una escala entre 0 (suelo completamente seco) y 1 (suelo sobre saturado de agua), en el cual entre 0,30 (punto de marchitez permanente) y 0,60 (capacidad de campo) se encuentra el agua disponible para las plantas, condición que se

asocia con adecuados contenidos de humedad y oxígeno para la óptima actividad microbiana del suelo. En consecuencia, cuando los valores de EPA sobrepasan el 0,60, se incrementa la limitación de oxígeno del suelo y con ello se favorecen las condiciones para la formación del N₂O (Linn y Doran 1984).

Diseño y análisis estadístico

Se implementó un diseño irrestricto al azar con cuatro tratamientos y cinco repeticiones. El análisis estadístico se realizó mediante un ANDEVA y se compararon las medias de las diferentes épocas climáticas utilizando la diferencia mínima significativa en Infostat (Di Rienzo *et al.* 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la emisión de N₂O

El comportamiento de la emisión del N₂O mostró variabilidad a lo largo del período evaluado en cada una de las épocas climáticas, lo cual fue más evidente durante la lluviosa y de transición a la seca (Figura 1). Aunque el patrón de emisión fue similar para todas las épocas, la mayor magnitud se determinó durante los primeros días de evaluación.

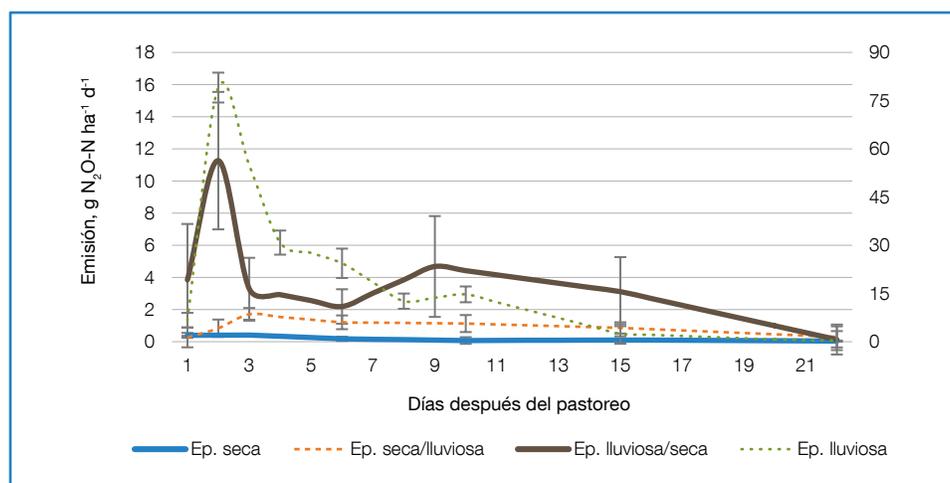


Figura 1. Patrón de emisión de N₂O-N, durante diferentes épocas climáticas, en un suelo cubierto con gramíneas bajo pastoreo. Costa Rica. 2018.

De manera general para todas las épocas, a partir del día 10 después del pastoreo y para todos los casos, la emisión disminuyó y se estabilizó en valores cercanos a cero (Figura 1).

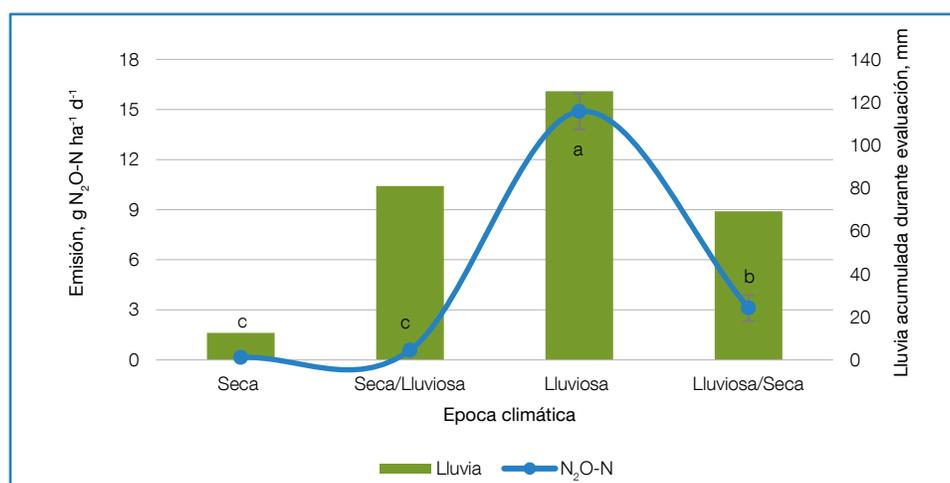
La aplicación del nitrógeno químico y el proveniente de los purines, además del de las excretas de los animales en pastoreo, contribuyeron a la formación y liberación del N₂O durante los primeros días luego del pastoreo durante la época lluviosa (Figura 1). La emisión determinada en la época seca fue muy baja, esta se observa como línea continua en la base de la figura 1.

