

Variación espacial y temporal de la emisión de óxido nitroso en un suelo dedicado a ganadería de carne en el trópico seco de Costa Rica

J. Montenegro¹, E. Barrantes²

RESUMEN

Variación espacial y temporal de la emisión de óxido nitroso en un suelo dedicado a ganadería de carne en el trópico seco de Costa Rica. Con el objetivo de determinar el efecto de la topografía y de la época climática en la emisión del óxido nitroso en una pastura de *B. brizantha* bajo pastoreo con ganado de carne en el trópico seco de Costa Rica y estimar la emisión anual de este gas, se implementaron cuatro experimentos. El primero de ellos se efectuó de abril a mayo en la transición de la época seca a la lluviosa; el segundo se estableció de agosto a setiembre durante la época lluviosa; el tercero se realizó de noviembre a diciembre en la transición de la época lluviosa a la seca. Finalmente el último de ellos se estableció de febrero a marzo durante la época seca. Cada uno de ellos consideró tres estratos topográficos: alto (A) y relativamente plano (<5° de inclinación); medio (M) con pendiente aproximada del 20% y, bajo (B) con pendiente similar al estrato A. Utilizando la técnica de la cámara estática se recolectaron muestras gaseosas hasta 30 días después de la salida de los bovinos en pastoreo. Se determinó el efecto de la topografía ($P < 0,051$) en los niveles de emisión, siendo inferior los valores en el estrato M. Con respecto a la época climática, esta también mostró influencia en la emisión del N₂O ($P < 0,047$) ya que durante la época seca se observaron los menores valores. En consecuencia, aún en el trópico se debe considerar la época del año, así como también la topografía cuando se va a desarrollar investigación tendiente a la obtención de un factor de emisión.

Palabras clave: Topografía, época climática, pastoreo, trópico, gases con efecto invernadero, cambio climático.

ABSTRACT

Spatial and temporal variation of nitrous oxide emission in a soil dedicated to livestock farming in the dry tropics of Costa Rica. With the objective of determining the topographic and seasonal climatic effect on the emission of nitrous oxide in a pasture of *B. brizantha* under grazing with beef cattle in the dry tropics of Costa Rica, and to estimate the annual emission of this gas, four experiments were implemented. The first one was carried out from April to May in the transition from the dry to the rainy season; the second was established from August to September during the rainy season; the third was carried out from November to December in the transition from the rainy to the dry season. Finally the last one was established from February to March during the dry season. Each of them considered three topographic strata: high (A) and relatively flat (<5° inclination); medium (M) with an approximate slope of 20% and, low (L) with a slope similar to stratum A. Using the static chamber technique, gaseous samples were collected up to 30 days after the grazing time. Was determined effect of topography ($P < 0.051$) on the emission levels, being lower the values in the stratum M. With respect to the climatic season, this also showed influence in the emission of N₂O ($P < 0.047$) since during the dry season the lowest values were observed. Consequently, even in the tropics, the climatic effect has be considered, as well as the topography when research is being carried out to obtain an emission factor.

Keywords: Topography, climatic season, grazing, tropic, greenhouse gases, climate change

1 Investigador en Cambio Climático y Agricultura, Convenio: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Agropecuaria (INTA) – Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Costa Rica. jmontenegro@imn.ac.cr, jmontenegro@inta.go.cr. Teléfono (506) 2222-5616 / Fax (506) 2223-1837.

2 Director de Investigación y Transferencia, Universidad Técnica Nacional - Sede Atenas, Alajuela, Costa Rica. ebarrantes@utn.ac.cr Teléfono (506) 2455-1004.

Recepción: 08.07.2019. Aceptación: 28.10.2019.

INTRODUCCIÓN

El óxido nitroso (N_2O) es un potente gas con efecto invernadero (GEI) que tiene un potencial de calentamiento 310 veces mayor al del dióxido de carbono (CO_2 , IPCC, 2006). Globalmente la emisión de este gas ha sido estimada en alrededor de 17,7 Tg de N por año (IPCC, 2007), siendo el sector agrícola una importante fuente, aunque existe bastante incertidumbre asociada con estos estimados (Hirsch *et al.* 2006). Por esta razón, se requiere que la cuantificación del N_2O sea lo más precisa posible, no solo para conocer la emisión, sino también para mejorar la precisión de los inventarios de gases con efecto invernadero.

El N_2O se forma mediante los procesos de nitrificación y denitrificación que ocurren en el suelo y son los responsables de la emisión de este gas en suelos agrícolas. La nitrificación es la oxidación aeróbica de NH_4^+ a NO_3^- , mientras que la denitrificación es el proceso de reducción de NO_3^- a N_2 . Este proceso puede ser completo, dando como resultado N_2 , o puede ser incompleto, y una fracción variable de N puede emitirse como N_2O (Signor y Pellegrino 2013).

De acuerdo con Snyder *et al.* (2009), diferentes características del suelo influyen en estos procesos, siendo la temperatura y la densidad del suelo importantes en la nitrificación, mientras que para la denitrificación es el contenido de agua del suelo. Sin embargo, debido a que la temperatura del suelo no varía mucho en el trópico, el contenido de agua del suelo es el factor más significativo que afecta las variaciones temporales y espaciales de la respiración del suelo (Davidson *et al.* 2000) ya que controla la actividad microbiana y los procesos relacionados, por lo que se convierte en el parámetro de suelo más importante para la emisión de gases.

