



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN SEDE BOGOTÁ

Modelación agrometeorológica de emisiones de Óxido Nitroso en *Brachiaria humidicola* bajo condiciones del Valle del Sinú

Eliecer David Díaz Almanza

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencia, Departamento de Geociencias
Bogotá D.C, Colombia

2012

Modelación agrometeorológica de emisiones de Óxido Nitroso en *Brachiaria humidicola* bajo condiciones del Valle del Sinú

Eliecer David Díaz Almanza

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias – Meteorología

Director:

M.Sc José Francisco Boshell Villamarín

Codirectora:

Doctora en Ciencias Biológicas Sony Reza García

Línea de Investigación:

Agrometeorológica

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencia, Departamento de Geociencia

Bogotá D.C, Colombia

2012

"Nadie podrá llevar por encima de su corazón a nadie, ni hacerle mal en su persona aunque piense y diga diferente". Pensamiento Wayúu

*A mis padres Elías y Dora,
A mis hermanos Ever, Viviana y Libeth
A la memoria de mi amigo Carlos Andrés S.H*

*“Pueden sacar a un hombre del campo, pero
nunca el campo de él “*

Agradecimientos

PRIMERAMENTE QUIERO AGRADECER A DIOS, POR ILUMINARME EN ESTE ARDUO CAMINO HACIA EL CONOCIMIENTO; POR PERMITIRME CONOCER A LAS PERSONAS QUE HAN SIDO IMPORTANTES EN ESTE PROCESO...

AGRADEZCO A MIS PADRES, HERMANOS Y DE MAS FAMILIAS POR SU APOYO, AYUDA Y COMPRENSIÓN...

MIS MÁS SINCEROS AGRADECIMIENTOS A MI PROFESOR Y DIRECTOR DE TESIS, FRANCISCO BOSHELL, POR TODA SU ENSEÑANZA, COLABORACIÓN, CONFIANZA Y DEDICACIÓN EN ESTE TRABAJO....

UN AGRADECIMIENTO MUY ESPECIAL A LA DRA SONY REZA GARCIA, POR SU APOYO, AYUDA, CONSEJOS, CONFIANZA, ENSEÑANZA Y PORQUE GRACIAS A ELLA FUE POSIBLE EL DESARROLLO DE LA PRESENTA INVESTIGACIÓN.

A MIS AMIGOS QUE SIEMPRE ME APOYARON... MEISY, CAROLINA, GENHLI, DAIRO, RODRIGO...

AGRADEZCO A EI MINISTERIO DE AGRICULTURA, AL CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT); A CORPOICA, ESPECIALMENTE AL CENTRO DE INVESTIGACION TURIPANÁ POR BRINDARME ESTAR EN SUS INSTALACIONES Y FACILITAR LA INFORMACIÓN PARA QUE FUESE POSIBLE EL DESARROLLARLO DEL PRESENTA TRABAJO.

A LOS COMPAÑEROS Y AMIGOS, HUGO CUADRADO, IVAN PASTRANA, MANUEL ESPINOSA Y EMIRO SUAREZ, POR SU AYUDO Y ENSEÑANZA...

A MIS PROFESORES DEL PROGRAMA DE CIENCIAS – METEOROLÓGICAS POR SU ENSEÑANZA, ESPECIALMENTE A LOS PROFESORES JORGE ZEA, GLORIA LEON Y EMEL VEGA.

A LUZBY ARENAS POR TODA SU AYUDA...

Y EN GENERAL A TODO EL MUNDO QUE DE UNA MANERA U OTRA SE HA VISTO IMPLICADO EN ESTE TRABAJO...

MI MÁS SINCERO AGRADECIMIENTO A TODOS...

Resumen

Se realizó la modelación agrometeorológica de las emisiones de óxido nitroso desde suelos cultivados con *Brachiaria humidicola* bajo condiciones edafológicas y meteorológicas del Valle del Sinú en Colombia. La modelación se efectuó a partir de la evaluación de las condiciones agrometeorológicas locales, del trabajo de campo realizado en CORPOICA – Centro de Investigación Turipaná y de la medición de emisiones de N_2O , que se realizó con la metodología de la cámara cerrada. En el CIAT se estimaron los flujos de óxido nitroso. Los datos de humedad del suelo se midieron en campo y los datos meteorológicos se obtuvieron de una estación operada por IDEAM, localizada en CORPOICA, Centro de Investigación Turipaná.

A través de modelos estadísticos empíricos no lineales, se evaluó la relación entre variables agrometeorológicas (humedad del suelo y temperatura del aire), y los flujos de N_2O emitidos desde suelos cultivados con *Brachiaria humidicola*. Se encontró que los aumentos en la humedad del suelo favorecen el incremento de los flujos y que la temperatura del aire previa al período de los muestreos, igualmente influye en las emisiones, pero según la especie de *Brachiaria* cultivada.

Por otra parte, mediante el modelo DNDC, utilizando variables meteorológicas a escala diaria y local, se simuló el proceso de descomposición y desnitrificación en el suelo cultivado con *Brachiaria humidicola*. Los resultados de óxido nitroso simulados por el modelo mostraron similitud, concordancia y no tienen diferencias significativas ($p=0,6737>0,05$) con los estimados experimentalmente en las parcelas cultivadas con las tres especies de *Brachiaria humidicola* en el tratamiento sin fertilización nitrogenada.

Palabras clave: Desnitrificación, Nitrificación, Óxido Nitroso, Gases de efecto invernadero, Flujos de N_2O desde suelos agrícolas, *Brachiaria humidicola*, Modelo DNDC.

Abstract

Agro-meteorological modeling was performed to simulate N₂O emissions from soils cultivated with *Brachiaria humidicola* in the Sinu Valley in Colombia, based on the evaluation of local agro-meteorological conditions, field work undertaken in the agricultural research center “CORPOICA Research Center Turipaná”, and N₂O emission measurement performed using the methodology of the closed chamber technique. Nitrous oxide fluxes were subsequently estimated at CIAT. Soil moisture data were measured directly in the cultivated fields and meteorological data were taken from a weather station located in CORPOICA Research Center Turipaná. Through empirical non-linear statistical models, a relationship between agro-meteorological variables (soil moisture, air temperature) and the flow of N₂O emitted from soils was evaluated. It was found that these variables influence the flow of N₂O emissions. Increases in soil moisture favor increased N₂O flows and air temperature influences the emissions according to the characteristics of the cultivated pasture.

