

# TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS



ISSN 1409 - 2034

Volumen 12

Junio 2013





# TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS

ISSN 1409 - 2034

Volumen 12

Junio 2013

**Editora:**

Dra. Gladys Jiménez Valverde

**Director de publicación:**

MSc. Roberto Villalobos Flores

**Comité editorial:**

Lic. Werner Stolz España, Lic. José Alberto Retana Barrantes, Lic. Luis Fernando Alvarado Gamboa

**Diseño y diagramación:**

Paula Solano Mora

---

*La revista "Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos" es publicada por el Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica. Tiene como finalidad dar a conocer los resultados de investigaciones y estudios en Ciencias de la Atmósfera y Oceanografía Física.*



Versión electrónica en:  
<http://www.imn.ac.cr/publicaciones>  
<http://cglobal.imn.ac.cr/documentos>

---

## INDICE

### **Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero en el Instituto Meteorológico Nacional durante el período 2008 al 2012.**

Ana Rita Chacón Araya. Ingeniera Química. Instituto Meteorológico Nacional ..... 3

### **Determinación de la emisión de óxido nitroso en pasto kikuyo (*Kikuyuochloa clandestina*) bajo pastoreo: efecto de diferentes fuentes y niveles de nitrógeno.**

Johnny Montenegro Ballester. Investigador en Cambio Climático y Agricultura. Convenio: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria – Instituto Meteorológico Nacional y Jorge Herrera Murillo. Coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional ..... 9

### **Emisión del óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) en el sistema de producción café sin sombra en Costa Rica.**

Johnny Montenegro Ballester, Investigador en Cambio Climático y Agricultura, Convenio: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria – Instituto Meteorológico Nacional y Jorge Herrera Murillo. Coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional ..... 22

### **Climatología de masas invernales de aire frío que alcanzan Centroamérica y el Caribe y su relación con algunos índices Árticos.**

Eladio Zárate Hernández. Investigador del Laboratorio de Investigaciones Atmosféricas y Planetarias (LIAP). Universidad de Costa Rica..... 35

### **Evaluación comparativa de un evento hidrometeorológico extremo en el Valle Central de Costa Rica utilizando diferentes parametrizaciones de cúmulos del modelo numérico del tiempo WRF-EMS.**

Daniel A. Poleo Brito. Meteorólogo. Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional y Werner Stolz España. Jefe del Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional..... 56

# Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero en el Instituto Meteorológico Nacional durante el período 2008 al 2012

ANA RITA CHACÓN ARAYA<sup>1</sup>

## Resumen

La evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero en el Instituto Meteorológico Nacional, se realiza como parte de las acciones del Plan de Gestión Ambiental (PGA) y el compromiso de Costa Rica de ser carbono neutral al año 2021. La metodología utilizada para su realización es la propuesta por el Panel de Expertos de Cambio Climático, siendo los resultados presentados en unidades de CO<sub>2</sub> equivalente. El promedio de emisiones del edificio central del IMN es de 50 toneladas aproximadamente, donde el principal emisor es la flota vehicular con aproximadamente el 50% de las emisiones totales, destacando la tendencia a la disminución en casi todas las áreas evaluadas.

PALABRAS CLAVES: GASES DE EFECTO INVERNADERO, INVENTARIOS, CAMBIO CLIMÁTICO.

## Abstract

The assessment of greenhouse gas emissions in the National Meteorological Institute is performed as part of the actions of the Environmental Management Plan (PGA) and Costa Rica's commitment to be carbon neutral by 2021. The methodology used for the implementation is the Expert Panel on Climate Change proposal and the results are showed in CO<sub>2</sub> equivalent units. The average emission of the IMN Central Building is 50 tonnes, where the vehicle fleet is the main emisor generating approximately 50% of total emissions highlighting the downward trend in almost all the areas studied.

KEYWORD: GREENHOUSE GAS, INVENTORIES, CLIMATE CHANGE.

## 1. Introducción

En el año 2007, el gobierno de Costa Rica se propuso alcanzar la neutralidad en las emisiones de carbono para del bicentenario de la Independencia, o sea, en el 2021; con el fin de lograr un cambio en el comportamiento de la comunidad nacional e internacional. Como parte de este objetivo, la directriz ministerial No. 56, del 01 de agosto del 2007, solicita a todas las instituciones públicas la elaboración y puesta en marcha de un plan de acción, que contemple los seis ejes de la Estrategia Nacional de Cambio Climático: mitigación, adaptación, creación de capacidades y transferencia de tecnología, métrica, educación y sensibilización pública, y financiamiento.

Por otra parte, el 9 de mayo del 2011, fue publicado mediante Decreto Ejecutivo N° 36499 MINAET-MS el Reglamento para la elaboración de Programas de Gestión Ambiental Institucional (PGA), en el sector público de Costa Rica.

El Instituto Meteorológico Nacional (IMN), como ente público que tiene a cargo la coordinación del Inventario Nacional de Emisiones por fuentes y absorción por sumideros de gases de efecto invernadero (GEI), se ha propuesto la elaboración del inventario de emisiones de GEI producidas por la institución, en las actividades propias de su quehacer diario.

<sup>1</sup> Ingeniera Química. Departamento de Climatología e Investigaciones Aplicadas. Instituto Meteorológico Nacional. Email: archacon@imn.ac.cr

## 2. Metodología

### 2.1. Alcance

El inventario de emisiones de gases con efecto invernadero del IMN, se circunscribe a las oficinas centrales, ubicadas en Barrio Aranjuez, avenida 9 calle 17, en San José, que ocupan un espacio físico de aproximadamente 2500 m<sup>2</sup>, distribuidos en un edificio de tres pisos y que albergan entre 66 y 73 funcionarios, de los cuales 35% son mujeres y 65% son hombres.

La evaluación del inventario se realizó en el período comprendido entre el año 2008 y el año 2012.

### 2.2. Metodología

En la estimación del inventario, se utilizaron las Directrices del IPCC del 2006 para Inventarios Nacionales de Gases con Efecto Invernadero y las guías para Estimación y Reporte de Datos de Emisión, bajo el Convenio sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a gran distancia. También se consultaron el Protocolo para Evaluación de Gases de Efecto Invernadero y las normas Inte\_ISO 14064 e Inte 12-01-06 2011.

Los gases evaluados fueron: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de carbono (CO), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), otros hidrocarburos volátiles diferentes del metano (NMVOC), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y halocarbonos (HFC). Adicionalmente se evaluó la emisión de partículas. No obstante, se presenta la evaluación en unidades de CO<sub>2</sub> equivalente, para hacerlo fácilmente comparable.

De acuerdo con la metodología del IPCC y las normas INTE-ISO 14064-1:2006 e Inte 12-01-06 2011, se dividió el inventario en emisiones directas y emisiones indirectas. Dentro de las emisiones directas se incluyeron aquellas que se presentan por la generación de electricidad, en la planta de generación con que cuenta el IMN, las emisiones por

la flota vehicular y las emisiones potenciales por uso de refrigerantes en los aires acondicionados. Por su parte, en las emisiones indirectas se incluyeron el uso de electricidad, la generación de desechos sólidos y las aguas residuales.

## 3. Resultados

### 3.1. Generación de electricidad

Las oficinas centrales del IMN cuentan con una planta de generación de electricidad, que funciona únicamente cuando se presenta un faltante de electricidad suministrada por la Compañía Nacional de Fuerza y Luz.

El combustible promedio usado anualmente en la planta es de 37,5 litros de diesel, lo que genera 102, 2 kg de CO<sub>2</sub> equivalente anualmente.

### 3.2. Flota vehicular

El IMN contaba en el año 2008 con 12 vehículos, de los cuales 9 eran estilo pick up y 3 automóviles. Actualmente cuenta con dieciséis vehículos, de los que 6 se encuentran fuera de servicio y se han incluido en la flota 2 vehículos híbridos.

Las emisiones producidas por el consumo de combustible en la flota vehicular expresadas como CO<sub>2</sub> equivalente, se presentan en la figura 1.

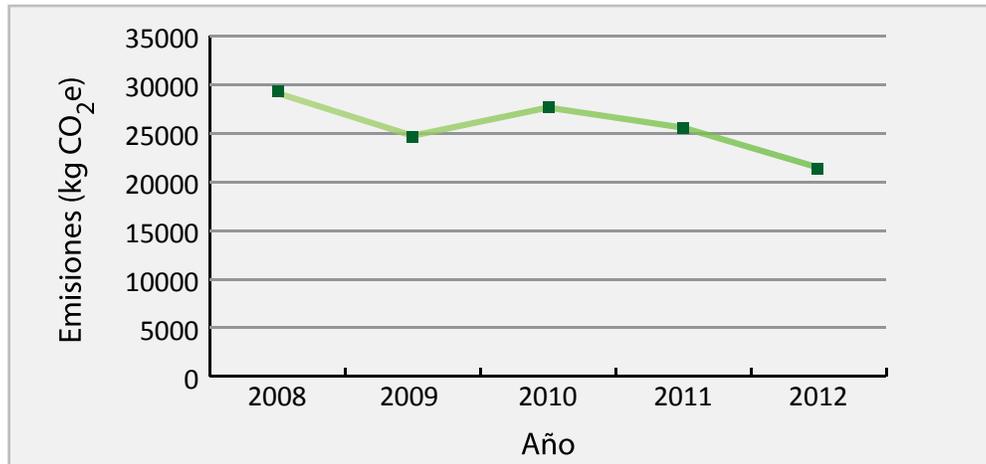


Figura 1. Evolución de emisiones de la flota vehicular IMN.

### 3.3. Aire acondicionado

El IMN cuenta en la actualidad con veintitrés aires acondicionados en el edificio central, la misma cantidad que en el 2008. No obstante, en el 2008 los veintitrés equipos utilizaban refrigerante HCFC-22 que es regulado por el Protocolo de Montreal, por lo que no se contabilizan en el inventario de emisiones de GEI, mientras en la actualidad se cuenta con 3 equipos nuevos que utilizan el R-410<sup>a</sup> como refrigerante.

El gas refrigerante no ha sido cambiado en el periodo estudiado por lo tanto la emisión es cero.

Con respecto a los aires acondicionados de los vehículos, los 8 vehículos que cuentan con aire acondicionado utilizan refrigerante R-134<sup>a</sup>, pero no

se han realizado recargas en el periodo estudiado, por lo que sus emisiones son nulas.

### 3.4. Uso de electricidad

En el IMN se utiliza la electricidad en los equipos de cómputo y los aires acondicionados principalmente, con un consumo de 55% y 27% respectivamente.

No obstante, aunque el consumo ha ido decreciendo en el período estudiado, las emisiones por uso de electricidad han aumentado, esto debido al incremento en el uso de combustible fósil en la generación eléctrica del país. Este resultado puede observarse en el cuadro 1.

Cuadro 1. Evolución de las emisiones por consumo de electricidad en el IMN

	Año				
	2008	2009	2010	2011	2012
Consumo de electricidad (kWh)	127839	124271	118532	119292	116478
Emisiones (kg CO <sub>2</sub> e)	8616,810	5046,50673	6758,5	9829,7	8980,4

### 3.5. Desechos sólidos

Debido a que no se lleva un control de los residuos sólidos generados en la institución, para evaluar las emisiones de metano por el manejo de desechos sólidos en el IMN, se consideró el valor promedio nacional de generación de residuos sólidos por

persona, aplicado durante la permanencia del funcionario en el edificio.

Con estos parámetros y considerando que los desechos se depositarían en el relleno sanitario, se obtuvieron los resultados presentados en la figura 2.

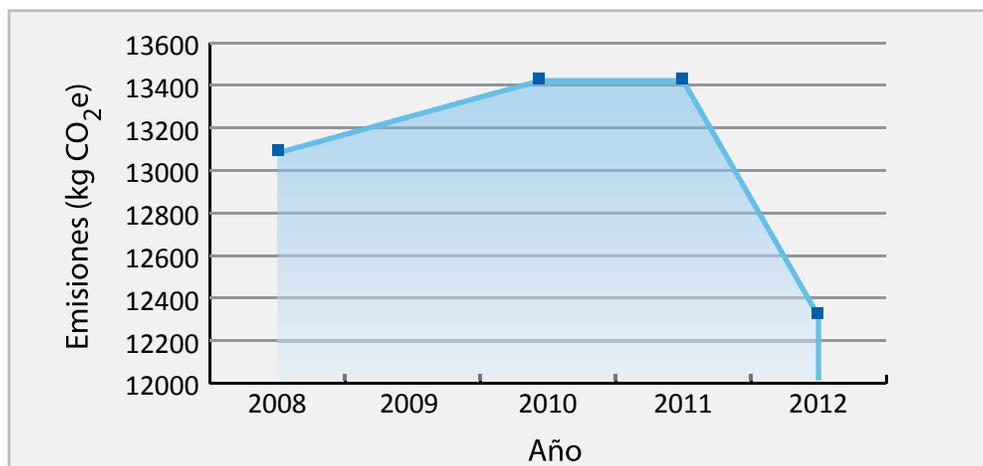


Figura 2. Evolución de emisiones por desechos sólidos generados en el IMN.

### 3.6. Aguas residuales

Las aguas residuales del edificio derivan en el alcantarillado sanitario propiedad del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados

(ICAA) y de allí las mismas van a dar a los ríos. Considerando la población de funcionarios y el tiempo que permanecen en el edificio, se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 3.

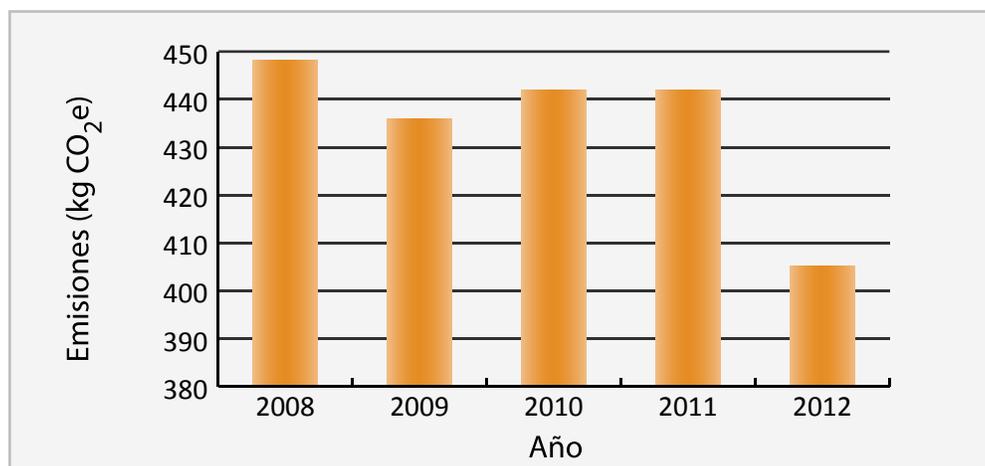


Figura 3. Emisiones por aguas residuales generadas en el IMN en el período 2008 - 2012.

Las emisiones totales de GEI del IMN durante el periodo en estudio, se presentan en el cuadro 2 y en la figura 4.

Cuadro 2. Emisiones totales en el edificio central del IMN en el período 2008 - 2012

Emisiones	Año				
	2008	2009	2010	2011	2012
Emisiones (kg CO <sub>2</sub> e)	51375,2	43567,7	48372,9	49375,2	43264,6

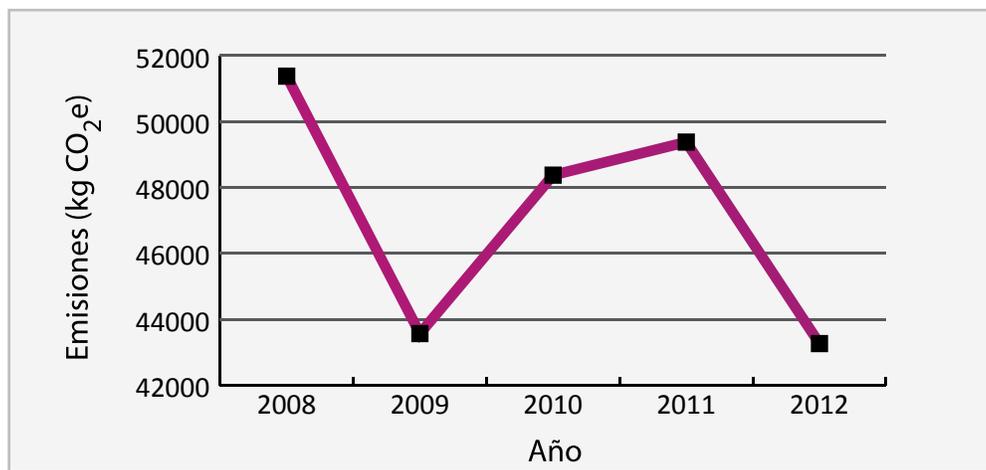


Figura 4. Emisiones en el edificio central del IMN expresadas como CO<sub>2</sub>e en el período 2008 - 2012.

#### 4. Conclusiones

Las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente en el edificio central del IMN, en el período de estudio, oscilan entre 40 y 50 toneladas. Dichas emisiones han ido decreciendo a través del tiempo, con una caída muy pronunciada en el año 2009, debido a que en ese año un 40% de la flota vehicular dejó de operar a causa de un proceso administrativo de cambio de placas, no obstante, se incorporan nuevos vehículos más eficientes tanto en ese año como en el 2010.

Las principales emisiones generadas por el personal del IMN se deben a la operación de la flota vehicular, con porcentajes entre 49 y 57%, siendo destacable la disminución de las mismas en el tiempo.

En el año 2012, se presenta una reducción apreciable de las emisiones con una disminución de más de 5

toneladas con respecto al año 2011, esto debido a tres razones principalmente: la disminución en el uso de la flota vehicular, la reducción de personal y la reducción del consumo de electricidad especialmente en luces y aire acondicionado, las cuales están relacionadas con las actividades de reducción planteadas en el PGAI.

Es importante destacar, que las emisiones en CO<sub>2</sub>e generadas por los funcionarios del edificio central del IMN, pueden ser compensadas con el crecimiento de 5 hectáreas de bosque secundario anualmente o bien con 2 hectáreas de una plantación de melina.

## 5. Referencias

- Dirección Sectorial de Energía. (1994). *Diagnóstico del Sector Energía*. Impreso en CNFL, San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2006). *Norma INTE - ISO 14064-1:2006 Gases de efecto invernadero – Parte 1: especificación con orientación, a nivel de organizaciones, para la cuantificación y el informe de emisiones y remociones de gases de efecto invernadero*. Primera edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2011). *Norma INTE 12-01-06:2011 Sistema de gestión para demostrar la C-neutralidad*. Segunda edición. San José, Costa Rica.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático. (1997). *Directrices del IPCC 1996 para evaluación de los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. París, Francia.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático. (2003). *Orientación del IPCC sobre buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Ginebra, Suiza.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático. (2006). *Directrices del IPCC del 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. IGES, Japón.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático. (2007) *Resumen para responsables de políticas y resumen técnico. Cambio Climático 2007: Mitigación del Cambio Climático*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Molina, A. (2009). *Balance Energético Nacional, 2008*. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. Dirección Sectorial de Energía. San José, Costa Rica.
- Molina, A. (2010). *Balance Energético Nacional, 2009*. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. Dirección Sectorial de Energía. San José, Costa Rica.
- Molina, A. (2012). *Balance Energético Nacional, 2010*. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. Dirección Sectorial de Energía. San José, Costa Rica.
- Molina, A. (2012). *Balance Energético Nacional, 2011*. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. Dirección Sectorial de Energía. San José, Costa Rica.
- Montero, J. (2012). *Factores para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero del sistema eléctrico nacional y su aplicación a un inventario del año 2011*. San José, Costa Rica: Instituto Costarricense de Electricidad: Centro Nacional de Planificación Energética.
- Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. (2009). *Decimoquinto Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. San José, Costa Rica.
- Refinadora Costarricense de Petróleo (2011). *Manual de productos*. San José, Costa Rica.
- World Resources Institute (2008). *The Greenhouse Gas Protocol*. Earthprint Limited, Washington, USA.

# Determinación de la emisión de óxido nitroso en pasto kikuyo (*Kikuyuochloa clandestina*) bajo pastoreo: efecto de diferentes fuentes y niveles de nitrógeno

JOHNNY MONTENEGRO<sup>1</sup>

JORGE HERRERA<sup>2</sup>

## Resumen

De acuerdo con el Inventario Nacional de Gases con Efecto Invernadero (GEI) del 2005, el sector pecuario generó importantes cantidades de óxido nitroso ( $N_2O$ ), sin embargo, hace falta investigación puntual de la generación de este gas en el sector lechero. Ante esta perspectiva y debido a la falta de información de la emisión de este gas relacionada con fertilización nitrogenada en pastos, se requiere desarrollar no solo este tipo de información, sino también generar alternativas de producción menos contaminantes para el ambiente, con baja emisión de  $N_2O$ , para así contribuir positivamente a la reducción de la emisión de GEI, causantes del actual calentamiento global. La obtención de información fundamentada en mediciones de campo, es crítica para disminuir la incertidumbre de los inventarios nacionales de GEI, los cuales se basan en factores de emisión promedio estimados en otras condiciones agroecológicas. Esta investigación se realizó para determinar la emisión de  $N_2O$ , derivada de la aplicación de fertilizante nitrogenado en pasto kikuyo, en fincas lecheras con manejo intensivo. La investigación se realizó entre junio del 2011 y julio del 2012, en Vázquez de Coronado, San José. Para ello se implementaron tres tratamientos: sin fertilizante (T1), con la fertilización normalmente aplicada en la finca ( $200 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , T2), y con  $96 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , suplido con una fórmula de lenta liberación (T3). Las muestras de gas provenientes del suelo se recolectaron utilizando la técnica de la cámara estática, durante diferentes ciclos de pastoreo. Se determinó que el índice de emisión fue diferente ( $P < 0,05$ ) entre tratamientos. El menor valor ( $0,78 \pm 0,01 \text{ kg de } N_2O\text{-N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) se determinó en el T1, mientras que el índice mayor ( $P < 0,05$ ) se detectó con el T2 ( $1,55 \pm 0,03 \text{ kg de } N_2O\text{-N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). El T3 produjo un nivel intermedio ( $1,00 \pm 0,05 \text{ kg de } N_2O\text{-N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), el cual difirió ( $P < 0,05$ ) del T1 y T2. Los resultados demuestran, que hay alternativas para reducir la emisión de  $N_2O$  y con ello contribuir a que los productos costarricenses puedan ser diferenciados en el mercado como bajos en la emisión de GEI.

**PALABRAS CLAVE:** ÓXIDO NITROSO, GASES CON EFECTO INVERNADERO, GANADERÍA DE LECHE, PASTOS, FERTILIZANTES NITROGENADOS

## Abstract

According to the National Inventory of Greenhouse Gas (GHG) in 2005, the livestock sector generated significant amounts of nitrous oxide ( $N_2O$ ), however, there is a lack of research to get the actual amount of this gas generated in the dairy sector. Due to the lack of information related to the emission of this gas with the application of nitrogen on pasture, it is necessary to develop this information but also to get cleaner production alternative for the environment, with low emission of  $N_2O$  in order to contribute positively to the reduction of GHG, which cause the current global warming. Obtaining information based on field measurements, is critical to reduce the uncertainty of national GHG inventories, which are based on estimated average emission factors in other ecological conditions. This research was conducted to determine  $N_2O$  emissions, resulting from the application of nitrogen fertilizer on kikuyo grass in intensively managed dairy farms. The research was conducted

1 Investigador en Cambio Climático y Agricultura. Convenio: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) – Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Costa Rica. E-mail: jmontenegro@imn.ac.cr, jmontenegro@inta.go.cr.

2 Coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, Costa Rica. Email: jherrer@una.ac.cr.

between June 2011 and July 2012, in Coronado, San Jose. There were evaluated three treatments: no fertilizer (T1), which is the fertilization usually applied on the farm ( $200 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , T2), and  $96 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , supplied with a slow release formula (T3). Gas samples were collected from soil, using the static chamber technique. It was determined that the emission rate was different ( $P < 0.05$ ) between treatments. The lowest value ( $0.78 \pm 0.01 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) was determined in T1, while the greater rate ( $P < 0.05$ ) was detected with T2 ( $1.55 \pm 0.03 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ). The T3 produced an intermediate level ( $1.00 \pm 0.05 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ), which differed ( $P < 0.05$ ) of T1 and T2. The results show that there are alternatives to reduce  $\text{N}_2\text{O}$  emissions, and thereby contribute to Costa Rican products can be differentiated in the market as having low GHG emissions.

PALABRAS CLAVE: NITROUS OXIDE, GREENHOUSE GASES, DAIRY SYSTEMS, GRAZING, NITROGEN FERTILIZERS, GRASSES

## 1. Introducción

El óxido nítrico ( $\text{N}_2\text{O}$ ) es un importante gas que contribuye con el calentamiento global del planeta, porque tiene un potencial de calentamiento 310 veces superior al  $\text{CO}_2$  (IPCC, 2006). Por esta razón, el  $\text{N}_2\text{O}$  es uno de los gases con efecto invernadero (GEI) que debe ser cuantificado por los países firmantes del Protocolo de Kyoto, dentro de los cuales se encuentra Costa Rica.

De acuerdo con el Inventario Nacional de Gases con Efecto Invernadero del 2005, realizado por el Instituto Meteorológico Nacional (Chacón, Montenegro y Gijad, 2009), en Costa Rica el  $\text{N}_2\text{O}$  representó el 7% del total de GEI emitidos por el sector agropecuario, pero constituyó el 54% de las emisiones del sector cuando se considera como  $\text{CO}_2$  equivalente. Esto demuestra la importancia que tiene este gas en el incremento del efecto invernadero y en consecuencia, refleja la necesidad de cuantificar sus emisiones para conocer con alto grado de precisión la magnitud de las mismas.

De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés, 2006), la concentración de  $\text{N}_2\text{O}$  en la atmósfera se ha incrementado 17% desde 1750 y contribuye con el 6% del efecto invernadero de origen antropogénico. Se estima que aproximadamente el 75% de la emisión global de este gas, se deriva de las actividades agrícolas (Rochette, Angers, Belanger, Chantigny, Prevost & Levesque, 2004; Marinho, DeLaune & Lindau, 2004). Esto se explica por la aplicación de fertilizantes nitrogenados en los suelos agrícolas, la

fijación simbiótica del nitrógeno y la aplicación al suelo de residuos de origen animal (Skiba & Smith, 2000; Millar, Robertson, Grace, Gehl & Hoben, 2010). Existe evidencia científica que muestra que la adición de fertilizantes nitrogenados al suelo agrícola, incrementa el potencial de las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  (Bouwman, Bouman & Batjes, 2002; Hoben, 2009). El IPCC sugiere un valor de 1% del nitrógeno aplicado, para ser utilizado en el cálculo de las emisiones de este gas (IPCC, 2006). Sin embargo, diversos estudios han demostrado que la emisión de óxido nítrico está directamente relacionada con el clima y en consecuencia varía significativamente entre regiones, cultivos y manejo de los mismos (Longoria-Ramírez, Carbajal-Benítez, Mar-Morales & Ruiz-Suarez, 2003). Es por ello que se reconoce, que datos obtenidos bajo las condiciones propias de cada país proporcionarán una mejor base para calcular las emisiones de los gases, antes que utilizar los valores promedios sugeridos por el IPCC.

En el sector lechero costarricense se aplican grandes cantidades de nitrógeno (hasta  $500 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ), para estimular el crecimiento de los pastos y de esta manera, poder utilizar alta carga animal en ciclos de pastoreo cortos (Montenegro y Abarca, 2001). Esto se explica por el hecho de que, estos sistemas de producción intensivos dependen de la producción de biomasa de los pastos para alimentar a las vacas en pastoreo. Sin embargo, como resultado de la aplicación del fertilizante nitrogenado y por las condiciones climáticas propias del trópico, se genera y se emite óxido nítrico (Veldkamp & Keller, 1997).

De acuerdo con trabajos preliminares realizados en Costa Rica por Montenegro y Abarca (2001), en una pastura de kikuyo, con niveles de aplicación de nitrógeno del orden de los  $485 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , la emisión de  $\text{N}_2\text{O}$  es muy significativa ( $6,38 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ).

Ante esta perspectiva y debido a la falta de información de la emisión de este gas relacionada con fertilización nitrogenada en pastos, se requiere desarrollar no solo este tipo de información, sino también, generar alternativas de producción menos contaminantes para el ambiente, que emitan poca cantidad de  $\text{N}_2\text{O}$ , para así contribuir positivamente con la estabilización de las condiciones climáticas.

En este sentido, la evaluación de fertilizantes nitrogenados producto de nueva tecnología aplicada en la producción, tales como los de lenta liberación, presentan varias ventajas: alto potencial para reducir tanto las emisiones del  $\text{N}_2\text{O}$  (Jiménez, 2002; Montenegro, Laprade, Ortega y Sandoval, 2012) así como para disminuir las pérdidas de nitrógeno (N) por lixiviación (Fernández-Escobar, Benlloch, Herrera & Garcia-Novelo, 2004), al mismo tiempo que estimulan el crecimiento de los pastos (Montenegro y Calderón, 2012).

De igual manera, dado el costo incremental que se ha experimentado en los últimos años con los fertilizantes nitrogenados, tendencia que parece continuará en el futuro, se requiere evaluar alternativas de uso más eficiente y generar información no sólo tendiente a la productividad de los mismos (Montenegro y Calderón, 2012), sino también relacionada con el efecto invernadero (Montenegro, et al., 2012).

La utilización de fertilizantes de lenta liberación es relativamente nueva en nuestro país y no existen actualmente resultados de investigaciones disponibles, relacionadas con aspectos ambientales de la aplicación de este tipo de fertilizantes en pasturas.

Además, resulta importante mencionar que Costa Rica se ha planteado el objetivo de ser Carbono-Neutro para el 2021, por lo que la cuantificación precisa de las emisiones y el desarrollo de opciones de mitigación que conlleven a la reducción de la emisión del  $\text{N}_2\text{O}$  generado en los sistemas de producción

de leche, sin duda contribuirá positivamente para alcanzar el objetivo país propuesto.

Finalmente y no menos importante, es que el resultado de esta investigación contribuirá para que los productores de leche puedan obtener un producto ecológicamente más amigable con el ambiente, lo cual les permitirá comercializarlo diferenciándolo en los mercados internacionales por ser bajo en emisiones de gases de efecto invernadero.

Por lo expuesto anteriormente, se realizó la presente investigación con el objetivo de determinar la emisión de  $\text{N}_2\text{O}$  derivada de la aplicación de un fertilizante nitrogenado de lenta liberación en pasto kikuyo y compararla con la generada por un fertilizante nitrogenado comercial, utilizado en fincas lecheras con manejo intensivo. Adicionalmente, determinar la influencia que podría tener la topografía en la generación y emisión del  $\text{N}_2\text{O}$  en suelos cubiertos de pasto kikuyo bajo pastoreo.

## 2. Materiales y métodos

Este estudio se llevó a cabo en dos fincas comerciales de ganado de leche, ubicadas en el cantón de Vázquez de Coronado, distrito 3° Jesús, con un promedio de precipitación anual de 2450 mm y una temperatura media de  $18^\circ\text{C}$ .

Una de las fincas se ubica a 1461 msnm y es manejada con vacas Jersey y Holstein, con una carga de  $3,7 \text{ UA ha}^{-1}$ . El pasto es kikuyo (*Kikuyuochloa clandestina*), que se pastorea con ciclos de ocupación y descanso de 1 y treinta días respectivamente. En esta finca, los apartos tienen un tamaño promedio de  $2300 \text{ m}^2$  y para la presente investigación se seleccionaron dos de ellos, por su representatividad en términos de topografía típica de la zona, la cual presenta ondulaciones pronunciadas.