Debido a que las bacterias productoras de N_2O requieren condiciones anaeróbicas, la mayor producción de este gas nitrogenado se presenta cuando el espacio poroso lleno de agua (EPA) es de aproximadamente 60%; consecuentemente valores de EPA inferiores a 30% conllevan a producciones bajas de N_2O (Gao *et al.* 2014). Es por ello que cuando se presentan períodos de sequía se reducen de manera importante la emisión de este gas, e inclusive en algunas ocasiones el suelo podría convertirse en un sumidero de N_2O tal y como se ha

observado en bosques (Goldberg y Gebauer 2009) y algunos cultivos (Meijide *et al.* 2009).

Existe muy poca información disponible para el trópico de la cuantificación del N_2O en suelo bajo pastoreo con ganado de carne. En Costa Rica, evaluaciones previas han sido realizadas en trabajos de corta duración con *Ischaemum indicum* e *Hypharrena rufa* ambas sin fertilizar, reportándose emisiones de 2,58 y 3,9 ng N_2O-N $cm^{-2} h^{-1}$ respectivamente (Montenegro y Abarca 2001). Más recientemente en pasturas de *Kikuyuochloa* clandestina bajo pastoreo de ganado de leche y sin fertilización, Montenegro y Herrera (2012) determinaron emisiones anuales de 0,89 ng N_2O-N $cm^{-2} h^{-1}$.

Un trabajo previo realizado por Veldkam *et al.* (1998) mostró emisión promedio anual de $2,67 \pm 1,44$ ng N_2O-N $cm^{-2} h^{-1}$ en pasturas de *Ischaemum indicum* y de $4,88 \pm 2,06$ ng N_2O-N $cm^{-2} h^{-1}$ para *B. brizantha* asociado con la leguminosa *Arachis pintoi*, ambos sin fertilización y pastoreadas por vacas lecheras en el trópico húmedo de Costa Rica.

En Colombia, Pastrana *et al.* (2011) determinó con diferentes accesiones (679, 16888, 26159) de *B. humidicola* sin fertilizar, que esta especie y particularmente la accesión 16888 parece tener un efecto inhibitorio de la nitrificación y en consecuencia, hace que las emisiones de este gas sean sumamente bajas (Subbarao *et al.* 2013). De igual forma Schumann (2013) en Brasil utilizando *B. brizantha* pastoreado y sin fertilizar, determinó un rango de emisión desde -0,06 hasta 12,5 ng $cm^{-2} h^{-1}$ con un promedio de 2,5 ng $cm^{-2} h^{-1}$.

Por otra parte, existe información previa que muestra la influencia de las condiciones climáticas en los niveles de emisión del N_2O (Du, Lu y Wang 2006; van der Weeden *et al.* 2016) en diferentes latitudes pero no en el trópico.

Flechard *et al.* (2007) demostraron el efecto del clima en la emisión del N_2O en pasturas ubicadas a través de Europa. De igual manera Kiese *et al.* (2003) reportaron que en Australia las variaciones en la emisión de este gas están estrechamente relacionadas con la lluvia, la cual influye directamente en la humedad del suelo, que como se

mencionó anteriormente, es un factor condicionante para la formación de este gas. En el trópico, la lluvia es la variable que marca cambios en las épocas climáticas.

Adicionalmente, variaciones propias del terreno como la topografía también han mostrado tener influencia en la emisión de N_2O (Izaurre et al. 2004; Vilain et al. 2010; Sakata et al. 2016) ya que influye en la temperatura y humedad del suelo (Luizao et al. 2004; Leiva et al. 2015) y con ello en la actividad de nitrificadores y denitrificadores (Zhu et al. 2013). Sin embargo, tanto el efecto del clima como de la topografía en la emisión de este gas, solo se ha evaluado en otras latitudes.

Sin embargo, hasta la fecha no existe estudio alguno en Costa Rica que evalúe el efecto de la

época climática y la topografía en la emisión de N_2O , por lo que existe la necesidad de generar este tipo de información para incluirla dentro del proceso de desarrollo de factores de emisión nacional, dadas las características topográficas y climáticas bajo las cuales se desarrolla la actividad agrícola en nuestro país. Sin duda, esto contribuirá de manera significativa a conocer de manera más precisa la emisión de gases con efecto invernadero en el sector agrícola, aspecto que es fundamental para el desarrollo de opciones de mitigación.

Por lo anteriormente expuesto, los objetivos de esta investigación fueron: determinar el efecto de la topografía y de la época climática en la emisión del óxido nitroso en una pastura de *B. brizantha* bajo pastoreo con ganado de carne en el trópico seco de Costa Rica y estimar la emisión anual de este gas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se llevó a cabo en la Universidad Técnica Nacional (UTN), Sede Atenas (450 msnm), Costa Rica, en un clima típico del ecosistema de bosque seco tropical, con un promedio anual de 2.131 mm de lluvia y 26°C de temperatura. Esta región presenta seis meses sin lluvia, período que se extiende de noviembre a abril.