On the other hand, by using the DNDC model, the process of decomposition and denitrification in soils cultivated with *Brachiaria* genotypes was simulated. Simulated nitrous oxide emissions showed similarity, agreement and no significant differences ($p < 0.05$) with those estimated experimentally.

Keywords: Denitrification, Nitrification, nitrous oxide, greenhouse gases, N₂O flows from agricultural soils, *Brachiaria humidicola*, DNDC Model.

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Lista de figuras.....	3
Introducción	6
1. MARCO TEÓRICO	13
1.1 Antecedentes.....	14
1.2 Efecto Invernadero	15
1.3 Óxido Nitroso.....	17
1.4 Factores que afectan las emisiones de óxido nitroso	17
1.4.1 Proceso de nitrificación	17
1.4.2 Proceso de desnitrificación	20
1.5 Metano	21
1.6 La mitigación del cambio climático a través de la agricultura	23
1.7 Variables Agrometeorológicas	23
1.7.1 Radiación solar	24
1.7.2 Temperatura del aire y del suelo	24
1.7.3 Humedad del aire y del suelo	25
1.7.4 La precipitación.....	25
1.8 <i>Brachiaria Humidicola</i>	26
2. Objetivos.....	27
2.1 Objetivo general.....	27
2.1.1 Objetivos específicos	27
3. METODOLOGÍA	29
3.1 Área de estudio.....	29
3.2 Datos utilizados	31
3.3 Diseño del experimento	32
3.4 Medición de gases del suelo.....	33
3.4.1 Instalación de anillos	34
3.4.2 Toma de muestra de gases.....	34
3.4.3 Análisis de las muestras de gases	35
3.5 Análisis estadísticos	36
3.5.1 Correlación de Pearson y Spearman.....	36
3.5.2 Análisis de regresión lineal.....	37
3.6 Modelos DNDC.....	38
3.6.1 Datos de Entrada para DNDC	42

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	44
4.1 Condiciones agrometeorológicas	44
4.2 Análisis de los flujos de N ₂ O emitidos desde suelos de parcelas con diferentes coberturas y aplicaciones de N.	53
4.3 Evaluación de la humedad del suelo en parcelas con diferentes coberturas ..	60
4.4 Relación entre flujos de óxido nitroso y la humedad del suelo.....	63
4.4.1 Relación de los flujos de N ₂ O de parcelas cultivadas con B.h CIAT 26159 con la humedad del suelo.	63
4.4.2 Relación de los flujos de N ₂ O de parcelas cultivadas con B.h CIAT 16888 con la humedad del suelo.	65
4.4.3 Relación de los flujos de N ₂ O de parcelas cultivadas con B.h CIAT 679 con la humedad del suelo.	67
4.4.4 Relación de los flujos de N ₂ O de parcelas con suelos descubierto con la humedad del suelo.	68
4.4.5 Relaciones entre flujos de N ₂ O y Humedad del suelo en época seca y de lluvias con diferentes dosis de fertilización.	70
4.4.6 Relación de los flujos acumulados de N ₂ O y la Precipitación.....	73
4.4.7 Relación entre flujos de N ₂ O bajo diversas aplicaciones de nitrógeno, con humedad del suelo y temperatura del aire.....	74
4.5 Modelos estadísticos empíricos de flujos de Óxido Nitroso en función de diversas condiciones agrícolas y agrometeorológicas.....	80
4.5.1 Modelación agrometeorológica de los flujos de N ₂ O de parcelas cultivadas con B.h CIAT 679 con aplicación de 0, 150 y 300 Kg N/ha/año.....	80
4.5.2 Modelación agrometeorológica de los Flujos de N ₂ O en suelos cultivados con B.h CIAT 16888.....	85
4.5.3 Modelación agrometeorológica de los Flujos de N ₂ O en suelos cultivados con B.h CIAT 26159.....	89
4.5.4 Modelación de los flujos de N ₂ O emitidos desde suelos descubiertos.....	95
4.6 Resultados de las simulaciones con el Modelo DNDC	100
5. Conclusiones y recomendaciones	107
5.1 Conclusiones.....	107
5.2 Recomendaciones.....	109
A. Anexo: Análisis de Varianza	110
B. Anexo: Resúmenes de cada una de los datos las variables de en estudio.....	117
C. Anexo: Humedad del suelo simulada con DNDC y medida en campo.....	119
D. Anexo: Ecuación para calcular flujos.....	122
E. Anexo: Resultados de Metano	124
Bibliografía	133

LISTA DE FIGURAS

Figura. 2.1. Ciclo del nitrógeno	11
Figura. 2.1. Efecto de la temperatura sobre la actividad de nitrificación.	12
Figura 3.1: Ubicación del lote La Electrificadora en el Centro de Investigación Turipaná CORPOICA	21
Figura 3.2: Zona de la Microrregión del Sinú	22
Figura 3.3. Geomorfología del valle inundable del río Sinú	23
Foto 1: Instalación de anillos y cámara	26
Foto 2: Toma de muestra de gases	27
Figura 3.4. Representación esquemática de la estructura del modelo DNDC	33
Figura 4. 1.a). Precipitación mensual –multianual entre 1981 a 2010 en la estación Turipaná- Cereté. b) Precipitación entre Octubre de 2009 y noviembre de 2010 en la estación Turipaná- Cereté	37
Figura 4.2. Temperatura del aire representativa en la zona de estudio	38
Figura 4.3: Humedad del suelo (%) en las cuatros muestras tomadas en parcelas cultivadas con <i>B.h</i> CIAT 679: a) sin aplicación de fertilizante, b) con aplicación de 150 KgN/ha /años de fertilizante y c) con aplicación de 300 KgN/ha /años de fertilizante.	39
Figura 4.4: Humedad del suelo (%) en las cuatros muestras tomadas en parcelas cultivadas con <i>B.h</i> CIAT 16888: a) sin aplicación de fertilizante, b) con aplicación de 150 KgN/ha /años de fertilizante y c) con aplicación de 300 KgN/ha /años de fertilizante.	40
Figura 4.5: Humedad del suelo (%) en las cuatros muestras tomadas en parcelas cultivadas con <i>B.h</i> CIAT 26159: a) sin aplicación de fertilizante, b) con aplicación de 150 KgN/ha /años de fertilizante y c) con aplicación de 300 KgN/ha /años de fertilizante.	42
Figura 4.6: Humedad del suelo (%) tomadas en parcelas de suelo descubierto: a) sin aplicación de fertilizante, b) con aplicación de 150 KgN/ha /años de fertilizante y c) con aplicación de 300 KgN/ha /años de fertilizante.	43
Figura 4.7. Representación de la serie de los flujos de N ₂ O ($\mu\text{gN}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{hr}$) emitidos desde suelo de parcelas con tres dosis de fertilizantes nitrogenado. a) Parcelas cultivadas con <i>B.h</i> CIAT 26159; b) Parcelas cultivada con <i>B.h</i> CIAT 16888;c) Parcelas cultivadas con <i>B.h</i> CIAT 679 y d) Parcelas con el suelo descubierto.	46
Figura 4.8. Representación de la serie de los flujos de N ₂ O ($\mu\text{gN}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{hr}$) emitidos desde suelos de parcelas con diferentes coberturas, sin fertilización nitrogenada.	50
Figura 4.9. Representación de la serie de los flujos de N ₂ O emitidos desde suelos de parcelas con diferentes coberturas: a) en época de lluvia sin fertilizantes nitrogenado. b) En época seca.	51
Figura 4.10. Representación de la serie de la humedad del suelo (%) en todo el periodo de estudio en parcelas con diferentes coberturas, sin aplicación de fertilizantes nitrogenado	53
Figura 4.11. Representación de la serie de la humedad del suelo (%) en parcelas con	54