En uno de los apartos se continuó aplicando el plan de fertilización empleado en la finca ( $200 \text{ kg de nitrógeno ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), mientras que al otro se le aplicó un fertilizante nitrogenado de lenta liberación, el cual está recubierto con azufre y polímeros, con una tasa de liberación de sesenta días. La dosis utilizada

de este fertilizante fue de 96 kg de N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y se aplicó cada dos ciclos de pastoreo. En ambos casos (fertilización con nitrógeno convencional o de lenta liberación), la distribución del fertilizante en la pastura se hizo al voleo y de forma manual después del pastoreo.

Los apartos utilizados en esta investigación, se ubicaron uno al lado del otro y fueron manejados de manera idéntica, con la excepción de que los pastoreos se realizaron con diferencia de un día, lo cual es parte del manejo normal de la finca. En ambos apartos el fertilizante se aplicó el día siguiente del pastoreo; previo a ello los residuos sólidos (boñiga) dejados por las vacas en pastoreo, se distribuyeron mediante la utilización de una pala, práctica normal en el sitio de estudio. Esta práctica se realizó durante la mañana y en el transcurso de la tarde se aplicó el fertilizante.

El fertilizante convencional se aplicó cada ciclo de pastoreo, pero se suspendió a partir de febrero del 2012 y se reinició nuevamente la aplicación en mayo. La razón de esta suspensión se explica por la falta de lluvia consecuencia de la época seca, lo cual redujo significativamente la disponibilidad de humedad del suelo y en consecuencia la disolución del fertilizante, así como su absorción y utilización por la planta.

Con respecto al fertilizante nitrogenado de lenta liberación, tampoco se aplicó durante la época excepcionalmente seca del primer año. Se aplicó durante la época lluviosa (julio, setiembre, noviembre), durante la época seca del siguiente año (enero) y a inicios de la siguiente temporada de lluvias (mayo).

La segunda finca lechera, se encuentra a una distancia aproximada de 400 m de la antes descrita, por lo que posee condiciones climáticas similares, aunque se ubica a una altitud ligeramente inferior (1438 msnm). Esta finca cubierta que en su totalidad por pasto kikuyo no aplica fertilizante. Es pastoreada con vacas Holstein, a una carga de 5,1 UA ha<sup>-1</sup>, con ciclos de 1 día de ocupación y treinta días de descanso. La alta carga animal se explica por el suministro diario a la hora del ordeño, de aproximadamente 35 kg de verdura fresca que proviene del desecho de grandes cadenas de supermercados del área metropolitana.

Adicionalmente, también se suministran 2,6 kg MS de concentrado por día y regularmente se ofrece aproximadamente 1,2 kg MS de pasto picado. Esto hace que el consumo de pasto sea proporcionalmente menor, comparado con fincas donde no se proporcionan estos suplementos.

En esta finca se seleccionó 1 apto, basado en la representatividad topográfica ondulada típica de la zona, así como por la presencia del pasto.

En estos 3 apartos se realizaron los muestreos de gas, para la determinación de la emisión del óxido nitroso del suelo.

## 2.1. Tratamientos

Los tratamientos evaluados fueron:

1. Tratamiento 1 (T1): consistió en la fertilización normalmente aplicada en la finca (200 kg de N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>).
2. Tratamiento 2 (T2): se aplicaron 96 kg de N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> suplido con una fuente de lenta liberación.
3. Los tratamientos 1 y 2 se ubicaron en la primera finca descrita.
4. Tratamiento 3 (T3): testigo absoluto, no se aplicó fertilizante a la pastura, el cual se ubicó en la segunda finca.

## 2.2. Muestreo de óxido nitroso

La recolección de las muestras gaseosas, se realizó considerando que las mayores emisiones de N<sub>2</sub>O se presentan durante los primeros días, luego de la aplicación de los fertilizantes (lo cual es típico de los fertilizantes convencionales). En el presente experimento, dada la aplicación de una fuente de lenta liberación, la recolección de muestras de gas continuó por un tiempo más prolongado (dos ciclos de pastoreo), ya que no existe información disponible para este sistema de producción, en lo relativo a la generación de N<sub>2</sub>O derivada de la aplicación

Para capturar el gas se utilizó la técnica de la cámara estática la cual tenía una altura de 30 cm, una circunferencia de 94,2 cm y estaba provista de un septum por donde se recolectó la muestra gaseosa en viales de vidrio. La cámara fue puesta sobre la superficie del suelo y se presionó para garantizar que no se presentara intercambio gaseoso (entradas o salidas de la cámara) por los bordes. En cada cámara se colectaron dos muestras, una al momento de colocarla y la otra 45 minutos después. Los muestreos de gases se realizaron durante las mañanas y se repitieron a lo largo del año, de acuerdo con los ciclos de pastoreo

Para determinar el efecto de la topografía sobre la emisión del  $N_2O$ , cada día de muestreo se colocaron

6 cámaras por tratamiento, distribuidas en tres diferentes posiciones topográficas (A: alta, M: media, B: baja) y de cada cámara se recolectaron 2 muestras. Los muestreos fueron más intensivos durante el período inmediato a la salida de los animales del aparcadero, disminuyéndose la frecuencia de los mismos a partir de la segunda semana del período de descanso.

Las muestras gaseosas se trasladaron al Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, donde se analizaron en un cromatógrafo de gases Agilent, utilizándose un detector de captura de electrones, de acuerdo con las condiciones indicadas en el cuadro 1.

Cuadro 1. Condiciones cromatográficas empleadas en el análisis de  $N_2O$

Condición	
Temperatura del puerto de inyección (°C)	200
Rampa de temperatura	35 °C
Detector	ECD
Temperatura del detector (°C)	250
Flujo de la columna (ml/min)	6

Para cuantificar la concentración de  $N_2O$  presente en las muestras, se interpoló en una curva de calibración de al menos cinco patrones, construida a partir de un cilindro certificado de  $N_2O$ :  $10 \mu\text{mol mol}^{-1}$ , balance nitrógeno. Para estimar los flujos de  $N_2O$  que se generaron entre los días de muestreo, se realizó interpolación lineal. Todos los valores se reportan como  $N_2O-N$ .

Los muestreos se efectuaron en la época lluviosa (julio-agosto, setiembre-octubre, junio-julio), en la época seca (abril) y en el inicio de lluvias (mayo).

Adicionalmente, se obtuvo la información de la precipitación correspondiente al período experimental comprendido entre junio del 2011 y julio del 2012, de la estación meteorológica ubicada en la comunidad de San Pedro de Coronado, propiedad del Instituto Costarricense de Electricidad.

### 2.3. Análisis estadístico

Los resultados de los análisis de las muestras gaseosas, fueron analizados utilizando ProcGLM de SAS (2006) y la comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tuckey al 5%.

## 3. Resultados

### 3.1. Efecto de la topografía

#### 3.1.1. Pasto sin fertilizar

La magnitud de la emisión de óxido nitroso detectada, muestra que las mayores emisiones se presentan entre el 1° y el 8° día, después de efectuado el pastoreo en el nivel topográfico más bajo (B); en el nivel alto (A) también se presentó un pico de emisión un día después del pastoreo (figura 1). De acuerdo

con Montenegro (2012), se podría suponer que el reciclaje de nitrógeno efectuado por los animales en pastoreo tiene un rol importante en la generación de este gas y esto probablemente esté ligado a la deposición de grandes cantidades de nitrógeno en pequeñas áreas, producto de las excretas sólidas

y líquidas, en los lugares de pastoreo donde los animales pasan más tiempo. De hecho en esta finca cada vaca en pastoreo recicla aproximadamente 18 kg de N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (Montenegro y Calderón, 2012).

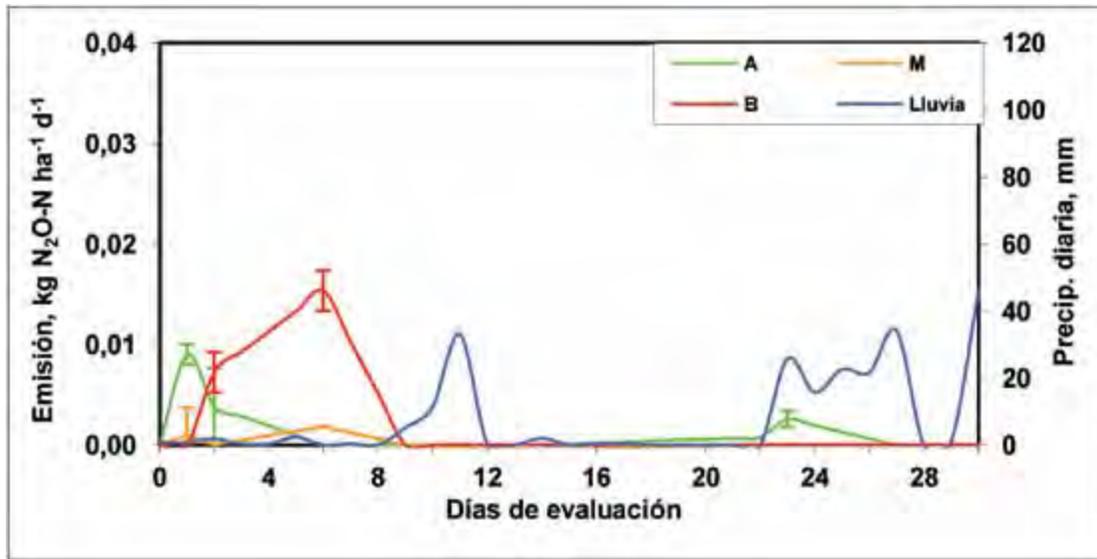


Figura 1. Emisión de N<sub>2</sub>O-N, kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, en diferentes niveles topográficos durante un ciclo de pastoreo en pasto kikuyo sin fertilizar

Niveles topográficos: A, M, B: alto, medio y bajo.

Valores de emisión ± 1 EE.

Debido a que el área impactada por los desechos sólidos y líquidos de los animales en pastoreo es poca, la disponibilidad de nitrógeno en el suelo en los lugares donde estos son depositados es alta, lo cual crea las condiciones propicias (reducida disponibilidad de oxígeno, gran disponibilidad de nitrógeno y carbono) para que se genere el óxido nítrico (Robertson y Groffman, 2007).

Con respecto a la influencia de la lluvia en la emisión de este gas, durante los primeros días luego del pastoreo no hubo eventos lluviosos importantes (figura 1), por lo que se determinó que no existe correlación entre ambas variables. Posiblemente para cuando las mismas se presentaron, luego de una semana de la salida de los vacas en pastoreo y al final del ciclo de descanso, ya el nitrógeno disponible había sido absorbido por la pastura y utilizado por

los microorganismos del suelo, siendo muy baja su disponibilidad como para causar la generación y emisión de N<sub>2</sub>O. En todo caso, las emisiones luego de diez días del pastoreo fueron casi nulas.

El patrón general de emisión total del N<sub>2</sub>O, mostró claramente que las mayores emisiones en la pastura sin fertilizar se produjeron durante la primera semana luego del pastoreo (figura 2). También se observa que la lluvia no incidió en la emisión de este gas, dado que eventos lluviosos importantes (mayores a 20 mm diarios, figura 1) se presentaron hasta alrededor del día once, después del pastoreo y posteriormente al día veintiuno del período de descanso, sin que se detectaran picos de emisión luego de los mismos (figura. 2).

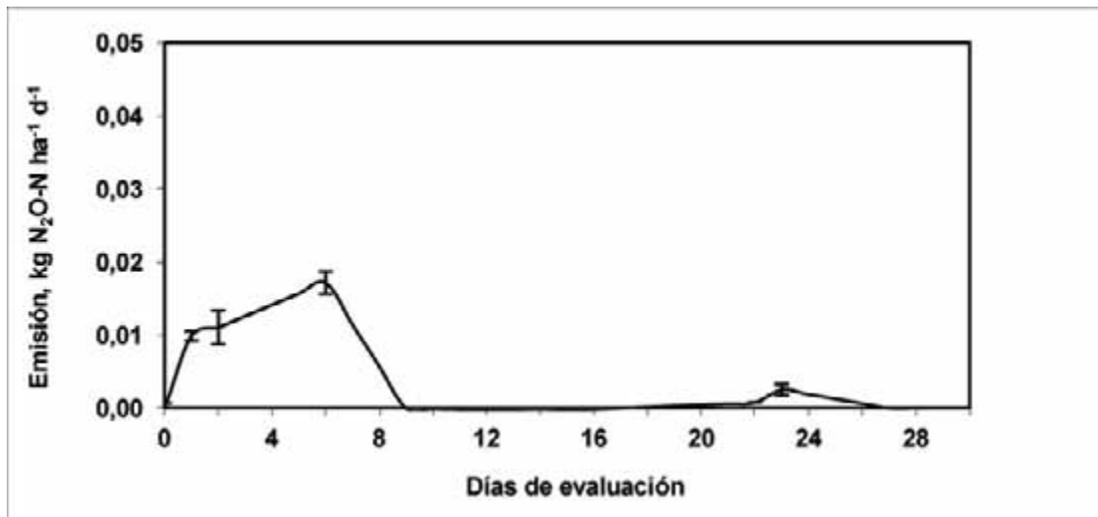


Figura 2. Emisión total de N<sub>2</sub>O-N, kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, en una pastura de kikuyo sin fertilizar durante un ciclo de pastoreo. Valores de emisión  $\pm$  1 EE.

### 3.1.2. Fertilización convencional

La aplicación del fertilizante nitrogenado comercial, resultó en mayor emisión de N<sub>2</sub>O en el nivel topográfico B, durante los primeros 10 días después del pastoreo (figura 3) comparada con aquella determinada en el nivel A. Esto muestra claramente

como la topografía influencia la emisión del N<sub>2</sub>O, lo cual probablemente se relaciona con el movimiento del agua de la parte superior, al nivel más bajo de la pendiente topográfica donde crea condiciones favorables para la generación y emisión de este gas (Robertson y Groffman, 2007).

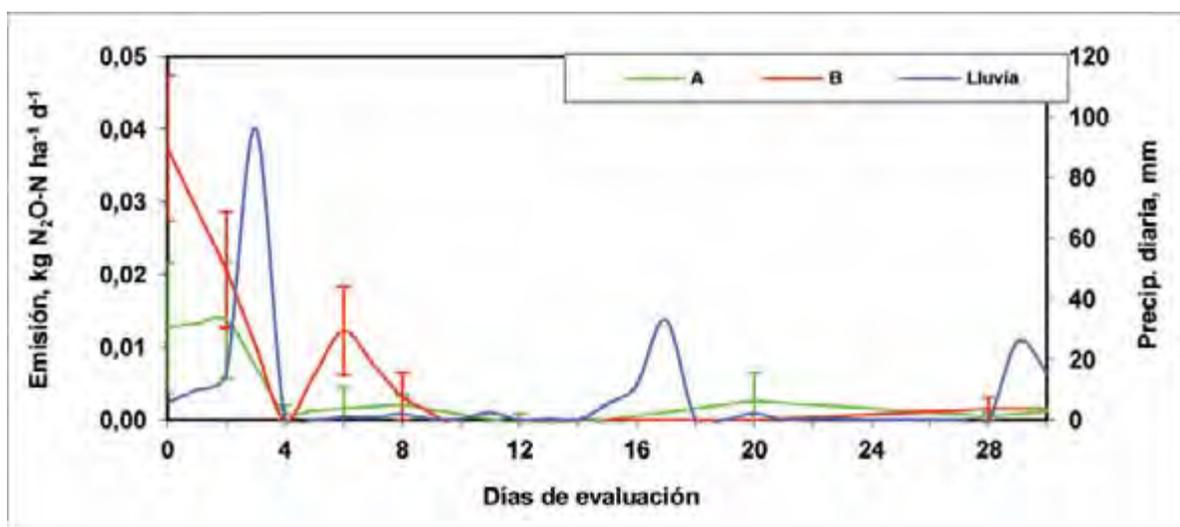


Figura 3. Emisión de N<sub>2</sub>O-N, kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, en diferentes niveles topográficos durante un ciclo de pastoreo en kikuyo fertilizado con nitrógeno convencional.

Niveles topográficos: A, B: alto y bajo; valores de emisión  $\pm$  1 EE.

De manera similar que lo determinado con la no aplicación de fertilizante nitrogenado (figura 1), con N convencional se detectaron emisiones importantes en el nivel A, durante los primeros 3 días después del pastoreo (figura 3).

Con respecto al efecto de la lluvia en la emisión de este gas, no se determinó correlación significativa, aunque parece existir una tendencia al aumento de la emisión luego de un evento lluvioso, lo cual se puede apreciar con la precipitación ocurrida durante el día 3 después del pastoreo y la emisión ocurrida en B varios días después. Posiblemente la escorrentía superficial, pero especialmente el movimiento subsuperficial del agua de A a B contribuyó a generar el pico de emisión detectado el día 6 después del pastoreo (figura 3).

En todo caso, la influencia de la lluvia en la emisión del  $N_2O$  parece presentarse por el incremento temporal

del agua en la capa superficial del suelo, lo cual crea una condición anaeróbica transitoria que contribuye a la generación del gas nitrogenado (Robertson y Groffman, 2007).

En términos generales, la emisión total del óxido nítrico con la aplicación del fertilizante comercial mostró ser mayor al inicio del período de muestreo, aunque al final del período de evaluación se mantuvieron emisiones bajas, pero constantes (figura 4). Estas podrían ser el resultado del cambio en las condiciones de suelo, producto de las lluvias sucedidas alrededor del día diecisiete después del pastoreo. Las lluvias al final del período de descanso no parecieron influir la emisión a ese tiempo, probablemente la cantidad de nitrógeno disponible en el suelo era muy bajo como para estimular la formación del óxido nítrico.

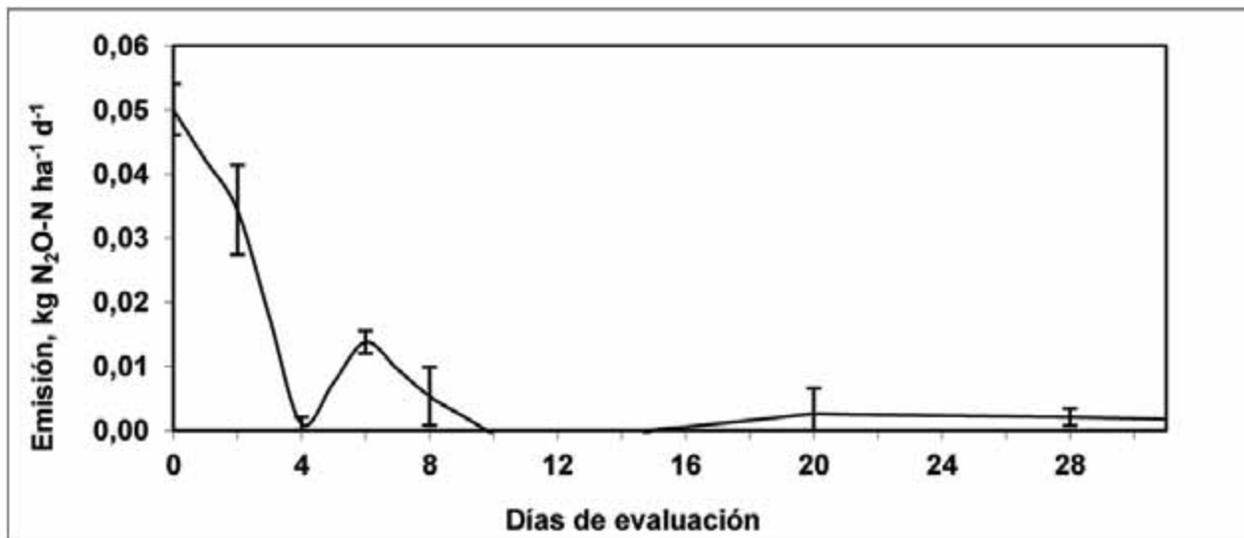


Figura 4. Emisión de  $N_2O-N$ ,  $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$ , en diferentes niveles topográficos durante un ciclo de pastoreo en kikuyo fertilizado con nitrógeno convencional.

Niveles topográficos: A, B: alto y bajo; valores de emisión  $\pm 1$  EE.

### 3.1.3. Fertilizante de lenta liberación

La emisión de óxido nítrico con la aplicación del fertilizante de lenta liberación, siguió un patrón topográfico similar al comentado anteriormente en el sentido de que mayores emisiones se determinaron

en el nivel topográfico B, especialmente durante los doce días siguientes al pastoreo y la aplicación del fertilizante; el nivel A también mostró emisiones importantes durante los primeros días, luego del pastoreo aunque de menor magnitud (figura 5). Incrementos en la emisión también se detectaron

en A después del día trece de evaluación, los cuales podrían estar influenciados por las lluvias sucedidas entre los días trece y quince después del pastoreo.

Durante el ciclo de descanso, cuando no se aplicó fertilización (a partir del día treinta y uno de

evaluación, figura. 5), se presenta nuevamente la misma tendencia mencionada anteriormente en los otros tratamientos, incluyendo el pastoreo anterior en este mismo tratamiento, es decir, mayor emisión de óxido nitroso durante los primeros dieciséis días después del pastoreo.

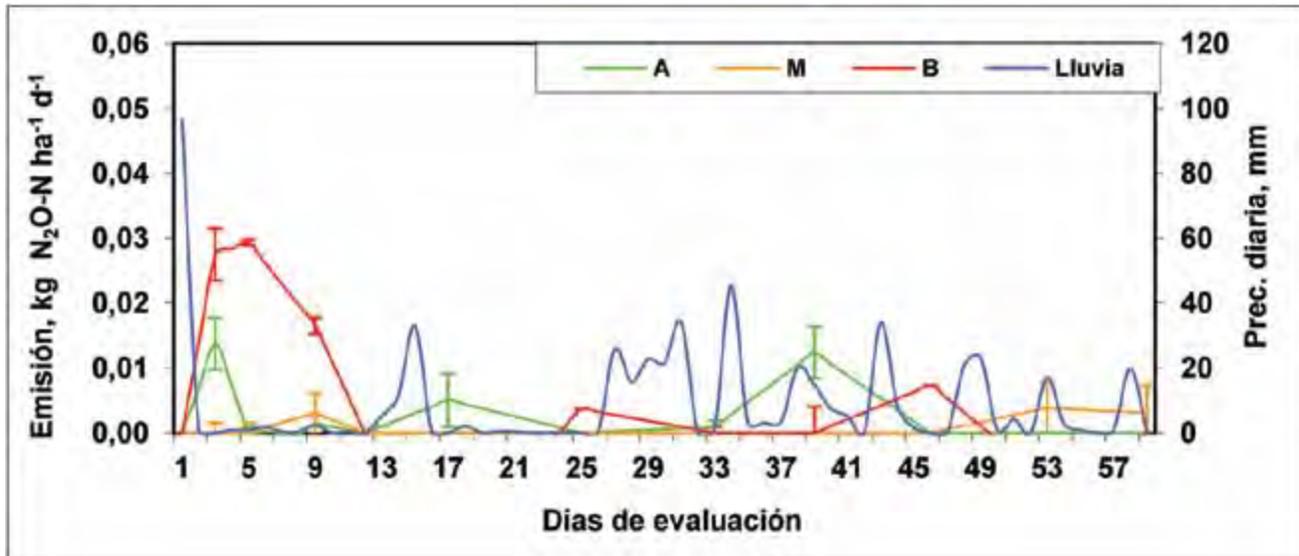


Figura 5. Emisión de N<sub>2</sub>O-N, kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, en diferentes niveles topográficos durante un ciclo de pastoreo en kikuyo fertilizado con nitrógeno convencional.

Niveles topográficos: A, B: alto y bajo; valores de emisión  $\pm$  1 EE.

En esta ocasión el nivel topográfico A presentó emisiones importantes alrededor del día treinta y nueve de evaluación, las cuales corresponden al día 8 después del pastoreo y fueron de similar magnitud que las determinadas en el nivel B a los dieciséis días después del segundo pastoreo (día cuarenta y siete de evaluación). Esto parece confirmar, que el reciclaje de N efectuado por las vacas en pastoreo es importante (Montenegro y Calderón, 2012) e influye positivamente para que se presenten las emisiones de este gas. La parte media (M) mostró la emisión más baja en ambos ciclos de pastoreo, situación que también se determinó sin la aplicación de fertilizante (figura 1).

El comportamiento general de la emisión total del N<sub>2</sub>O se puede observar más claramente en la figura 6. El comportamiento general de la emisión total del N<sub>2</sub>O se puede observar más claramente en la figura 6, donde se muestra que la emisión total detectada es mayor durante los primeros días del primer período de descanso (del día 1 al diez de evaluación) y durante las primeras dos semanas del segundo período de descanso (que inicia el día treinta y uno de evaluación). Sin embargo, la magnitud de la emisión del óxido nitroso es superior luego de la aplicación del fertilizante que se realizó justo a la salida del primer pastoreo (figura 6).

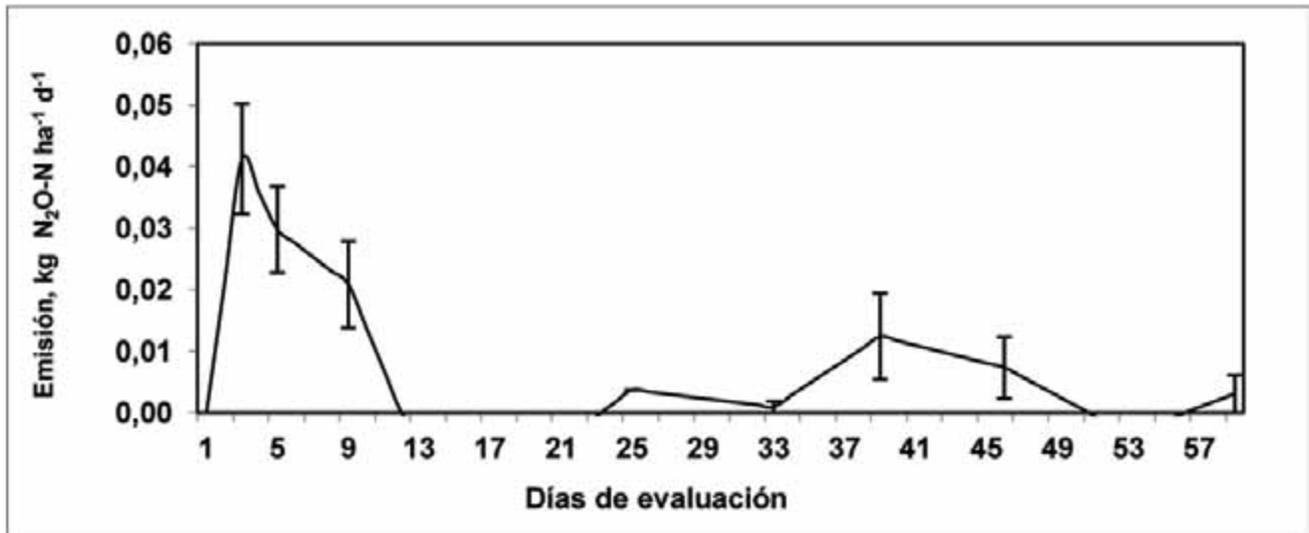


Figura 6. Emisión total de  $N_2O-N$ ,  $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$ , en una pastura de kikuyo fertilizada con nitrógeno de lenta liberación durante dos ciclos de pastoreo. Valores de emisión  $\pm 1\ EE$ .

El comportamiento observado con el fertilizante de lenta liberación, en términos de la emisión de  $N_2O$ , muestra que una fracción importante del nitrógeno del fertilizante está siendo rápidamente liberado, por lo tanto, la disponibilidad de este elemento es uno de los factores principales que predispone la generación y liberación consecuente de este gas. Esto explica porqué se presentan picos de emisión importantes pocos días después de su aplicación.

En el segundo ciclo de descanso después del pastoreo en el día treinta y uno de la evaluación, probablemente la liberación del nitrógeno proveniente de los gránulos del fertilizante y la lluvia ocurrida durante ese tiempo, crearon condiciones propicias para la liberación del mismo, así como la posterior generación y emisión del gas nitrogenado.

de emisiones basales y casi imperceptibles. Un comportamiento similar fue determinado para el tratamiento donde se aplicó el fertilizante nitrogenado convencional, aunque la magnitud de la misma es claramente superior con la aplicación de nitrógeno químico.

### 3.2. Emisión acumulada

La emisión acumulada de  $N_2O$  para el tratamiento sin fertilización, muestra claramente que la emisión ocurre principalmente durante la primera semana luego del pastoreo (figura 7) y a partir del día 8 se reduce significativamente. Es por esta razón, que a partir de ese día se presenta un comportamiento lineal con una pendiente casi igual a cero producto

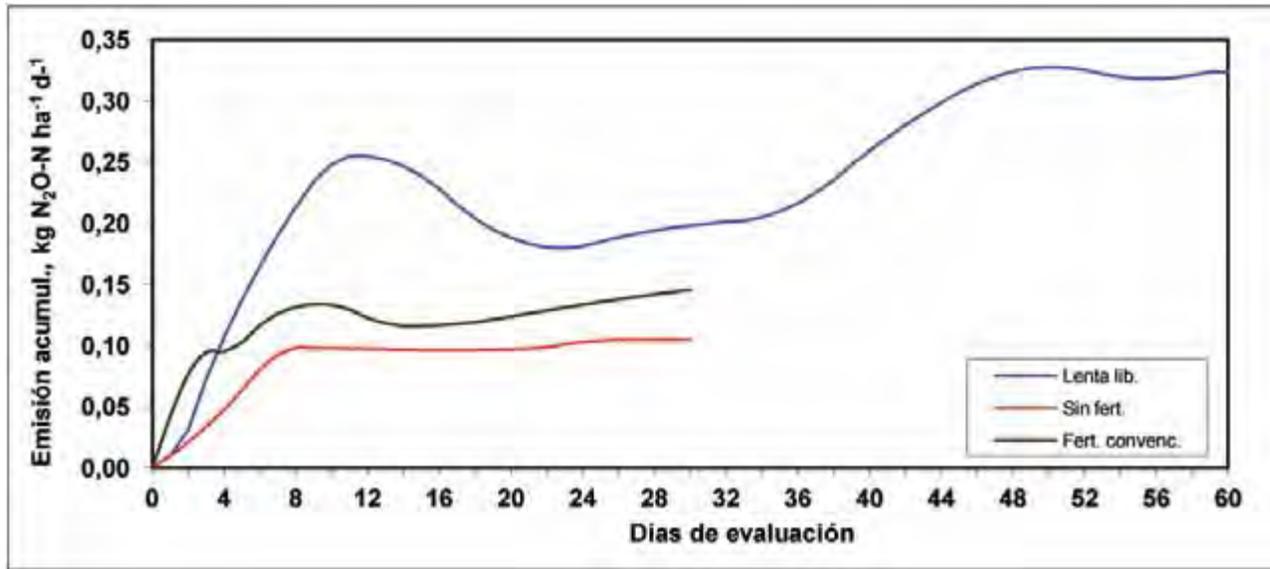


Figura 7. Emisión acumulada de  $N_2O-N$ ,  $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$ , en una pastura de kikuyo con diferentes niveles y fuentes de nitrógeno durante un ciclo de evaluación.

Lenta liberación: N de lenta liberación, fertilización convencional: fertilizante N comercial, sin fertilizante: no aplicación de N.