Los experimentos se establecieron en una pastura de *Brachiaria brizantha* con más de cinco años de sembrada, seleccionándose un apartado de topografía variable y típica de la región, la cual se caracteriza por la presencia de pendientes de variable inclinación así como también, partes planas.

Esta pastura no recibió fertilización alguna, ni ningún tipo de insumo químico, siendo pastoreada con ganado cebuino de carne (2 UA ha⁻¹) con ciclos que variaron dependiendo de la época del año. Durante la época lluviosa (mayo-noviembre) se pastoreó cada 35-40 días, mientras que durante la época seca los pastoreos se realizaron de manera continua con baja carga animal (0,75 UA ha⁻¹), época durante la cual se les proporcionó pacas de *Brachiaria* a los animales.

2.1. Emisión de óxido nitroso

2.1.1. Efecto de topografía

Para determinar el efecto de la topografía en la emisión del óxido nitroso se seleccionó un apartado de 3,6 ha por su representatividad de la pendiente con relación al panorama de la zona y esta se clasificó en tres estratos topográficos: alto (A) y relativamente plano (<5° de inclinación); medio (M) con pendiente aproximada del 20% y bajo (B) con pendiente similar al estrato A. El mismo apartado y estratos seleccionados se utilizaron para todos los experimentos.

2.1.2. Efecto de la época del año

Para determinar la variación temporal en la emisión de óxido nitroso se establecieron cuatro experimentos. El primero de ellos, se efectuó de abril a mayo en la transición de la época seca a la lluviosa; el segundo se estableció de agosto a setiembre durante la época lluviosa; el tercero se realizó de noviembre a diciembre en la transición de la época lluviosa a la seca. Finalmente el último de ellos se estableció de febrero a marzo durante la época seca. En cada uno de los experimentos y en cada estrato topográfico (A, M, B) se colocaron tres cámaras estáticas distribuidas de manera aleatoria; en el caso del estrato M las cámaras fueron colocadas horizontalmente con respecto a la pendiente.

2.1.3. Muestreo de N₂O

En cada uno de los experimentos los muestreos de gas se iniciaron el día siguiente de la salida de los bovinos en pastoreo. Los muestreos de gases se realizaron durante las mañanas (entre las 9:00 a.m. y 12 md), y para capturar el gas se utilizó la técnica de la cámara estática, de 30 cm de alto y circunferencia de 94,2 cm, provista de un septum por donde se recolectó la muestra gaseosa utilizando una jeringa y trasvasando inmediatamente a viales de vidrio previamente evacuados al vacío. En cada cámara y cada día de muestreo se colectaron dos muestras, una al momento de colocarla en el campo (t₀) y otra 45 minutos después (t₁) (Luo *et al.* 2011, Berneze *et al.* 2014, Bell *et al.* 2015).

En cada estrato topográfico se colocaron tres cámaras estáticas y para cada una de ellas, se realizó la recolección de las muestras gaseosas considerando que mayores emisiones de N₂O se presentan durante los primeros días luego de la salida de los animales en pastoreo (Montenegro y Herrera 2012). De manera que la primera semana luego del pastoreo se muestreó diariamente para reducirse a tres y dos días en las subsiguientes dos semanas. Posterior a ello se muestreó un día la siguiente semana donde se completó el muestreo que se realizó hasta 30 días después de la salida de los bovinos del aparcadero. En total se muestreó durante 13 días.

2.1.4. Análisis de las muestras gaseosas

Las muestras gaseosas se analizaron en el Laboratorio de Suelos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), utilizando un cromatógrafo de gases (Agilent Modelo 7890A Santa Clara, CA, Estados Unidos) equipado con un detector de captura de electrones (ECD). La concentración de N₂O en las muestras gaseosas se determinó por interpolación a partir de las 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 las cuales se analizaron intercaladamente con las muestras provenientes del campo.

2.1.5. Flujo acumulado

El flujo acumulado se calculó integrando todos los valores para cada experimento y para ello se utilizó el método de integración trapezoidal mediante

la función “suma-producto” en Excel. El valor total anual se obtuvo mediante la multiplicación de la emisión promedio diaria de cada época, por la duración de la misma y luego se sumaron los cuatro productos.

2.1.6. Mediciones adicionales

2.1.6.1 Humedad y temperatura del suelo

Se realizaron muestreos del suelo para determinar el contenido de humedad del mismo. Para ello se utilizó un barrenador y se recolectaron muestras de suelo (0-10 cm de profundidad) a la par de cada cámara de donde se recolectó la muestra de gas y de cada uno de los niveles topográficos (A, M, y B) durante el ciclo completo de muestreo de la pastura.

Cada muestra de suelo se depositó en una bolsa plástica previamente identificada, posteriormente el suelo se introdujo en una estufa a 60°C, previo a la respectiva determinación del peso húmedo y luego de 48 horas se determinó el peso seco por gravimetría.

La temperatura del suelo se determinó a 10 cm de profundidad, con un termómetro digital cerca del lugar donde se recolectaron las muestras para humedad de suelo.

2.1.6.2. Densidad aparente del suelo

También se determinó la densidad aparente del perfil superficial del suelo (0-10cm), utilizándose un cilindro metálico de 5,2 cm de diámetro y 10 cm de longitud. Las muestras se recolectaron de sitios cercanos al lugar donde se ubicaron las cámaras estáticas.