diferentes coberturas; a) en época de lluvia sin aplicación de fertilizantes nitrogenado. b) En época seca.	
Figura 4.12. a.) Relación entre el flujo de N ₂ O de suelos cultivados con <i>B.h</i> CIAT 26159 y la humedad del suelo entre octubre del 2009 a noviembre de 2010. b) Relación entre el flujo N ₂ O de suelos cultivado con <i>B.h</i> CIAT 26159 y la humedad del suelo por intervalos.	56
Figura 4.13. a.) Relación entre el flujo de N ₂ O emitido desde suelos cultivado con <i>B.h</i> CIAT 16888 y la humedad del suelo entre octubre del 2009 a noviembre de 2010. b.) Relación entre el flujo de N ₂ O emitido desde suelos cultivado con <i>B.h</i> CIAT 16888 con humedad del suelo por intervalos	58
Figura 4.14. a.) Relación entre el flujo de N ₂ O emitido desde suelos cultivado con <i>B.h</i> CIAT 679 y la humedad del suelo entre octubre del 2009 a noviembre de 2010. b.) Relación entre el flujo de N ₂ O emitido desde suelos cultivado con <i>B.h</i> CIAT 679 con humedad del suelo por intervalos.	59
Figura 4.15.a.) Relación entre los flujo de N ₂ O emitidos desde suelos descubiertos y la humedad del suelo entre octubre del 2009 a noviembre de 2010. b). Relación de los flujo de N ₂ O emitidos desde suelos descubiertos con humedad del suelo por intervalos	61
Figura 4.16: Flujos de N ₂ O experimental, promedio y modelado; emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con <i>B.h</i> CIAT 679 sin aplicación de fertilizante nitrogenado entre octubre de 2009 a noviembre de 2010.	73
Figura 4.17: Flujos de N ₂ O experimental, promedio y modelado; emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con <i>B.h</i> CIAT 679 con aplicación de diferentes dosis de fertilizante entre octubre de 2009 a noviembre de 2010;	76
Figura 4.18: Flujos de N ₂ O experimental, promedio y modelado; emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con <i>B.h</i> CIAT 16888 sin aplicación de fertilizante nitrogenado entre octubre de 2009 a noviembre de 2010.	78
Figura 4.19: Flujos de N ₂ O experimental, promedio y modelado; emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con <i>B.h</i> CIAT 16888 con aplicación de diferentes dosis de fertilizante entre octubre de 2009 a noviembre de 2010.	81
Figura 4.20: Flujos de N ₂ O experimental, promedio y modelado; emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con <i>B.h</i> CIAT 26159 sin aplicación de fertilizante nitrogenado entre octubre de 2009 a noviembre de 2010.	83
Figura 4.21.a: Flujos de N ₂ O experimental, promedio y modelado; emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con <i>B.h</i> CIAT 26159 con aplicación de diferentes dosis de fertilizante entre octubre de 2009 a noviembre de 2010	86
Figura 4.21.b: Flujos de N ₂ O experimental, promedio y modelado por la ecuación 5.19; emitidos desde suelos de parcelas descubiertas con aplicación de diferentes dosis de fertilizante entre octubre de 2009 a noviembre de 2010.	90
Figura 4.22: Flujos de N ₂ O experimentalmente mediante la técnica de la cámara cerrada estática; emitidos desde suelos de parcelas cultivados genotipos de <i>Brachiaria humidicola</i> sin aplicación de fertilizante nitrogenado entre octubre de 2009 a diciembre de 2010.,a) Parcelas cultivada con <i>B.h</i> CIAT 679.,b) Parcelas cultivada con <i>B.h</i> CIAT 16888.,c) Parcelas cultivada con <i>B.h</i> CIAT 26159.	93
Figura 4.23: Flujos de N ₂ O experimentalmente mediante la técnica de la cámara cerrada estática y modelados con DNDC; emitidos desde suelos de parcelas cultivados genotipos de <i>Brachiaria humidicola</i> con aplicación de 150 KgN/ha/años de fertilizante entre octubre de 2009 a diciembre de 2010.,a) Parcelas cultivada con <i>B.h</i> CIAT 679.,b) Parcelas cultivada con <i>B.h</i> CIAT 16888.,c) Parcelas cultivada con <i>B.h</i> CIAT 26159.	94

- Figura 4.24: Flujos de N₂O experimentalmente mediante la técnica de la cámara cerrada estática y modelados con DNDC con un rezagó de un días; emitidos desde suelos de parcelas cultivados genotipos de *Brachiaria humidicola* con aplicación de 150 KgN/ha/años de fertilizante entre octubre de 2009 a diciembre de 2010.,a) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 679.,b) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 16888.,c) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 26159. 94
- Figura 4.25: Flujos de N₂O experimentalmente mediante la técnica de la cámara cerrada estática y modelados con DNDC; emitidos desde suelos de parcelas cultivados genotipos de *Brachiaria humidicola* con aplicación de 300 KgN/ha/años de fertilizante entre octubre de 2009 a diciembre de 2010.,a) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 679.,b) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 16888.,c) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 26159 95
- Figura 4.26: Flujos de N₂O experimentalmente mediante la técnica de la cámara cerrada estática y modelados con DNDC con un rezagó de un días; emitidos desde suelos de parcelas cultivados genotipos de *Brachiaria humidicola* con aplicación de 300 KgN/ha/años de fertilizante entre octubre de 2009 a diciembre de 2010.,a) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 679.,b) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 16888.,c) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 26159. 95
- Figura 4.27: Flujos de N₂O experimentalmente mediante la técnica de la cámara cerrada estática y modelados con DNDC; emitidos desde suelos descubiertos con aplicación de dosis de fertilizante entre octubre de 2009 a diciembre de 2010. a) sin fertilizante nitrogenado. b) 150 KgN/ha/años. c) 300 KgN/ha/años. 96