En el caso del fertilizante nitrogenado de lenta liberación, se determinó una curva bimodal con dos incrementos importantes; el primero de ellos se determinó inmediatamente después del pastoreo donde se aplicó la fertilización, el segundo corresponde al período inmediato al pastoreo donde no se aplicó fertilizante (a partir del día treinta y uno de evaluación, figura 7), el cual es de menor magnitud que el anterior. La disminución observada en las emisiones, se debe a que durante el proceso de nitrificación y desnitrificación no sólo se genera el  $N_2O$ , sino también se consume este compuesto nitrogenado (Williams, Hutchinson & Fehsenfeld, 1992).

### 3.3. Índice de emisión

El índice de emisión es la cantidad de gas, óxido nitroso en este caso, que se emite por unidad de área durante un tiempo determinado. Usualmente las unidades utilizadas son kilogramos, por hectárea y por año.

El desarrollo de índices de emisión nacionales es de gran importancia estratégica para Costa Rica, que se

ha propuesto ser C-Neutro para el 2021, ya que ello le permitirá tener información, no sólo actualizada, sino de gran precisión que contribuirá positivamente a reducir la incertidumbre asociada con el cálculo de las emisiones de este tipo de gas, que se genera en el sector agropecuario costarricense.

Basado en las determinaciones de campo realizadas, se logró determinar que el índice de emisión fue diferente entre tratamientos. El menor ( $P < 0,05$ ) valor ( $0,78 \pm 0,01\ kg\ de\ N_2O-N\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) se determinó en el tratamiento donde no se aplicó fertilizante nitrogenado, mientras que el índice mayor ( $P < 0,05$ ) se detectó con la aplicación del fertilizante nitrogenado convencional ( $1,55 \pm 0,03\ kg\ de\ N_2O-N\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ). La aplicación de fertilizante nitrogenado de lenta liberación, produjo un nivel intermedio entre los anteriores tratamientos ( $1,00 \pm 0,05\ kg\ de\ N_2O-N\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) siendo diferente ( $P < 0,05$ ) a los otros dos tratamientos.

## 4. Conclusiones

Basados en las condiciones bajo las cuales se desarrolló la presente investigación se puede concluir que:

Hubo diferencias estadísticas entre tratamientos en los niveles de emisión determinados, comparado con el nitrógeno comercial la emisión de óxido nitroso fue menor con la aplicación de fertilizante nitrogenado de lenta liberación, por lo que esta fuente nitrogenada se constituye en una potencial opción de mitigación a ser utilizada en esta actividad productiva.

Es clara la influencia que ejerce la topografía sobre las emisiones de óxido nitroso, estas tienden a ser de mayor magnitud en los niveles topográficos más bajos.

Es evidente que el reciclaje de nitrógeno realizado por los animales en pastoreo constituye un factor que estimula la emisión de óxido nitroso, ello fue claramente observado en el tratamiento donde no se aplicó fertilización nitrogenada, así como en el segundo ciclo de pastoreo del tratamiento donde se aplicó fertilizante nitrogenado de lenta liberación.

La generación de un índice para el cálculo de la emisión del óxido nitroso, proveniente del análisis de muestras gaseosas de experimentos donde se aplicó fertilizante nitrogenado en pasturas, es de mucha importancia ya que contribuye significativamente a reducir la incertidumbre asociada con la realización de inventarios de emisión de gases con efecto invernadero.

### Reconocimiento

Se agradece el apoyo financiero recibido de parte de la Fundación para el Fomento y Promoción de la Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria de Costa Rica (FITTACORI), que contribuyó al desarrollo de esta investigación.

## 5. Referencias

- Bouwman, A.; Bouman, L. & Batjes, N. (2002). Emissions of  $N_2O$  and NO from fertilized fields: summary of available measurements. *Global Biogeochem cycles* 16(4):1058-1070.
- Chacón, A.; Montenegro, J. y Gijad, J. (2009). *Inventario Nacional de Gases con Efecto Invernadero y Sumideros de Carbono*. IMN-MINAET. 96 p.
- Fernández-Escobar, R.; Benlloch, M.; Herrera, E. and Garcia-Novelo, J. (2004). *Effect of traditional and slow release N fertilizers on growth of olive nursery plants and N losses by leaching*. *Scientia Horticulturae* 101:39-49.
- Hoben, J. (2009). *On-farm nitrous oxide response to nitrogen fertilizer in corn cropping systems*. Dissertation, Michigan State University. 61 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan.
- Jiménez, C. (2002). *Influencia del tipo de fertilizante nitrogenado en la emisión del óxido nitroso procedente de los procesos de desnitrificación y nitrificación en suelos agrícolas*. Tesis Ing. Agr. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Universidad Politécnica de Madrid.
- Longoria-Ramírez, R.; Carbajal-Benítez, G.; Marmoraes, B. & Ruiz-Suarez, L. (2003). *Nitrous oxide flux in maize and wheat cropped soils in the central region of Mexico during "El Niño" year 1998*. *Atmosphere* 231-244.

- Marinho, E.; DeLaune, R. & Lindau, C. (2004). *Nitrous oxide flux from soybeans grown on Mississippi alluvial soil*. Communications in Soil Science and Plant Analysis 35:1-8.
- Millar, N.; Robertson, GP.; Grace, PR.; Gehl, RJ. & Hoben, J.P. (2010). *Nitrogen fertilizer management for nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) mitigation in intensive corn (maize) production: an emissions reduction protocol for US Midwest agriculture*. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 15:185–204.
- Montenegro, J. y Calderón J. (2012). Respuesta productiva del pasto kikuyo (*Kikuyuochioa clandestina*) al fertilizante nitrogenado de lenta liberación. *Revista INTA* (en prensa) 9 p.
- Montenegro, J.; Laprade, S.; Ortega, R. y Sandoval, J. (2012). *Desarrollo de opciones de mitigación de óxido nitroso en el cultivo de banano: Evaluación de diferentes fuentes nitrogenadas*. IV Congreso Internacional sobre el Banano celebrado en San José del 21 al 23 de febrero del 2012. 14p
- Montenegro, J. y Abarca, S. (2001). *Importancia del sector agropecuario costarricense en la mitigación del calentamiento global*. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Instituto Meteorológico Nacional. 96 p.
- Robertson, GP. & Groffman, P. (2007). *Nitrogen transformations*. In: Paul EA (ed) *Soil microbiology, ecology, and biochemistry*, 3rd ed. Academic/Elsevier, New York, pp 341–364.
- Rochette, P.; Angers, D.; Belanger, G.; Chantigny; M., Prevost, D. & Levesque, G. (2004). Emissions of nitrous oxide from alfalfa and soybean crops in eastern Canada. *Soil Science Society of America Journal* 68:493-506.
- Skiba, U. & Smith, K. (2000). The control of nitrous oxide emissions from agricultural and natural soils. *Chemosphere Global Change Science* 2:379–386.
- Veldkamp, E. & Keller, M. (1997). *Nitrogen oxide emissions from a banana plantation in the humid tropics*. J of Geophysical Research 102:15889-15898.
- Williams, EJ.; Hutchinson, GL. & Fehsenfeld, FC. (1992). *NO<sub>x</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from soil*. Global Biogeochemical Cycles 6:351-388.

## Emisión del óxido nitroso ( $N_2O$ ) en el sistema de producción café sin sombra en Costa Rica

JOHNNY MONTENEGRO<sup>1</sup>  
JORGE HERRERA<sup>2</sup>

### Resumen

Existe evidencia que muestra que la adición de fertilizantes nitrogenados a los suelos agrícolas, incrementa el potencial de las emisiones de óxido nitroso ( $N_2O$ ), poderoso gas con efecto invernadero que contribuye con el calentamiento global. La forma química del nitrógeno aplicado, tiene un rol importante en las emisiones de este gas. Basado en ello, el objetivo de esta investigación fue determinar la emisión de óxido nitroso derivada de tres diferentes fuentes de nitrógeno, aplicados a una plantación de café manejada a plena exposición solar. Esta investigación se realizó en la finca experimental del Centro de Investigaciones del Instituto del Café (CICAFE) ubicada en San Pedro de Barva de Heredia, en un suelo andosol con un 5% de pendiente. Las evaluaciones en el campo se iniciaron en junio del 2011 y finalizaron en junio del 2012, utilizándose un diseño de bloques completos al azar con 3 repeticiones y 3 tratamientos: fuente comercial, fuente con inhibidor de la nitrificación y fuente de lenta liberación. Para capturar el  $N_2O$  se utilizó la técnica de la cámara y los muestreos de gas se repitieron a lo largo del año, de acuerdo con el calendario de aplicación del fertilizante. La emisión de  $N_2O$  fue diferente ( $P < 0,05$ ) entre tratamientos, la mayor emisión se determinó con el fertilizante que contenía el inhibidor de la nitrificación ( $2,01 \pm 0,18$  kg de  $N_2O-N$   $ha^{-1}$   $año^{-1}$ ) y la menor emisión fue determinada con la fuente de nitrógeno de lenta liberación ( $1,31 \pm 0,07$  kg de  $N_2O-N$   $ha^{-1}$   $año^{-1}$ ). Un nivel intermedio y similar ( $P > 0,05$ ) a la fuente con inhibidor, se detectó con la fuente comercial ( $1,86 \pm 0,08$  kg de  $N_2O-N$   $ha^{-1}$   $año^{-1}$ ). La emisión de óxido nitroso podría ser reducida con la aplicación de fuentes nitrogenadas de lenta liberación, lo cual se demostró en esta investigación. Se recomienda continuar su evaluación para confirmar esta tendencia.

**PALABRAS CLAVE:** CAFÉ, GASES CON EFECTO INVERNADERO, ÓXIDO NITROSO, ÍNDICE DE EMISIÓN, OPCIONES DE MITIGACIÓN.

### Abstract

There is evidence that the addition of nitrogen fertilizers to agricultural soils increases the potential for nitrous oxide ( $N_2O$ ) emissions, and that the chemical form of nitrogen applied has an important role in emissions of this gas. Based on this, the objective of this research was to determine the nitrous oxide emission derived from three different sources of nitrogen, applied to a coffee plantation in full sunlight. This research was conducted at the experimental coffee farm of CICAFE, located in Barva de Heredia, over an andosol soil with 5% slope. The assessments in the field began in June 2011 and ended in June 2012, using a complete randomized block design with 3 replications and 3 treatments (sources): commercial source, nitrification inhibitor, and slow release source. To capture the  $N_2O$  coming out from the soil the chamber technique was used; the gas sampling was repeated throughout the year, according to the calendar of fertilizer application. The  $N_2O$  emission was different ( $P < 0.05$ ) between treatments, the biggest was determined with fertilizer containing nitrification inhibitor ( $2.01 \pm 0.18$  kg  $N_2O-N$   $ha^{-1}$   $yr^{-1}$ ) and the lowest emission with the source of slow release nitrogen ( $1.31 \pm 0.07$  kg  $N_2O-N$   $ha^{-1}$   $yr^{-1}$ ). Intermediate and similar emission ( $P > 0.05$ ) to the source with inhibitor was detected with the commercial source ( $1.86 \pm 0.08$  kg  $N_2O-N$   $ha^{-1}$   $yr^{-1}$ ). The nitrous oxide emission should be reduced with the application of slow release nitrogen source, as demonstrated in this study. Further evaluation is recommended to confirm this trend.

1 Investigador en Cambio Climático y Agricultura. Convenio: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) – Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Costa Rica. Email: [jmontenegro@imn.ac.cr](mailto:jmontenegro@imn.ac.cr), [jmontenegro@inta.go.cr](mailto:jmontenegro@inta.go.cr).

2 Coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental, Universidad Nacional, Costa Rica. Email: [jherrer@una.ac.cr](mailto:jherrer@una.ac.cr).

KEYWORDS: COFFEE PLANTATIONS, GREENHOUSE GAS EMISSION, NITROUS OXIDE, EMISSION INDEX, MITIGATION OPTIONS.

## 1. Introducción

El óxido nitroso ( $N_2O$ ) es un gas con efecto invernadero muy importante desde el punto de vista de calentamiento global, debido a que su potencial es 310 veces superior al  $CO_2$  (IPCC 2006). Su concentración en la atmósfera, se ha incrementado 17% desde 1750. Se considera que la razón ha sido la expansión e intensificación de la agricultura y se prevé que esta tendencia continuará en el futuro (Bouwman, 1996).

De acuerdo con información del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del 2005, realizado por el Instituto Meteorológico Nacional (Chacón, Montenegro y Gijad, 2009), el  $N_2O$  representó el 7% del total de los gases emitidos por el sector agropecuario, pero constituyó el 54% de las emisiones cuando se considera como  $CO_2$  equivalente. Una parte significativa de esta emisión, es el resultado de la aplicación de fertilizantes nitrogenados en las diferentes actividades primarias que realiza este sector.

Existe evidencia que muestra que la adición de fertilizantes nitrogenados a los suelos agrícolas, incrementa el potencial de las emisiones de  $N_2O$  (Rochette, Angers, Belanger, Chantigny, Prevost & Levesque, 2004; Stehfest & Bouwman, 2006). Por esta razón el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) sugiere que para calcular la emisión de este gas se utilice como factor el 1% del nitrógeno total aplicado anualmente.

Estudios previos han demostrado, que la forma química del nitrógeno (N) aplicado tiene un rol importante en las emisiones de este gas y que fuentes de N de liberación controlada o con inhibidores de la nitrificación, pueden tener menores emisiones que las generadas con fuentes convencionales de nitrógeno (McTaggart, Clayton, Parker, Swan & Smith, 1997; Akiyama, Tsuruta, & Watanabe, 2000). El nitrógeno de lenta liberación o con inhibidores de la nitrificación, es usado prioritariamente para disminuir las pérdidas de N por lixiviación (Fernández-Escobar,

Benlloch, Herrera & Garcia-Novelo, 2004), así como para extender la disponibilidad de este nutriente durante la fase de crecimiento de los cultivos. Sin embargo, dada sus características químicas es posible que bajo las condiciones climáticas del trópico, también se deriven beneficios ambientales ligados a menor emisión de gases con efecto invernadero, lo cual se debe cuantificar para demostrar si efectivamente presentan alguna ventaja comparativa en este sentido.

Por esta razón, la utilización de fertilizantes de lenta liberación y con inhibidor de nitrificación, no solo podrían incrementar la eficiencia de utilización del mismo por parte de las plantas, lo cual se traduciría en menores pérdidas del fertilizante, sino que también podrían contribuir a disminuir la tendencia actual del calentamiento global, debido a que por la potencial reducción de la generación del óxido nitroso se estaría disminuyendo la concentración de gases con efecto invernadero en la atmósfera.

Debido a que el uso de estos fertilizantes es relativamente nuevo en nuestro país, no hay resultados de investigación disponibles, ni información relacionada con aspectos ambientales, razón por la cual este tipo de información debe ser generada.

Por lo anteriormente expuesto, el objetivo de esta investigación fue determinar la emisión de óxido nitroso derivada de la aplicación de dos diferentes fuentes alternativas de nitrógeno (una con inhibidor de la nitrificación y otra de lenta liberación), aplicados a una plantación de café manejada a plena exposición solar y compararla con aquella determinada con la aplicación de una fuente comercial de nitrógeno.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Localización del estudio

Esta investigación se realizó en la finca experimental del Centro de Investigaciones del Instituto del Café (CICAPE), ubicada en San Pedro de Barva de Heredia, a una altitud de 1211 msnm, en un suelo andosol con 5% de pendiente. La temperatura y la precipitación promedio anual son de 20°C y 2468 mm respectivamente (IMN, 2012).

Las evaluaciones en el campo se iniciaron en junio del 2011 y finalizaron en junio del 2012, fueron realizadas en una plantación de café de la variedad caturra, de ocho años, sembrada a plena exposición solar y con una densidad de 7086 plantas ha<sup>-1</sup> (1,68m entre hileras y 0,84m entre plantas).

### 2.2. Manejo de la plantación

El manejo de la plantación incluyó la aplicación de fungicidas, principalmente para la roya (*Hemileia vastatrix*) y el uso de controladores biológicos

para el manejo del barrenador del grano del café (*Hypothenemus hampei*). Las malezas se controlaron con motoguadaña y la poda se realizó utilizando el sistema por lote, la última poda se realizó en el 2009.

El ensayo donde se realizaron los muestreos de N<sub>2</sub>O se inició en el 2007, por lo que al momento de las evaluaciones este sistema de fertilización tenía 4 años de establecido y en consecuencia, se consideró en una condición estable desde el punto de vista de compuesto nitrogenados en el suelo producto de la aplicación de las diferentes fuentes nitrogenadas.

La información climática fue provista por el Instituto del Café (ICAPE), institución que posee una estación meteorológica, ubicada en la plantación de café donde se desarrollaron los muestreos.

### 2.3. Diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar, con 3 repeticiones y 3 tratamientos. La fertilización nitrogenada se fraccionó de acuerdo con el siguiente esquema (cuadro 1).

Cuadro 1. Tratamientos, tipo, forma química, dosis de nitrógeno evaluadas y épocas de aplicación

Tratamiento	Tipo de fertilizante	Forma química del nitrógeno	Dosis kg N ha <sup>-1</sup>	Junio	kg N ha <sup>-1</sup>	
					Agosto	Octubre
1	Comercial	Nitrato y amonio	200	67	67	66
2	Con inhibidor de nitrificación *	Nitrosulfato y amonio	200	67	67	66
3	Lenta liberación **	Nitrógeno amoniacal y nitrógeno nítrico	200	100	100	

\* DMPP (3,4-dimetilpirazol fosfato).

\*\* 50 % a 3 meses y 50 % a 6 meses.

La mención de los fertilizantes no significa recomendación alguna.

En la plantación se implementaron parcelas conformadas por 5 hileras y 5 plantas por hilera, para un total de veinticinco plantas por parcela; la parcela útil la constituyeron las quince plantas centrales, donde se realizaron las mediciones.

A todos los tratamientos se les aplicó una fertilización base, correspondiente a 150, 80, 50 y 16 kg de  $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $P_2O_5$  y  $B_2O_3$  por hectárea, cantidad que se fraccionó en dos tractos, el primero se aplicó en junio y el segundo en agosto, en ambos casos previo a la aplicación de la fuente nitrogenada (cuadro 1).

Los fertilizantes se aplicaron de forma manual a la base de la planta de café, formando un semicírculo alrededor del tallo donde se colocó la dosis completa y correspondiente a cada uno de los eventos de fertilización programado (cuadro 1).

#### 2.4. Muestreo de óxido nítrico

La recolección de las muestras gaseosas se realizó considerando, que se presentarían mayores emisiones durante los primeros días luego de la aplicación de los fertilizantes, lo cual es típico de los fertilizantes convencionales.

Para capturar el gas se utilizó la técnica de la cámara, la cual tenía una altura de 30 cm y una circunferencia de 94,2 cm, provista de un septum por donde se recolectó la muestra gaseosa. La cámara fue puesta sobre la superficie del suelo y se presionó para garantizar que no se presentara intercambio gaseoso (entradas o salidas de la cámara) por los bordes. Las cámaras se colocaron en la banda de fertilización (BF) y en la no fertilizada (BNF).

Los muestreos se realizaron durante la mañana y se repitieron a lo largo del año de acuerdo con el calendario de aplicación del fertilizante (cuadro 1). Cada día de muestreo se colocaron dos cámaras por repetición en cada tratamiento y de cada una de ellas se recolectaron dos muestras de gas.

Las muestras se recolectaron más intensivamente durante los primeros días inmediatamente después de la aplicación del fertilizante, disminuyéndose la frecuencia de muestreo a partir de la segunda semana de iniciados los mismos.

Las muestras de gas se trasladaron al Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, donde se analizaron en un cromatógrafo de gases Agilent, utilizándose un detector de captura de electrones de acuerdo con las condiciones indicadas en el cuadro 2.

Cuadro 2. Condiciones cromatográficas empleadas en el análisis de  $N_2O$

Condición	
Temperatura del puerto de inyección (°C)	200
Rampa de temperatura	35 °C
Detector	ECD
Temperatura del detector (°C)	250
Flujo de la columna (ml/min)	6

Para cuantificar la concentración de  $N_2O$  presente en las muestras se interpoló en una curva de calibración de al menos cinco patrones, construida a partir de un cilindro certificado de  $N_2O$ :  $10 \mu\text{mol mol}^{-1}$ , balance nitrógeno. Para estimar los flujos de  $N_2O$  que se generaron entre los días de muestreo, se realizó interpolación lineal. Todos los datos se expresan como  $N_2O-N$ .

#### 2.5. Análisis estadístico

Los resultados de los análisis de las muestras gaseosas fueron realizados utilizando ProcGLM de SAS (2006) y la comparación de medias se efectuó mediante la prueba de Tuckey al 5%.

### 3. Resultados

#### 3.1. Emisión asociada con la aplicación o no de nitrógeno

##### 3.1.1. Fertilizante comercial

La emisión de óxido nitroso ( $N_2O$ ) proveniente de la banda donde se aplicó la fuente comercial de fertilizante nitrogenado (BF), tuvo mayor magnitud que aquella proveniente de la banda donde no se aplicó fertilizante (BNF, figura 1). La mayor disponibilidad de nitrógeno en la BF, es un factor que contribuye significativamente para que se produzcan las emisiones en los días siguientes a la fertilización. Se puede notar, como la emisión presenta picos importantes, días después de cada uno de los eventos de fertilización (figura 1).

La emisión del  $N_2O$  proveniente de la BF fue mayor, ya que se calculó que el 66% de la emisión proviene de ella, mientras que el restante 34% provino de la BNF. Probablemente la emisión de  $N_2O$  originada de la franja sin fertilización es el resultado del reciclaje de nitrógeno realizado por la planta, es decir, por la mineralización del nitrógeno contenido en partes de la planta (hojarasca y raíces), que mueren como parte del ciclo normal anual del cultivo. En este caso las emisiones ocurridas en los primeros 120 días de evaluación, provendrían de la descomposición de material vegetal acumulado del ciclo vegetativo del año anterior y que producto del inicio de la época lluviosa, está siendo descompuesta por la acción de los microorganismos del suelo.

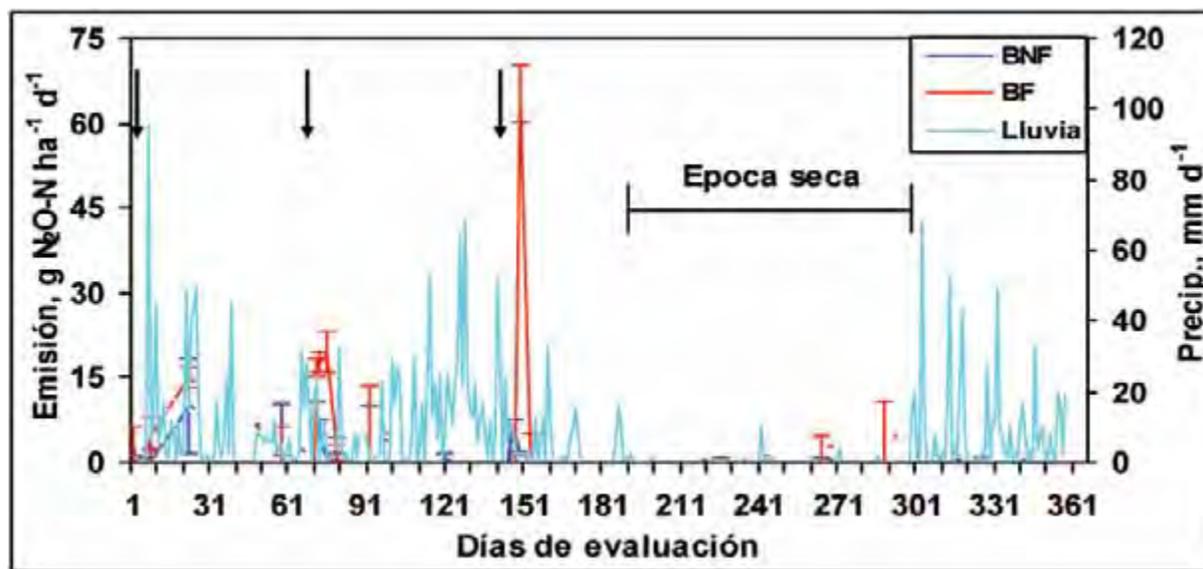


Figura 1. Emisión de  $N_2O$  proveniente de la franja con o sin fertilizante comercial, en una plantación de café a plena exposición solar.

Las flechas indican el evento de fertilización.

BF, BNF: banda con y sin fertilizante, valores promedio  $\pm 1$  EE.

De acuerdo con un estudio realizado en la misma localidad y con el mismo sistema de producción, la mayor caída de hojas ocurre a partir de octubre, lo que refuerza el hecho de que la mayor parte de la emisión de la banda no fertilizada proviene de

la mineralización del nitrógeno contenido en ese material vegetativo, ya que este material recicla hasta  $153 \pm 7$  kg de nitrógeno, por hectárea, por año (Hergoualc'h et al., 2008).

En consecuencia, el nitrógeno liberado de esas partes de la planta en descomposición, más la influencia de la lluvia que incrementa el contenido de agua en el suelo, conllevan a la formación y emisión del óxido nitroso.

La lluvia es un factor que influye en las emisiones, lo cual se aprecia claramente en los 3 eventos de fertilización. Esto es particularmente evidente en la tercera fertilización (día 151 de evaluación, figura 1), donde se determinó el mayor pico de emisión del óxido nitroso, influenciado por los eventos lluviosos que se sucedieron la semana previa a la fertilización, lo cual generó la condición de humedad propicia para la formación y posterior emisión del mencionado gas. Durante la época seca las emisiones fueron muy bajas (figura 1), incrementándose en la época de transición a la estación lluviosa debido a los eventos lluviosos que se presentaron, estimulando la actividad microbiana y por ende la descomposición de la materia orgánica del suelo y la liberación del nitrógeno inorgánico.

### 3.1.2. Fertilizante con inhibidor de nitrificación

En el caso de la fuente nitrogenada conteniendo el inhibidor de nitrificación, fue notoria la mayor emisión que se originó en la BF (figura 2), la cual representó el 90% de la emisión total. Es evidente que se presenta un incremento en la emisión seguido del evento de fertilización en la BF, condición que se manifiesta muy ligeramente en la BNF.

En este caso la emisión en la franja fertilizada tiene un claro patrón asociado con la práctica de la fertilización, donde aún cuando este producto contiene el inhibidor de la nitrificación (el nitrato es uno de los principales precursores del  $N_2O$ ), las emisiones fueron bastante altas, lo que hace suponer que la fuente de este compuesto gaseoso podría estar relacionado con factores diferentes a la desnitrificación, o bien, que el inhibidor de la nitrificación no actuó según las especificaciones técnicas del fabricante en estas condiciones agroecológicas.

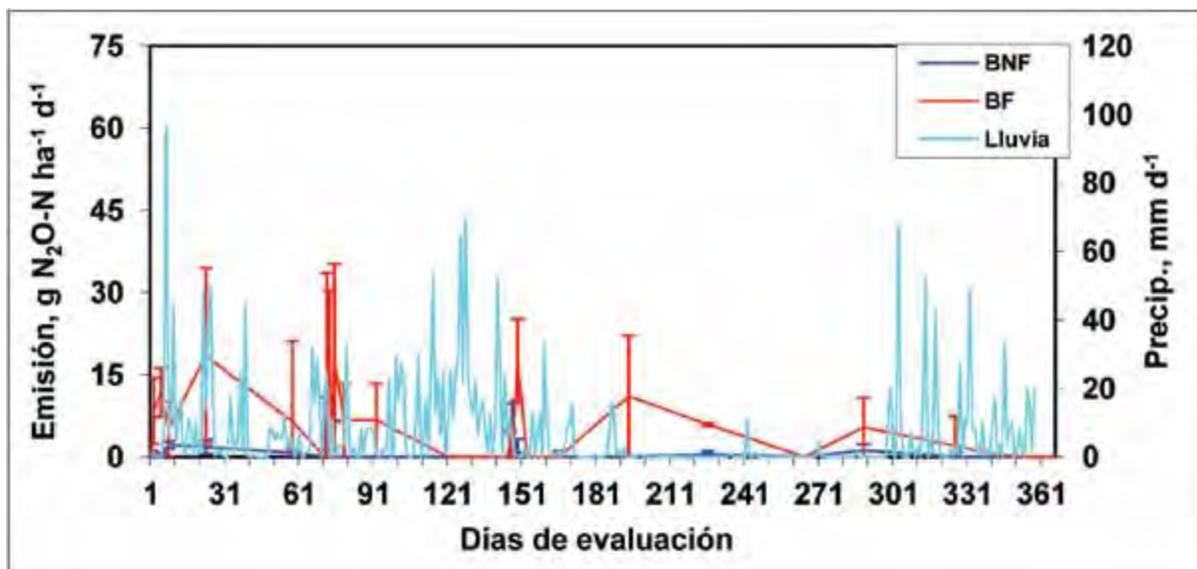


Figura 2. Emisión de  $N_2O$  de la franja con o sin fertilizante nitrogenado con inhibidor de nitrificación, en una plantación de café a plena exposición solar.

Las flechas indican el evento de fertilización.

BF, BNF: banda con y sin fertilizante, valores promedio  $\pm 1$  EE.

En cuanto a la emisión que podría provenir del nitrógeno reciclado por la planta es muy baja y se presentó principalmente durante la primera aplicación de fertilizante (días 1 a 61 de evaluación, figura 2) en la BNF. El estímulo causado a la actividad microbiana por las primeras lluvias del 2011 y la subsecuente descomposición de los residuos vegetales, se manifestó en el incremento de la emisión observado (figura 2).

De igual forma que lo comentado anteriormente, para el fertilizante comercial la lluvia influencia la emisión del  $N_2O$  al incrementar la humedad del suelo, particularmente después de repetidos eventos lluviosos como los que se presentaron durante los primeros 150 de evaluación (figura 2). Conforme se reducen las lluvias y se aproxima la época seca, disminuye la humedad del suelo y se reduce la emisión de este gas.

### 3.1.3. Fertilizante de lenta liberación

El nitrógeno de lenta liberación presentó un patrón interesante, dado que la mayor emisión además de que provino en un 60% de la BF (figura. 3), presentó la influencia directa de las condiciones climáticas, en este caso de la lluvia. Pevio a la segunda fertilización se presentaron lluvias que mantuvieron muy húmedo el suelo, lo que combinado con el nitrógeno suplido por el fertilizante interactuó para que se presentaran las emisiones en la magnitud determinada, luego de la segunda aplicación del fertilizante.

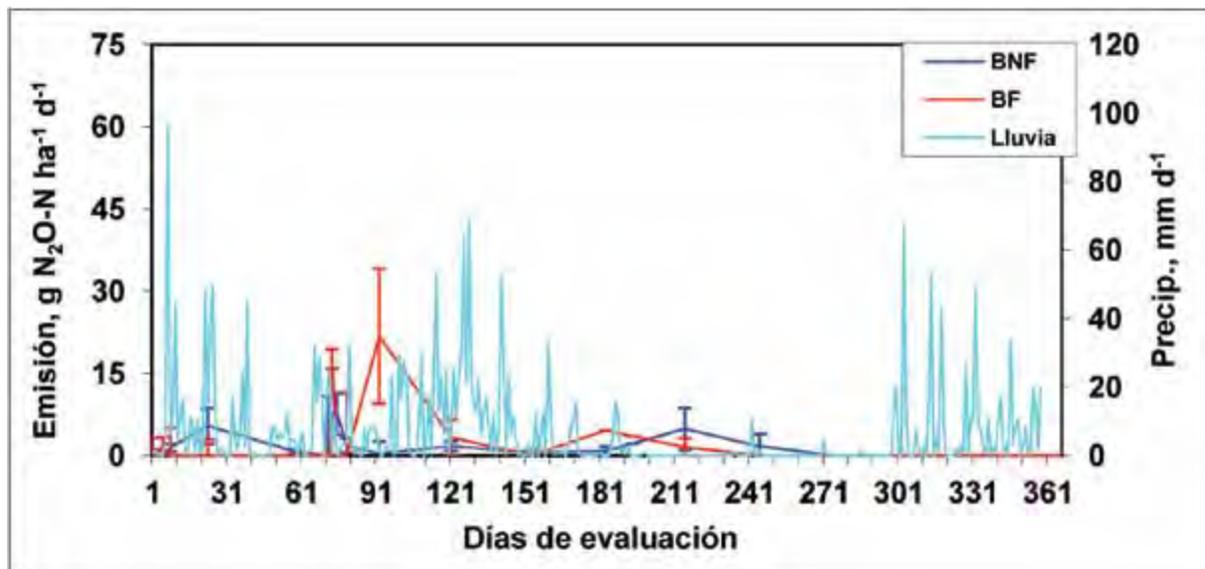


Figura 3. Emisión de  $N_2O$  de la franja con o sin fertilizante nitrogenado de lenta liberación, en una plantación de café a plena exposición solar.