Con relación a las épocas de transición, estas mostraron magnitudes diferentes en términos de la cantidad de óxido nitroso emitida; la mayor se presentó en la transición a la época seca con

respecto a la transición a la época lluviosa, probablemente relacionada con la cantidad de agua recibida y presente en el suelo.

Efecto de la época climática en la emisión de óxido nitroso

La emisión de N₂O mostró ser variable a lo largo del año con diferencias importantes ($P < 0,001$) entre épocas climáticas (Figura 2). Los mayores valores diarios se presentaron en la época lluviosa, mientras que los menores durante la seca y durante la transición de la época seca a la lluviosa. Durante la transición de la época lluviosa a la seca, se determinaron valores intermedios aunque diferentes de los anteriores.



Valores promedio de N₂O ± 1 EE con diferente letra difieren al nivel $P < 0,05$

Figura 2. Emisión promedio diaria de N₂O-N, según época climática, en un suelo cubierto con gramíneas bajo pastoreo. Costa Rica. 2018.

Esto claramente demuestra la importancia de considerar las condiciones propias de cada localidad, particularmente aquellas relacionadas con la variación intra anual del clima cuando se pretende desarrollar un factor de emisión, ya que de esta forma se estará incluyendo la influencia del clima y ello se reflejará en el factor de emisión determinado.

Diferentes investigaciones realizadas (Barton *et al.* 2008; Kiese *et al.* 2003) han demostrado la variabilidad temporal de las emisiones de N₂O en una amplia variedad de sistemas de uso del suelo, variaciones que son estimuladas entre

otros factores por el contenido de humedad y el N disponible en el suelo.

La influencia integrada de los diferentes factores del suelo (principalmente contenido de oxígeno y humedad en el suelo) son claves en la regulación de la magnitud de la emisión, condiciones que están directamente relacionadas con aspectos climáticos.

El clima y las variaciones estacionales del mismo que ocurren a lo largo del año, han sido mencionados como importantes factores que influyen en la emisión de N₂O. De acuerdo con van

der Weerden *et al.* (2016), gran parte de la variación observada en las emisiones de óxido nitroso se explican por el efecto de las estaciones del año; esto coincide con nuestros resultados los cuales mostraron que la mayor variación en la emisión anual se explican por las épocas climáticas típicas que se presentan a lo largo del año.

Las variaciones estacionales determinadas en la emisión de este gas en la presente investigación, también fueron coincidentes con las reportadas para una pastura de *Brachiaria brizantha* cv Marandú en la Amazonía brasileña, donde Nogueira *et al.* (2015) determinaron variaciones importantes en la emisión del N₂O como resultado de la época climática, ya que esta fue mayor durante la época lluviosa comparada con la detectada en la época seca.

De igual forma, Luo *et al.* (2007) en Nueva Zelanda reportaron variaciones importantes en la emisión como resultado de la época climática, la cual presentó un rango desde 0% durante la época seca, hasta 1,56% del N aplicado para la

época lluviosa. La misma tendencia fue reportada por Wang *et al.* (2016) en Australia.

Efecto de la humedad del suelo

Durante la época lluviosa, las fluctuaciones en el contenido de humedad del suelo reflejan la influencia de la precipitación, la cual se incrementa luego de los eventos lluviosos (Figura 3). De manera similar, aunque con menor magnitud, durante la época seca se incrementó la humedad del suelo por la aplicación de purines al inicio del período de evaluación, y por eventuales pequeños eventos lluviosos ocurridos durante el período de evaluación.