LISTA DE TABLAS

Tabla. 2.1. Lista de gases de efecto invernadero (GEI)	8
Tabla 3.2: Fechas de muestreos, fertilización y época	25
Tabla 4.1. Análisis de los flujos medios de N ₂ O ($\mu\text{gN}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{hr}$) emitidos desde el suelo con diferentes coberturas, y con tres dosis de fertilizante nitrogenado; usando el método de la diferencia significativa de Fisher, con un nivel de confianza del 95%	46
Tabla 4.2. Análisis de los flujos medios de N ₂ O ($\mu\text{gN}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{hr}$) de suelos con diferentes coberturas, en parcelas con dosis nulas de fertilizantes (0 KgN/ha/año); usando el método de la diferencia significativa de Fisher, con un nivel de confianza del 95%.	50
Tabla 4.3. Análisis de las medias de la humedad del suelo (%) de parcelas con diferentes coberturas, sin aplicación de fertilizantes nitrogenado; usando el método de la diferencia significativa de Fisher, con un nivel de confianza del 95%.	52
Tabla 4.4: Coeficientes de correlación de PEARSON entre los flujos de N ₂ O de suelos cultivados con <i>B.h</i> CIAT 26159 entre octubre del 2009 y noviembre de 2010 y humedad del suelo por intervalos, para un valor de significancia $p < 0,1$.	56
Tabla 4.5: Coeficiente de relación entre los flujos de N ₂ O emitido desde suelos cultivados con <i>B.h</i> CIAT 16888 entre octubre del 2009 a noviembre de 2010 con humedad del suelo por intervalos, para un valor de significancia $p < 0,1$.	58
Tabla 4.6: Coeficiente de relación entre los flujos de N ₂ O emitido desde suelos cultivados con <i>B.h</i> CIAT 679 entre octubre del 2009 a noviembre de 2010 con humedad del suelo por intervalos, para un valor de significancia $p < 0,1$.	60
Tabla 4.7: Coeficiente de relación entre flujos de N ₂ O emitidos desde suelos descubiertos entre octubre del 2009 a noviembre de 2010 con humedad del suelo por intervalos, para un valor de significancia $p < 0,1$.	62
Tabla 4.8. Coeficientes de relación entre los flujos de N ₂ O de el suelo con <i>B.h</i> CIAT 26159 y Hs en época seca y época de lluvia con fertilizante N, con $p < 0,1$.	63
Tabla 4.9. Coeficientes de relación entre los flujos de N ₂ O de suelos con <i>B.h</i> CIAT 16888 y Hs en época seca y época de lluvia con fertilizante N, con $p < 0,1$.	64
Tabla 4.10. Coeficientes de relación entre los flujos de N ₂ O de suelos con <i>B.h</i> CIAT 679 y Hs en época seca y época de lluvia con fertilizante N, con $p < 0,1$.	64
Tabla 4.11. Coeficientes de relación entre los flujos de N ₂ O de suelos descubiertos y Hs en época seca y época de lluvia con fertilizante N, con $p < 0,1$.	65
Tabla 4.12. Coeficiente de correlación entre los flujos de N ₂ O acumulados emitidos desde suelos cultivados con tres genotipos de <i>Brachiaria humidicola</i> y suelo descubierto, con la precipitación acumulado en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.	66
Tabla 4.13: Coeficientes de correlación de Pearson entre los flujos de N ₂ O de suelos con <i>B.h</i> CIAT 679 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las	68

variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.

Tabla 4.14: Coeficientes de correlación de Spearman entre los flujos de N_2O de suelos con *B.h* CIAT 679 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0$

68

Tabla 4.15: Coeficientes de correlación de Pearson entre los flujos de N_2O de suelos con *B.h* CIAT 16888 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.4: Coeficientes de correlación de Pearson entre los flujos de N_2O de suelos con *B.h* CIAT 16888 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.

69

Tabla 4.16: Coeficientes de correlación de Spearman entre los flujos de N_2O de suelos con *B.h* CIAT 16888 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0$

69

Tabla 4.17.: Coeficientes de correlación de Pearson entre los flujos de suelos con *B.h* CIAT 26159 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.

70

Tabla 4.18: Coeficientes de correlación se Spearman entre los flujos de N_2O de suelos con *B.h* CIAT 26159 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0$

70

Tabla 4.19: Coeficientes de correlación de Pearson entre los flujos de N_2O de parcelas de suelo descubierto usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.

71

Tabla 4.20: Coeficientes de correlación de Spearman entre los flujos de N_2O de parcelas de suelo descubierto usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.

72

Introducción

Los gases de efecto invernadero (GEI) son componentes gaseosos de la atmósfera que atrapan el calor impidiendo su salida al espacio exterior. Esta energía se transfiere a los GEI, resultando un aumento de la temperatura global en la atmósfera inferior. Los GEI son de importancia crítica para regular la temperatura de la superficie terrestre, ya que sin ellos la temperatura media en la superficie terrestre sería muy inferior a 15 ° C (Steinfeld et al. 2006). Desde el período pre-industrial, las emisiones globales de GEI han aumentado de manera exponencial y en un 70% entre 1970 y 2004 como resultado de las actividades industriales y agrícolas (IPCC, 2007).

En consecuencia, el promedio de la temperatura de la superficie terrestre ha aumentado 0,6 °C ± 0.2°C (IPCC, 2001), desde finales del siglo XVIII, con aumento de 5,1 °C previsto para el año 2100 (Steinfeld et al., 2006). Este aumento de la temperatura se prevé que afecte el clima de la Tierra y patrones de fenómenos extremos, como sequías e inundaciones. La comprensión de los impactos de las actividades humanas en las emisiones de GEI procedentes de los suelos agropecuarios es vital para mitigar los efectos negativos del sector agrícola sobre el cambio climático, ya que las actividades agrícolas y ganaderas contribuyen directamente a la emisión de GEI (IPCC, 2007).