Las flechas indican el evento de fertilización.

BF, BNF: banda con y sin fertilizante, valores promedio  $\pm 1$  EE.

En el mediano plazo (después de los 181 días de evaluación), se determinaron emisiones que están relacionadas con la lluvia, ya que el incremento de la disponibilidad de agua favorece el proceso de liberación nitrogenado contenido en los gránulos

del fertilizante. Esta liberación de nitrógeno ligada a la condición de incremento de humedad del suelo, favoreció la generación y liberación del óxido nitroso, producto de la mayor disponibilidad de nitrógeno en el suelo.

Contrario a las otras dos fuentes de nitrógeno analizadas anteriormente, el fertilizante de lenta liberación no presentó emisión detectable a partir de los doscientos setenta días de evaluación (figura 3). Se debe resaltar el hecho de que, si bien la dosis total aplicada de nitrógeno fue igual para los tres fertilizantes aplicados en la presente investigación, las dosis fueron proporcionalmente mayores en cada aplicación en el caso de lenta liberación, debido a que solo se realizaron dos aplicaciones de este fertilizante (cuadro 1). A pesar de que hubo mayor cantidad de nitrógeno en el suelo luego del momento de aplicación, ello no se transformó en eventos de emisión mayores a los determinados con el fertilizante comercial o la fuente conteniendo el inhibidor de la nitrificación. Esto demuestra, que esta fuente nitrogenada tiene potencial para ser utilizada como una opción de mitigación en las condiciones agroecológicas bajo las cuales se desarrolló la presente investigación.

La emisión de este gas que proviene de la BNF, representa una fuente significativamente de  $N_2O$  y totalizó el 40% del total. Esto es el resultado de la combinación de la emisión que proveniente del reciclaje de nitrógeno, que es liberado durante el proceso de descomposición de la hojarasca y las raíces y de aquella proveniente del nitrógeno que probablemente se ha trasladado horizontalmente hacia la franja no fertilizada por efecto del movimiento del agua.

### 3.2. Emisión de $N_2O$ en la banda fertilizada

En términos comparativos y utilizando la emisión del  $N_2O$  que se originó exclusivamente en la banda de fertilización, es interesante notar que si bien todos los tratamientos recibieron la misma cantidad de nitrógeno por unidad de área (200 kg), la emisión fue diferente ( $P < 0,05$ ) entre las fuentes utilizadas. La menor emisión se derivó cuando se utilizó el fertilizante de lenta liberación ( $0,78 \pm 0,01$  kg de  $N_2O-N$ ) y la mayor se produjo con el nitrógeno conteniendo el inhibidor de nitrificación ( $1,80 \pm 0,01$  kg de  $N_2O-N$ ), mientras que un valor intermedio se originó con el fertilizante comercial ( $1,22 \pm 0,01$  kg de

$N_2O-N$ ). Esto demuestra la respuesta diferencial en la emisión para cada una de las fuentes nitrogenadas utilizadas.

### 3.3. Patrón de emisión

En general la emisión del  $N_2O$  presentó un patrón directamente relacionado con la aplicación del fertilizante. Con el fertilizante comercial se presentó un pico de emisión pocos días después de su aplicación, este comportamiento fue repetitivo, ya que se mostró en cada uno de los tres eventos de fertilización realizados en el ciclo anual del cultivo (figura. 4). La magnitud de los picos de emisión fue similar en las dos primeras aplicaciones, sin embargo, en la tercera se determinó el mayor evento de emisión.

Esto se explica por el hecho de que durante los 7 días previos a la fertilización se presentaron lluvias que totalizaron 124 mm y el día anterior a la fertilización llovió un total de 23 mm. Lo anterior, incrementó la humedad del suelo, lo que contribuyó a disolver el fertilizante y en consecuencia se aumentó la disponibilidad de este nutriente. Esto en combinación con la reducción de la disponibilidad de oxígeno para la actividad microbiana en el suelo, por el incremento del espacio poroso con agua producto de la excesiva humedad en esta, favoreció la formación y emisión del óxido nitroso.

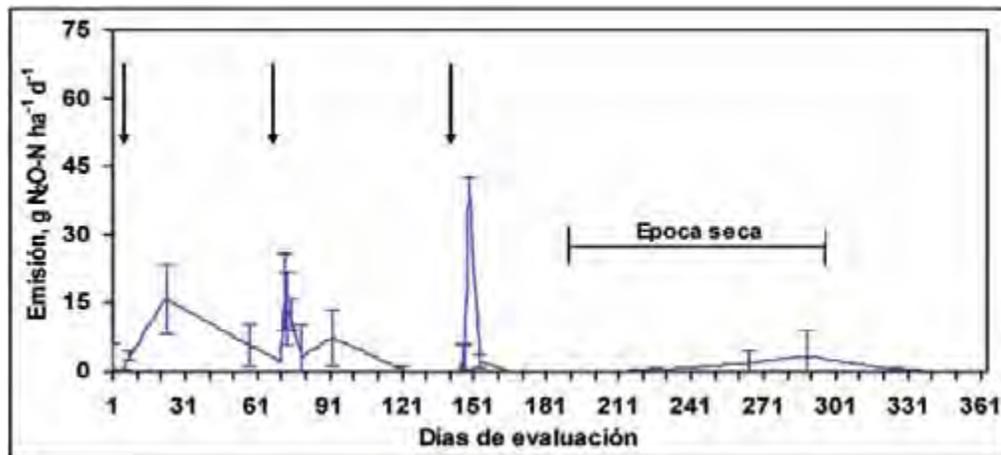


Figura 4. Patrón de emisión anual de  $N_2O$  con la aplicación de nitrógeno comercial en café manejado a plena exposición solar.

Las flechas indican el evento de fertilización; valores promedio  $\pm 1$  EE.

En el corto plazo (después de veinte días de la fertilización) y mediano plazo (más de ciento sesenta días después de la fertilización), la emisión se redujo en forma significativa y los niveles determinados fueron sumamente bajos, excepto aquellos detectados a partir de los doscientos cuarenta y hasta los trescientos treinta días de evaluación.

Esto confirma la tendencia reportada en la literatura, la cual indica que inmediatamente seguido a la fertilización es cuando se presentan las mayores emisiones, las que disminuyen en un período corto de 2-3 semanas, lo cual también es influenciado por los eventos lluviosos. Este comportamiento de mayores emisiones inmediatamente después de la aplicación del fertilizante, con la consiguiente reducción de la

misma conforme pasan los días de la aplicación, ha sido reportada por diversos investigadores en varias latitudes, incluyendo Costa Rica (Hergoualc'h et al., 2008; Montenegro y Abarca, 2001; Montenegro et al., 2012).

De manera similar al fertilizante comercial, la fuente nitrogenada conteniendo el inhibidor de la nitrificación mostró picos de emisión seguidos al evento de fertilización (figura 5). Sin embargo, en este caso se presentaron dos eventos de magnitud significativa durante la tercera fertilización (días doscientos y trescientos). También es claro, que luego de los picos de emisión esta regresa a niveles basales previos a la siguiente fertilización.

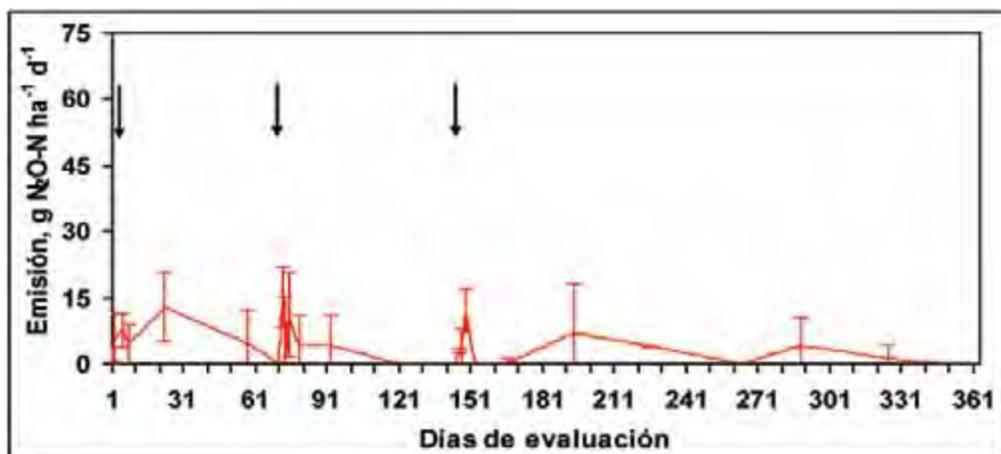


Figura 5. Patrón de emisión anual de  $N_2O$  con la aplicación de nitrógeno con inhibidor de nitrificación, en café manejado a plena exposición solar.

Las flechas indican el evento de fertilización; valores promedio  $\pm 1$  EE.

Con el fertilizante nitrogenado de lenta liberación se determinaron emisiones de baja magnitud durante los primeros días luego de la primera fertilización, las cuales probablemente se encuentran asociadas con la humedad del suelo como resultado de los

eventos lluviosos ocurridos durante los primeros días de evaluación (figura 6). Sin embargo, la magnitud de las mismas se incrementó luego de la segunda fertilización.

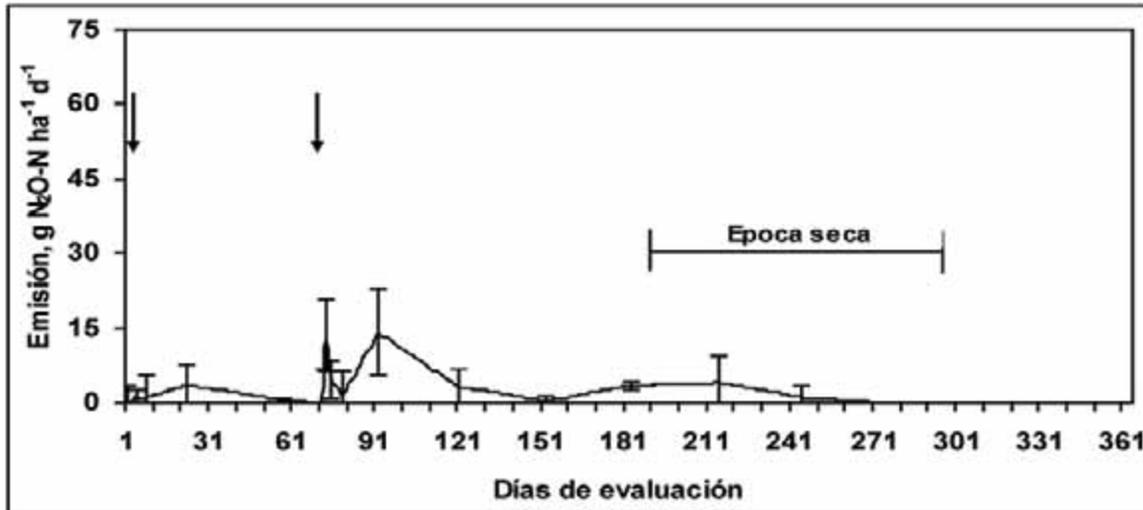


Figura 6. Patrón de emisión anual de N<sub>2</sub>O con la aplicación de nitrógeno de lenta liberación en una plantación de café manejada a plena exposición solar.

Las flechas indican el evento de fertilización; valores promedio  $\pm$  1 EE.

Probablemente el efecto residual del fertilizante de la primera fertilización, en combinación con aquel proveniente de la segunda aplicación, incrementó significativamente la disponibilidad de nitrógeno, lo cual aunado a la humedad del suelo estimuló la generación y emisión de este gas (figura 6).

mayor emisión anual. En el caso del nitrógeno de lenta liberación, este mostró durante todo el período experimental menores valores de emisión, lo que se manifiesta claramente al final del período de evaluación, con el menor valor determinado (figura 7).

### 3.4. Emisión acumulada

La emisión acumulada de N<sub>2</sub>O muestra que, el comportamiento fue similar durante la primera fertilización con la fuente comercial y la fuente conteniendo el inhibidor de nitrificación (figura 7).

Sin embargo, a pesar de que durante la parte media del experimento este último fertilizante mostró menores emisiones que el fertilizante comercial, emisiones importantes durante la tercera fertilización (figura 5) hicieron que al final del período experimental el tratamiento conteniendo el inhibidor presentara la

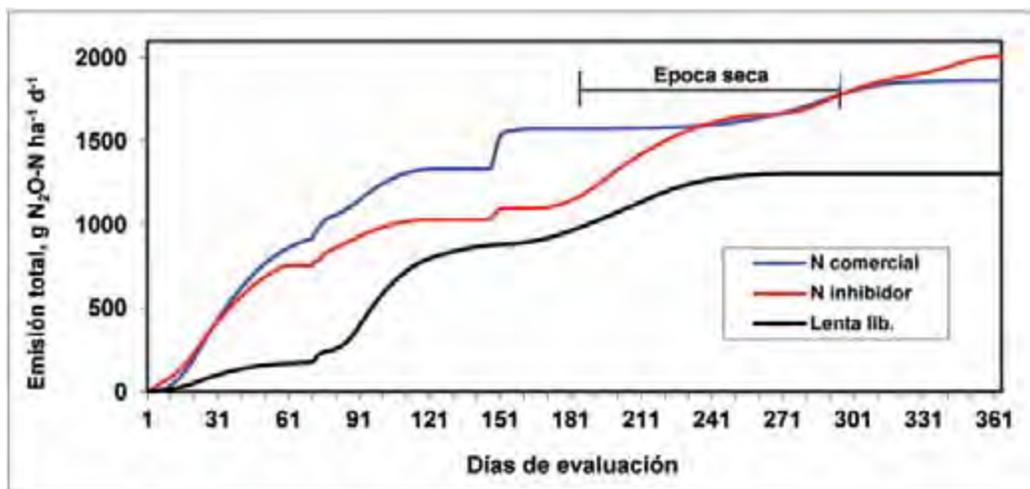


Figura 7. Emisión anual acumulada de  $N_2O$  con la aplicación de tres fuentes nitrogenadas, en una plantación de café manejada a plena exposición solar.

Las flechas indican la aplicación del fertilizante.

### 3.5. Índice de emisión

El índice de emisión es la cantidad de gas, óxido nitroso en este caso, emitido por unidad de área durante un tiempo determinado.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la mayor emisión ( $P < 0,05$ ) se determinó con el fertilizante conteniendo el inhibidor de la nitrificación ( $2,01 \pm 0,18$  kg de  $N_2O$ -N  $ha^{-1} año^{-1}$ ), la cual fue similar ( $P > 0,05$ ) a la detectada con la fuente comercial ( $1,86 \pm 0,08$  kg de  $N_2O$ -N  $ha^{-1} año^{-1}$ ). La menor emisión ( $P < 0,05$ ), fue determinada con la fuente de nitrógeno de lenta liberación ( $1,31 \pm 0,07$  kg de  $N_2O$ -N  $ha^{-1} año^{-1}$ ).

Investigaciones previas realizadas en café sin sombra, en la misma localidad donde se realizó el presente experimento, con la misma fuente comercial de nitrógeno, determinaron índices de emisión para el  $N_2O$  en el orden de los  $4,3 \pm 0,1$  kg de  $N_2O$ -N  $ha^{-1} año^{-1}$  (Hergoualc'h et al., 2008). Valores similares al determinado en esta investigación fueron previamente reportados por Montenegro y Abarca (2001), quienes determinaron un índice de emisión de  $2,42$  kg de  $N_2O$ -N  $ha^{-1} año^{-1}$ . Variaciones

en la distribución de la lluvia anual con respecto al momento de la fertilización, así como el manejo de esta, entre otras posibilidades, pueden explicar las diferencias en los índices calculados.

### 3.6. Pérdida de nitrógeno por volatilización

La cantidad de fertilizante nitrogenado emitido como  $N_2O$ -N varió según la fuente utilizada, fue superior en la fuente nitrogenada que contenía el inhibidor de nitrificación (1%) y similar con la fuente comercial (0,9%), mientras que la pérdida de nitrógeno resultó inferior con la fuente de lenta liberación (0,6%). Estas pérdidas no consideran volatilizaciones que hayan ocurrido en forma de amoníaco, ya que no fueron objeto de este estudio y que de presentarse pueden no solo incrementar la magnitud de las pérdidas, sino también cambiar el ordenamiento de los productos evaluados según el nivel de pérdida.

La cantidad de fertilizante comercial o con inhibidor de nitrificación que se transforma en  $N_2O$ -N, está en el rango de lo sugerido por el IPCC (2006), quienes utilizan un valor del 1% del total de

fertilizante nitrogenado aplicado. Sin embargo, este valor default estaría sobreestimando de manera significativa la emisión de  $N_2O$ -N para el fertilizante de lenta liberación. Lo anterior pone de manifiesto la importancia de realizar este tipo de investigaciones, que permitan determinar bajo las condiciones agroecológicas donde se desarrolla cada actividad agrícola, los verdaderos valores de emisión. Esto refuerza la necesidad de generar índices de emisión propios a las condiciones de cada país, de manera que los valores determinados reflejen las condiciones climáticas, edáficas y de manejo, bajo las cuales se desarrollan las explotaciones agrícolas.

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con las condiciones en las cuales se desarrolló la presente investigación se concluye que:

- La fuente de nitrógeno de lenta liberación presentó menor emisión de óxido nitroso, comparado con la fuente comercial o con inhibidor de la nitrificación.
- Las mayores emisiones de óxido nitroso se asociaron directamente a la aplicación del fertilizante en la banda de fertilización, ya que representaron entre el 66 % y el 90 % del total.
- Existe un patrón definido de emisión, en el cual el óxido nitroso es generado principalmente pocos días después de la aplicación del fertilizante nitrogenado, para disminuir posteriormente a partir de la segunda o tercera semana después de aplicado el fertilizante
- El nitrógeno de lenta liberación debería ser considerado como una opción de mitigación a ser implementada en cafetales a plena exposición solar.
- Los eventos lluviosos parecen influenciar positivamente los eventos de emisión de  $N_2O$ .

Se recomienda:

- Realizar una evaluación similar en un sistema de producción de café ubicado en otro ecosistema,

como el trópico húmedo, para determinar si la magnitud y el patrón de la emisión es diferente bajo otras condiciones de zona de vida.

- Evaluar estas fuentes nitrogenadas, incluyendo otras fuentes de lenta liberación, en el sistema de producción de café con sombra.
- Realizar estas evaluaciones por un período mayor de tiempo (dos o tres años) para incluir la variación interanual de las condiciones climáticas, las cuales tienen influencia directa en las emisiones del óxido nitroso.

#### 5. Referencias

- Akiyama, H., Tsuruta, H. & Watanabe, T. (2000).  $N_2O$  and NO emissions from soils after the application of different chemical fertilizers. *Chemosphere-Global Change Science* 2: 313-320.
- Bouwman, A. F. (1996). Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 46: 53-70.
- Chacón, A., Montenegro J. y Gijad, J. (2009). *Inventario nacional de gases con efecto invernadero y sumideros de carbono*. IMN-MINAET, 96 p.
- Fernández-Escobar, R., Benlloch, M., Herrera, E. Garcia-Novelo, J. (2004). Effect of traditional and slow release N fertilizers on growth of olive nursery plants and N losses by leaching. *Scientia Horticulturae* 101: 39-49.
- Hergoualc'h, K. Skiba, U., Harmand J. & Hénault, C. (2008). Fluxes of greenhouse gases from andosols under coffee in monoculture or shaded by *Inga densiflora* in Costa Rica. *Biogeochemistry* 89: 329-345.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2012). <http://www.imn.ac.cr/>

- Intergovernmental Panel on Climate Change). (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan.
- McTaggart, I., Clayton, H., Parker, J., Swan, L. & Smith, K.A. (1997). Nitrous oxide emissions from grassland and spring barley, following fertilizer application with and without nitrification inhibitors. *Biol. Fertil. Soils* 25: 261-268
- Montenegro, J., Laprade, S., Ortega, R. y Sandoval, J. (2012). *Desarrollo de opciones de mitigación de óxido nitroso en el cultivo de banano: Evaluación de diferentes fuentes nitrogenadas*. IV Congreso Internacional sobre el Banano celebrado en San José del 21 al 23 de febrero del 2012. 14p
- Montenegro, J. y Abarca, S. (2001). *Importancia del sector agropecuario costarricense en la mitigación del cambio climático*. 76p.
- Rochette, P., Angers, D., Belanger, G., Chantigny, M., Prevost, D. & Levesque, G. (2004). Emissions of nitrous oxide from alfalfa and soybean crops in eastern Canada. *Soil Science Society of America Journal* 68: 493-506.
- Stehfest, E. & Bouwman, L. (2006). N<sub>2</sub>O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modelling of global annual emissions. *Nutr Cycl Agroecosystems* 74: 207-228.

# Climatología de masas invernales de aire frío que alcanzan Centroamérica y el Caribe y su relación con algunos índices Árticos

ELADIO ZÁRATE HERNÁNDEZ<sup>1</sup>

## Resumen

Se generó una estadística del número de masas de aire frío que alcanzan Centroamérica y el Mar Caribe utilizando el concepto de Empuje Frío (EF), término utilizado para designar la entrada de un frente frío bien definido o de una línea de cortante de origen frontal hasta dichas zonas durante el invierno boreal. Los análisis se llevaron a cabo con base en treinta y siete temporadas invernales que van de noviembre a febrero entre los años 1975 y 2012. Se encontró que en promedio entraron 16,2 empujes fríos (EF's) por temporada. La región de estudio se dividió en tres subregiones y se presenta el análisis y estadísticas sobre el número y la profundidad latitudinal que alcanzan los EF's, las horas de entrada, tiempos de penetración y zonas donde tienden a disiparse. Se encontró que tanto el número de EF's, así como las profundidades latitudinales que alcanzan, guardan relación con la variación de la temperatura en el cinturón ártico entre 70 y 90°N y con los valores de la Oscilación Ártica. Anomalías negativas de la presión en superficie sobre el Atlántico y Mar Caribe debilitan el flujo alisio en la troposfera baja en esas áreas, generando anomalías del oeste y permitiendo la penetración de un mayor número de EF's por temporada. Se comparan los resultados del estudio con tres estudios previos, que utilizan el criterio de frente frío para generar estadísticas similares.

**PALABRAS CLAVE:** EMPUJE FRÍO, FRENTE FRÍO, LÍNEA DE CORTANTE, MASA DE AIRE FRÍO, OSCILACIÓN ÁRTICA, TEMPERATURAS ÁRTICAS, HIELOS MARINOS ÁRTICOS.

## Abstract

A statistics of cold air masses that reach Central America and the Caribbean Sea is generated using the concept of cold surge, term used to designate the penetration of a well defined cold front or a frontal shear line into the study area during the boreal winter. The analysis is carried out based on 37 "winter seasons" from November to February in the period 1975-2012. An average of 16.2 cold surges per winter season was found. The study region is divided in three sub regions and an analysis and statistics of the frequency of cold surges and the latitudinal depths that they reach is presented. Arrival times of the cold surges, penetration distances and dissipation zones are shown. It is found that both the number of cold surges and their latitudinal depths keep a good relationship with temperature variations in the Arctic belt between 70 and 90°N, as well as the Arctic Oscillation behavior. Negative anomalies of the surface pressure over the Atlantic and Caribbean weaken the trade winds in the low troposphere in those areas, generating west anomalies and allowing the penetration of a greater number of cold surges per winter season. The results of the study are compared with three previous studies that used the criterion of cold front to generate similar statistics in the area of study.

**KEY WORDS:** COLD SURGE, COLD FRONT, SHEAR LINE, COLD AIR MASS, ARCTIC OSCILLATION, ARCTIC TEMPERATURES, ARCTIC SEA ICE.

## 1. Introducción

Este trabajo genera una estadística sobre las masas invernales de aire frío del hemisferio norte, que alcanzan Centroamérica y el Caribe, con base en

treinta y siete temporadas entre los años 1975 y 2012. Aunque se utiliza el término "invernal", las temporadas analizadas van de noviembre a febrero.

---

<sup>1</sup> Investigador del Laboratorio de Investigaciones Atmosféricas y Planetarias (LIAP), Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. Email: elzarate2003@yahoo.com.

El área de trabajo se extiende desde el norte de Belice hasta Guyana en Suramérica.

Existen varios estudios que describen el comportamiento puntual y regional de las masas invernales de aire frío del Hemisferio Norte que incursionan en Centroamérica y el Caribe, utilizando el concepto de frente frío. DiMego, Bosart & Enderson (1976) estudiaron la frecuencia media mensual de los sistemas frontales entre 1965 y 1972, en un área comprendida entre 10-30°N y 60-105°O. Henry (1979) analizó la duración y penetración de frentes fríos en el Golfo del Méjico y el Mar Caribe, entre los años 1967 y 1977. Grandoso, Zárate y Vega (1980) estudiaron el caso de un frente frío que produjo un temporal sobre la vertiente del Caribe de Costa Rica y describieron varios tipos de interacciones mesoescalares. Reding (1992) estudió once temporadas de octubre a marzo entre los años 1979 y 1990, utilizando análisis de superficie e imágenes horarias de satélite, e identificó los frentes fríos que alcanzaron el sur de los Estados Unidos siguiéndoles su curso hasta penetrar en el Mar Caribe y Centroamérica. Frutos (1996) estudió el paso de frentes fríos sobre Belice y los relacionó con la producción de cítricos y banano. Schultz, Bracken, Bosart, Hakim, Bedrick, Dickinson & Tyle (1997) estudiaron la penetración de un severo frente frío que penetró al Caribe y alcanzó la parte norte de Suramérica en marzo de 1993, evento que en su momento se le denominó "latormentadelsiglo" debido a los valores extremos anómalos que alcanzaron la mayoría de los parámetros meteorológicos. Schultz, Bracken, & Bosart, (1998) ofrecen referencias sobre zonas o bandas latitudinales, en donde los frentes fríos tienden a tener mayor frecuencia de disipación sobre Centroamérica. González (1999) publicó una climatología sobre frentes fríos que han alcanzado la isla de Cuba, entre los años de 1916 y 1997. Otros trabajos han estudiado los "nortes", término utilizado en alusión a vientos invernales fuertes y fríos asociados con masas de aire frío, que penetran hacia el sur de los Estados Unidos. Vázquez (1999) estudió el comportamiento de "los nortes" a su paso por el Golfo de Méjico, generando una estadística entre las temporadas invernales comprendidas en el periodo 1958-1998. Ramírez y Prieto (2008) estudiaron los "nortes" de la temporada 2006-2007 en el Golfo de Méjico, utilizando como apoyo el modelo MM5. Herrera (2007) formuló y validó un índice de anomalía

de presión atmosférica para el pronóstico de corto y mediano alcance de las masas de aire frío que alcanzan Guatemala, utilizando datos de la Estación Sinóptica de Izabal, localizada en la costa caribeña de Guatemala. El índice es utilizado rutinariamente en el Instituto Sismológico, Vulcanológico, Meteorológico e Hidrológico de Guatemala (INSIVUME), durante las épocas invernales.

El abordaje que aquí se hace del tema va dirigido en dos sentidos: uno, aportar junto con estudios previos una perspectiva climática regional de la incursión de masas invernales de aire frío que alcanzan Centroamérica y el Caribe, utilizando una serie de datos superior a treinta años y conceptos algo menos restrictivos que los de "frente frío" o "incursión de nortes". Dos, a partir de los resultados estadísticos obtenidos, relacionar la incursión de las masas de aire frío con índices regionales y globales tales como la Oscilación Ártica (AO por sus siglas en inglés) y la variación de la temperatura en las regiones árticas.

### 1.1. Concepto de empuje frío (EF) para la identificación de las masas de aire frío que alcanzan Centroamérica y el Caribe

La American Meteorological Society (2000) define una masa de aire como un "gran volumen de aire que es aproximadamente homogéneo en su extensión horizontal, principalmente en cuanto a temperatura y humedad. Las variaciones verticales de estos parámetros son similares a los horizontales". Las masas de aire se clasifican con base en la temperatura y la humedad de sus "regiones fuente" (zonas donde se forman), las cuales pueden ser oceánicas o continentales. Las masas invernales de aire frío que alcanzan Centroamérica y el Caribe entre fines de otoño y principios de primavera del hemisferio norte, son por sus regiones fuente, del tipo marítimo Polar (mP), continental Ártica (cA) y continental Polar (cP). La figura 1 muestra las regiones fuente y las trayectorias que siguen dichas masas de aire, en sus desplazamientos hacia el sur. La temperatura y la humedad de estas masas de aire frío, se modifican sustancialmente por el prolongado trayecto que ejecutan, pero sobre todo, en el caso del área de trabajo de este estudio, por el paso sobre las aguas del Golfo de Méjico y el Mar Caribe.

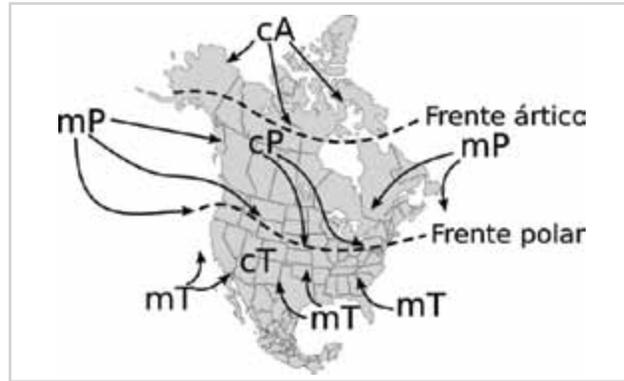


Figura 1. Regiones de origen de las masas de aire Marítimo Polar (mP), Continental Ártica (cA) y Continental Polar (cP) y las trayectorias que ejecutan al dejar sus regiones de origen. Tomada y modificada de Ritter (2006).

Cuando una masa invernal de aire frío se desprende de su región de origen en latitudes altas o medias y avanza hacia el sur, se forma en su parte delantera una interface o zona de transición denominada frente. Los frentes pueden ser fríos, cálidos, ocluidos o estacionarios. Las zonas frontales son la separación entre dos masas de aire de diferentes temperaturas y densidades, que tienen por lo general unas cuantas decenas de kilómetros de ancho. A su paso, a medida que la masa de aire frío avanza hacia latitudes menores, se producen tormentas eléctricas y lluvias acompañadas de cambios bruscos de temperatura, humedad y viento.