2.1.6.3. Humedad del suelo

Los resultados de la humedad gravimétrica y densidad aparente se utilizaron para determinar el espacio poroso lleno de agua (EPA). El EPA utiliza una escala de 0% (suelo completamente seco) a 100% (suelo sobre saturado de agua), en el cual entre 30% (punto de marchitez permanente) y 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 actividad microbiana del suelo.

En consecuencia, conforme los valores del EPA se incrementan de 60% de igual forma se aumenta la limitación de oxígeno del suelo y con ello se favorecen las condiciones para la formación del N₂O (Linn y Doran 1984).

2.1.6.4. Datos climáticos

Se obtuvo información diaria de precipitación y temperatura del aire correspondiente a cada período experimental de una estación meteorológica, propiedad del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), ubicada a menos de 1 Km del sitio experimental.

2.1.6.5. Análisis estadístico

Los resultados de los análisis de las muestras gaseosas se analizaron de acuerdo con un diseño de bloques al azar repetido en el tiempo. Se realizaron comparaciones de medias usando la diferencia mínima significativa de Infostat (Di Rienzo *et al.* 2015) y utilizando la prueba de Tuckey al 5%.

3. Resultados y discusión

3.1. Topografía

Se determinó efecto ($P < 0,051$) de la topografía en la emisión acumulada de óxido nitroso, donde la menor emisión se observó en el estrato medio (M), mientras que superiores y similares entre sí se determinaron en los restantes dos estratos (Cuadro 1).

3.2. Época climática

La época climática mostró ser importante en la emisión de este gas, donde los menores ($P < 0,047$) valores se determinaron durante el período seco (Cuadro 2), siendo superiores y similares entre sí en las restantes épocas. En consecuencia, se observó un patrón de emisión donde estas tienden a ser superiores durante las épocas lluviosas (Figura 1).

Cuadro 1. Emisión diaria de N₂O-N, proveniente del suelo cubierto por *B. brizantha*, según estrato topográfico. Atenas, Costa Rica. 2016.

Estrato topográfico	g N ₂ O-N ha ⁻¹ d ⁻¹	EE
Alto	0,85 ^a	0,22
Medio	0,35 ^b	0,14
Bajo	0,82 ^a	0,21

Valores promedio con diferente letra difieren al nivel $P < 0,05$, EE: error estándar.

Cuadro 2. Emisión diaria de N₂O-N proveniente del suelo cubierto por *B. brizantha*, según época climática. Atenas, Costa Rica. 2016.

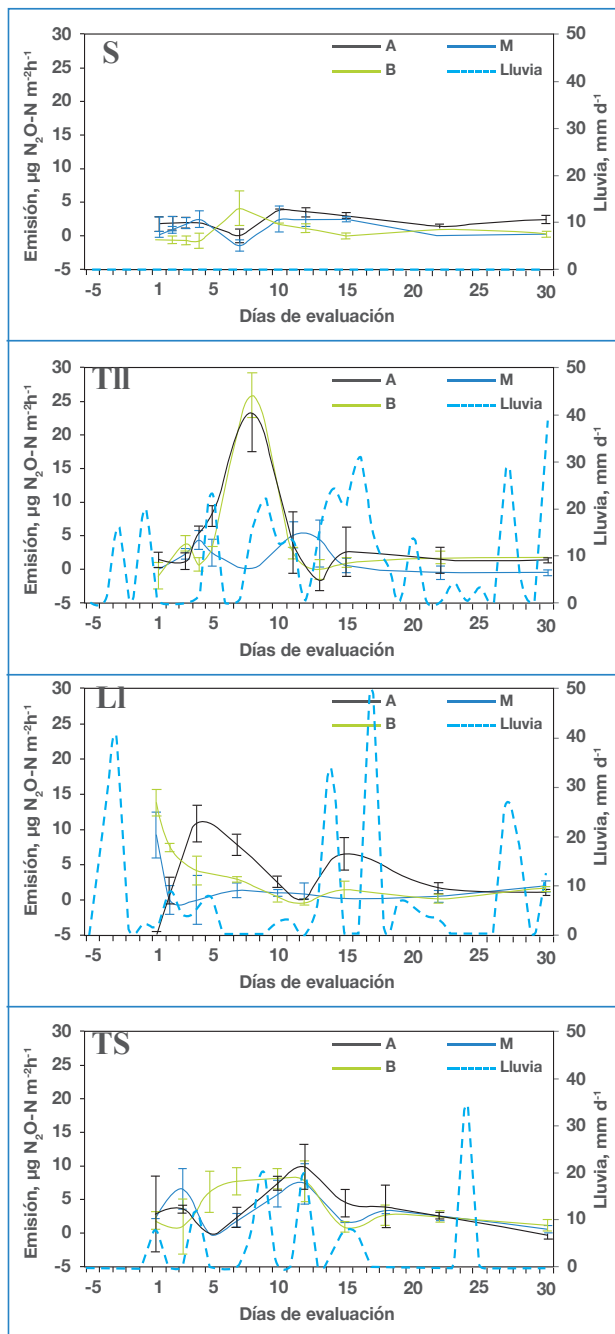
Época climática	g N ₂ O-N ha ⁻¹ d ⁻¹	EE
Seca	0,16 ^b	0,09
Transición a lluvias	0,96 ^a	0,32
Lluviosa	0,71 ^a	0,19
Transición a seca	0,86 ^a	0,27

Valores promedio con diferente letra difieren al nivel $P < 0,05$, EE: error estándar.