Los principales gases de efecto invernadero antropogénicos son el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). Estos gases de efecto invernadero tienen diferente potencial de calentamiento atmosférico (PCA) con base en la capacidad de los gases para absorber la radiación infrarroja y su permanencia en la atmósfera. El potencial de calentamiento atmosférico del (CH₄) y el N₂O, en relación con el PCA del CO₂, es actualmente calculado en 25 y 298 respectivamente (Solomon et al., 2007), lo que indica que el calentamiento ocasionado por 1 kg de (CH₄) equivale al calentamiento de 25 kg de CO₂ y el calentamiento de 1 kg de N₂O equivale al ocasionado por 298 kg de CO₂. La principal fuente de emisiones de CO₂ es el uso de combustibles fósiles,

mientras que los sistemas agrícolas contribuyen al 40% y 90% de las emisiones de (CH₄) y N₂O en el mundo, respectivamente. Los sistemas de pastoreo contribuyen en un 20% a las emisiones totales de CH₄ y entre el 16% y 33% a las emisiones de N₂O (Clark et al., 2005). Se estima que estas estimaciones tienen niveles de incertidumbre cercanos al 25%. Por este motivo es recomendable generar información local ya que las emisiones dependen no solamente del aporte de N al suelo sino también de otros factores como la humedad y temperatura del suelo, su contenido de C y el pH, factores que son muy variables en función del sitio (Videla et al, 2009).

Las emisiones de CH₄ del suelo son el resultado de su producción y oxidación, procesos a su vez afectados por el nivel freático, la temperatura del suelo, la tasa de difusión, el nivel de oxígeno y el drenaje. Cada uno de estos procesos y factores tienen diversa variabilidad espacial y temporal, haciendo difícil extrapolar tasas de emisiones de un sitio a otro (Videla et al, 2009). El CH₄ es el hidrocarburo más abundante en la atmósfera, sus principales fuentes son los campos de arroz y las superficies húmedas naturales donde el oxígeno disuelto está en muy baja concentración (Martinez et al. 1999). Algunos tipos de suelo se comportan como sumidero, pues las mediciones realizadas en suelos tropicales por Keller et al. (1993), y templados por Willison et al. (1995), indican que la destrucción de metano por este tipo de terrenos constituye alrededor del 15% del total de los sumideros.

El N₂O tiene un tiempo de residencia largo en la atmósfera y es muy eficiente absorbiendo radiaciones de onda larga. Es un producto colateral o intermedio de la nitrificación y la desnitrificación (Firestone et al, 1989). Luego de aportes nitrogenados al suelo se producen incrementos en las tasas de N₂O, tanto en condiciones de campo como de laboratorio (Kaiser et al., 1998). La nitrificación requiere amonio, oxígeno y CO₂, mientras que la desnitrificación es favorecida por adecuados niveles de C disponible y nitrato, en condiciones de deficiencia de oxígeno. Estos factores a su vez están regulados por ciertas propiedades del suelo como textura, temperatura, humedad y pH (Videla et al 2009; Dalal et ál. 2003).

La producción de NO y N₂O en suelos inundados se limita porque el nitrato es reducido a su forma de N₂ en condiciones anaeróbicas (Bronson et al. 1997). Según Davidson et al.(2000) las emisiones de NO y N₂O del suelo están controladas por la temperatura del suelo, la humedad del suelo, disponibilidad de sustrato, y la acidez del suelo. Los

resultados de estudios de campo en suelos cultivados en EE.UU han mostrado que el flujo de NO y N₂O aumenta de forma exponencial con la temperatura del suelo. Kim et al. (2002) encontraron una relación entre la humedad del suelo y el flujo de NO y N₂O que se desprenden de suelos en Corea, cultivados con cebollas verdes.

Según el IPCC (2006), las emisiones de N₂O pueden ser directas e indirectas. Las emisiones directas se producen por aplicaciones de N a los suelos y las indirectas por volatilización de NH₃ y NO_x por el manejo del suelo, por la quema de combustibles fósiles y la quema de biomasa. Desde la perspectiva agrícola, las emisiones de N₂O del suelo, representan pérdidas del sistema y disminución en la eficiencia de uso del nitrógeno (N). El suelo es considerado la fuente más importante de emisiones de N₂O, contribuyendo con un 65% del total global. La emisión anual de N₂O de sistemas agrícolas es de 6,3 x 10⁶ toneladas, e incluye las emisiones de suelos agrícolas y sistemas de producción animal a sistemas acuáticos y a la atmósfera (Bhatia et ál. 2004).

Como las emisiones de GEI desde los suelos son el resultado de procesos microbianos, las emisiones presentan un alto grado de variabilidad temporal y espacial. La medición directa de las emisiones de GEI con fines de inventario es poco práctica ya que requeriría muchas mediciones que se tienen que hacer en grandes áreas y durante largos períodos de tiempo. Muchos países utilizan el valor por defecto del IPCC de conversión de N aplicado o presente en el suelo, en emisiones de N₂O, para realizar sus inventarios nacionales de emisiones de GEI. Este método supone simplemente que una proporción determinada del N aplicado se emite como N₂O a la atmósfera. El factor de emisión se deduce de un número limitado de observaciones y representa un valor promedio de todos los tipos de suelo, las condiciones climáticas y las prácticas de gestión. Como las emisiones de N₂O son muy sensibles a todos estos factores hay un alto grado de incertidumbre asociada con el factor de emisión. Además, el método de factor de emisión no tiene en cuenta muchas de las prácticas de gestión que podrían reducir las emisiones de N₂O (Por ejemplo, el calendario de fertilización, el uso de inhibidores de la nitrificación (IN)) (Donna L, et al. 2010).

Comprender los factores que limitan la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero es fundamental para poder formular políticas de adaptación y/o mitigación. El desarrollo de modelaciones de emisiones de N₂O basadas en procesos agrometeorológicos, no sólo permite que la simulación de las emisiones agrícolas de GEI se ajuste en un rango de escala local, sino también la exploración de posibles

estrategias de mitigación. Por estas razones el desarrollo de un enfoque basado en procesos agro - meteorológicos es altamente deseable y con esta finalidad se ha enfocado la presente Tesis.

1. MARCO TEÓRICO

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar (IPCC, 2007). La determinación de las causas del cambio climático ha sido un largo proceso y ha involucrado el trabajo de miles de científicos de todo el mundo.