Dependiendo del mayor o menor grado de modificación que experimente una masa de aire frío al ingresar a Centroamérica y el Caribe, ésta puede mostrar tres posibles interfaces en su encuentro

con el aire tropical: un frente frío bien definido con claro avance hacia el sur, un frente frío en disolución (frontólisis) con poco avance o un frente estacionario (sin avance). Los frentes fríos en disolución y los estacionarios suelen clasificarse como línea de cortante de origen frontal. La NOAA (2011) define este tipo de línea de cortante como “un límite o zona que delimita el lugar donde la velocidad del viento se incrementa abruptamente en su lado polar y se asocia típicamente con el estado final en el ciclo de vida de un frente frío que ha penetrado hasta latitudes subtropicales y tropicales”. O sea, que la línea de cortante no involucra en su definición aspectos de temperatura o humedad. La figura 2 es un ejemplo de una masa de aire fría cuyo centro se ubica aproximadamente en 22°N y 173°O (anticiclón); muestra un frente frío bien definido hacia su porción este y una línea de cortante en su flanco sur.

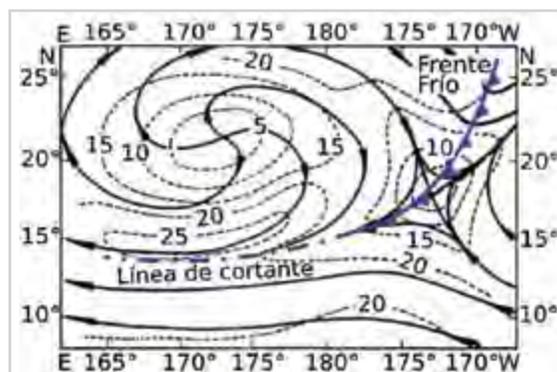


Figura 2. Frente frío (línea azul con picos) y línea de cortante (línea azul con trazos y puntos). Las líneas sólidas con flechas representan las direcciones del viento y las líneas a trazos con números indican las velocidades del viento. Tomada y modificada del Análisis Unificado en Superficie NOAA (2011).

Cuando una línea de cortante permanece estacionaria sobre terrenos montañosos por varios días, se pueden acumular importantes cantidades de lluvia capaces de generar inundaciones y deslizamientos de tierra (NOAA, 2011). Es por esto, que su estudio resulta de importancia fundamental en el comportamiento del tiempo atmosférico en Centroamérica y el Caribe. Zárate (1977) había notado que la mayoría de las masas de aire que incursionaban hasta Costa Rica, mostraban mayoritariamente líneas de cortante en lugar de frentes fríos, aspecto que se demuestra numéricamente en este estudio.

Existen gran cantidad de estudios que han analizado y cuantificado la entrada de frentes fríos a Centroamérica y el Caribe utilizando diferentes metodologías, pero no han cuantificado la incursión de las líneas de cortante de origen frontal. Para conciliar la incursión de frentes fríos y líneas de cortante en un concepto único e integrador, en este

trabajo se establece el término “empuje frío” (EF) para designar la incursión de una masa invernal de aire frío hasta Centroamérica y el Caribe, sin hacer diferencia si en su borde delantero o de ataque presenta un frente frío o una línea de cortante. En el contexto de este estudio un EF es simplemente el arribo de una masa invernal de aire frío a la región de estudio. Desde luego que la inclusión de las masas de aire frío en la base de datos del estudio, están sujetas al cumplimiento de ciertos requisitos que se mencionarán posteriormente. La idea es cuantificar el número total de masas de aire frío que alcanzan la región de estudio por temporada invernal y no solamente las que presentan frentes fríos. De esta forma se pueden establecer relaciones con índices climáticos regionales y globales, capaces de contribuir al pronóstico de las temporadas invernales. En la figura 3 se muestra un ejemplo de un EF para el 8 de febrero de 2010.

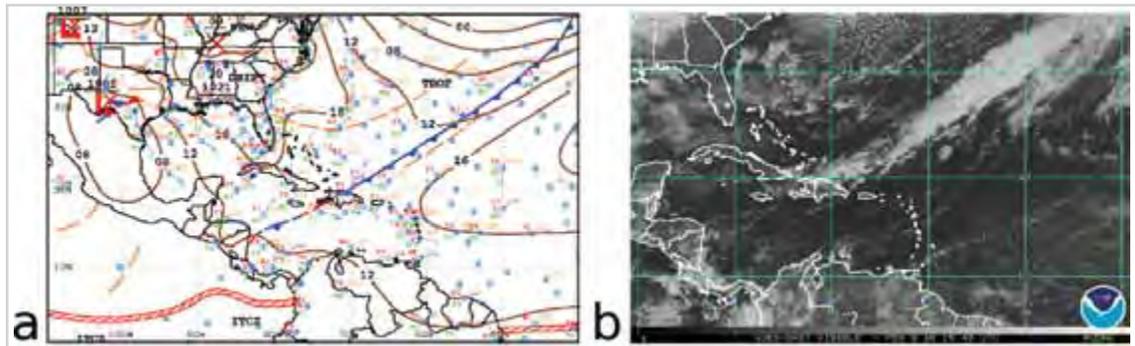


Figura 3. a. Mapa de presión en superficie del 8 de febrero de 2010 mostrando un frente frío (línea azul con picos) que se convierte en línea de cortante en su extremo suroeste (línea a trazos rojos y azules); b. Imagen del espectro visible coincidente con el mapa. Tomadas de <http://www.nhc.noaa.gov/>

En la figura 3a se muestra un mapa con líneas de presión en superficie y un frente frío que se convierte en línea de cortante (símbolo de frente estacionario), entre la isla La Española y Nicaragua. La figura 3b muestra la fotografía de satélite del espectro visible correspondiente a la figura 3a. En la porción que corresponde al frente frío, la banda nubosa frontal está bien definida con nubosidad compacta, mientras que en la porción correspondiente a la línea de cortante la nubosidad casi desaparece. Aún así, en la mayoría de las ocasiones la línea de cortante sigue

produciendo tiempo atmosférico importante, que debe ser vigilado. La creencia algo generalizada de que en los trópicos las líneas de cortante son menos activas que los frentes fríos y la mayor dificultad para darles seguimiento, pueden ser algunas de las razones para que no se le haya prestado mucha atención en estudios anteriores, en lo que compete al área de Centroamérica y el Caribe. Sin embargo, para los países localizados en estas zonas, las mismas resultan de gran interés el comportamiento del tiempo invernal.

Hay un aspecto en el comportamiento de los EF's sobre Centroamérica y el Caribe, que parece ser muy propio de esta área geográfica y que debe ser aclarado en este estudio. Es muy típico ver que los vientos de ataque de la masa fría sobre la masa cálida de los alisios se adelantan o se ubiquen más al sur, con respecto a la posición del frente frío, del frente en disolución o del frente estacionario. Este fenómeno local parece estar motivado por la forma de la orografía al oeste de la masa de aire frío, compuesta por el sistema montañoso que recorre Centroamérica de norte a sur, el cual confina las masas de aire frío por dicho flanco y deforma el campo espacial de la presión. Al deformarse el campo de la presión, se deforma también el campo del viento, produciéndose el referido fenómeno. Este hecho obliga a que en muchos casos se registre la disipación del EF en un punto algo más al sur de donde los centros internacionales de análisis meteorológico ubican el símbolo que define al EF (frente frío, frente en disipación o frente estacionario). Por ejemplo, en un momento dado los análisis sinópticos podrían ubicar el símbolo de un frente estacionario sobre el noreste de Honduras (NE Hon, figura 4), sin embargo, el viento delantero o de ataque de la masa fría podría estar alcanzando para ese entonces el sureste de Nicaragua (SE Nic). En tal caso, en este estudio se anotó que el EF alcanzó hasta el sureste de Nicaragua. Al observar mapas sinópticos sobre áreas subtropicales y tropicales abiertas en los océanos Pacífico y Atlántico, no se aprecia este fenómeno, o sea los campos de presión y viento se corresponden bastante bien dentro de los preceptos de la dinámica atmosféricas de dichas áreas. De allí que la singularidad parezca ser propia de la zona de estudio. Si este hecho no se tomara en cuenta en los análisis sinópticos del día a día en Centroamérica y el Caribe, sería difícil explicar muchas veces porque el viento de la masa fría y sus efectos tales como lluvias o caídas de temperatura, se producen antes de la llegada de un frente frío o de una línea de cortante a un determinado punto.

## 2. Metodología

### 2.1. Fuente de los Datos

Para la detección de los EF's se utiliza la Base de Datos del Reanálisis del National Center for Environmental Prediction (NCEP) y el National Center for Atmospheric Research (NCAR) - (Imágenes provistas por la NOAA/ESRL División de Ciencias Físicas, Boulder, Colorado, sitio Web <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>). Algunos de los índices climáticos fueron confeccionados a partir de la página: Índices Climáticos: Series Mensuales de Tiempo Atmosféricas y Oceánicas (Reanálisis del NCEP).

### 2.2. Método de trabajo

Los EF's se identifican en mapas meteorológicos del Reanálisis del NCEP/NCAR, utilizando las horas sinópticas 00, 06, 12 y 18 UTC. Para aceptar la incorporación de un EF en la base de datos, la masa migratoria de aire frío (anticiclón migratorio) debe provenir de las regiones fuente: marítimo Polar (mP), continental Ártica (cA) y continental Polar (cP) (ver figura 1) y debe ingresar al norte de Centroamérica por un periodo mínimo de doce horas.

Se analizaron treinta y siete temporadas invernales de noviembre a febrero, entre los años 1975 y 2012. Para cada EF se registraron los siguientes datos: hora de entrada al norte de Belice, valor del centro de la alta presión migratoria que produjo el EF independientemente del lugar donde este centro se ubicó, hora en que el EF dejó de avanzar y lugar donde detuvo su avance. Para indicar el desplazamiento latitudinal que alcanzaron los EF's, se utilizaron diecinueve puntos de referencia sobre la costa del Caribe (figura 4), iniciando en Belice y terminado en Guyana, tal como sigue: Bel; NO, N y NE de Honduras; NE, E y SE de Nicaragua; NE y E de Costa Rica; O, N y E de Panamá; NO, N y NE de Colombia; NO, N y NE de Venezuela y Guy (Guyana). El EF se registra en el punto que más se aproxima.



Figura 4. Puntos utilizados en la costa del Caribe para determinar la penetración de los EF's.

Se anotó también, el tiempo transcurrido desde que un EF entró al norte de Belice y el momento en que se detuvo. Las orientaciones de las divisorias entre las masas de aire extratropical y tropical sobre la región de estudio fueron variadas, siendo la orientación noreste-suroeste la más común, similar a la mostrada en la figura 3a.

Se reconocieron además en el estudio, tres tipos de situaciones que generan dudas al momento de identificar y clasificar los EF's. El primer caso se presenta cuando el borde de ataque de la masa de aire frío, apenas si se asoma al sector norte de la región de estudio. La duda que surge a veces es si el EF penetró a la zona de trabajo por el periodo mínimo de tiempo de 12 horas, requisito de admisión de los EF's en la base de datos. El segundo caso que genera dudas, es cuando una masa de aire frío que ha entrado y permanecido dentro de la región de estudio, es alcanzada por una segunda masa fría. En ocasiones es posible clasificar la segunda masa como un EF independiente, en otras, hay que tomar la situación como el refuerzo de la primera masa, sin incluir un segundo EF. El tercer caso surge sobre todo a finales del otoño del hemisferio norte, cuando aún algunas perturbaciones tropicales como depresiones tropicales, tormentas tropicales o huracanes se dirigen hacia el Golfo de Méjico, bordeando la costa del Caribe de Centroamérica. Suele suceder que cuando la perturbación tropical se dirige hacia el norte, una masa de aire frío se desplaza simultáneamente hacia el Golfo de Méjico. Entonces, lo que inicia como

una banda de alimentación del disturbio tropical, se puede transformar en una banda con características frontales sobre la porción norte de Centroamérica; algunas veces es claro clasificarlo como EF, otras no, dependiendo de cada situación específica.

### 3. Resultados

#### 3.1. Resultados estadísticos

En el cuadro 1 se muestran los resultados estadísticos obtenidos al identificar los EF's que ingresaron a Centroamérica y el Caribe durante las treinta y siete temporadas invernales del hemisferio norte, comprendidas entre los años 1975 y 2012. En el periodo de las treinta y siete temporadas se cuantificaron 600 EF's, con un valor promedio de 16,2 eventos por temporada. El mes que más EF's aportó fue enero, con un total de 4,8 en términos absolutos, lo cual equivale a un 30% del total por temporada. La temporada más activa fue la de 1980-1981 con 24 EF's y la menos activa fue la de 1998-1999 con únicamente 11. El aporte de 8 EF's en el mes de enero de 1981, convierte a dicho mes en el más activo de los ciento cuarenta y ocho meses contenidos en la serie de treinta y siete temporadas. Por otra parte, 3 meses de noviembre, a saber: 1978, 1985 y 1986, mostraron la penetración de un único EF. Un detalle no mostrado en el cuadro 1 fue que en las treinta y siete temporadas, únicamente un EF alcanzó Guyana, el día 19 de enero de 1980.

Cuadro 1. EF's que ingresaron al Caribe y Centroamérica entre las temporadas 1975-76 y 2011-2012

Temporada	Total por temporada	Noviembre		Diciembre		Enero		Febrero	
		# EF's	%	# EF's	%	# EF's	%	# EF's	%
1975-1976	15	2	13	4	27	5	33	4	27
1976-1977	19	5	26	5	26	5	26	4	21
1977-1978	16	2	13	4	25	5	31	5	31
1978-1979	14	1	7	3	21	7	50	3	21
1979-1980	17	3	18	4	24	4	24	6	35
1980-1981	24	4	17	7	29	8	33	5	21
1981-1982	14	4	29	4	29	4	29	2	14
1982-1983	15	3	20	4	27	4	27	4	27
1983-1984	18	2	11	4	22	7	39	5	28
1984-1985	15	4	27	2	13	6	40	3	20
1985-1986	17	1	6	6	35	6	35	4	24
1986-1987	13	1	8	3	23	7	54	2	15
1987-1988	19	4	21	5	26	5	26	5	26
1988-1989	13	4	31	4	31	2	15	3	23
1989-1990	15	3	20	5	33	4	27	3	20
1990-1991	13	4	31	3	23	2	15	4	31
1991-1992	17	2	12	4	24	7	41	4	24
1992-1993	15	3	20	4	27	3	20	5	33
1993-1994	15	2	13	5	33	5	33	3	20
1994-1995	18	3	17	4	22	7	39	4	22
1995-1996	17	6	35	3	18	5	29	3	18
1996-1997	14	3	21	4	29	4	29	3	21
1997-1998	16	4	25	4	25	4	25	4	25
1998-1999	11	2	18	3	27	3	27	3	27
1999-2000	15	5	33	3	20	4	27	3	20
2000-2001	17	5	29	6	35	4	24	2	12
2001-2002	16	4	25	3	19	3	19	6	38
2002-2003	20	5	25	5	25	7	35	3	15
2003-2004	19	4	21	6	32	5	26	4	21
2004-2005	15	4	27	5	33	3	20	3	20
2005-2006	18	5	28	5	28	4	22	4	22
2006-2007	15	4	27	3	20	4	27	4	27
2007-2008	17	5	29	4	24	5	29	3	18
2008-2009	18	5	28	5	28	4	22	4	22
2009-2010	18	3	17	3	17	6	33	6	33
2010-2011	17	2	12	7	41	5	29	3	18
2011-2012	15	5	33	4	27	3	20	3	20
Totales	600	128	--	157	--	176	--	139	--
Promedio 37 temporadas	16,2	3,4	21	4,2	26	4,8	30	3,8	23

La figura 5 muestra un resumen estadístico del comportamiento de los EF's en la zona de estudio. En la 5a se observan los promedios del cuadro 1; en 5b se muestra la cantidad de EF's y sus porcentajes según tres zonas escogidas, notándose que el 86% de los EF's se disipan entre Belice y el Norte de Panamá y apenas un 14% logran penetrar más

profundamente hacia el sector oriental del Caribe (los EF's contabilizados sobre los límites inferiores de las zonas escogidas se contabilizan en la región de la izquierda). La distribución de los EF's por meses y zonas aparecen en la figura 5c, mientras que la figura 5d muestra tres zonas donde preferiblemente detienen sus avances los EF's (cementeros de EF's).

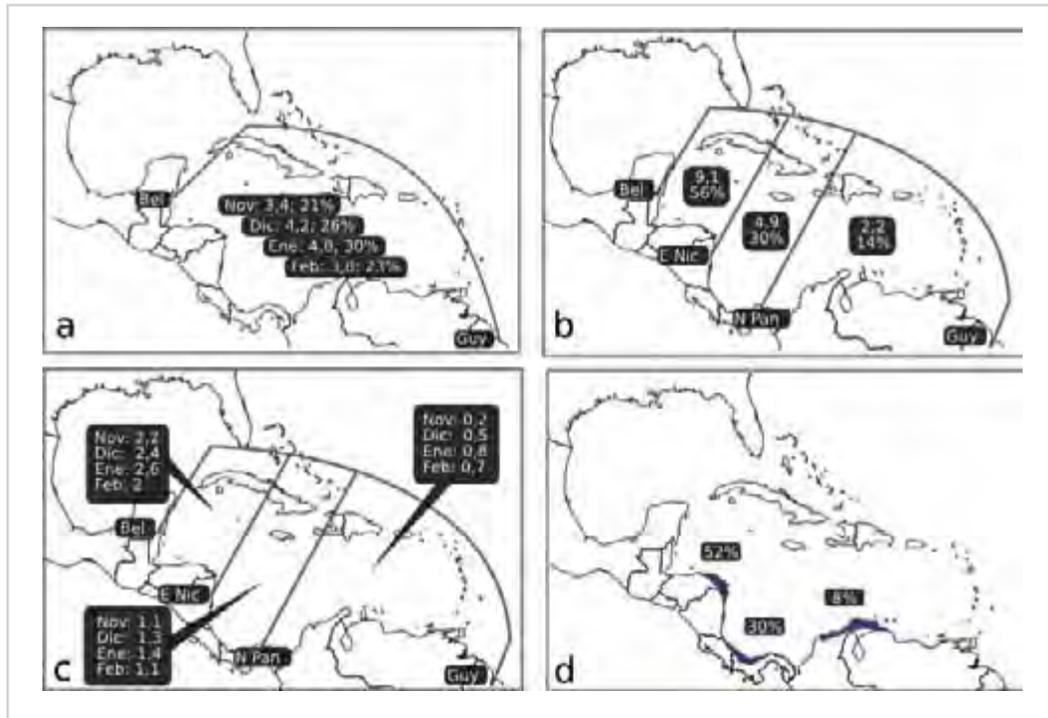


Figura 5. a- Promedio mensual de EF's; b- EF's según tres zonas seleccionadas; c- EF's por zonas y meses; d- zonas donde tienden a detenerse los EF's con mayor frecuencia.

En total esas tres zonas contabilizan el 90% de los EF's que penetraron en el periodo de treinta y siete temporadas invernales, el restante 10% se reparte entre las zonas no marcadas desde el norte de Belice hasta Guyana. La primera zona va del Norte de Honduras al Este de Nicaragua, en donde se detiene el 52% de los EF's; la segunda del Noreste de Costa Rica al Norte de Panamá y la tercera, del Norte de Colombia al NO de Venezuela. Es probable que los EF's tiendan a detenerse en esas zonas por la forma continental y la orografía de la región. Los EF's, al internarse desde Belice hacia el sureste, se encuentran con un primer obstáculo montañoso pronunciado con orientación

este-oeste sobre la costa norte de Honduras, lo cual impone una dificultad al desplazamiento de las masas de aire frío hacia el sur. Luego, el sistema montañoso reaparece en forma importante por sus alturas sobre Costa Rica y Panamá después de pasar la depresión orográfica asociada con el Lago de Nicaragua, aspecto que daría cuenta de la segunda región donde tienden a detenerse los EF's. La tercera región de disipación de EF's estaría relacionada con el extremo norte de la Cordillera de los Andes sobre Colombia y Venezuela. Schultz y otros (1998) mencionan cuatro bandas latitudinales, donde los frentes fríos tienden a alcanzar su máxima penetración ecuatorial: 16°N,

13-14°N, 11°N y 7-8°N. Con excepción de la zona en 11°N, la cual es bastante plana y para la que Schultz y otros no encontraron una explicación satisfactoria del porque los frentes tienden a detenerse allí, las restantes tres zonas están en buen acuerdo con este trabajo. La zona en 11°N aparece en este estudio, como una zona en donde se detienen muy pocos EF's y este comportamiento estaría asociado a la depresión que allí exhibe el sistema montañoso.

Al clasificar los EF's por el valor central de presión en superficie que produce el EF (anticiclón migratorio), se obtiene que un 70% muestran valores centrales de presión que oscilan entre 1025 y 1040 hPa, como se observa al sumar las casillas resaltadas del cuadro 2. De los seiscientos EF's identificados en las treinta y siete temporadas, únicamente cuarenta y nueve mostraron presiones centrales menores a 1020 hPa y 18 superaron los 1040 hPa.

Cuadro 2. EF's que ingresaron al Caribe y Centroamérica entre las temporadas 1975-76 y 2011-2012

Intervalo de presión (hPa)	≤ 1020	≥1020 <1025	≥1025 <1030	≥1030 <1035	≥1035 <1040	≥1040 <1045	≥1045 <1050	≥1065
Número de EF's	49	115	181	149	88	13	4	1
Porcentaje de EF's	0,08	0,19	0,30	0,25	0,15	0,02	0,01	0,00

En el cuadro 3 se muestra el tiempo que registran los EF's, desde el momento en que ingresan a Belice hasta el momento en que se detienen en algún lugar, lo cual se aproxima con las horas sinópticas

principales de las 00, 06, 12 y 18 UTC (los tiempos de permanencia de los EF's después de que se detienen, no se registran en el estudio).

Cuadro 3. EF's que ingresaron al Caribe y Centroamérica entre las temporadas 1975-76 y 2011-2012

Horas que toma la penetración	12	18	24	30	36	42	48
Número de EF's	137	185	125	85	38	20	8
Porcentaje de EF's	23	31	21	14	06	03	01

El 89% de los EF's (suma de las casillas resaltadas), registran tiempos de penetración que van de doce a treinta horas y apenas un 11% registraron periodos de treinta y seis horas o más. Con base en datos no mostrados, se obtiene que los periodos de penetración de doce horas agrupan EF's que por lo general apenas si alcanzan el NE de Honduras, aquellos con periodos de penetración de veinticuatro a treinta y seis horas alcanzan entre Costa Rica y el oeste de Colombia y los EF's que se internan de allí hacia el este, por lo general toman más de treinta

y seis horas en sus recorridos. La velocidad de penetración está muy ligada a la intensidad de los vientos alisios. Vientos alisios fuertes (débiles) dan cuenta de velocidades bajas (altas) de penetración. En el estudio de la tormenta del siglo en marzo de 1993 de Schultz y otros (1997), el frente frío en el borde de ataque de la masa fría penetró del noreste de Honduras al este de Panamá en veinticuatro horas.

Las horas de entrada de los EF's al norte de Centroamérica, se recogen en el cuadro 4. Llama la

atención que el mayor número de EF's entra hacia la media noche (06 UTC) e inicio de la mañana, disminuyendo hacia el medio día y el atardecer. No queda claro si esto es un resultado meramente casual

o si está relacionado con alguna característica invernal, entre el Golfo de Méjico y la parte continental de la Península de Yucatán.

Cuadro 4. EF's que ingresaron al Caribe y Centroamérica entre las temporadas 1975-76 y 2011-2012

Hora UTC	06	12	18	00
Número de EF's	173	167	153	107
Porcentaje de EF's	0,29	0,28	0,26	0,18

### 3.2. Comparación de estadísticas con otros estudios

En este apartado se comparan los resultados obtenidos por DiMego y otros (1976), Henry (1979) y Reding (1992) con los de este estudio, resaltando que estos tres estudios utilizan el concepto de frente frío, únicamente, sin tomar en cuenta las líneas de cortante. Aunque las metodologías aplicadas en los tres estudios son similares conceptualmente, sí presentan diferencias en las magnitudes de las variaciones de los parámetros analizados, por ejemplo las caídas de temperatura en determinado intervalo de tiempo; presumiblemente esta sería la causa para que aparezcan algunas diferencias importantes en los resultados entre los estudios.

Como hipótesis de trabajo para este estudio se planteó que los conteos de frentes fríos deberían ser siempre menores o al máximo iguales en cantidad a los conteos de EF's, ya que estos últimos incluyen tanto los frentes fríos como las líneas de cortante. DiMego y otros (1976), utilizando mapas de superficie del hemisferio norte del Servicio Meteorológico de los Estados Unidos (00, 06, 12, 18 UTC), identificaron los frentes fríos, cálidos, estacionarios y ocluidos que incursionaron en la región comprendida entre 10-30°N y 60-105°O, en un periodo de ocho temporadas entre 1965 y 1972 (es importante aclarar que los frentes cálidos y ocluidos solo se presentan al norte del Mar Caribe y por tanto no producen discrepancias en las comparaciones llevadas a cabo aquí). Para la cuantificación utilizaron cuadrados de 2,5° de latitud-longitud y se obtuvieron mapas de frecuencia media

mensual y duración de los frentes que pasaron por el área de estudio.

Henry (1979) utilizando un conjunto de datos de diez temporadas entre los años 1967 y 1977, determinó las cantidades de frentes fríos que entraron al Golfo de Méjico y al Caribe. En el conteo se filtraron eventos de retrogresión (frentes que se devuelven) y frontólisis (debilitamiento del frente que generalmente termina en línea de cortante) antes de entrar al Caribe. Reding (1992) analizó once temporadas de octubre a marzo entre 1979 y 1990 y cuantificó los frentes fríos que alcanzaron el Golfo de Méjico y continuaron su curso hacia Centroamérica y el Caribe. En su estudio utilizó datos de la estación de Mérida, Méjico, análisis de imágenes de satélite y análisis de superficie del NCEP. El paso de los frentes por Mérida lo estableció mediante los siguientes criterios: a) una caída en la temperatura máxima diaria en superficie en la estación de Mérida mayor o igual a 4°C en un periodo de 48 horas; b) vientos nortes (300° - 30°) sostenidos por más de 24 horas en el mismo periodo. La incursión de los frentes hacia el sur de Mérida los determinó utilizando imágenes satelitales tipo GOES. El cuadro 5 muestra algunos de los resultados obtenidos en cada uno de los estudios e incluye los resultados obtenidos en este trabajo para el subperiodo 1979-1990, en donde las temporadas fueron extendidas de octubre a marzo para fines de comparación (la serie total de 1975 a 2012 utiliza temporadas de noviembre a febrero).

Cuadro 5. Comparación entre estudios que utilizan el criterio de frente frío y éste que utiliza el criterio de EF para la cuantificación de las masas de aire frío que incursionan en Centroamérica y el Caribe (\* las cifras de DiMego fueron estimadas de sus mapas de frecuencia de frentes)

	Promedio de Frentes Fríos que sobrepasan Mérida, Méjico	Promedio de Frentes Fríos que cruzan 15 °N	Promedio de Frentes Fríos que cruzan 10 °N
DiMego* (1965-72)	26,4	8,9	3
Henry (1967-77)	18,1	7	0,7
Reding (1979-90)	16,1	12	4,3
Promedio DiMego + Henry + Reding	20,2	9,3	2,7
	Promedio de EF's que alcanzan el norte de Belice	Promedio de EF's que cruzan 15 °N	Promedio de EF's que cruzan 10 °N
Zárate (1979-90)	21,4	14,4	6,2

Las cifras de Henry y Reding en la localidad de Mérida, son relativamente parecidas y las diferencias entre sus conteos pueden surgir de la cuantía en la variación de los parámetros utilizados en la identificación de los frentes fríos. DiMego por su parte, supera en 8 y 10 eventos fríos en Mérida las cifras de Henry y Reding, respectivamente (cifras redondeadas). Estas diferencias que sí parecen importantes, pueden deberse al hecho de que DiMego contabilizó los frentes en cuadrados de 2,5° de latitud-longitud y sus cifras podrían incluir frentes ligeramente al norte de Mérida, no contabilizados por los otros dos estudios.

Las penetraciones hasta los 15 y 10°N en los tres estudios, parecen menos conciliables, considerando las diferencias numéricas que muestran. De nuevo, posiblemente ello resulte de los criterios utilizados, sobre todo teniendo en cuenta que los frentes fríos pierden muchas de las características que los identifican al desplazarse por el Caribe. Para tener una cifra única a manera de instrumento de trabajo, se promediaron los resultados de DiMego, Henry y Reding en Mérida, 15 y 10°N (cuadro 5) y se compararon con los promedios de los EF's obtenidos en este trabajo para un subconjunto de datos en el periodo 1979-90, con temporadas de octubre a marzo. Los EF's contabilizados en el norte de Belice en este trabajo, superan en una unidad aproximadamente al promedio de frentes fríos detectados en Mérida,

lo cual puede considerarse admisible. Luego de los 14,4 EF's que sobrepasan los 15°N hacia el sur, aproximadamente 9 serían frentes fríos y 5 líneas de cortante. De los 6,2 EF's que sobrepasan los 10°N hacia el sur, aproximadamente 3 serían frentes fríos y 3 serían líneas de cortante. Si bien estas cifras son aproximadas, dan una idea general de lo que se puede esperar por temporada de octubre a marzo en cuanto a frentes fríos y líneas de cortante en el área de Centroamérica y el Caribe.

Schultz y otros (1998) generaron 6 tipos de entradas de frentes fríos al Caribe utilizando la base de datos de Reding (1992). A la vez, como verificación independiente, analizaron datos meteorológicos de la estación de Mérida, Méjico entre los años 1957 y 1989 para temporadas de octubre a marzo. Identificaron el paso de trescientos sesenta y tres frentes fríos, promediando once frentes fríos por temporada. En un periodo de tiempo en que los estudios de Reding (1992) y Schultz y otros (1998) se traslapan, Reding incluye ochenta eventos no cuantificados por los otros autores y éstos incluyen veintisiete casos no cuantificados por Reding. Ello se debe principalmente a la diferencia en los criterios en las magnitudes de las caídas de las temperaturas, las escalas temporales en que éstas se producen y en las consideraciones sobre radio sondeos faltantes. No obstante, Schultz y otros (1998) indican que para

periodos largos de tiempo se considera que ambos resultados son consistentes.

El Servicio Meteorológico de Guatemala ha venido identificando incursiones de masas de aire polar con una metodología desarrollada por Herrera (2007), con base en un Índice de Anomalía de Presión Atmosférica. El índice se basa en datos de la estación sinóptica de Puerto Barrios, localizada en la costa caribeña de Guatemala, en el Golfo de Honduras. El índice captura anomalías de presión subdivididas en siete categorías, desde una anomalía normal hasta una extrema. En años recientes en que se han venido identificando los EF's en tiempo real, durante las épocas invernales, tanto con el método utilizado en Guatemala como con el método utilizado en este estudio, los resultados obtenidos han sido consistentes.

### 3.3. Temperaturas árticas y hielos marinos árticos y sus relaciones con los EF's

De acuerdo con Thompson y Wallace (1999) y Wallace (2000), durante la fase en que el índice de la Oscilación Ártica (AO) es positivo, se sitúa una baja presión fría sobre el polo, rodeada de un cinturón de vientos oestes fuertes en la latitud de 55°N. Entre 35 y 55°N prevalecen condiciones de altas presiones cálidas, mientras que en las zonas tropicales se presentan anomalías frías acompañadas por reforzamiento de

los vientos alisios en niveles bajos, especialmente en el sector del océano Atlántico. En esta fase, el aire muy frío de las regiones polares no se extiende tanto hacia la parte central de Norteamérica. Por el contrario, durante la fase negativa de la AO, el aire muy frío se extiende hacia la parte central de los Estados Unidos, hay mayor incidencia de días más fríos de lo normal, mayor número de días con fenómeno de bloqueo, mayor cantidad de frentes fríos, bajas temperaturas, precipitaciones engelantes y vientos fuertes.