El patrón de emisión también muestra que los eventos de emisión del N₂O se presentan principalmente durante los primeros 10 días de evaluación, particularmente durante la transición a la época lluviosa (Figura 1B) y durante esta (Figura 1C).

Aun y cuando no se determinó interacción significativa entre época climática y topografía, las emisiones fueron menores en el estrato medio (Figura 2) como resultado del movimiento del agua en el suelo, que no se acumula por la fuerza gravitacional, y en consecuencia no se presentan condiciones propicias para la generación del gas en estudio.

Esto se puede apreciar claramente en la Figura 2, en la cual se observa que este estrato topográfico tiende a tener menores contenidos de humedad en el suelo.



Época climática: S: Seca; TII: Transición a lluvia; LI: Lluviosa; TS: Transición a seca; Estrato topográfico: A: Alto; B: medio; B: bajo

Figura 1. Flujos de N₂O-N determinados en diferentes épocas climáticas en un suelo con *B. brizantha* en el trópico seco de Costa Rica. 2016.

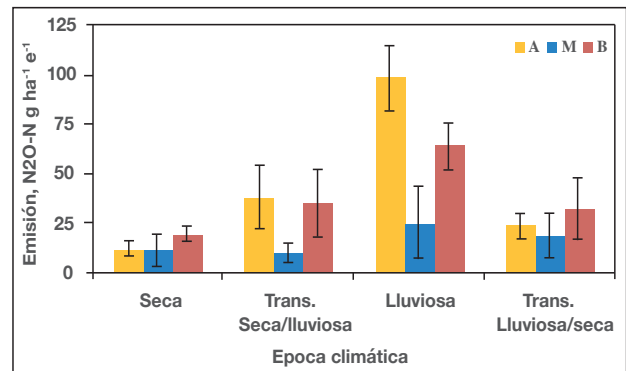


Figura 2. Emisión de N₂O-N determinados en diferentes épocas climáticas y estrato topográfico en un suelo con *B. brizantha* en el trópico seco de Costa Rica. 2016.

3.3. Humedad del suelo

A pesar de que no se determinó correlación alguna entre humedad del suelo y emisión, esta última fue mayor para los estratos A y B en las épocas donde se presentan lluvias (Figura 2). Durante la época seca los contenidos de agua en el suelo fueron muy bajos (inferiores a 30% de EPA, Figura 3S) y los valores de emisión también (Figuras 2 y 1S).

En la época lluviosa la humedad del suelo se mantuvo entre 60 y 50% de EPA (Fig. 3LI) y se determinaron mayores valores de emisión (Figs. 1LI y 2).

Con respecto a la temperatura del suelo, fue similar entre las diferentes posiciones topográficas en las diferentes épocas climáticas, y mostró un rango entre 25,4 y 30,1 °C, y no hubo relación estadística alguna con la emisión del N₂O.

3.3. Factor de emisión

El factor de emisión determinado varió con la topografía, fue inferior para el estrato medio y mayor en el estrato alto e intermedio en la zona baja (Cuadro 3) cuando este se calculó por unidad de área para cada estrato.

La topografía es un factor que influye en la emisión del N₂O, aspecto que ha sido mencionado por diferentes investigadores (Vilain *et al.* 2010; Sakata *et al.* 2016; Arias *et al.* 2017), quienes de manera similar a la determinada en la presente investigación, detectaron menos emisión de este gas en el estrato topográfico medio (M).

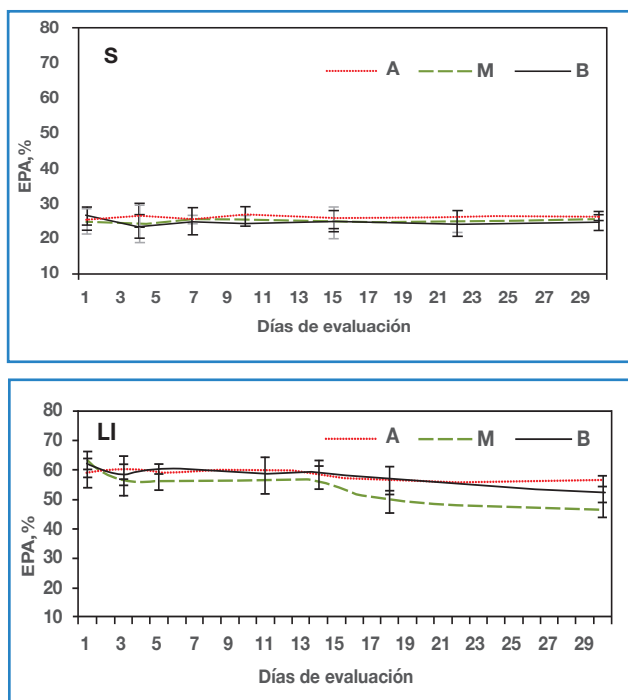


Figura 3. Humedad del suelo expresada como EPA, según estrato topográfico, para la época seca (S) y lluviosa (LI) en el trópico seco de Costa Rica. 2016.