En 1995, alrededor de 2.500 científicos coincidieron, por primera vez, en afirmar que el aumento de las emisiones de GEI son la responsables del cambio climático. Las emisiones mundiales de GEI por efecto de actividades humanas han aumentado, desde la era preindustrial, en un 70% entre 1970 y 2004 (IPCC, 2007). Por lo tanto, la cuestión ya no es más si los humanos alteran el clima mundial, sino dónde, cuándo y en qué medida se está haciendo. Lo más importante de esta conclusión científica es que ahora se sabe que, para prevenir la ocurrencia de cambios catastróficos en el clima de la Tierra, se deben reducir las emisiones de GEI (IPCC, 1996 y 2006). El calentamiento antropógeno de los tres últimos decenios ha ejercido probablemente una influencia discernible a escala mundial sobre los cambios observados en numerosos sistemas físicos y biológicos (IPCC, 2007).

Las concentraciones de CO₂, CH₄ y N₂O en la atmósfera mundial han aumentado considerablemente por efecto de las actividades humanas desde 1750. La concentración mundial de N₂O en la atmósfera aumentó respecto de los valores preindustriales, pasando de aproximadamente 270 ppmm a 319 ppmm en 2005. El aumento de la concentración de N₂O se debe principalmente a las actividades agrícolas (IPCC, 2006 y 2007).

1.1 Antecedentes

No se tienen evidencias que se hayan realizado investigaciones sobre la modelación agrometeorológica de emisiones de Óxido Nitroso en *Brachiaria humidicola* bajo condiciones del Valle del Sinú, Colombia, aunque existen trabajos relacionados con la modelación agrometeorológica en Nueva Zelanda, como el de Donna et al (2010), donde se analiza un modelo basado en procesos de los flujos de gases de efecto invernadero de los suelos agrícolas; en este trabajo se encontró que los modelos agrometeorológicos, se pueden utilizar para evaluar el impacto de posibles estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero.

Giltrap et al (2010), desarrollaron un estudio preliminar para modelar los efectos de un inhibidor de la nitrificación en las emisiones de N_2O de la orina del ganado; se encontró un modelo simplificado de inhibición de la nitrificación (IN) utilizando el modelo NZ-DNDC basado en procesos, para investigar el efecto de diciandiamida (DCD) sobre las transformaciones de N en nitrato (NO_3) y la consiguiente reducción de N_2O en un sistema de pastoreo. Cheng-I et al (2005) analizaron el efecto de las perturbaciones climáticas futuras sobre las emisiones de N_2O procedentes de pastos fertilizados en pastizales húmedos y estimaron un incremento de emisiones de N_2O mucho mayor que la disminución prevista con la reducción de las aplicaciones de fertilizantes. Saggat S. et al (2004) analizaron la modelización de emisiones de óxido nitroso en sistemas lecheríos bajo pastoreo, y encontraron que los flujos de N_2O procedentes de los sitios de pastoreo fueron superiores que los flujos de los sitios no pastoreados, promediando 26,4 N_2O g/ha/día para el suelo franco arenoso fino y 32,0 N_2O g/ha/día para el suelo franco limoso; sus resultados muestran que los poros del suelo y las excretas de fertilizante-N, fueron las variables que más fuertemente regulan los flujos de N_2O .

En el presente estudio (Tesis de Maestría) se utilizó una metodología similar a la usada por Donna L (2010), Giltrap et al (2010), Cheng-I (2005) y Saggat S. (2004) para modelar emisiones de N_2O , pero en lugares y tipos de pasturas diferentes.

1.2 Efecto Invernadero

Los gases de efecto invernadero absorben la radiación infrarroja, emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera debido a los mismos gases, y por las nubes. La radiación atmosférica se emite en todos los sentidos, incluso hacia la superficie terrestre. Los gases de efecto invernadero atrapan el calor dentro del sistema de la troposfera terrestre. A esto se le denomina “efecto invernadero natural”.

La radiación atmosférica se vincula en gran medida a la temperatura del nivel al que se emite. En la troposfera, la temperatura disminuye generalmente con la altura. En efecto, la radiación infrarroja emitida al espacio se origina en altitud con una temperatura que tiene una media de -19°C , en equilibrio con la radiación solar neta de entrada, mientras que la superficie terrestre tiene una temperatura media mucho mayor, de unos $+14^{\circ}\text{C}$. Un aumento en la concentración de gases de efecto invernadero produce un aumento de la capacidad infrarroja de la atmósfera, y por lo tanto, una radiación efectiva en el espacio desde una altitud mayor a una temperatura más baja. Esto causa un forzamiento radiativo ^{a*}, un desequilibrio que sólo puede ser compensado con un aumento de la temperatura del sistema superficie–troposfera. A esto se denomina ‘efecto invernadero aumentado’ (IPCC, 2000). De acuerdo con el actual consenso científico, el efecto invernadero se está viendo acentuado en la Tierra por la emisión de ciertos gases, como el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), debida a la actividad económica humana (IPCC, 2000).

Los gases de efecto invernadero (Tabla 2.1), atrapan el calor dentro del sistema superficie-troposfera. Este mecanismo es diferente al de un verdadero mecanismo de invernadero, donde el aislamiento del aire en el interior de la estructura, limita la convección y conducción, que es lo que calienta el aire interno.

^{a*} Forzamiento radiativo: Mide en términos simples la importancia de un posible mecanismo de cambio climático. El forzamiento radiativo es una perturbación del balance de energía del sistema Tierra–atmósfera (en W/m^2) que se produce, por ejemplo, a raíz de un cambio en la concentración de dióxido de carbono o en la energía emitida por el Sol; el sistema climático responde al forzamiento radiativo de manera que se restablezca el balance de energía. Un forzamiento radiativo tiende, si es positivo, a caldear la superficie y, si es negativo, a enfriarla. El forzamiento radiativo suele expresarse como un valor medio mundial y anual. Una definición más precisa del forzamiento radiativo, tal como se emplea en los informes del IPCC, es la perturbación del balance de energía del sistema superficie–troposfera, dejando un margen para que la estratosfera se reajuste a un estado de equilibrio radiativo medio mundial (IPCC, 1994). Se denomina también “forzamiento del clima”.

El efecto invernadero fue descubierto por Joseph Fourier en 1824, con los primeros experimentos confiables realizados por John Tyndall en el año 1858 y reportado por primera vez de manera cuantitativa por Svante Arrhenius en 1896. En ausencia del efecto invernadero en atmósfera gaseosa, la Tierra cuya temperatura media superficial actual es de 14°C (57°F) podría ser tan baja como -18°C (-0,4°F).