En atención a lo anterior, en el presente estudio se hace un análisis de los EF's que alcanzan Centroamérica y el Caribe y se comparan con el comportamiento de las temperaturas en el cinturón Ártico entre 70-90°N. Para relacionar las temperaturas árticas con los EF's se construyó el cuadro 6, en donde se seleccionaron las temporadas cuyas anomalías muestran desviaciones de 2 ó más EF's, ó de -2 ó menos con respecto al promedio de 16,2 por temporada de noviembre a febrero. Las desviaciones se transcribieron sobre la figura 6a (Climate Research Unit, 2012) donde las anomalías mensuales de la temperatura ártica (línea azul) están calculadas con respecto al periodo 1961-1990, sugerido por la Organización Meteorológica Mundial y su promedio móvil para trece meses aparece con una línea roja. La figura original se recortó para que iniciara en el año 1975 y coincidiera con el inicio de la serie de los EF's, así mismo se le agregaron líneas horizontales mostrando las anomalías de las temperaturas árticas de 0,5°C, 1°C, 1,5°C y 2°C, para una mejor visualización.

Cuadro 6. Temporadas cuyas anomalías muestran desviaciones de 2 ó más, ó de -2 ó menos EF's con respecto al promedio

Temporada	76-77	78-79	80-81	81-82	83-84	86-87	87-88	88-89	90-91	94-95	96-97	98-99	02-03	03-04	05-06	08-09	09-10
No. EF's por temporada	19	14	24	14	18	13	19	13	13	18	14	11	20	19	18	18	18
Desviación positiva	3		8		2		3			2			4	3	2	2	2
Desviación negativa		-2		-2		-3		-3	-3		-2	-5					

También se agregó la línea vertical, para mostrar el momento en que la temperatura ártica supera sostenidamente el nivel de  $0,5^{\circ}\text{C}$ . En el periodo 1975 - 2011, se distinguen dos periodos bien diferenciados. Entre 1975 y la temporada 98-99, el promedio móvil de trece meses de las temperaturas árticas superó por periodos cortos el valor de  $0,5^{\circ}\text{C}$ , sin sobrepasar en ningún momento el valor de  $1^{\circ}\text{C}$ ; a partir de dicha temporada el valor de  $0,5^{\circ}\text{C}$  se superó sostenidamente y en la primera mitad del año 2012 ya había alcanzado el valor de  $2^{\circ}\text{C}$ . Es a partir de la temporada 1999-2000 cuando dejaron

de presentarse anomalías negativas con  $-2$  EF's o menos (en la temporada 10-11 la anomalía fue de 1 y en la temporada 11-12 fue de  $-1$ ). Además, entre las temporadas de 75-76 y 98-99 inclusive, se encuentra una correspondencia bastante buena entre las desviaciones positivas y negativas de los EF's y el comportamiento de las temperaturas árticas. Las desviaciones positivas tienden a ubicarse en las pendientes positivas y crestas del promedio móvil de trece meses y tienden a asociarse también, con picos de los valores mensuales de las temperaturas durante las temporadas individuales (línea azul).

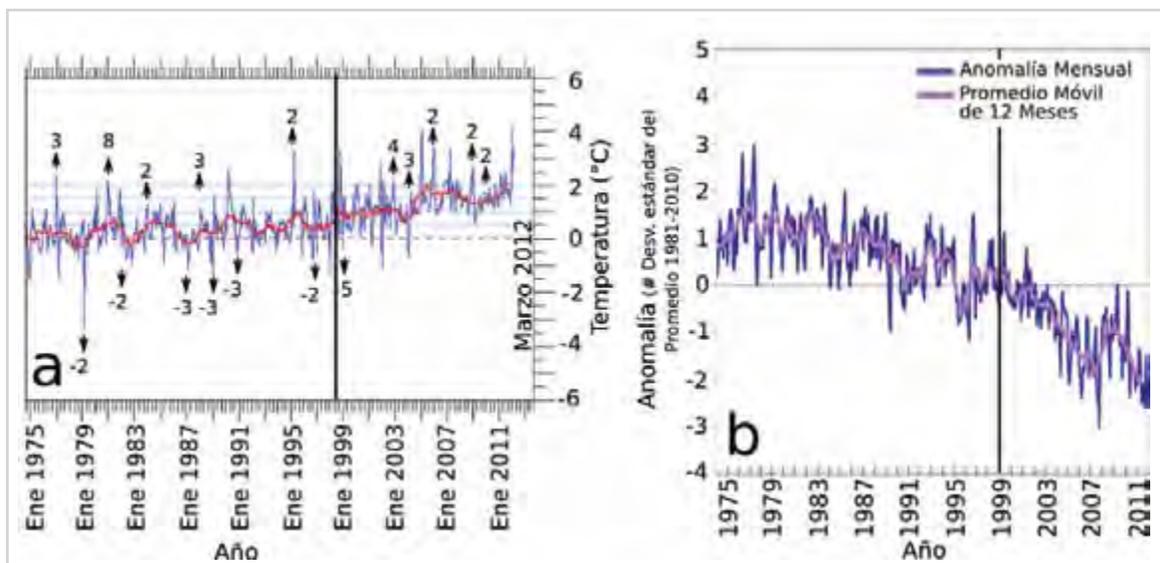


Figura 6. a- Anomalías mensuales de la temperatura ártica en grados Celsius (azul) y promedio móvil de 13 meses (rojo); los números positivos y negativos indican desviaciones de EF's por temporada ubicadas por las flechas; b- Anomalías mensuales de la extensión de los hielos marinos árticos en millones de km cuadrados (azul) y en violeta el promedio móvil para 12 meses.

Las desviaciones negativas muestran comportamiento inverso, se ubican preferiblemente en gargantas o pendientes negativas de la curva del promedio móvil de trece meses y se asocian con caídas de los valores mensuales de las temperaturas durante las temporadas. Este comportamiento está muy en concordancia con lo apuntado por Thompson y Wallace (1999), en el sentido de que las temperaturas árticas altas debilitan el vórtice circumpolar y propician un mayor número de masas de aire frío, escapando de latitudes altas. A partir de la temporada 99-00 en que las temperaturas árticas se disparan

hacia arriba, esa asociación no es tan clara y todas las temporadas muestran cantidades de EF's cercanas al promedio o mayores como lo muestra el cuadro 1.

Resulta interesante también, comparar el comportamiento de los EF's con el comportamiento de las anomalías de la extensión de los hielos marinos árticos (millones de km cuadrados) mostrado en la figura 6b para el periodo entre 1975 y 2011 (National Snow and Ice Data Center, 2012). El promedio móvil de las anomalías de los hielos marinos árticos se vuelven sostenidamente negativas y en descenso

a partir del año 1999 aproximadamente, fecha en la cual las anomalías de las temperaturas árticas superan los  $0.5^{\circ}\text{C}$  y siguen en ascenso. A partir de esa fecha los EF's dejan de mostrar anomalías negativas de -2 o menos por temporada.

La relación entre los hielos marinos y las temperaturas árticas e interacciones con algunas configuraciones atmosféricas se reportan en diferentes trabajos. Manak y Mysak (1989) correlacionaron los hielos marinos y la temperatura en superficie en tres regiones al norte de Canadá (Mar de Beaufort, Bahía de Hudson, Bahía de Buffin/Mar de Labrador), encontrando correlaciones inversas significativas. Como los hielos marinos actúan como reservorios térmicos, encontraron también que las anomalías de los hielos marinos se retrasan ("lag" en inglés) con respecto a las anomalías de la temperatura, aunque los tiempos de retraso varían según las localidades geográficas. Por ejemplo, en la región de la Bahía de Buffin/Mar de Labrador no existe retraso del todo, mientras que en el Mar de Beaufort el retraso es de 7 meses. James y Simmons (2010) encontraron que el calentamiento en el Ártico es más intenso en superficie la mayor parte del año y es consistente con la disminución observada en la cobertura de los hielos marinos en las últimas décadas. Chiang y Bitz (2005) encontraron, mediante modelaje, que al incrementar la cobertura de hielo en ambos hemisferios influenciaba fuertemente la zona de convergencia intertropical sobre los océanos, al modificar el balance de radiación en el tope de la atmósfera y el transporte de energía hacia el polo.

Francis, J; Chan, W; Leathers, D; Miller, J. & Veron, D. (2009) encontraron que durante el periodo 1979-2006, en que se registraron cantidades bajas inusuales en los hielos marinos árticos durante los veranos, el chorro polar se debilitó durante los otoños e inviernos. Esto debido a una reducción de 10 a 20% en la diferencia de temperatura entre el Ecuador y el Polo Norte. Al debilitarse el chorro polar, produjo debilitamiento en las bajas de las Aleutianas e Islandia, lo que resultó en una AO más negativa, permitiendo que el aire frío abandonara las zonas polares e irrumpiese en Europa y el este de los Estados Unidos con inviernos más severos. Lo anterior haría suponer, que el mayor número de EF's a partir de la temporada 1999-2000 está relacionado

con este comportamiento de los hielos marinos y las temperaturas árticas.

### 3.4. Temporadas altas y bajas en el número de EF's y sus relaciones con la AO

De acuerdo a Thompson y Wallace (1999) la AO tiende a ser positiva con temperaturas árticas altas y negativa cuando esas temperaturas son bajas. Considerando lo antes analizado en cuanto al comportamiento de los EF's y las temperaturas árticas, se procedió a obtener las anomalías de la AO para las temporadas altas y bajas en cuanto al número de EF's (figura 7) utilizando los datos del cuadro 6, con el fin de buscar alguna relación entre los EF's que alcanzan Centroamérica y el Caribe y dicha oscilación.

Cuando una temporada es alta (baja) en el número de EF's, por lo general son uno o dos meses únicamente los que aportan mayor (menor) cantidad con respecto a sus valores mensuales promedio (figura 5a). Si se utilizaran los 4 meses de las temporadas para calcular los valores medios de la AO, se suavizarían los campos y se dificultaría el análisis; es por ello que la figura 7 está elaborada con subperiodos a lo interno de las temporadas. Por ejemplo, la temporada 1987-1988 muestra en el cuadro 6 una desviación positiva de 3 EF's; en este caso los meses utilizados en la elaboración de la figura 7 fueron noviembre de 1987 y febrero de 1988, ya que fueron los que más EF's aportaron.

La figura 7a muestra los valores mensuales promedios de la AO para los meses que aportan el mayor número de EF's por temporada. De las diez temporadas con anomalías positivas de EF's (cuadro 6), siete se asocian con valores negativos de la AO y tres muestran valores positivos pequeños, lo que significa que los valores positivos bajos y los negativos de la AO favorecen la incursión de EF's hasta Centroamérica y el Caribe. De las 7 temporadas bajas en EF's (figura 7b), ninguna muestra valores negativos de la AO, lo cual indica que los valores positivos de la AO durante los inviernos boreales, tienden a desfavorecer la incursión de EF's en el área de estudio.

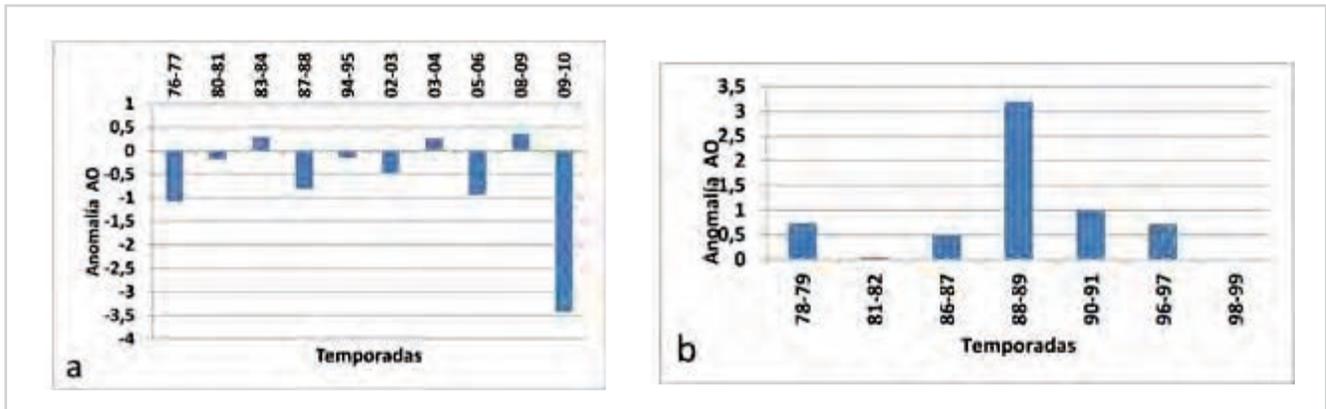


Figura 7. a- Anomalías de la AO en meses seleccionados para temporadas altas en EF's; b- igual pero para temporadas bajas.

De nuevo lo mostrado en la figura 7, parece estar en buen arreglo con los señalamientos de Thompson y Wallace (1999) y Wallace (2000), en el sentido de que las temperaturas árticas altas (bajas) debilitan (fortalecen) el vórtice circumpolar, dejando escapar (reteniendo) el aire frío. De acuerdo a lo encontrado en este estudio, ese mecanismo sería el responsable en buena medida del comportamiento de los EF's que alcanzan Centroamérica y el Caribe.

### 3.5. Configuraciones atmosféricas para temporadas altas y bajas en el número de EF's

a. **Presión:** Las configuraciones atmosféricas de las anomalías de la presión en superficie para las temporadas altas en el número de EF's, resultan prácticamente inversas a las encontradas para las temporadas bajas. La figura 8 muestra los campos compuestos de estas anomalías (hPa), utilizando los mismos periodos de la figura 7. En la figura 8a para las temporadas altas, se notan dos rasgos que tienden a favorecer la incursión de los EF's hacia la región de estudio. El primero y que parece ser el fundamental, es que la presión está anómalamente baja en las vecindades de la costa este de Canadá y Estados Unidos, con proyección hacia el Atlántico subtropical y tropical.

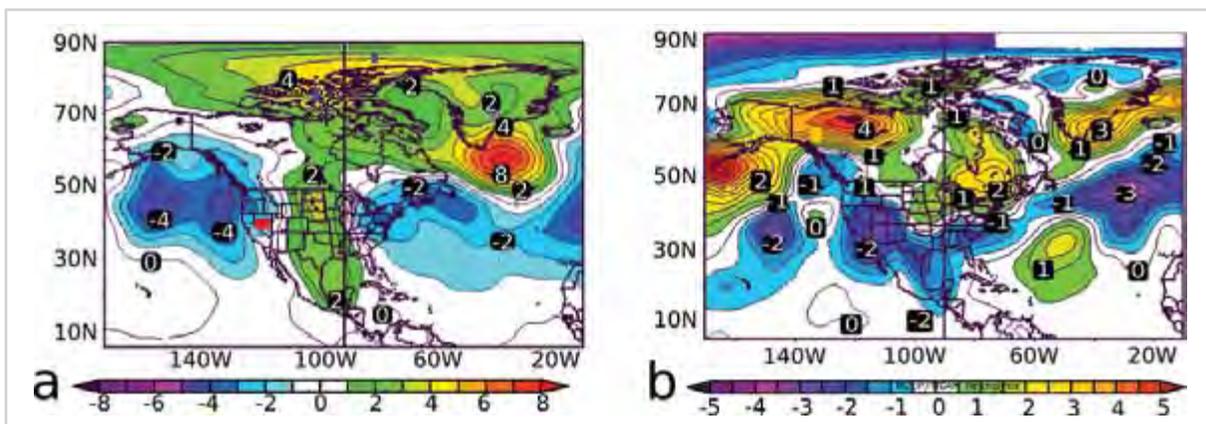


Figura 8. a- Anomalías compuestas de la presión en superficie (hPa) para temporadas altas en EF's; b- para temporadas bajas.

El segundo rasgo es que se presenta una anomalía de baja presión en las vecindades del océano Pacífico, que limita con la costa oeste de Estados Unidos y Canadá, con proyección hacia Alaska. De esta forma las masas de aire frío se deslizan por la parte central de Canadá y Estados Unidos, formando un anticiclón relativo en las anomalías de la presión, cuya porción sur alcanza Centroamérica y el Caribe, funcionando como mecanismo impulsor de los EF's. Francis et al (2009) indican que estos rasgos de anomalías de presión aparecen cuando las bajas de Islandia y las Aleutianas están debilitadas, lo que resulta en una AO más negativa.

En el caso de las temporadas bajas en EF's (figura 8b), el Atlántico central y la mitad oriental del Caribe experimentan anomalías positivas de la presión en superficie, mientras que en la región sur de Estados Unidos, Méjico, Centroamérica y la mitad occidental

del Caribe, aparecen anomalías negativas, patrón inverso al que se mostraba para las temporadas altas. Tal configuración inhibe la penetración de EF's a la región de estudio.

b. **Viento:** Las anomalías compuestas del viento en superficie se muestran en la figura 9, construida con los mismos periodos de la figura 7. Para las temporadas altas, las anomalías del viento resultan con componente del oeste en el Caribe y Atlántico tropical (figura 9a), lo que indica que el debilitamiento de los vientos alisios favorecen las incursiones de los EF' hasta Centroamérica y el Caribe. Ello propicia vientos nortes más intensos que bañan esta última región. Nótese que en este análisis no se hace mención a la profundidad latitudinal que alcanzan los EF's, aspecto que se retoma más adelante.

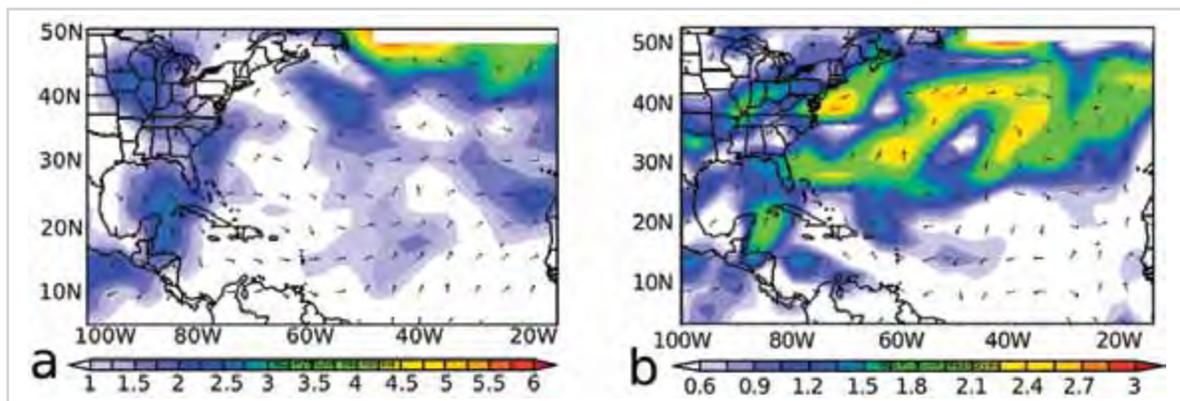


Figura 9. a- Anomalías del viento en superficie (m/seg) para temporadas altas en EF's; b- para temporadas bajas.

Para las temporadas bajas en EF's las anomalías del viento en el Caribe y buena parte del Atlántico, tienen componente del este (figura 9b). Esto indica que cuando el campo de los vientos alisios es más intenso de lo normal, los EF's experimentan oposición para penetrar hasta la región de estudio.

c. **Lluvia:** Las anomalías compuestas de la lluvia para los mismos periodos de la figura 7, se muestran en la figura 10. Para las temporadas altas en EF's (figura 10a) se nota una anomalía positiva, con una configuración lineal consistente con la estructura lluviosa de los frentes y las líneas

de cortante, que se extiende desde Honduras hacia la parte central de Cuba y de ahí continúa semiparalela a la costa este de los Estados Unidos. En lo que corresponde a la configuración lluviosa en la parte sur de Centroamérica y extremo occidental del mar Caribe, la lluvia puede tener al menos tres orígenes en las temporadas invernales: una primera contribución es debida a los EF's (frentes fríos más líneas de cortante) que penetran profundamente al Caribe; la segunda es por la formación de vaguadas prefrontales que se forman al oeste del Caribe, cuando se acerca un EF, sea que penetre o no hasta el sur del Caribe

(Zárate, 1977). La tercera se debe a la acción del Chorro de Bajo Nivel del Caribe (Amador, 1998; Amador y Magaña, 1999; Wang y Lee, 2007; Wang, 2000 Mora, 2008 y Martin y Schumacher, 2010), que genera un máximo de lluvia en esa zona. Por tanto, las lluvias que aparecen ahí no pueden identificarse en su totalidad como producto de la acción de los EF's, pero es razonable suponer que existe un grado importante de contribución por ese concepto.

La distribución de las lluvias en las temporadas bajas en EF's (figura 10b), resulta casi inversa con

respecto a las temporadas altas. La banda de lluvia debida a los EF's se corre más hacia Yucatán y el Golfo de Méjico, mientras que una buena porción del Caribe al sur de esa banda se mantiene más seca, solo el extremo suroeste del Caribe y la parte continental centroamericana muestran anomalías positivas de la lluvia, lo que en general puede atribuirse a las mismas causas apuntadas en el párrafo anterior. Lo que esto significa, es que en temporadas bajas en EF's, el suroeste del Caribe y sur de Centroamérica no necesariamente se quedan del todo sin lluvias, ya que existen otros factores importantes que también las generan.

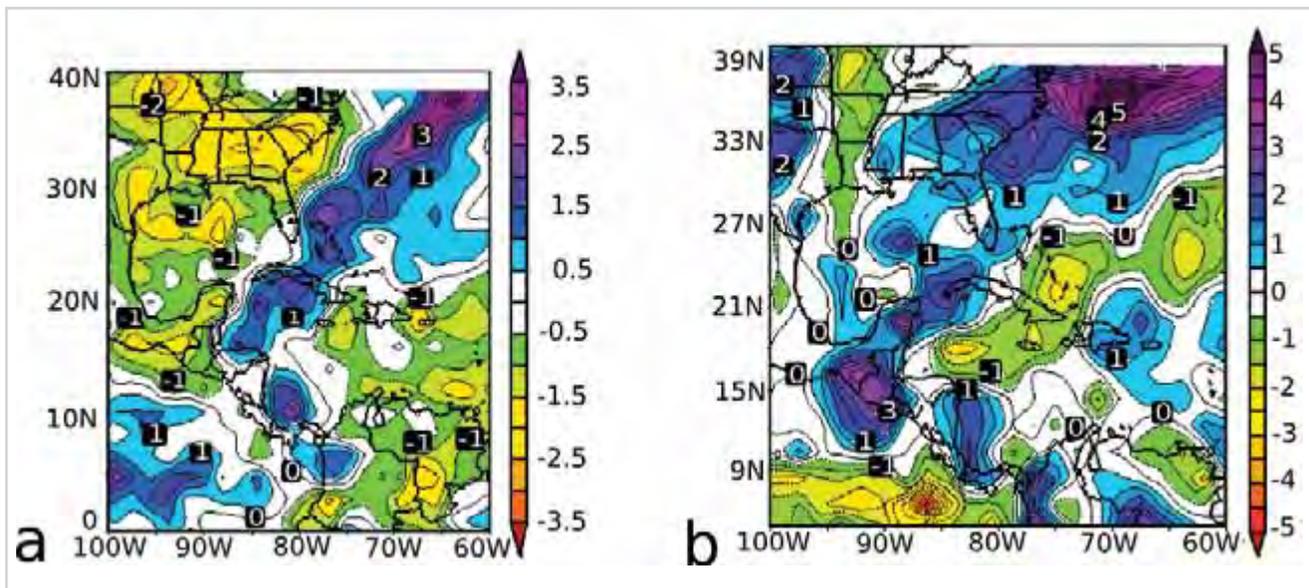


Figura 10. a- Anomalías de la lluvia (mm/día) para temporadas altas; b- para temporadas bajas.

### 3.6. Temporadas ricas y pobres en la penetración latitudinal de los EF's y sus relaciones con la AO

En el apartado anterior, se analizaron las temporadas altas y bajas en el número de EF's que alcanzan Centroamérica y el Caribe. Se analizan ahora, las temporadas ricas y pobres en cuanto a sus penetraciones latitudinales profundas y sus

relaciones con el comportamiento de la AO, lo cual se muestra en el cuadro 7.

Cuadro 7. Temporadas cuyas anomalías muestran desviaciones de 2 ó más, ó de -2 ó menos EF's con respecto al promedio

	Temporadas ricas en EF's profundos							
<b>Temporada</b>	80-81	84-85	97-98	99-00	04-05	05-06	09-10	10-11
<b>Total EF's por temporada</b>	24	15	16	15	15	18	18	17
<b>EF's desde Norte Panamá hacia Este</b>	5 (E)	7 (E)	5(D,E,F)	6(D,E)	5(E,F)	5(E,F)	6(E,F)	7(D)
<b>Valor AO</b>	-0,12	-2,8	-0,78	1,16	-0,92	-0,163	-3,43	-2,63
	Temporadas pobres en EF's profundos							
<b>Temporada</b>	82-83	89-90	92-93	98-99	06-07	x	x	x
<b>Total EF's por temporada</b>	15	15	15	11	15	x	x	x
<b>EF's desde Norte Panamá hacia Este</b>	1(N,E,F)	1(N,E,F)	1(N,D,F)	1(N,D,E)	1(N,D,E)	x	x	x
<b>Valor AO</b>	0,07	1,48	0,84	0,0	1	x	x	x

Para definir las temporadas ricas y pobres en EF's profundos, se calculó el promedio de los EF's que en las treinta y siete temporadas analizadas, alcanzaron profundidades latitudinales entre el Norte de Panamá y Guyana, obteniéndose un valor promedio de 3,4 EF's por temporada (el promedio de 2,2 de la figura 5a no incluye los EF's correspondientes al punto Norte de Panamá, que sí se incluyen aquí). A partir del promedio de 3,4 EF's por temporada, aquellas temporadas que mostraron 5 o más EF's con esas características se definieron como temporadas ricas en EF's profundos y las temporadas con solo un EF, se definieron como temporadas pobres. Es importante aclarar, que no todas las temporadas altas en el número de EF's son necesariamente ricas en cuanto al número de EF's profundos y no todas las temporadas bajas son necesariamente pobres en ese concepto. Las letras que aparecen entre paréntesis junto a las cantidades de EF's en el cuadro 7, se refieren a los meses que aportan la mayor y menor cantidad de EF's por temporada. Los valores de la AO son el promedio de las anomalías mensuales de los meses entre paréntesis. De 8 temporadas ricas en EF's profundos (cuadro 7), 7 se relacionan con valores negativos de la AO. En el caso de las temporadas pobres en EF's profundos, todas se relacionan con signos positivos o cero del valor de la AO. Un dato interesante es que de las 8 temporadas ricas en EF's profundos, 5 de ellas se ubican de la temporada 1999-2000 en adelante, cuando las anomalías del promedio móvil de trece

meses de las temperaturas árticas alcanzaron y sobrepasaron sostenidamente el valor de 0,5°C, a la vez que las anomalías del promedio móvil de doce meses para los hielos árticos se tornaron negativas, también sostenidamente. En general, los análisis de la cantidad de EF's por temporada así como el de sus penetraciones latitudinales profundas, están ligados al comportamiento de la AO en arreglo con lo apuntado por Thompson y Wallace (1999) y Wallace (2000).

#### 4. Conclusiones

El concepto de EF utilizado en este estudio resulta muy conveniente para cuantificar el número total de masas invernales de aire frío que alcanzan Centroamérica y el Caribe, ya que incluye las masas que ingresan con frentes fríos bien definidos y también aquellas que presentan solamente líneas de cortante. Las estadísticas construidas bajo este concepto, arrojan una buena correspondencia entre el comportamiento de las temperaturas árticas en el cinturón 70-90°N y el número de EF's que alcanzan Centroamérica y el Caribe.

Anomalías positivas en las temperaturas árticas favorecen temporadas altas en EF's y viceversa. Se encuentra también una buena correspondencia entre el comportamiento de la AO y el número de EF's que

ingresan a la región de estudio. Valores negativos de la AO favorecen temporadas altas en el número de EF's y viceversa. Cuando la AO experimenta periodos negativos prolongados y magnitudes importantes por algún lapso, las temporadas resultan con un mayor número de EF's profundos latitudinalmente y viceversa.

Llama la atención que en términos de la hora de entrada de los EF's al norte de Belice, hay predominancia de entrada hacia la media noche (06 UTC) e inicio de la mañana, disminuyendo hacia el medio día y el atardecer. No queda claro si esto es un resultado meramente casual o si está relacionado con alguna característica invernal entre la península de Yucatán y el Golfo de Méjico.

Es interesante notar que 5 de las 8 temporadas ricas en EF's profundos identificadas en el estudio, se ubican de la temporada 1999-2000 en adelante, cuando las anomalías de las temperaturas árticas alcanzan y sobrepasan sostenidamente el valor de 0,5°C y el valor de las anomalías del promedio móvil de doce meses de los hielos marinos árticos, se torna negativo, también sostenidamente. Además, a partir de dicha temporada, solamente una, la de 2006-2007 fue pobre en penetraciones profundas.

En temporadas deficitarias en cuanto al número de EF's, el suroeste del Caribe y sur de Centroamérica no necesariamente se quedan sin lluvias, ya que existen otros mecanismos importantes que también las producen, tales como el Chorro de Bajo Nivel del Caribe y las vaguadas prefrontales.

### Reconocimiento

Se agradece la revisión del trabajo, sus valiosos comentarios y señalamientos a las siguientes personas: Dr. Walter Fernández Rojas de la Escuela de Física de la Universidad de Costa Rica; Especialista en Meteorología Werner Stolz España, del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica y al Licenciado en Meteorología Luis Fernando Alvarado Gamboa, del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica.

## 5. Referencias

- Amador, JA. (1998). A climatic feature of the tropical Americas: The trade wind easterly jet. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 5(2):1-13.
- Amador, JA. & Magana, V. (1999). *Dynamics of the low level jet over the Caribbean Sea. Preprints, the 23rd conference on hurricanes and tropical meteorology*, American Meteorological Society, Dallas, pp 868-869.
- Baldwin, M. (2010). Annular modes in global daily surface. *Geophysical Research Letters*. Vol. No. 21, pages 4115-4118, November 1, 2001. Recuperado de [http://www.nwra.com/resumes/baldwin/pubs/Baldwin\\_GRL2001.pdf](http://www.nwra.com/resumes/baldwin/pubs/Baldwin_GRL2001.pdf).
- Chiang, J.C.H.; Biasutti, M. & Battisti, D.S. (2003). Sensitivity of the Atlantic Intertropical Convergence zone to last glacial maximum boundary conditions. *Paleoceanography*, 18 (18-1), 1094. doi:10.1029/2003PA000916.
- Climatic Research Unit (CRU), University of East Anglia, (2012). *Temperature in Polar Regions: Arctic and Antarctic*. Recuperado de: <http://www.climate4you.com/index.htm>
- Chylek, P.; Folland, CK.; Lesins, G.; Dubey, MK. & Wang, M. (2009). Arctic air temperature change amplification and the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Geophysical Research Letters*. Vol. 36, L14801, doi:10.1029/2009GL038777.
- Manak, DK. & Mysak, LA. (1989). On the relationship between arctic sea-ice anomalies and fluctuations in Northern Canadian air temperature and river discharge. *Atmosphere-Ocean*. 27:4, 682-691.