Hubo diferencia en los contenidos de humedad del suelo entre las diferentes épocas climáticas, particularmente durante la época lluviosa y la seca, así como las tendencias observadas durante las condiciones de transición (Figura 3).

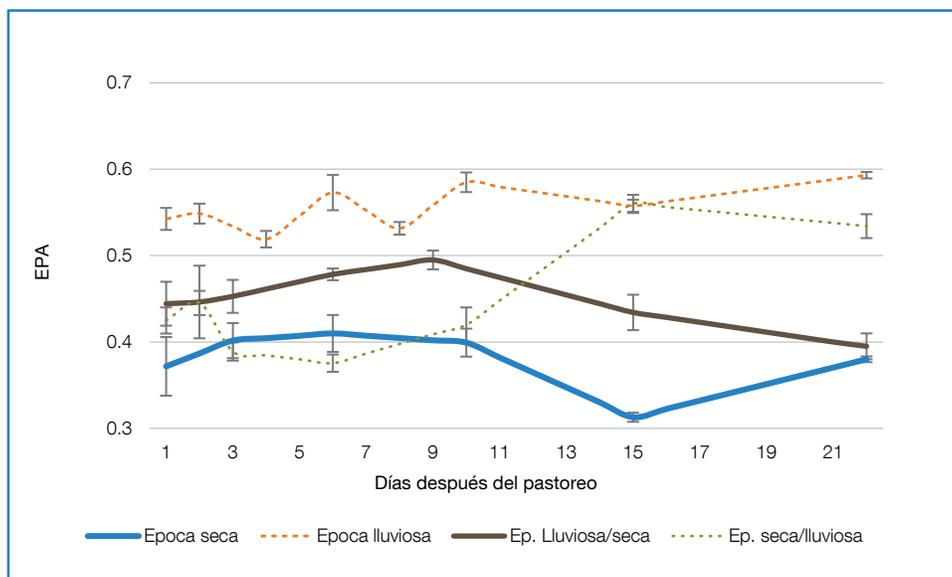


Figura 3. Espacio poroso lleno de agua (EPA) durante diferentes épocas climáticas en un suelo cubierto con gramíneas bajo pastoreo. Costa Rica. 2018.

Los niveles de humedad del suelo determinados en la época lluviosa, probablemente no llegaron a reducir de manera significativa el oxígeno en el suelo como sucede cuando se sobrepasa 0,60 del EPA (Khalil y Baggs 2005). Sin embargo, la cantidad de agua en el espacio poroso del suelo sí se incrementó sustancialmente comparado con las otras épocas climáticas, y contribuyó a la formación del N₂O. Niveles inferiores a 0,40 del EPA no favorecieron la formación de N₂O durante la época seca (Eckard *et al.* 2003).

Las épocas de transición mostraron comportamientos diferentes en la emisión de óxido nitroso (Figura 1) y ello se explica en parte por la lluvia recibida y en consecuencia, por la humedad del suelo (Figura 3).

Durante la transición de la época seca a la lluviosa, con la excepción del segundo día de evaluación, se incrementó el contenido de humedad del suelo como resultado de un evento lluvioso y la adición de purines. En términos promedio, el EPA fue de aproximadamente 0,40 durante los primeros 12 días de evaluación (Figura 3), condición que no favorece la formación de N₂O (Eckard *et al.* 2003).

Hacia el final de este periodo de transición (de seco a lluvioso), y producto de eventos lluviosos importantes, el EPA se incrementó a valores cercanos a 0,55 (Figura 3) típicos de la época lluviosa, pero no tuvieron efecto alguno en la emisión de N₂O-N (Figura 1). Caso contrario se observó en la transición de la época lluviosa a la seca, donde se determinó reducción del EPA (Figura 3), por la disminución de las lluvias (Figura 2). Estas condiciones influyeron en las emisiones (Figura 1) determinadas durante las épocas climáticas comentadas.

De manera general, los valores de EPA se incrementaron al inicio del período de evaluación (Figura 3) debido a la influencia de los purines y los eventos lluviosos ocurridos.