El calentamiento de la Tierra es inequívoco, como lo evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar (IPCC, 2007); se cree que es el resultado de un aumento del efecto invernadero natural, debido principalmente al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera y a cambios en el uso del suelo (IPCC, 2000).

Tabla. 2.1. Lista de gases de efecto invernadero (GEI)

GEI	Concentración 1750	Concentración 1992	Fuerza Irradiativa (W/m ²)
Dióxido de Carbono	280 ppmv	355 ppmv	1,56
Metano	0,8 ppmv	1,72 ppmv	0,5
Óxido Nitroso	275 ppbv	310 ppbv	0,1
CFC-11	0	280 pptv	(siguiente)
CFC-12	0	484 pptv	0,3 (todos los CFCs)
HCFCs/HFCs	0	Sin datos	0,05
Ozono Troposférico	Sin datos	Variable	0,2 - 0,6
Ozono Estratosférico	Sin datos	300 unidad. dobson	-0,1

Fuente: IPCC 2000

El efecto invernadero es uno de los varios factores que afectan a la temperatura de la Tierra. Otras reacciones positivas y negativas pueden amortiguar o amplificar el efecto invernadero. La importancia de medir flujos naturales de gases trazas radica en la constatación de que se están produciendo variaciones de sus proporciones en la mezcla atmosférica, con la consiguiente repercusión en la calidad del aire.

1.3 Óxido Nitroso

El óxido nitroso (N_2O), cuyas fuentes son de carácter natural y antropogénico, contribuye con cerca del 6% del forzamiento del efecto invernadero. Sus fuentes incluyen los océanos, la quema de combustibles fósiles y biomasa y la agricultura (IPCC, 1997). El N_2O es inerte en la troposfera. Su principal sumidero es a través de las reacciones fotoquímicas en la estratosfera que afectan la abundancia de ozono estratosférico. La fuente más importante de N_2O son las emisiones generadas por suelos agrícolas y en menor grado por el consumo de combustibles fósiles para la transformación de energía y las emitidas por descomposición de proteínas de aguas residuales domésticas. Las emisiones de N_2O generadas por los suelos agrícolas se deben principalmente al proceso microbiológico de la nitrificación y desnitrificación en el suelo. Se pueden distinguir tres tipos de emisiones; las directas desde el suelo, las directas del suelo debido a la producción animal (pastoreo) y las indirectas generadas por el uso de fertilizantes (Domínguez, V , 2007).

1.4 Factores que afectan las emisiones de óxido nitroso

Las emisiones de N_2O procedentes desde los suelos se generan de los procesos de nitrificación-desnitrificación. La cantidad de N depositado en los suelos es determinante para las emisiones. Las condiciones ambientales también influyen las emisiones, en particular las precipitaciones y su interacción con el tipo de suelo y el espacio poroso de éste (Kelliher et al, 2003).

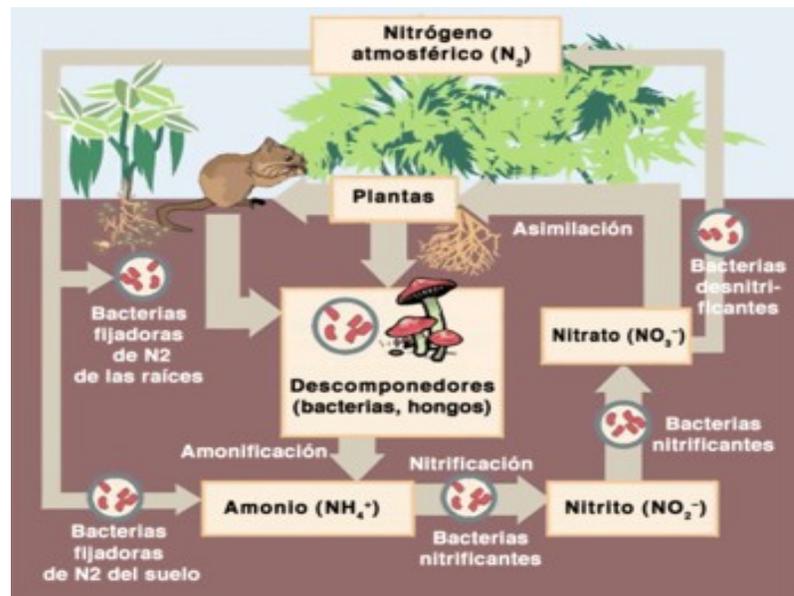
1.4.1 Proceso de nitrificación

El proceso de nitrificación consiste en la oxidación de amoníaco bajo condiciones estrictamente aeróbicas. En ambientes con un potencial redox alto, el amoníaco puede

ser oxidado a óxidos de nitrógeno y a nitrato. No obstante, siendo el amoníaco un compuesto estable, se requieren agentes oxidantes fuertes o agentes catalíticos para que se pueda efectuar su oxidación. En la naturaleza contamos con un grupo de bacterias aerobias estrictas que poseen los agentes catalíticos (ej. enzimas) apropiados para efectuar dicha reacción de oxidación. Estas bacterias se conocen con el nombre de bacterias nitrificantes. La oxidación de amoníaco por estas bacterias se observa en suelos con buen drenaje, a un pH neutral o en cuerpos de agua con un alto contenido de oxígeno disuelto y un pH neutral. Condiciones de anoxia o una alta acidez inhiben la actividad catalítica de estas bacterias. El proceso de nitrificación ocurre en dos etapas; comienza con la oxidación del amoníaco a nitritos, seguido de la oxidación del nitrito a nitrato. En cada una de estas etapas intervienen diferentes poblaciones de bacterias quimiolitotróficas. La oxidación de amoníaco (NH_3) a nitrito (NO_2^-) es mediada principalmente por bacterias del género *Nitrosomonas*, mientras que en la oxidación de nitrito (NO_2^-) a nitrato (NO_3^-) intervienen frecuentemente bacterias del género *Nitrobacter*. No se conoce hasta el presente de ninguna bacteria quimiolitotrófica que puede oxidar el amoníaco directamente a nitrato. Aunque existen algunas bacterias quimioorganotróficas y algunos hongos que pueden oxidar el amoníaco directamente a nitrato, la magnitud de dicha actividad se considera de escasa importancia ecológica.