- DiMego, GJ.; Bosart, LF; & Enderson, WG. (1976). *An examination of the frequency and mean conditions surrounding frontal incursion into the Gulf of Mexico and the Caribbean Sea*. Monthly Weather Review, Rev., 104, 709-718.
- Francis, J.; Chan, W.; Leathers, D.; Miller, J. & Veron, D. (2009). Winter Northern Hemisphere weather patterns remember summer, Arctic sea-ice extent, *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L07503, doi:10.1029/2009GL037274, 2009.
- Frutos R. (1996). *Central American Cold Surges: some effects on citrus and banana production in Belize*. Tesis para optar al título de maestría, Universidad de Reding, Reino Unido.
- González, C. (1999). Climatología de los frentes fríos que han afectado a Cuba desde 1916-1917 hasta 1996-1997. *Revista Cubana de Meteorología* Vol. 6, No.1, año 99.
- Grandoso, H.; Zárate, E. y Vega, N. (1980). Análisis en la gran escala y mesoescala de un frente frío sobre Centroamérica. *Revista Semestral del Instituto Geográfico Nacional*. Primer Semestre. Costa Rica.
- Henry, WK. (1979). *Aspects of the fate of cold fronts in the Gulf of Mexico*. Monthly Weather Review. Rev., 107, 1078-1082.
- Herrera, J. (2007). *Ensayo sobre formulación y validación de un índice de anomalía de presión atmosférica para el pronóstico a corto y mediano alcance, utilizando datos de la Estación de Izabal, Guatemala*. Método utilizado en el Instituto Sismológico, Vulcanológico, Meteorológico e Hidrológico (INSIVUME) de Guatemala.
- Huschke, R. (2000). *Glossary of Meteorology*. 2 edition. American Meteorological Society. Recuperado de: [http://glossary.ametsoc.org/wiki/Air\\_mass](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Air_mass)
- James, A. & Simmons, I. (2010). *The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification*, Nature 464, 1334–1337.
- Martin, E. and Schumacher, C (2010). Modulation of Caribbean Precipitation by the Madden–Julian Oscillation. Department of Atmospheric Sciences, Texas A&M University, College Station, Texas. *Journal of Climate*, 24, 813–824. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2010JCLI3773.1>
- Mora, G. (2008). *Low Level Jets in the Tropical Americas*. Master degree thesis, Colorado States University.
- National Snow and Ice Data Center, (2012). *State of the Cryosphere*. University of Colorado. Recuperado de: [http://nsidc.org/cryosphere/sotc/sea\\_ice.html](http://nsidc.org/cryosphere/sotc/sea_ice.html)
- NOAA (2011). *Changes to the TAFB portion of the Unified Surface Analysis*. Recuperado de: [http://www.nhc.noaa.gov/news/20110519\\_tafb\\_unifiedSurfaceAnalysis.pdf](http://www.nhc.noaa.gov/news/20110519_tafb_unifiedSurfaceAnalysis.pdf)
- Ramírez, VR y Prieto GR. (2008). *Estudio de nortes de la temporada 2006-2007, en el Golfo de México utilizando como apoyo el modelo MM5 (dos casos de estudio)*. Tesis de Licenciatura, Universidad Veracruzana, 90 p.
- Reding, PJ. (1992). *The Central American cold surge: An observational analysis of the deep southward penetration of North American cold fronts*. M.S. Thesis, Department of Meteorology. Texas A&M University.

- Ritter M. (2006). *The Physical Environment: an Introduction to Physical Geography*. Recuperado de: [http://www.uwsp.edu/geo/faculty/ritter/geog101/textbook/title\\_page.html](http://www.uwsp.edu/geo/faculty/ritter/geog101/textbook/title_page.html).
- Schultz, DM.; Bracken, WE.; Bosart, LF.; Hakim, GJ.; Bedrick, MA., Dickinson, MJ.& Tyle, KR. (1997). *The 1993 superstorm cold surge: Frontal structure, gap flow, and tropical impact*. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 5–39; Corrigendum, 125, 662.
- Schultz, DM.; Bracken, E. & Bosart, LF. (1998). Planetary and synoptic scale-signature associated with Central American cold surges, *Journal of Climatology*, 126: 5-27
- Thompson, D. & Wallace J. (1998). The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No. 9, 1297-1300.
- Vázquez JL. (1999). *Caracterización objetiva de los nortes del Golfo de México y su variabilidad climática*. Tesis de licenciatura, Universidad Veracruzana, Xalapa, Ver., México.
- Wallace, JM. (2000). *North Atlantic Oscillation/annular mode: Two paradigms - one phenomenon*. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 791-806.
- Wallace, J.M. (2000). *On the Arctic and Antarctic Oscillations*. Recuperado de: [http://www.jisao.washington.edu/wallace/ncar\\_notes/#1Introduction](http://www.jisao.washington.edu/wallace/ncar_notes/#1Introduction)
- Wang, C. & Lee, SK. (2007). *Atlantic warm pool, Caribbean low-level jet and their potential impact on Atlantic hurricanes*. *Geophys Res Lett* 34:L02703. doi:10.1029/2006GL028579
- Wang, C. (2007). *Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate*, *Clim Dyn* 29:411–422.
- Zárate, E. (1977). *Principales sistemas de vientos que afectan a Costa Rica y sus relaciones con la precipitación*. Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica.
- Zárate, E. (1981). *Regímenes de lluvia y viento en Limón, Costa Rica*. Informe Semestral, Enero a Junio, 1981, Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Costa Rica.

# Evaluación comparativa de un evento hidrometeorológico extremo en el Valle Central de Costa Rica, utilizando diferentes parametrizaciones de cúmulos del modelo numérico del tiempo WRF-EMS

DANIEL A. POLEO BRITO<sup>1</sup>  
WERNER STOLZ<sup>2</sup>

## Resumen

Se utilizó el modelo numérico del tiempo WRF-EMS, núcleo ARW y varias parametrizaciones de cúmulo, para analizar el evento extremo de lluvia, ocurrido el 15 de agosto de 2012 sobre el Valle Central de Costa Rica, comparándolas con la lluvia estimada por el hidroestimador del CAFFG. Se disminuyó la escala dinámicamente utilizando tres dominios hasta obtener una grilla de 2,49 km de resolución. Se utilizaron 4 parametrizaciones de convección de cúmulos: Kain-Fritsch (KF), Betts-Miller-Janjic (BMJ), Grell-Devenyi (GD) y Grell 3D (G3) y además se corrió la simulación de alta resolución sin parametrización (SP). Las mejores correlaciones, entre 0,6 y 0,9 y con una significancia del 95%, se obtuvieron cuando el evento no se parametrizó, mostrando mejores resultados en el período de la tarde; también se observó la recurrente sobrestimación de la lluvia de la parametrización BMJ en el Mar Caribe. Además, se comparó la lluvia de diferentes estaciones del Valle Central y las imágenes horarias de satélite con las precipitaciones simuladas para el evento extremo para cada una de las parametrizaciones obteniendo muy buenas correlaciones con la parametrización G3 y SP.

PALABRAS CLAVE: PARAMETRIZACIÓN DE CÚMULOS, MODELO WRF, MODELOS NUMÉRICOS, REDUCCIÓN DE ESCALA DINÁMICA, PRONÓSTICO DEL TIEMPO.

## Abstract

We used the numerical weather model WRF-EMS, ARW core and several cumulus parameterizations to analyze extreme rainfall event occurred on August 15, 2012 on the Central Valley of Costa Rica rain comparing it with Hydro-estimator of they the CAFFG. The scale was decreased dynamically using three domains until a grid of 2.49 km resolution. We used four cumulus convection parameterizations: Kain-Fritsch (KF), Betts-Miller-Janjic (BMJ), Grell-Devenyi (GD) and Grell 3D (G3) and also ran the high-resolution simulation without parameterization (SP). The best correlations were obtained when the event was SP between 0,6 and 0,9 with a statistical significance of 95%, performing better in the afternoon period, the appellant was also observed overestimation of the BMJ parameterization rain on the Caribbean Sea. In addition, we compared the Central Valley meteorological stations, satellite imagery in every hour, with simulated rainfall for extreme event for each of the settings getting very good correlations with the parameterization G3 and SP.

KEYWORD: CUMULUS PARAMETERIZATION, WRF MODEL, NUMERICAL MODELS, DYNAMICAL DOWNSCALING, WEATHER FORECAST.

## 1. Introducción

El Valle Central es la región más densamente poblada del país. Presenta una temporada lluviosa entre

mayo y noviembre, la cual está modulada entre otras cosas por brisas locales, sistemas atmosféricos de escalas regional y sinóptica y la Zona de Convergencia Intertropical. La distribución mensual

<sup>1</sup> Meteorólogo. Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional. Email: dpoleo@imn.ac.cr.

<sup>2</sup> Meteorólogo. Jefe Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional. Email: wstolz@imn.ac.cr.

de la precipitación en dicha región es bimodal, dado que presenta dos valores máximos de lluvia en junio y septiembre, así como valores mínimos relativos en julio y agosto, asociados al veranillo según Ramírez (1983) y Magaña, Amador & Medina (1999).

En el Valle Central se han presentado aguaceros de fuerte intensidad, que han llegado a acumular 82 mm en 1 hora en San José, 66 mm en el aeropuerto Juan Santamaría y 50 mm en Pavas, este último fue un récord registrado durante el evento extremo ocurrido el 15 de agosto de 2012; por otro lado, la lluvia máxima registrada en 24 horas en las estaciones estudiadas del Valle Central, fue de 138 mm al oeste del Valle, con capacidad de causar inundaciones severas en varios puntos del área metropolitana y, por ende, ser clasificados como eventos hidrometeorológicos extremos. Las afectaciones debido a estos intensos volúmenes de lluvia pueden llegar a ser muy severas, no solo en la infraestructura, sino que también pueden poner en riesgo las vidas humanas que habitan en las áreas más vulnerables.

La previsión -espacial y temporal- de este tipo de eventos extremos es de suma importancia, dado que la información puede ser utilizada de manera preventiva por las instituciones de primera respuesta del país.

Para tal efecto, en este artículo se reanaliza -utilizando el modelo numérico del tiempo Weather Research and Forecasting Model - Environmental Modeling System (WRF-EMS) con una alta resolución espacial y con varias parametrizaciones de cúmulos- el evento hidrometeorológico extremo del 15 de agosto de 2012, el cual causó inundaciones en diversos sectores del Valle Central, como consecuencia de las fuertes precipitaciones que produjo valores acumulados de entre 30 mm a 80 mm, en 3 horas, según el informe emitido por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), realizado por Poleo y Stolz (2012).

La evaluación de los resultados arrojados por diferentes parametrizaciones de cúmulos del WRF-EMS y otros modelos numéricos del tiempo, ha sido poco estudiada en Costa Rica durante eventos extremos, debido a que la gran mayoría de las investigaciones en esta rama se realizan en latitudes medias o para otros regímenes de lluvia,

como lo es el trabajo realizado por Gilliland y Rowe (2007), quienes estudiaron diferentes esquemas de parametrizaciones de cúmulos del WRF en Nebraska. Da Silva, Herath, Weerakoon & Rathnayake, (2010), realizaron estudios similares utilizando diferentes parametrizaciones de cúmulos en el WRF, pero aplicadas a Sri Lanka. Sin embargo, Mejía (1999) realizó una investigación en la cual evaluó el modelo de aviación (AVN) sobre Costa Rica.

Por otro lado, Rivera y Amador (2008) estudiaron la reducción de escala dinámica hasta 30 km en los modelos de predicción estacional CCM3.6 y ECHAM 4.5, sin embargo, el enfoque de esta investigación fue la reducción de escala dinámica de un modelo numérico del tiempo.

## 1.1. Modelos numéricos de predicción del tiempo

Washington y Parkinson (1986) describieron las ecuaciones dinámicas básicas, utilizadas por los modelos numéricos de predicción del tiempo. Para iniciar los procesos computacionales, estos modelos necesitan ser alimentados con datos meteorológicos reales, tanto en los niveles bajos, medios y altos de la atmósfera, como sobre la superficie terrestre -incluyendo los registrados por el radiosondeo-. Posteriormente, se inician los procesos de cálculo para prever las características atmosféricas en sus diversas variables, tanto a corto como a mediano plazo.

El WRF-EMS es un modelo numérico de previsión del tiempo de área limitada, lo que permite que su frontera geográfica pueda estar delimitada dentro de un modelo de escala global como el Global Forecast System (GFS) de la NOAA de los Estados Unidos.

Dicho modelo, permite optar por diferentes configuraciones físicas y dinámicas, ajustándose a los requerimientos del investigador, admitiendo la elección -entre otras cosas- de diferentes dominios geográficos, dos tipos de coordenadas geométricas -eta y sigma-, varios tipos de capas límites planetarias, la cantidad de capas atmosféricas verticales, diversas parametrizaciones de cúmulos y

la opción no-hidrostática de aplicación fundamental en los trópicos (Dudhia, Gill, Guo, Manning, Wang & Bruyere 2005).

El WRF-EMS tiene dos opciones dinámicas: el Advanced Research WRF (ARW) desarrollado por el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR), el cual tiene su origen en el Mesoscale Model 5 (MM5) y el Non-hydrostatic Mesoscale Model (NMM) desarrollado por el Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP), que se basa en la

estructura dinámica del modelo numérico del tiempo ETA. El estudio actual se realizó aplicando la opción ARW, la cual a diferencia del núcleo NMM, tiene más opciones para variar las parametrizaciones de cúmulo (PC).

La orografía del terreno es una de las características del modelo, que se corresponde bien con la orografía real de Costa Rica. Nótese que, además de mostrar el eje montañoso del país, indica con bastante precisión las alturas de los sistemas montañosos (ver figura 1).

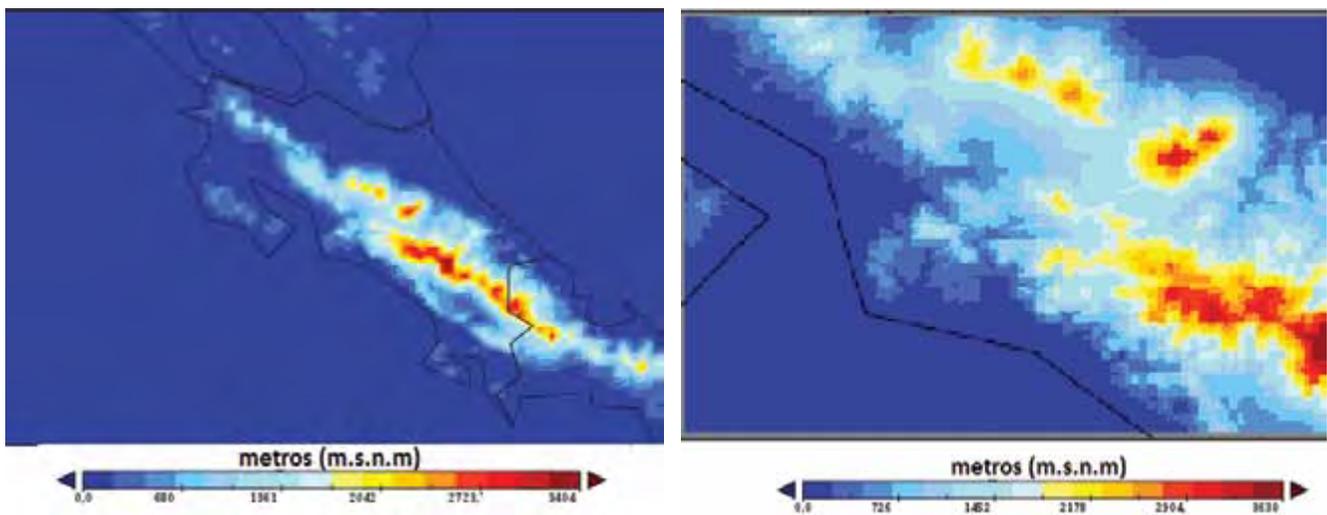


Figura 1. Orografía en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) utilizada por el WRF-EMS para los dominios de 7,47 km (izquierda) y 2,49 km (derecha).

## 1.2. Parametrización de la convección de cúmulos

La parametrización convectiva de cúmulos (PC), es el método por el cual los modelos numéricos de previsión del tiempo toman en cuenta los efectos convectivos que no están explícitos en las ecuaciones de los modelos numéricos, redistribuyendo la temperatura y la humedad en el área de estudio. Es decir, estas últimas variables determinan de una manera indirecta la convección, que no es calculada por las ecuaciones que utilizan los modelos numéricos, esto debido a lo complejo de dichos procesos (Módulo Comet: ¿Cómo los modelos generan nubes y precipitación).

La convección no produce únicamente lluvia, sino que también transporta calor hacia las partes altas de la atmósfera, redistribuye la humedad y por lo tanto contribuye a la estabilidad atmosférica. Los modelos tratan de tomar en cuenta todo este tipo de efectos por la convección, pero dependen de su resolución espacial para hacerlo explícitamente o por medio de una parametrización. Finalmente, toda PC toma en cuenta tres elementos: la activación, la intensidad y la distribución vertical de la convección.

Además, existen diferentes formas de parametrizar la convección de cúmulos, en esta investigación se utilizaron los siguientes:

- a. **Parametrización Betts-Miller-Janjic (BMJ):** ajusta el sondeo atmosférico a un perfil vertical de temperatura y viento de referencia, predeterminado y post-convectivo. Según Janjic (1994), BMJ genera convección si: i) hay disponibilidad de energía potencial convectiva (CAPE, por sus siglas en inglés), ii) el espesor de la nubes convectivas supera un determinado umbral climatológico de referencia y iii) si los sondeos modelados muestran humedad hasta al menos 700 hectopascales (hPa). Esta parametrización fue desarrollada por Betts-Miller (1986) y modificada por Janjic (1994). La BMJ usa los perfiles de referencia basado en observaciones climatológicas y estos son fijos, de modo que no permiten flexibilidad para cada situación de pronóstico, como resultado pueden causar la eliminación de estructuras verticales importantes o eventos extremos.
- b. **Kain y Fritsch (KF):** está diseñado para redistribuir la masa de aire en una columna atmosférica, con el objetivo de disipar la energía potencial disponible. Según Kain y Fritsch (1991), KF genera procesos convectivos si los datos de las condiciones iniciales disponen de CAPE -determinado por el sondeo-.
- c. **Grell-Devenyi ensamble (GD):** utiliza los radiosondeos como condiciones iniciales, partiendo de la propuesta de la PC Arakawa-Shubert simplificada. Para los cálculos de la capa límite utiliza el CAPE y finalmente utiliza flujos de masa ascendentes y descendentes basados en el esquema de Grell (1994), es decir calcula la profundidad de la nube basándose en los índices de inhibición de estabilidad CIN, el CAPE y finalmente utiliza la derivada temporal de CAPE, este esquema fue propuesto por Grell y Devenyi (2002).
- d. **Grell 3D (G3):** se basa en la parametrización creada por Grell-Devenyi (2001), sin embargo, ésta utiliza corrientes de aire ascendentes y descendentes explícitas como disparador de la convección, similar a GD, sin embargo, también usa la subsidencia en columnas adyacentes, interconectando cada uno de las columnas de convectivas. Según Grell y Devenyi (2002) esta

parametrización tiene retroalimentación de la radiación y de la convección profunda.

## 2. Metodología

Se definieron tres dominios (áreas geográficas) anidados en doble vía, haciendo una reducción de escala dinámica: un primer dominio-inserto en el GFS- con una resolución espacial de 29,9 x 29,9 km, el segundo de 7,49 x 7,49 km y el tercero de 2,49 x 2,49 km (figuras 2a y 2b).

El dominio 1 -el cual abarca Centro América- proporciona datos cada 6 horas, el dominio 2 -centrado en Costa Rica- cada 3 horas y el dominio 3 -que abarca el Valle Central y parte del Pacífico Central- cada hora, el período fue de las 7 a.m. del 15 de agosto hasta las 2 a.m. del 16 de agosto; en esta investigación solo se incluyeron los resultados horarios de las 5 p.m. a 11 p.m. (figura 2).

El WRF-EMS se corrió con 4 parametrizaciones (BMJ, GD, G3 y KF), en los tres dominios mencionados (figura 2 a y b) manteniendo todas las características restantes iguales; además, se hizo una quinta corrida sin utilizar parametrización (SP) en el tercer dominio -Valle Central- manteniendo la PC de BMJ en los otros dos dominios. Esta última configuración se realizó con base en estudios de Gilliland y Rowe (2007).

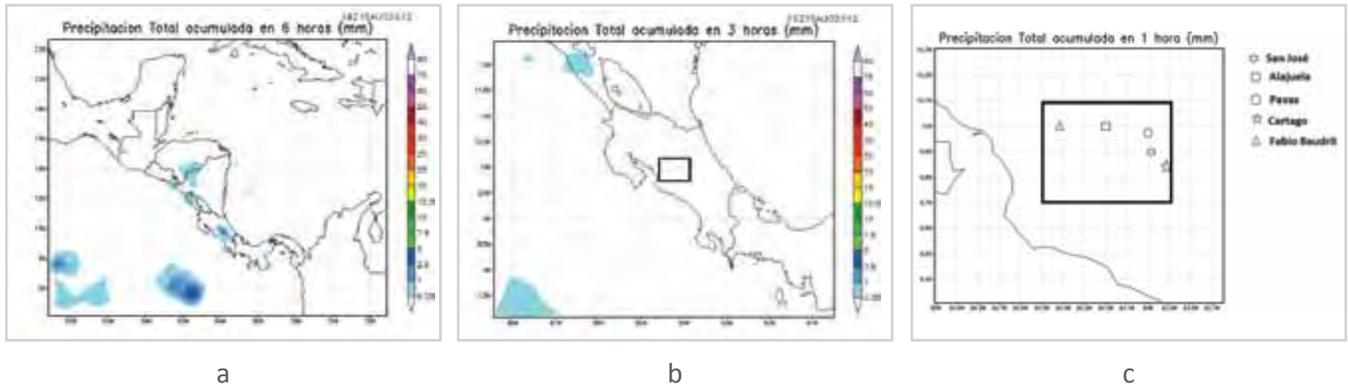


Figura 2. Dominios geográficos de la simulación del 15 de agosto de 2012: (a) Dominio 1: 29,9 km de resolución espacial, (b) Dominio 2: 7,47 km, (c) Dominio 3: 2,49 km. El recuadro en el Dominio “C” señala cinco lugares de control en el Valle Central.

La resolución atmosférica vertical de los tres dominios, fue de 45 niveles atmosféricos. Se utilizó la microfísica de Goddard GCE de 6 clases la cual se basa en la microfísica propuesta por Lin, Farley, & Orville (1983); la parametrización de la Capa Límite Planetaria es la de la Universidad de Skamarock, Dudhia, Klemp, Gill, Barrer, Duda, Huang, Wang & Powers (2005). En todas las simulaciones se usó la misma microfísica, Capa Límite Planetaria y se aplicó la aproximación no-hidroestática, además de utilizarse las coordenadas geométricas tipo sigma ( $\sigma$ ).

Se realizó la comparación de las cantidades de lluvia, utilizando los datos de las 5 estaciones meteorológicas de control, ubicadas en el Valle Central. Se recurrió a las imágenes satelitales del GOES-13 y al hidrostimador del CAFFG para analizar la distribución espacial de la misma. Se calcularon las correlaciones lineales entre la precipitación del modelo y la lluvia real en cada una de las estaciones meteorológicas de control. El nivel de significancia estadístico utilizado fue 95%.

Los datos horarios de lluvia (mm) de las estaciones meteorológicas de control en el Valle Central, se obtuvieron de la base de datos del IMN. Se utilizaron las estaciones meteorológicas ubicadas en: San José, Aeropuerto Internacional Juan Santamaría (Alajuela), Fabio Baudrit, Instituto Tecnológico de Cartago y Aeropuerto Internacional Tobías Bolaños (Pavas), dado que representan la región central y oeste del Gran Área Metropolitana (GAM) (figura 2c).

Los datos de frontera fueron proporcionados por el modelo Global Forecast System (GFS), de las 0600 UTC (medianoche, hora local). Se compararon los sistemas convectivos y su distribución espacial, analizando las imágenes del Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-13) y luego se contrastaron con las salidas de los modelos. Se utilizó además, el hidrostimador del Central America Flash Flood Guidance (CAFFG, siglas en inglés), el cual estima satelitalmente la lluvia, la cual es calibrada por catorce estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo del país.

El software WRF-EMS fue obtenido del Science and Training Resource Center (STRC) Environmental Modeling System (EMS), Centro de Investigación y Desarrollo de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

### 3. Resultados y análisis

#### 3.1. Análisis de las líneas de corriente de escala sinóptica y local

Las figuras 3 y 4 muestran que la atmósfera era favorable -el día en estudio- para que se desarrollaran convección profunda y aguaceros, dada la presencia y el acople de ciclones en los niveles más bajos -925.

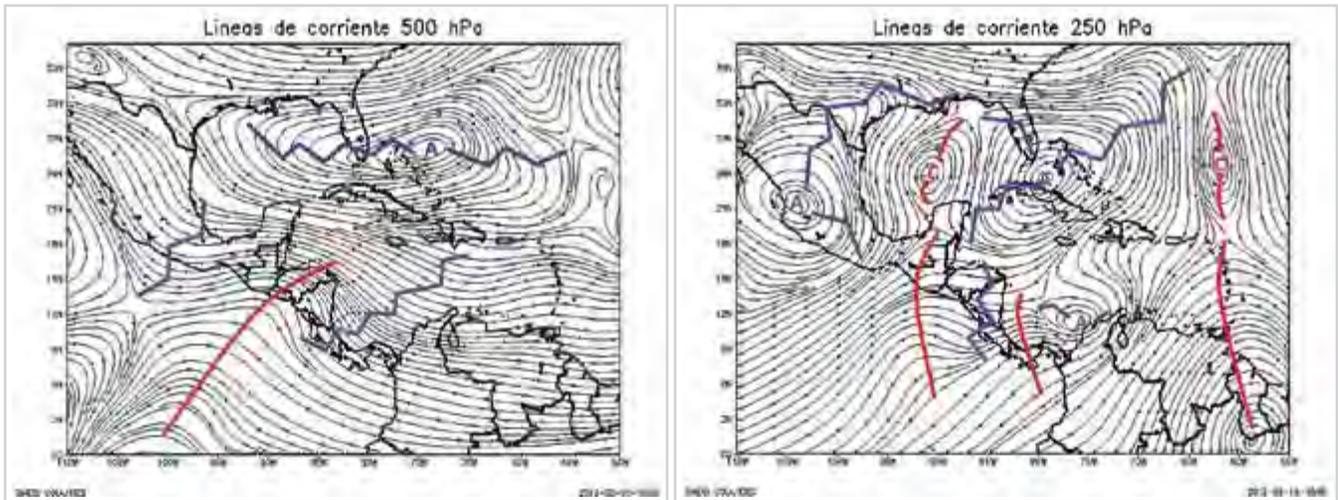


Figura 3. Dominios geográficos de la simulación del 15 de agosto de 2012: (a) Dominio 1: 29,9 km de resolución espacial, (b) Dominio 2: 7,47 km, (c) Dominio 3: 2,49 km. El recuadro en el Dominio “C” señala cinco lugares de control en el Valle Central.

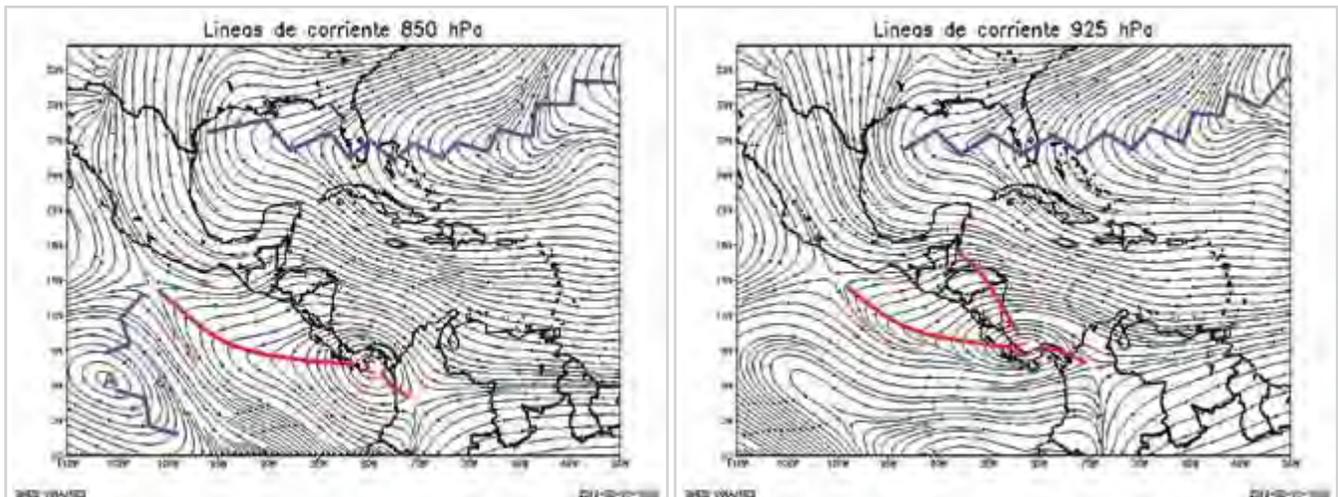


Figura 4. Líneas de corriente en 925 hPa (derecha) y 850 hPa (izquierda) promedio para todo el día 15 de agosto de 2012. Las líneas rojas (azules) marcan el eje de las vaguadas (dorsales); C: Ciclón, A: Anticiclón Fuente: Reanálisis NCAR/NCEP.

En el diagrama termodinámico de la figura 5 se observa: a) los vientos eran débiles con valores entre 5 y 20 km/h a lo largo de toda la capa atmosférica, b) la troposfera tenía un alto contenido de agua: 40 mm y c) los índices de estabilidad mostraban una atmósfera inestable, por el valor alto del índice de inestabilidad “K” y el valor de 193.6 del índice “SWEAT”, valores que están asociados con una alta probabilidad de tormentas severas, según el Manual Técnico del

Radiosondeo de RAOB. El nivel de condensación por elevación (LCL por sus siglas en inglés) estaba alrededor de 875 hPa, es decir, favorecía la formación de nubes desde las capas más bajas de la troposfera. Además, el nivel de condensación por convección (CCL por sus siglas en inglés) se encontraba alrededor de los 750 hPa, lo que sugiere gran inestabilidad y una atmósfera favorable a la convección.