Los valores de humedad del suelo y de emisión de N₂O-N no mostraron correlación significativa, sin embargo, si mostraron clara tendencia a que

los valores de emisión sean más altos cuando la humedad se incrementa. Ello se observó claramente en la figura 2.

En este sentido, Rowlings *et al.* (2016), también determinaron que la emisión varió estacionalmente como resultado del EPA producto de los eventos lluviosos. Cuando el espacio poroso lleno de agua es inferior a 0,40, la formación de N₂O a partir de la nitrificación es normalmente baja, pero si los valores de EPA se incrementan hasta niveles de 0,55-0,65, la formación del óxido nitroso igualmente se aumenta.

Los resultados mostraron que cuando los valores de EPA estaban en el rango de 0,50-0,60, se determinaron las mayores emisiones, lo que hace suponer que este proceso es mayoritariamente resultado de la nitrificación. De acuerdo con lo reportado por Oertel *et al.* (2016), en lo referente a la producción de N₂O proveniente del suelo, la emisión de este gas es óptima cuando el EPA es de alrededor de 0,60.

Los resultados también concuerdan con informes anteriores que indican que la humedad del suelo es uno de los factores que desencadenan las emisiones de N₂O en pastos tropicales (Keller y Reiners 1994; Veldkamp *et al.* 1998), y estas son más bajas que las determinadas previamente por Montenegro y Abarca (2001) en nuestro país, probablemente debido a que se utilizó una fuente de N amoniacal como la urea.

En este sentido Klein *et al.* (2001), determinaron factores de emisión de N₂O de 0,1% -1,9% (promedio 0,6%) cuando se aplicó urea como fuente de N, y de 0,08% -12% (promedio 2,9%) cuando se aplicó N como alguna forma de nitrato. Del mismo modo, Eckard *et al.* (2003) informaron que las pérdidas promedio de N₂O fueron 12,9% mayores con nitrato de amonio que con urea.

Según parece, el fertilizante nitrogenado basado en nitrato produce mayores emisiones de N₂O en relación con las fuentes de N amoniacal cuando se aplica al pasto en crecimiento activo, lo cual podría ser el resultado de que el nitrato es un precursor de este gas.

Emisión anual de N₂O-N y factor de emisión

La emisión anual fue de 2,40±0,21 kg de N₂O-N ha⁻¹ año⁻¹, lo cual representa 0,41% del nitrógeno aplicado considerando tanto el proveniente de la urea como de los purines. Este valor es inferior al sugerido por el nivel I de la metodología de cálculo de inventarios de gases con efecto invernadero (IPCC 2006) para estimar las emisiones de óxido nitroso. Ello demuestra la importancia de desarrollar factores de emisión nacional, ya que los mismos reflejan no solo el manejo implementado en el sistema de producción, sino también las condiciones climo-edáficas del lugar donde se desarrollan las actividades ganaderas.

La emisión anual determinada en esta investigación fue inferior al factor de emisión sugerido por el IPCC (2006), situación que coincide con diferentes trabajos de investigación. Por ejemplo, Charles *et al.* (2017) en un análisis global de factores de emisión utilizando fertilizantes químicos determinaron valores menores del 1% del N aplicado. Cuando se analizaron los resultados de diversas investigaciones realizadas en Nueva Zelanda por Weerden *et al.* (2016), donde se aplicó urea y purines de manera conjunta, se determinó que el valor promedio del factor de emisión fue de 0,46%. Similarmente, los resultados de Klein *et al.* (2001), Galbally *et al.* (2005) y de Harty *et al.* (2016) mostraron factores de emisión en el rango de 0,1 a 0,49% del N aplicado.

De acuerdo con Bouwman *et al.* (2002), el factor de emisión sugerido por el IPCC (2006), se basa en una serie de observaciones las cuales en su mayoría (aproximadamente 75%) provienen de latitudes media caracterizadas por climas de “verano suave e invierno frío”. En consecuencia, este factor proporciona estimaciones adecuadas de la emisión de este gas para localidades particularmente en esas latitudes, por lo tanto bajo las condiciones climo-edáficas del trópico que son diferentes a donde se determinó el coeficiente, es probable que los resultados al utilizar este factor no reflejen lo que realmente ocurre en términos de emisión.