Cuadro 3. Emisión anual de N₂O-N proveniente del suelo cubierto por *B. brizantha*, según estrato topográfico. Atenas, Costa Rica. 2016.

Estrato topográfico	kg N ₂ O-N ha ⁻¹ a ⁻¹	EE
Alta	0,267	0,123
Media	0,101	0,113
Baja	0,235	0,086

Valores promedio con diferente letra difieren al nivel P<0,05, EE: error estándar.

Esto puede ser explicado por diferentes razones; una de ellas es la humedad del suelo (Vilain *et al.* 2010, 2011; Negassa *et al.* 2015). La topografía influye en ella, debido a que la escorrentía superficial y el drenaje sub-superficial es más rápido en las pendientes que en las partes planas (Fang *et al.* 2009), por lo que en una topo-secuencia ellas son más secas.

En nuestra investigación ello se reflejó en el espacio poroso lleno de agua (EPA), el cual fue menor en el estrato topográfico medio (M) con respecto al A y B, en la medición realizada durante la época lluviosa (Figura 3LI) y aunque no hubo

correlación estadística con la emisión del N₂O como la reportada en otros estudios (Negassa *et al.* 2015; Arias *et al.* 2017), si se observó una clara tendencia que a mayor EPA mayor emisión (Figuras. 1 y 3). Probablemente se requieren mayores niveles de humedad para lograr establecer una correlación estadística entre ambas variables (Arias *et al.* 2017).

La emisión de N₂O fue mayor en los estratos A y B (Figura 2) durante la medición realizada en la época lluviosa cuando el EPA era de aproximadamente 60% (Figura 3LI), condición que favoreció la formación del N₂O (Linn y Doran 1984; Gao *et al.* 2014). Mayores emisiones en posiciones altas o bajas de pendientes han sido reportadas por diferentes investigadores (Arias *et al.* 2017).

El efecto del estrato topográfico en la emisión del N₂O durante la estación seca fue nulo comparado con aquellas determinadas en la época lluviosa o de transición a esta (Figuras 1 y 2). La razón es que la humedad del suelo ejerce un efecto controlador de la actividad microbiana y de diferentes procesos que ocurren en el suelo (Signor y Pellegrino 2013). Por ello cuando la humedad del suelo es muy baja, menor al 30% como la determinada durante el período seco (Figura 3S), la emisión del N₂O (Figura 1S, Cuadro 2) fue muy reducida (Gao *et al.* 2014; Montenegro, Barrantes e Ivanckovich 2019).

En pasturas sin fertilizar, el reciclaje de nitrógeno (N) que realizan los bovinos en pastoreo es muy importante para la sostenibilidad del sistema productivo y contribuye a explicar las diferencias observadas en la emisión del gas en evaluación (Bhandral *et al.* 2007; de Klein *et al.* 2014).

La deposición de las excretas sólidas y líquidas, debido al contenido de N, tiene una marcada influencia en la emisión del N₂O (Rafique, Hennessy y Kiely 2011). En este sentido, el patrón de comportamiento durante el pastoreo y el descanso de los bovinos influyen la distribución de las deposiciones y con ello la posterior emisión del N₂O (Saggar *et al.* 2015).

Cuando la topografía es irregular, como en el caso del apartado donde se realizaron las determinaciones de la presente investigación, los bovinos tienden a pastorear por mayores lapsos en las partes altas y bajas que en aquellos lugares con pendiente. Además, los descansos los realizan

básicamente en esos mismos estratos topográficos (de Klein *et al.* 2014; Saggar *et al.* 2015) y ello implica mayor cantidad de deposiciones en A y B. Como resultado se presenta mayor emisión en los mencionados estratos (Cuadro 1).

También hay que considerar que compuestos nitrogenados como el nitrato, un precursor del N_2O , al ser hidrosoluble se mueve con el agua pendiente abajo. Menores concentraciones de este compuesto nitrogenado fueron asociadas con bajas emisiones de este gas en el estrato topográfico medio (Montenegro 2013) y con ello contribuye a explicar los menores valores de emisión determinados en M (Cuadro 1).

En lo que respecta a los factores de emisión determinados en la presente investigación, los mismos se encuentran en el rango reportado por Schumann (2013) en Brasil para pasturas sin fertilizar. En Guyana, Petitjean *et al.* (2015) y Meurer *et al.* (2016) en Brasil determinaron valores (0,88 y 0,90 kg $N_2O-N ha^{-1} a^{-1}$, respectivamente) similares a las detectadas en esta investigación. Mayor emisión (1,2 kg $N_2O-N ha^{-1} a^{-1}$) fue reportada por Piotto (2016) en Brasil para pasturas de *B. brizantha* cv Marandú.

Por otra parte, el clima y las variaciones estacionales del mismo que ocurren a lo largo del año, han sido mencionadas como factores importantes que influyen en la emisión de N_2O . En este sentido y 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 presentó por las épocas climáticas típicas que se presentan a lo largo del año (Cuadro 2, Figura 2).