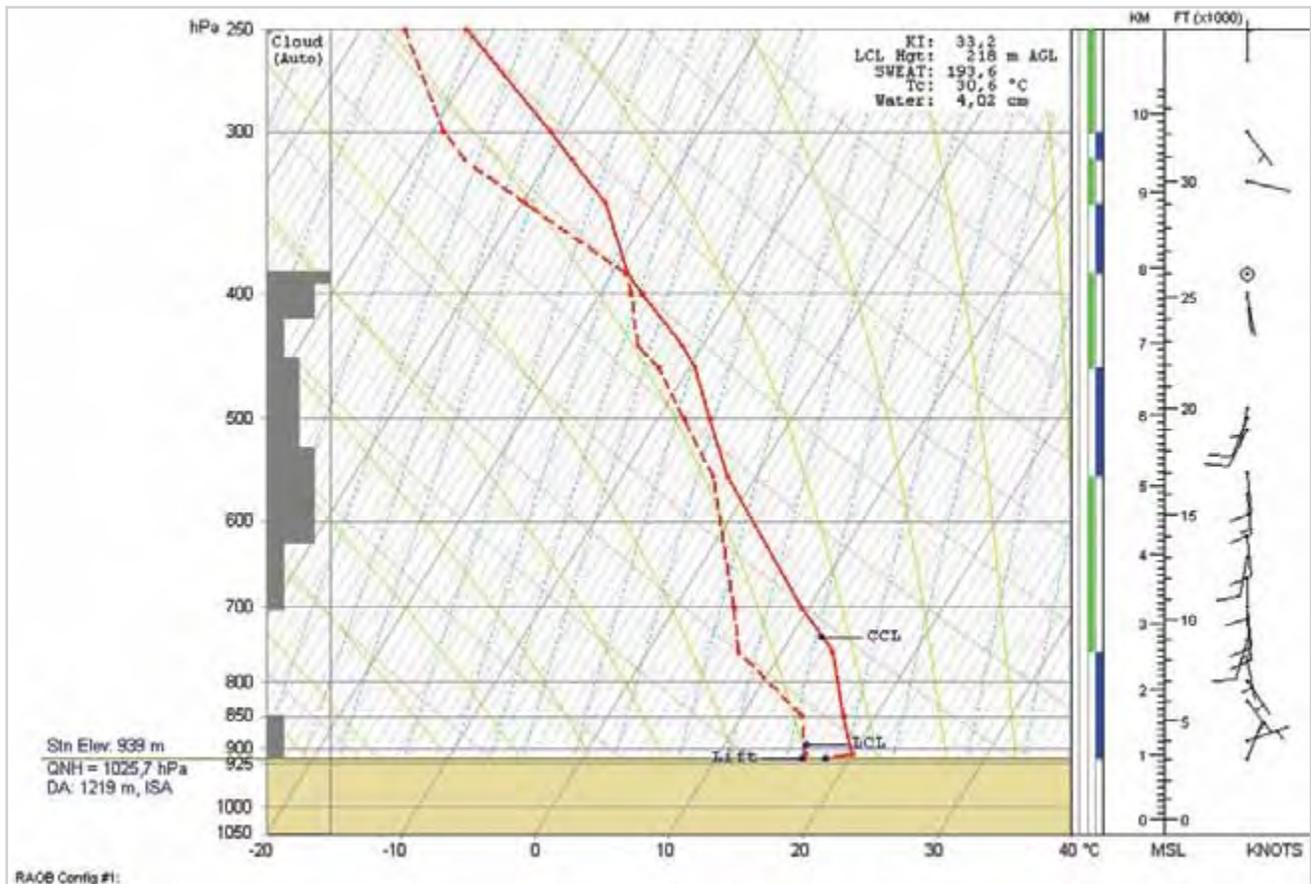


Figura 5. Diagrama termodinámico SkewT-LogP del radiosondeo realizado el 15 de agosto 2012 a las 12Z (6 a.m. hora local). Barbas de viento en nudos y niveles atmosféricos en hectopascales (hPa). Fuente: Estación Fabio Baudrit-UCR, Oficina de Radiosondeo del Instituto Meteorológico Nacional.

### 3.2. Resultados comparativos de las diferentes simulaciones utilizadas con las distintas parametrizaciones (PC) de nubosidad tipo cúmulus

Las figuras 6 y 7 muestran que cuando no se usó parametrización de cúmulos (SP) en el dominio de 2,49 km -manteniendo la parametrización BMJ en los otros dos dominios-, el modelo estimó de manera aceptable la distribución espacial de la precipitación, en comparación con lo mostrado en las imágenes de satélite. Al comparar la nubosidad convectiva, la lluvia registrada por el hidroestimador y la precipitación horaria de la simulación, se observan discrepancias entre regiones. Todas las parametrizaciones en el dominio de 7,47 km (figura 6) representaron bastante

bien la distribución espacial de la lluvia, a excepción de SP y BMJ que sobreestimaron la lluvia sobre el Mar Caribe principalmente en horas de la tarde (figura 6). Todas las simulaciones independientemente de la PC usada, mostraron el núcleo convectivo que se desarrolló al norte de Guanacaste a las 9 p.m. hora local. SP fue la parametrización que mejor resolvió la distribución espacial (figura 6). Además, en el Valle Central se muestra el aumento de las precipitaciones en la tarde y la disminución de las mismas a partir de las 9 p.m., en todas las parametrizaciones.

En cuanto a las precipitaciones estimadas por el hidroestimador al sur de Costa Rica a las 18 horas (12 m.d.), se observan bien simuladas por todas las PC, la mejor simulación para estas precipitaciones estimadas entre 60 y 80 mm fue la SP, que mostró

entre 60 y 80 mm y ubicó espacialmente muy bien la lluvia (figura 6). La PC de GD y G3 subestimaron la lluvia en 50 % y la PC que usó BMJ la sobreestimó en 30%.

Además, las parametrizaciones KF y GD subestimaron las lluvias sobre el Mar Caribe, posiblemente como consecuencia del uso que éstas hacen del CAPE, de tal manera que podrían ser deficientes para prever lluvias nocturnas causadas por nubes estratificadas. Es importante señalar, que todas las parametrizaciones generaron de 20 a 25 mm, entre las 21 y 23 horas (9 a 11 p.m.), representando muy bien espacialmente la actividad lluviosa durante el período nocturno, la cual se inició a las 8 p.m.

Por otra parte, cuando se utilizó la parametrización en el dominio de 2,49 X 2,49 km (ver figura 7) hubo resultados diversos. BMJ, G3 y SP, después de las 2100, mostraron una disminución significativa de la precipitación en comparación con las otras parametrizaciones. A las 17 horas la mejor PC que simuló las precipitaciones en el Valle Central fue BMJ; SP al igual que BMJ identificaron muy bien los núcleos de precipitación en el Valle Central.

La parametrización KF sobreestimó las precipitaciones durante todo el día (figura 7), se pueden observar los montos sobreestimados de las 17 a 21 horas.

Las SP y BMJ simularon mejor el evento extremo en estudio durante el período vespertino, sin embargo, en la noche se presentaron discrepancias, siendo únicamente la simulación sin parametrización quien representó mejor la actividad lluviosa de las 19 a 20 horas (ver figura 7). Si se observan las imágenes de las simulaciones, la que mejor se ajusta en cuanto a cantidad de lluvia y nubosidad, es la parametrización BMJ, no obstante lo anterior, la que mejor se ajustaría en relación a la ubicación de los eventos es la G3.

Referente a la simulación que usó KF, no solo sobreestimó la precipitación real ocurrida, sino que algunas veces la ubicó en lugares donde no estaba precipitando; mientras que la G3 sobrestimó levemente los acumulados registrados, además es congruente con la distribución espacial e incluso para el período de la tarde y primeras horas de la noche pareciera que fue el mejor esquema que parametrizó la lluvia, tal como se observa en la figura 7.

En cuanto a la GD, aunque genera resultados satisfactorios tuvo problemas en la distribución temporal y en la cantidad de lluvia, es decir, aunque los resultados fueron muy similares a los ocurridos con otras parametrizaciones, ubicó la convección máxima y las precipitaciones en otros puntos diferentes a aquellos en donde ocurrió.

Sin embargo, al observar las imágenes de satélite y compararlas con los puntos de convección máxima de las simulaciones, tal y como se observa en las figuras 6 y 7, podría llegarse a conclusiones erradas si no se conocen los máximos de lluvia para cada hora.

Al analizar las figuras 8, 9 y 10, y correlacionar la lluvia real con la simulada, se observa que las simulaciones que usaron GD y KF tuvieron la menor correlación. Por el contrario, las simulaciones con G3 y SP tuvieron una correlación promedio mayor a 0,65 para BMJ y de 0,70 para SP, en el período entre las 17 y 23. La correlación fue mayor para la región del occidente del Valle Central.

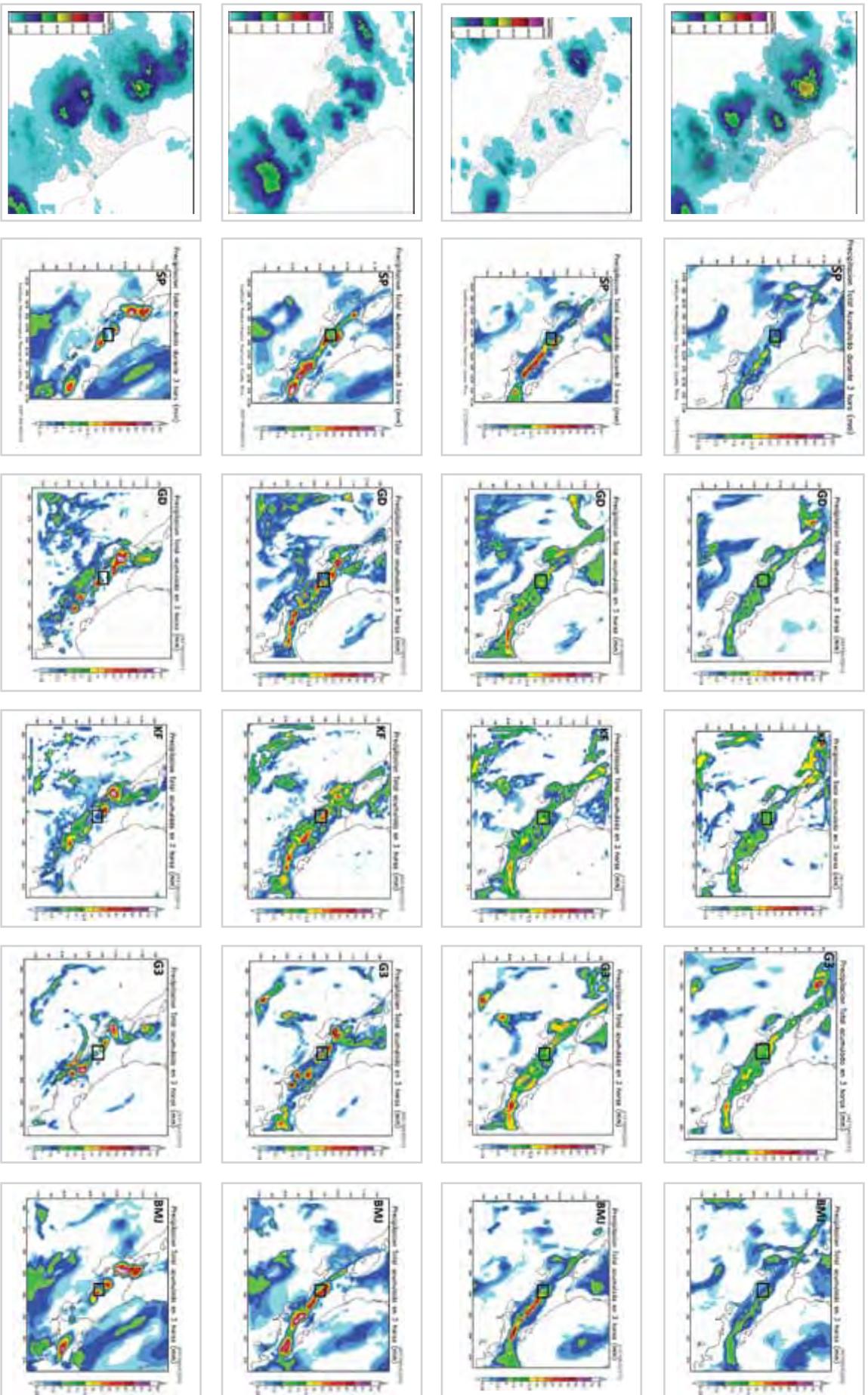


Figura 6. Análisis comparativo (de izquierda a derecha) entre el hidroestimador del CAFFG acumulado cada tres horas: 12, 15, 18 y 21 hora local, y el acumulado cada tres horas generado por el modelo, SP, GD, KF, G3 y BMJ. De arriba hacia abajo en hora local: 12, 15, 18 y 21. Fuente: CAFFG e IMN.

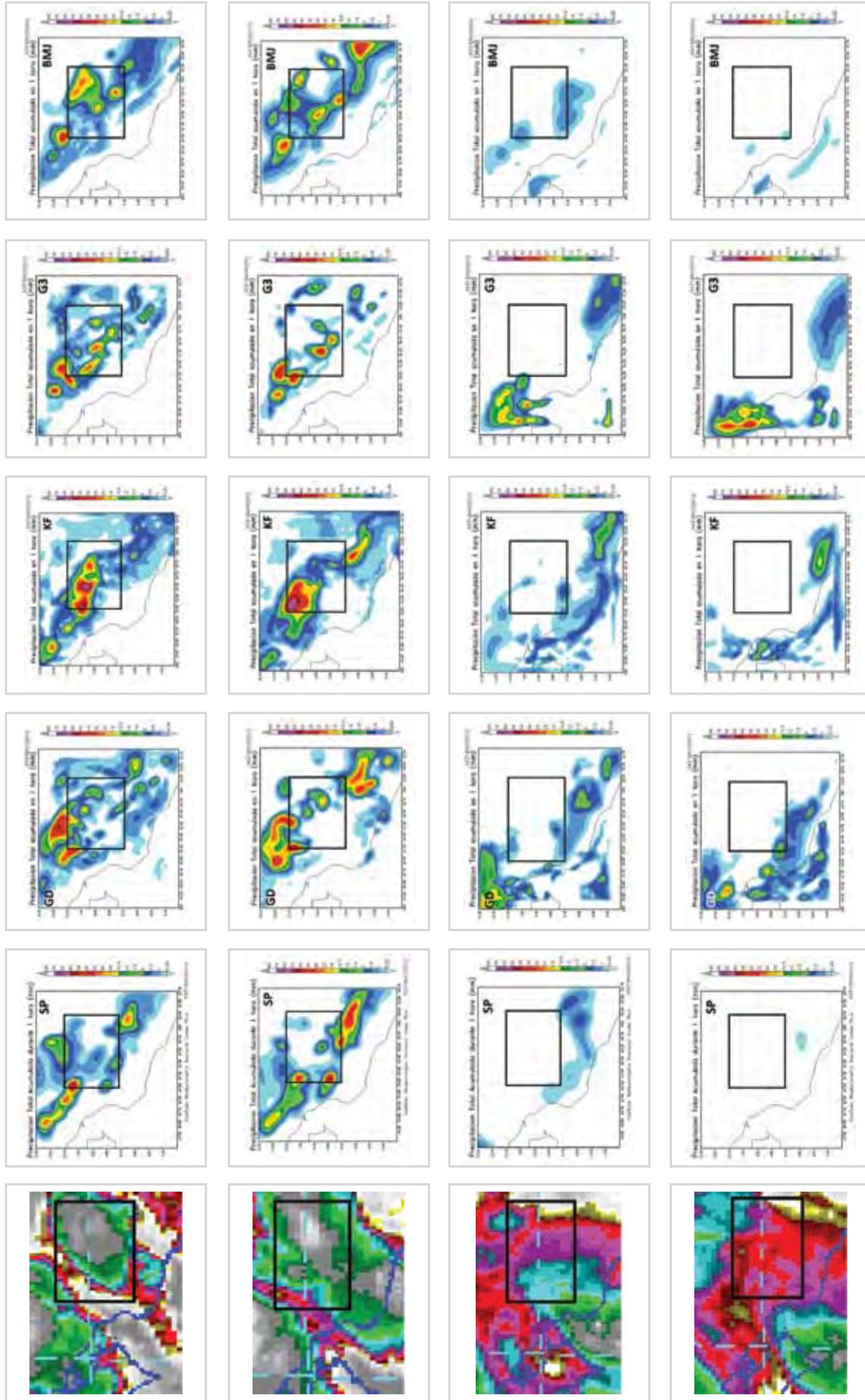
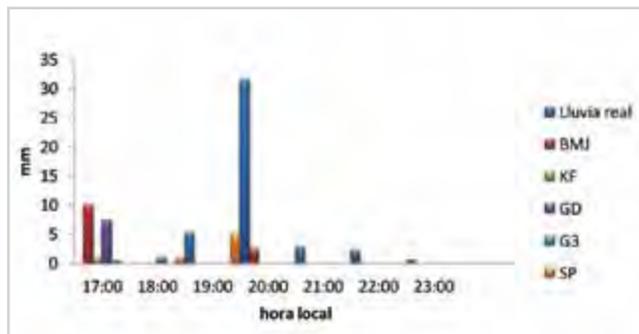


Figura 7. Análisis comparativo (de izquierda a derecha) entre: las imágenes de satélite infrarrojas y las diferentes parametrizaciones: (b) SP, (c) GD, (d) KF, (e) G3 y (f) BMJ. De arriba hacia abajo en hora local: 1700, 1800, 2100, 2200. Área en rectángulo delimita Valle Central. Fuente: GOES-13 e IMN.

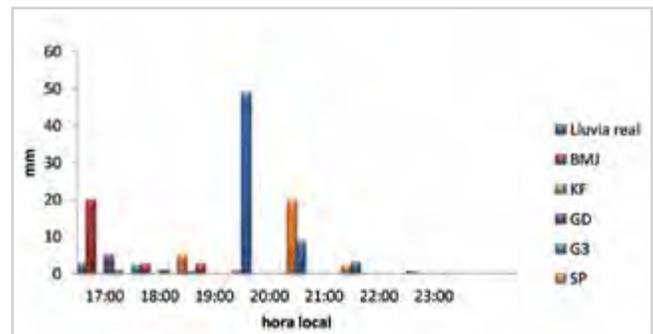
### 3.3. Datos de lluvia horaria en el Valle Central y resultados previstos por la simulación del WRF-EMS

Las figuras 8 y 9 muestran que la actividad lluviosa inició a las 8 p.m. en todas las estaciones meteorológicas de control del Valle Central, excepto en Fabio Baudrit ubicada en Alajuela, la más occidental de todas la estaciones meteorológicas

de control. Lo anterior hace suponer, que las lluvias fueron generadas por un gran sistema convectivo o el movimiento hacia el oeste del complejo nuboso. La mayor intensidad se registró en Pavas, 50 mm/h, estableciendo un récord histórico de lluvia horaria para el período 1996-2013, seguido de San José, 30 mm/h. La actividad lluviosa persistió durante la noche, terminando a las 11 p.m. en la ciudad capital.

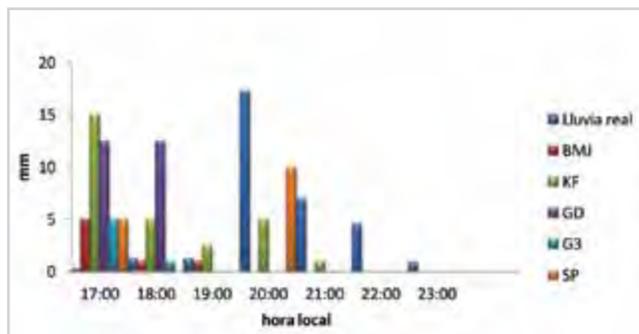


a

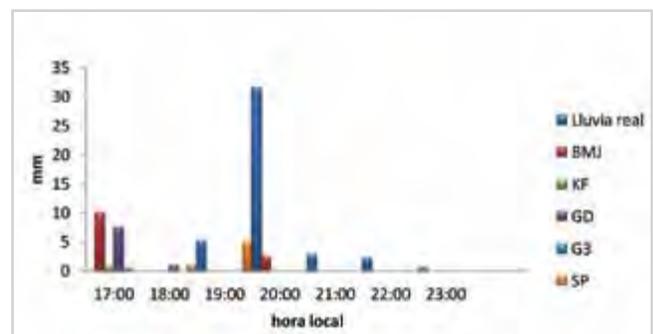


b

Figura 8. Lluvia (mm) horaria de San José (a) y Pavas (b) de las 17:00 horas (5:00 p.m.) hasta las 23:00 horas (11:00 p.m.) del día 15 de agosto. BMJ: Betts-Miller-Janjic, KF: Kain-Fritsch, GD: Grell-Devenyi, G3: Grell 3D y SP, sin parametrización. Fuente: IMN.



a



b

Figura 9. Lluvia (mm) horaria de Alajuela y Fabio Baudrit de las 17:00 horas (5:00 p.m.) hasta las 23:00 horas (11:00 p.m.), del día 15 de agosto. BMJ: Betts-Miller-Janjic, KF: Kain-Fritsch, GD: Grell-Devenyi, G3: Grell 3D y SP, sin parametrización. Fuente: IMN.

La figura 9 muestra, que tanto en Alajuela como en la Fabio Baudrit -ambas estaciones ubicadas en el sector occidental del Valle Central-, la mayor intensidad se presentó a las 8 p.m. (15 mm/h) y a las 9 p.m. (14 mm/h), respectivamente.

La actividad lluviosa fue débil en Cartago, en comparación con el resto del Valle Central y la distribución temporal fue de 8 a 9 de la noche (figura 10). Se observa una buena respuesta de los modelos, tanto en intensidad como en distribución espacial, no

obstante, hubo sobreestimación de la PC en BMJ. La PC que usó SP capturó muy bien la reducción de la precipitación al este del Valle Central, aunque la que

mejor correlación que se presentó fue la simulación con GD.

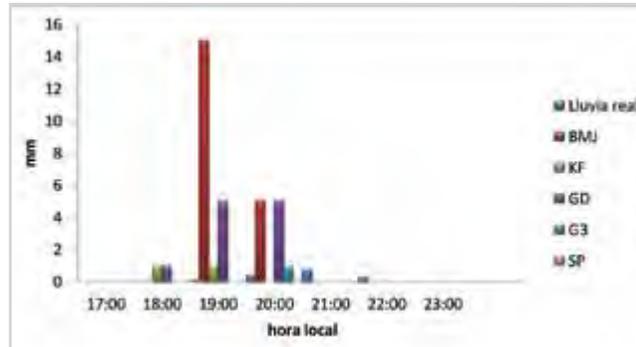


Figura 10. Lluvia (mm) horaria de la estación del Instituto Tecnológico de Cartago de 5 p.m. a 11 p.m. (hora local), del 15 de agosto. BMJ: Betts-Miller-Janjic, KF: Kain-Fritsch, GD: Grell-Devenyi, G3: Grell 3D y SP, sin parametrización. Fuente: IMN.

La mayoría de las simulaciones produjeron lluvias matutinas desde las 0600 horas (no se muestran), a excepción de SP, lo que podría ser reflejo del alto grado de humedad que se presentó desde las primeras horas de la mañana.

La parametrización que más sobreestimó la cantidad de lluvia fue KF, dado que mostró acumulados para todo el día de hasta 160 mm (figura 7, KF). Al contrario de los resultados de KF, la corrida que no utilizó parametrización subestimó la lluvia, dado que generó cantidades horarias de lluvia menores a los 15 mm.

Ninguna de las simulaciones se acercó realmente a los resultados que se produjeron durante las primeras horas del día, con excepción de SP, esto porque todas las simulaciones generaron lluvia entre las 8 de la mañana y las 6 de la tarde, excepto la simulación con KF, que aunque generó lluvias después de las 7 de la noche, las cantidades fueron sobrestimadas.

Finalmente se puede determinar, que la cantidad de lluvia diurna fue bien prevista por las parametrizaciones SP, BMJ y G3; sin embargo, al igual que en las otras estaciones, hubo problemas para representar la lluvia nocturna. La PC que usó SP fue la que mejor simuló la precipitación en el Valle Central,

tal como se puede ver en las figuras 8, 9 y 10, siendo la estación de Pavas el punto de mejores resultados (figura 8b).

#### 4. Conclusiones

Los mejores resultados, en lo que respecta a la distribución espacial de la lluvia, se obtuvieron cuando no se aplicó una parametrización de cúmulos específica (SP) en el dominio 3 -dominio del Valle Central-; sin embargo, la mejor correlación lineal la presentó la parametrización BMJ en las estaciones meteorológicas de San José y Cartago. Por el contrario, la simulación que usó KF sobrestimó la lluvia horaria en casi 200 mm, aunque el evento fue de lluvia extrema y hubo sectores que registraron hasta 107 mm como Turrialba, KF sobrestimó incluso la lluvia en dichos sectores.

Las correlaciones estadísticas horarias (no mostradas) fueron entre 0,4 y 0,6 en la mayoría de los casos, exceptuando los resultados arrojados por SP y BMJ que estuvieron entre 0,6 y 0,9, con un nivel de significancia de 95%.

El dominio correspondiente al Valle Central pudo verse influenciado por las cordilleras circundantes,

debido a que conformaron la frontera del dominio, por lo que en condiciones ideales se debería utilizar un dominio de muy alta resolución, menor que 5 km que contemple a todo el país y sin parametrización, siguiendo las recomendaciones del Manual técnico del WRF-EMS, 2012.

El segundo dominio mostró resultados diversos, la mejor simulación de la lluvia en la vertiente del Pacífico se obtuvo con BMJ y SP, sin embargo, la parametrización que utilizó BMJ tuvo una tendencia a sobrestimar la lluvia en el Caribe, si se compara con los valores del hidroestimador del CAFFG.

Dado lo anterior, se recomienda seguir evaluando periódicamente los resultados del modelo numérico del tiempo WRF-EMS, en relación con los eventos hidrometeorológicos extremos, a fin de aumentar la precisión de las previsiones del tiempo y así poder informar de manera efectiva, a las instituciones de primera respuesta encargadas de la atención de las emergencias causadas por este tipo de situaciones.

Se recomienda además, realizar experimentos variando otros parámetros del WRF-EMS y analizar los resultados ante diferentes escenarios lluviosos extremos.

## 5. Referencias

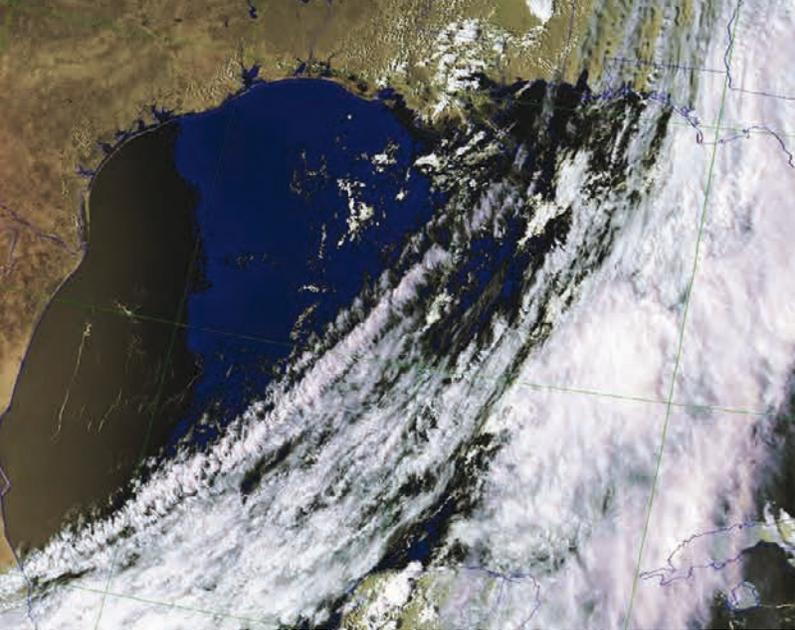
- Amador, JA.; Chacón, R. E. & Laporte, S. (2003). *Climate and climate variability in the Arenal river Basin of Costa Rica*. In. Díaz H. F y Morehouse B. (Eds.): *Climate and Water: Transboundary Challenges in the Americas*. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands, 317–350.
- Arakawa, A. & Schubert, WH. (1974). Interaction of a Cumulus Cloud Ensemble with the Large-Scale Environment, Part I. *Journal Atmospheric Sciences*. 31, 674-701.
- Arakawa, A. (2004). The cumulus parameterization problem: Past, present, and future. *J. Climate*. 17, 2493-2525.
- Betts, AK. (1986). A new convective adjustment scheme. Part I: Observational and theoretical basis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 112, 677-691.
- Betts, AK. & Miller, MJ. (1986). A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX, and Arctic air-mass data sets. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 112, 693-709.
- Chen, F. y Dudhia, J. (2001). Coupling an Advanced Land Surface–Hydrology Model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. *Monthly Weather Review*. 129, 569-584.
- Da Silva, G.; Herath, S.; Weerakoon, S. & Rathnayake, U. (2010). *Application of WRF with different cumulus parametrization schemes for precipitation forecasting in a tropical river basin*. Proceedings of the 13th Asian Congress of fluid Mechanics. 513-516.
- Dudhia, J.; Gill, D.; Guo, Y.-R.; Manning, K.; Wang, W. & Bruyere, C. (2005). *PSU/NCAR mesoscale modeling system tutorial class notes and users' guide: MM5 modeling system version 3, Mesoscale and Microscale*. Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research. Boulder, Colorado.
- Gilliland E., & Rowe, C. (2007). *A comparison of cumulus parametrization schemes in the WRF model*. Proc. Twenty-first conference on hydrology. 2-16.

- Guerrero-Higueras, A., García-Ortega, E., Matellán-Olivera, V. y Sánchez J. (2012). *Procesamiento paralelo de los pronósticos meteorológicos del modelo WRF mediante NCL*. Jornadas Sarteco, 19-21 septiembre. Universidad Miguel Hernández. España.
- Grell, G. (1993). Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Monthly Weather Review*. 121, 764-787.
- Grell, G., & Devenyi, D. (2002). A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*. 29 (14), 1-4.
- Holton, J. (1990). *Introducción a la Meteorología Dinámica*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid, España.
- Holton, J. (2004). *An introduction to Dynamic Meteorology*. Academic Press. 4ta Edition. 531.
- Janjić, Z.I. (1994). The step-mountain Eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*. 122, 927-945.
- Kain, JS y Fritsch, J.M. (1993). *Convective parameterization in mesoscale models: the Kain-Fritsch scheme*. American Meteorological Society. 165-170.
- Kain, J.S. & Fritsch, J.M. (1990). A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *Journal at Atmospheric Science*. 47, 2784-2802.
- Lin, Y.L., Farley, R.D. & Orville, H.D. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal Application of Meteorology*. 22, 1065-1092.
- Magaña, V., Amador, J. & Medina, S. (1999). The Midsummer Drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*. 12, 1577-1588.
- Mejía, J. (1999). *Evaluación de los pronósticos del modelo de Aviación sobre Centroamérica y el Caribe*. Tesis de grado para optar al título de licenciatura en meteorología. Escuela de Física. Universidad de Costa Rica.
- Módulo del COMET (s.f.). Recuperado el 20 de mayo del 2013 de [http://www.meted.ucar.edu/nwp/model\\_precipandclouds/print.htm](http://www.meted.ucar.edu/nwp/model_precipandclouds/print.htm).
- Noh, Y., Cheon WG., Hong SY., & Raasch S. (2003). Improvement of the K-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data. *Bound. Layer Meteorology*. 107, 401-427.
- Poleo, D. y Stolz W. (2012). *Boletín Meteorológico Mensual*. Resumen mensual. Instituto Meteorológico Nacional. 2-16.
- Ramírez, P. (1983). *Estudios meteorológicos de los Veranillos en Costa Rica*. Nota de Investigación. IMN.
- RAOB (2012). *Sounding Indices. Rawinson de Observation program*. Technical manual. Version 6.0. Environmental Research Service (ERS). 159 p.
- Rivera, E. y Amador, J. (2008). Predicción estacional del clima en Centroamérica mediante la reducción de escala dinámica. Parte I: evaluación de los modelos de circulación general ccm3.6 y echam4.5. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*. 15 (2) ,131-173.

Skamarock, W.; Dudhia, J.; Klemp, J.; Gill, D.; Barrer, D.; Duda, M.; Huang, X.; Wang, W. & Powers, J. (2005). *A Description of the Advanced Research WRF Version 2*. NCAR Technical Note.

Washington, W.M. & Parkinson, CL. (1986). *An Introduction to Three-Dimensional Climate Modeling*. University Science Books. Mill Valley, California.





## Instituto Meteorológico Nacional

Sitios web:  
<http://cglobal.imn.ac.cr>  
[www.imn.ac.cr](http://www.imn.ac.cr)

Teléfono: (506) 2222 5616

Apartado postal: 5583-1000  
San José  
Costa Rica