Es por esta razón que los datos obtenidos bajo las condiciones propias de cada país, proporcionan mejor base para calcular las emisiones y pueden contribuir a racionalizar el uso de los fertilizantes nitrogenados cuando se asocian las dosis de fertilizante aplicado con la producción de biomasa de las pasturas. Esto es apoyado por

el hecho de que datos disponibles de áreas tropicales indican que al utilizar el factor de emisión utilizado por el IPCC se sobreestima los flujos medidos (Alves *et al.* 2010; Cruvinel *et al.* 2011).

La emisión de óxido nitroso fue baja en la época seca y durante la transición de la época seca a la lluviosa. Las mayores emisiones se presentaron durante la época lluviosa, lo cual mostró la influencia directa del nivel de humedad del suelo en la emisión. El patrón de emisión mostró que luego de los eventos lluviosos que ocurrieron inmediatamente después del pastoreo, la magnitud de la emisión disminuyó y se mantuvo en valores basales luego de la segunda semana de evaluación. Esto es apoyado por la correlación positiva determinada entre ambas variables.

La determinación de la emisión anual de N₂O por unidad de área para actividades productivas desarrolladas bajo las condiciones agroecológicas propias de nuestro país, contribuye notoriamente a conocer con bajo nivel de incertidumbre, la realidad del aporte de gases con efecto invernadero que se derivan directamente de las actividades pecuarias, que como se demuestra en la presente investigación, fue inferior al valor sugerido por el IPCC.

La utilización de factores de emisión nacionales, también permite que los inventarios nacionales de gases reflejen tanto las condiciones agroclimáticas en las cuales se desarrollan las actividades agropecuarias como el manejo de las mismas, lo cual no es posible con la utilización de factores de emisión generados en otras latitudes.

Adicionalmente, debido a los cambios estacionales del clima durante el año, se hace necesario considerarlas cuando se cuantifica la emisión de GEI, ya que como se demostró, la emisión varía sustancialmente entre épocas climáticas.

Finalmente, se recomienda realizar evaluaciones para determinar la respuesta de esta mezcla de pastos a la fertilización nitrogenada, de manera que se pueda recomendar la dosis de nitrógeno en función de la cantidad de biomasa requerida para las vacas en pastoreo y así racionalizar la utilización de este insumo. Esta podría ser una estrategia para mejorar la eficiencia de la utilización del nitrógeno y reducir las emisiones de este poderoso gas con efecto invernadero.