Los valores de emisión fueron mayores durante la época lluviosa comparada con la detectada en la

época seca. En este sentido, previas evaluaciones realizadas en una pastura en un sistema de producción de leche por Montenegro, Barrantes e Ivanckovich (2019) mostraron el efecto de la época del año en la emisión del N_2O . Estos resultados también son coincidentes con los reportados en la Amazonía brasileña con pasto *Brachiaria brizantha* cv Marandú (Nogueira *et al.* 2015) donde se determinaron variaciones importantes en la emisión del N_2O como resultado de la época climática. De igual forma Luo *et al.* (2007) en Nueva Zelandia, reportaron variaciones importantes en el factor de emisión como resultado de la época climática, ya que detectaron un rango desde 0% durante la época seca, hasta 1,56% para la época lluviosa. La misma tendencia fue determinada por Wang *et al.* (2016) en Australia.

Las variaciones estacionales y espaciales, representadas por la época del año y la topografía, mostraron ser de importancia y deben ser consideradas cuando se desarrolla investigación tendiente a la obtención de factores de emisión.

La emisión del óxido nitroso fue baja durante la época seca y las mayores emisiones se presentaron cuando se presentan las lluvias, lo cual mostró la influencia directa del nivel de humedad del suelo en la emisión. Por su parte el estrato topográfico medio fue donde se presentaron las menores emisiones en comparación con las observadas en los estratos alto y bajo.

Por esta razón se requiere considerar las variaciones estacionales del clima que ocurren a lo largo del año cuando se desarrollan factores de emisión, ya que la emisión varía sustancialmente entre la época seca y la lluviosa.

LITERATURA CITADA

- Arias, C; Díaz-Pinés, E; Klatt, S; Brandt, P; Rufino, M; Butterbach-Bahl, K; Verchot, L. 2017. Spatial variability of soil N₂O and CO₂ fluxes in different topographic positions in a tropical montane forest in Kenya. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 122:514–527.
- 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. *Atmospheric Environment* 92:394–397. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.04.046
- 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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.12.008
- Bhandral, R; Saggar, S; Bolan, N; Hedley, M. 2007. Transformation of nitrogen and nitrous oxide emission from grassland soils as affected by compaction. *Soil and Tillage Research* 94:482–492.
- Davidson, E; Verchot, L; Cattanio, J; Ackerman, I. 2000. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry* 48(1):53–69.
- de Klein, C; Shepherd, M; van der Weerden, T. 2014. Nitrous oxide emissions from grazed grasslands: interactions between the N cycle and climate change—a New Zealand case study *Current Opinion in Environmental Sustainability* 9:131–139.
- Di Rienzo, J; Casanoves, F; Balzarini, M; Gonzalez, L; Tablada, M; Robledo, C. 2015. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- 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(12):3474–3482.
- Fang, Y; Gundersen, P; Zhang, W; Zhou, G; Christiansen, J; Mo, J; Dong, S; Zhang, T. 2009. Soil-atmosphere exchange of N₂O, CO₂ and CH₄ along a slope of an evergreen broad-leaved forest in southern China. *Plant Soil* 319(1–2):37–48.
- Flechard, C; Ambus, P; Skiba, U; Rees, R; Hensen, A; van Amstel, A; van den Pol-van, A; Soussana, JF; 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 & Environment* 121(1–2):135–152.
- Gao, B; Ju, X; Su, F; Meng, Q; Oenema, O; Christie, P; Chen, X; Zhang, F. 2014. Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: a two-year field study. *Science of the Total Environment* 472:112–124.
- Goldberg, S; Gebauer, G. 2009. N₂O and NO fluxes between a Norway spruce forest soil and atmosphere as affected by prolonged summer drought. *Soil Biology and Biochemistry* 41:1986–1995.
- Hirsch, A; Michalak, A; Bruhwiler, L; Peters, W; Dlugokencky, E; Tans, P. 2006. Inverse modeling estimates of the global nitrous oxide surface flux from 1998–2001. *Global Biogeochem Cycles*. 20:1–17.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. *Greenhouse Gas Inventory Reference Manual*, 4. Intergovernmental Panel on Climate Change. 128 p. Disponible en <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Summary for policy makers, in: *Climate Change 2007: The physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In Solomon, S; Qin, D; Manning, M; Chen, Z; Marquis, M; Averyt, KB; Tignor, M; Miller, HL (eds.) Cambridge, UK and New York, USA. Páginas.