LITERATURA CITADA

- Alves, B; Smith, K; Flores, R; Cardoso, A; Oliveira, W; Jantalia, C; Urquiaga, S; Boddey, R. 2012. Selection of the most suitable sampling time for static chambers for the estimation of daily mean N₂O flux from soils. *Soil Biology and Biochemistry* 46:129-135.
- Alves, B; Jantalia, C; Madari, B; Machado, P; Franchini, J; dos-Santos, J; Boddey, R; Urquiaga, S. 2010. Emissões de óxido nitroso de solos pelo uso de fertilizantes nitrogenados em áreas agrícolas. *Embrapa Agrobiologia* 126:1-6.
- Barton, L; Kiese, R; Gatter, D; Butterbach-Bahl, K; Buck, R; Hinz, C; Murphy, D. 2008. Nitrous oxide emissions from a cropped soil in a semi-arid climate. *Global Change Biology* 14:177-192.
- Barneze, A; Mazzetto, A; Zani, C; Misselbrook, T; Cerri, C. 2014. Nitrous oxide emissions from soil due to urine deposition by grazing cattle in Brazil. *Atmosphere and Environment* 92:394-397.
- Bell, M; Rees, R; Cloy, J; Topp, C; Bagnall, A; Chadwick, R. 2015. Nitrous oxide emissions from cattle excreta applied to a Scottish grassland: Effects of soil and climatic conditions and a nitrification inhibitor. *Science of the Total Environment* 508:343-353.
- Bouwman, A; Boumans, L; Batjes, N. 2002. Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available data. *Global Biogeochemical Cycles* 16:1058-1071.
- Charles, A; Rochette, P; Whalen, J; Angers, D; Chantigny, M; Bertrand, N. 2017. Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 236(2):88-98.
- Cruvinel, E; Bustamante, M; Kozovitsc, A; Zeppd, A. 2011. Soil emissions of NO, N₂O and CO₂ from croplands in the savanna region of central Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 144:29-40.
- Di Rienzo, J; Casanoves, F; Balzarini, M; Gonzalez, L; Tablada, M; Robledo, C. 2015. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, ARG.
- Du, R; Lu, D; Wan, G. 2006. Diurnal, seasonal, and inter-annual variations of N₂O fluxes from native semi-arid grassland soils of inner Mongolia. *Soil Biology and Biochemistry* 38:3474-3482.
- Eckard, R; Chen, D; White, R; Chapman, D. 2003. Gaseous nitrogen loss from temperate perennial grass and clover dairy pastures in south eastern Australia. *Australian Journal of Agricultural Research* 54:561-570.
- Flechard, C; Ambus, P; Skiba, U; Rees, R; Hensen, A; van Amstel, A; van den Pol-van, A; Soussana, J; Jonesk, M; Clifton-Brown, J; Raschi, A; Horvath, L; Neftel, A; Jocher, M; Ammann, C; Leifeld, J; Fuhrer, J; Calanca, P; Grosz B. 2007. Effects of climate and management intensity on nitrous oxide emissions in grassland systems across Europe. *Agriculture Ecosystems and Environment* 121:135-152.
- Galbally, I; Meyer, C; Bentley, S; Weeks, I; Leuning, R; Kelly, K; Phillips, F; Barker-Reid, F; Gates, W; Baigent, R; Eckard, R; Grace, P. 2005. A study of environmental and management drivers of non-CO₂ greenhouse gas emissions in Australia agro-ecosystems. *Environmental Science* 2:133-142.
- Grace, P; Shcherbak, I; Macdonald, B; Scheer, C; Rowlings, D. 2016. Emission factors for estimating fertiliser-induced nitrous oxide emissions from clay soils in Australia's irrigated cotton industry. *Soil Research* 54:598-603.
- Harty, M; Forrestal, P; Watson, C; McGeough, K; Carolan, R; Elliot, C; Krol, D; Laughlin, R; Richards, K; Lanigan, G. 2016. Reducing nitrous oxide emissions by changing N fertiliser use from calcium ammonium nitrate (CAN) to urea based formulations. *Science of the Total Environment* 563-564:576-586.
- Haydock, K., Shaw, N. 1975. The comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 15, 663-670.

- Holdridge, L. 1979. Ecología basada en zonas de vida, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José, Costa Rica.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). 2008. Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica. Segunda Comunicación Nacional. 75 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate change). 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Prepared by the national greenhouse gas inventories programme. Vol 4. IGES, JPN.
- Keller, M; Reiners, W. 1994. Soil atmospheric exchange of nitrous-oxide, nitric-oxide, and methane under secondary succession of pasture to forest in the Atlantic lowlands of Costa Rica. *Global Biogeochemical Cycles* 8:399-409.
- Klein, C; Sherlock, R; Cameron, K; van der Weerden, T. 2001. Nitrous oxide emissions from agricultural soils in New Zealand—a review of current knowledge and directions for future research. *Journal of the Royal Society of New Zealand* 31:543-574.
- Khalil, M; Baggs, E. 2005. CH₄ oxidation and N₂O emissions at varied soil water-filled pore spaces and headspace CH₄ concentrations. *Soil Biology and Biochemistry* 37:1785-1794.
- Kiese, R; Hewett, B; Graham, A; Butterbach-Bahl, K. 2003. Seasonal variability of N₂O-emissions and CH₄-uptake from/by a tropical rainforest soil of Queensland, Australia. *Global Biogeochemical Cycles* 17:1043-1056.
- Linn, D; Doran; J. 1984. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal* 48:1267-1272.
- Luo, J; Ledgard, S; Lindsey, S. 2007. Nitrous oxide emissions from application of urea on New Zealand pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 50:1-11.
- Montenegro, J; Abarca, S. 2001. Importancia del sector agropecuario costarricense en la mitigación del cambio climático. MAG-IMN, San José, CR.
- Montenegro, J; Herrera, J. 2013. Determinación de la emisión de óxido nitroso en pasto kikuyo (*Kikuyuochloa clandestina*) bajo pastoreo: Efecto de diferentes fuentes y niveles de nitrógeno. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 12:9-21.
- Noemí, V. 2016. Factores y procesos que afectan la emisión de óxido nitroso en un suelo pampeano manejado con siembra directa. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía. 131 p.
- Nogueira, A; Rodrigues, R; Castro, B; Nogueira, T; da Silva, J; Behling, M; Mombach, M; Armacolo, N. Silveira, J. 2015. Emissões de óxido nitroso e metano do solo em áreas de recuperação de pastagens na Amazonia Matogrossense. *Química Nova* 38:937-943.
- Oertel, C; Matschullat, J; Zurba, K; Zimmermann, F; Erasmí, S. 2016. Greenhouse gas emissions from soils—A review. *Chemie der Erde* 76:327-352.
- Pastrana, I; Reza, S; Espinosa, M; Suárez, E; Díaz, E. 2013. Efecto de la fertilización nitrogenada en la dinámica del óxido nitroso y metano en *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweickert. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 12(2):134-142.
- Piotto, V. 2016. Mitigação da emissão de gases de efeito estufa em pasto de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu sob pastejo. Tesis Ph. D. Facultad de zootecnia e ingeniería de alimentos. Universidad de Sao Paulo, BRA.
- Rochette, P. 2011. Towards a standard non-steady-state chamber methodology for measuring soil N₂O emissions. *Animal Feed Science and Technology* 166-167:141-146.
- Rowlings, D; Grace, P; Scheer, C; Liu, C. 2016. Rainfall variability drives interannual variation in N₂O emissions from a humid, subtropical pasture. *Science of the Total Environment* 512-513:8-18.
- Sordi, A; Dieckow, J; Bayer, C; Amaral, M; Thiago, J; Acordi, J; Moraes, A. 2014. Nitrous oxide emission factors for urine and dung patches in a subtropical Brazilian pastureland. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 190:94-103.
- Snyder, C; Bruulsema, T; Jensen, T; Fixen, P. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture Ecosystems and Environment* 133:247-266.

Stehfest, E; Bouwman, L. 2006. N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modelling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74(3):207-228.

Van der Weerden, T; Cox, N; Luo, J; Dic, H; Podolyan, A; Phillips, R; Sagggar, S; de Klein, C; Ettem, P; Rys, G. 2016. Refining the New Zealand nitrous oxide emission factor for urea fertiliser and farm dairy effluent. *Agriculture Ecosystems and Environment* 222:133-137.

Veldkamp E; Keller, M; Nuñez, M. 1998. Effect of pasture management on N₂O and NO emissions from soil in the humid tropics of Costa Rica. *Global Biogeochemical Cycles* 12:71-79.

Wang, W; Park, G; Reeves, S; Zahmel, M; Heenan, M; Salter B. 2016. Nitrous oxide emission and

fertilizer nitrogen efficiency in a tropical sugarcane cropping system applied with different formulations of urea. *Soil Research* 54:572-584.

Wile, A; Burton, D; Sharifi, M; Lynch, D; Main, M; Papadopoulos, Y. 2014. Effect of nitrogen fertilizer application rate on yield, methane and nitrous oxide emissions from switchgrass (*Panicum virgatum* L.) and reed canarygrass (*Phalaris arundinacea* L.). *Canadian Journal of Soil Science* 94:129-137.

Yan, R; Tang, H; Xin, X; Chen, B; Murray, P; Yan, Y; Wang, X; Yang, G. 2016. Grazing intensity and driving factors affect soil nitrous oxide fluxes during the growing seasons in the Hulunber meadow steppe of China. *Environmental Research Letters* 11:1-12.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a la señora Doris Ivankovich, dueña de la Finca Duraznal, ya que permitió el desarrollo de la presente investigación, lo cual fue clave poder generar la información que se presenta en este artículo.

Se agradece también a la Agencia para el Desarrollo Internacional del Gobierno de los Estados Unidos de América (USAID), que a través del proyecto EC-LEDS II, financió parcialmente esta investigación, la cual fue realizada en el marco del Acuerdo interinstitucional entre el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), Costa Rica y el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), en colaboración con la Universidad Técnica Nacional (UTN), Costa Rica, Sede Atenas.