- Izaurrealde, R; Lemke, R; Goddard, T; McConkey, B; Zhang, Z. 2004. Nitrous oxide emissions from agricultural toposequences in Alberta and Saskatchewan. *Soil Science Society of America Journal* 68:1285-1295.
- 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(2):1043.
- Leiva, N; Rubiano, Y; Peña, A. 2015. Evaluation of soil moisture using topographic (DEM), climate and soil parameters in a piedmont area of Villavicencio. *Revista EIA* 12(2):E61-E75.
- 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; van der Weerden, T; Hoogendoorn, C; de Klein, C. 2011. Determination of the N₂O emission factor for animal dung applied in spring in three regions of New Zealand. *MAF Technical Paper No: 2011/30*
- 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.
- Luizao, R; Luizao, F; Paiva, R; Monteiro, T; Sousa, L; Kruijt, B. 2004. Variation of carbon and nitrogen cycling processes along a topographic gradient in a central Amazonian forest. *Global Change Biology* 10:592-600.
- Mejjide, A; Garcia-Torres, L; Arce, A; Vallejo, A. 2009. Nitrogen oxide emissions affected by organic fertilization in a non-irrigated Mediterranean barley field. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 132(1-2):106-115.
- Meurer, K; Franko, U; Stange, C; Dalla, J; Madari, B; Jungkunst, H. 2016. Direct nitrous oxide (N₂O) fluxes from soils under different land use in Brazil—a critical review. *Environmental Research Letters* 11:023001.
- Montenegro, J; Abarca, S. 2001. Importancia del sector agropecuario costarricense en la mitigación del calentamiento global. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Instituto Meteorológico Nacional. 96 p.
- Montenegro, J; Herrera, J. 2012. 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.
- Montenegro, J; Barrantes, E; Ivankovich, S. 2019. Variación de la emisión de óxido nitroso con gramíneas en pastoreo del trópico húmedo montano bajo en diferentes épocas climáticas, Costa Rica. En prensa.
- Negassa, W; Price, R; Basir, A; Snapp, S; Kravchenko, A. 2015. Cover crop and tillage systems effect on soil CO₂ and N₂O fluxes in contrasting topographic positions. *Soil and Tillage Research* 154:64-74.
- 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(7):937-943.
- Pastrana, I; Reza, S; Espinosa, M; Suárez, E; Díaz, E. 2011. Efecto de la fertilización nitrogenada en la dinámica del óxido nitroso y metano en *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweickhardt. *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 12(2):134-142.
- Petitjean C; Henault C; Perrin A; Pontet C; Metay A; Bernoux, J; Viard A; Roggy, J. 2015. Soil N₂O emissions in French Guiana after the conversion of tropical forest to agriculture with the chop-and-mulch method. *Agriculture Ecosystems and Environment* 208:64-74.
- Piotto, V. 2016. Mitigação da emissão de gases de efeito estufa em pasto de *Brachiaria brizantha* cv Marandu sob pastejo. Tesis Ph. D. Ciudad, País. Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de Sao Paulo. 86 p.

- Rafique, R; Hennessy, D; Kiely, G. 2011. Nitrous oxide emission from grazed grassland under different management systems. *Ecosystems* 14(4): 563-582.
- Saggar, S; Giltrap, D; Davison, R; Gibson, R; de Klein, C; Rollo, M; Ettema, P; Rys, G. 2015. Estimating direct N₂O emissions from sheep, beef, and deer grazed pastures in New Zealand hill country: accounting for the effect of land slope on the N₂O emission factors from urine and dung. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 205:70–78.
- Sakata, R; Shimada, S; Yoshioka, N; Yoshioka, R; Aoki, H; Kimoto, N; Sakamoto, A; Inubushi, K. 2016. Effect of topography on N₂O and CO₂ emissions and dissolved N₂O in oil palm plantation in Riau, Indonesia. *Tropical Agriculture and Development* 60(4):226-235.
- Schumann, A. 2013. Emissão de gases de efeito estufa em pastagem de *Brachiaria brizantha* cv. marandu. Instituto de Zootecnia, APTA/SAA. Tesis Mag. Sc. Ciudad, País. Instituto de Zootecnia Programa de Pós-Graduação em Produção Animal Sustentável. 62 p.
- Signor, D; Pellegrino, C. 2013. Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. *Pesquisa Agropecuaria Tropical* 43(3):322-338.
- 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(3-4):247-266.
- Subbarao, GV; Rao, IM; Nakahara, K; Sahrawat, KL; Ando, Y; Kawashima, T. 2013. Potential for biological nitrification inhibition to reduce nitrification and N₂O emissions in pasture crop–livestock systems. *Animal* 7(2):322–332.
- van der Weerden, T; Cox, N; Luo, J; Dic, H; Podolyan, A; Phillips, R; Saggar, 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. Effects of pasture management on N₂O and NO emissions from soils in the humid tropics of Costa Rica. *Global Biogeochemical Cycles* 12(1):71-79.
- Vilain, G; Garnier, J; Passy, P; Silvestre, M; Billen, G. 2011. Budget of N₂O emissions at the watershed scale: Role of land cover and topography (the Orgeval basin, France). *Biogeosciences Discussions* 8(6):10823–10857.
- Vilain, G; Garniera, J; Tallec, G; Cellier, P. 2010. Effect of slope position and land use on nitrous oxide (N₂O) emissions (Seine Basin, France). *Agricultural and Forest Meteorology* 150:1192–1202.
- Wang, W; Park, G; Reeves, S; Zahmel, M; Heenan, M; Salter, B. 2016. Nitrous oxide emission and fertiliser nitrogen efficiency in a tropical sugarcane cropping system applied with different formulations of urea. *Soil Research* 54:572–584.
- Zhu, J; Mulder, J; Meng, X; Wu, L; Wang, Y; Dörsch, P. 2013. Spatial and temporal variability of N₂O emissions in a subtropical forest catchment in China. *Biogeosciences* 10:1309-1321.