La nitrificación también juega un importante rol en la remoción del nitrógeno orgánico de aguas servidas, donde la remoción convencional es por esa nitrificación bacteriana, seguida de la desnitrificación. El costo de este proceso reside mayormente en la aireación (dar oxígeno en el reactor) y la adición de una fuente externa de carbono para la desnitrificación. En muchos ambientes, ambos organismos se hallan juntos, rindiendo nitrato como el producto final. Sin embargo, es posible diseñar sistemas donde se forme selectivamente nitrito (el proceso Sharon). En conjunto con la amonificación, la nitrificación forma parte del proceso de mineralización, que hace referencia a la descomposición completa de materia orgánica, con la liberación de compuestos nitrogenados disponibles para los vegetales (formas minerales, no orgánicas), esto completa el ciclo del nitrógeno (Figura 2.1).

Figura. 2.1. Ciclo del nitrógeno



Fuente: Fuente: Miller, 1991

La nitrificación es entonces un proceso de oxidación de compuestos nitrogenados (efectivamente, hay pérdida de electrones del átomo de N al átomo de O):

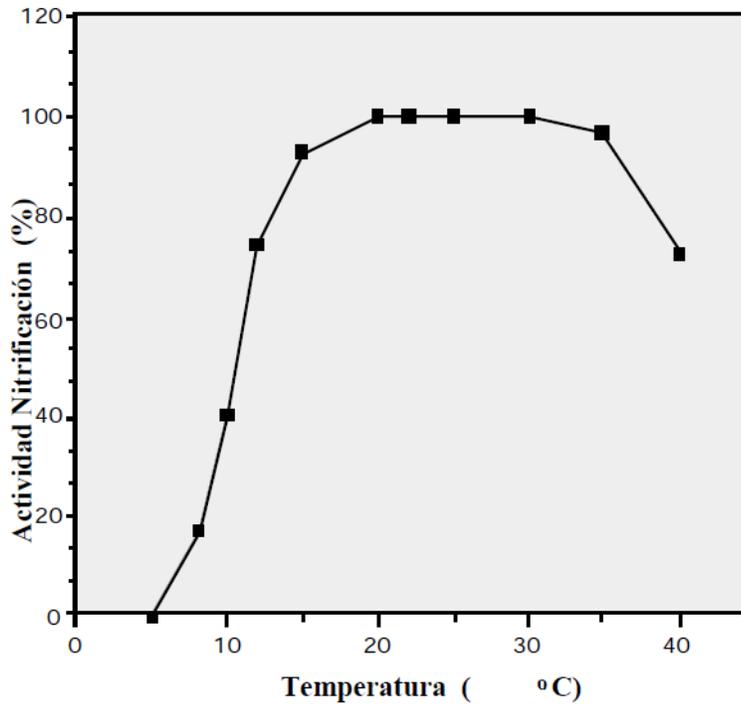
1. $NH_3 + O_2 \rightarrow NO_2^- + 3H^+ + 2e^-$
2. $NO_2^- + H_2O \rightarrow NO_3^- + 2H^+ + 2e^-$

El conocimiento de las condiciones que afectan las actividades y desarrollo de las bacterias nitrificantes, y por consiguiente, la formación de nitratos a partir de sales amónicas, es de gran interés para la agricultura.

El proceso de nitrificación es afectada por la temperatura (Figura 2.2). La actividad máxima de nitrificación se registra a lo largo de un rango amplio de temperaturas, que por lo general se extiende de 15 a 35°C. Cuando la temperatura desciende de los 15°C, la razón de nitrificación cae abruptamente, reduciéndose a un 50% cuando la temperatura baja a 12°C.

Los valores óptimos de la humedad del suelo deben estar entre 65 – 85 % de la capacidad de campo (CC). Valores por encima o por debajo de estos límites resultan perniciosos (Fernández P, 2010).

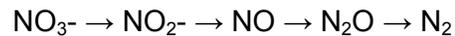
Figura. 2.1. Efecto de la temperatura sobre la actividad de nitrificación.



Fuente: Datos tomados de Shamma (1986).

1.4.2 Proceso de desnitrificación

La desnitrificación es un proceso que realizan ciertas bacterias durante la respiración anaeróbica usando el nitrato como aceptor terminal de electrones en condiciones anaeróbicas (ausencia de oxígeno). El proceso de reducción de nitratos hasta nitrógeno gaseoso ocurre en etapas seriales, catalizadas por sistemas enzimáticos diferentes, apareciendo como productos intermedios nitritos, óxido nítrico y óxido nitroso.



La desnitrificación requiere un sustrato oxidable ya sea orgánico o inorgánico que actúe como fuente de energía, por lo que puede llevarse a cabo tanto por bacterias heterótrofas como autótrofas. En la desnitrificación heterótrofa, un sustrato orgánico, como metanol, etanol, ácido acético, glucosa, etc. actúa como fuente de energía (donador de electrones) y fuente de carbono. En la desnitrificación autótrofa, la fuente de energía es inorgánica, como hidrógeno o compuestos reducidos de azufre. El

mayor problema de la desnitrificación biológica es la contaminación potencial del agua tratada con bacterias, fuente de carbono residual (desnitrificación heterótrofa) y la posibilidad de formación de nitritos, lo cual hace necesario un post-tratamiento.

Los factores ambientales favorecen tanto la desnitrificación como la reducción de los nitratos: Las bacterias de ambos procesos en su mayoría son mesófilas, y por eso estos procesos se realizan más rápidamente a temperaturas entre 15 y 45 °C. En los suelos inundados o anegados (100% CC) se ven favorecidos ambos procesos, no obstante en suelos relativamente secos rara vez ocurre (Fernández P, 2010).

1.5 Metano

El metano es un gas de efecto invernadero muy efectivo, con una concentración atmosférica media actual entre 1,7 o 1,8 ppb (partes por bimillón del volumen del aire) (Lelieveld, 2006). Debido a su incremento desde los tiempos preindustriales (cuando la concentración atmosférica era de sólo 0,7 ppb), se cree que el forzamiento radiativo producido desde entonces es importante, unos 0,7 W/m² (el del CO₂ es 1,4 W/m²). Las fuentes de emisión son muy variadas pero la destrucción del gas por los radicales OH del aire es rápida, de tal manera que la vida media del metano atmosférico es de unos 12 años. La evolución de la concentración atmosférica depende por eso, no sólo de las fuentes, sino también de la mayor o menor presencia de estos radicales en el aire.

El incremento térmico causado por la agricultura, se asocia con aportes de 40 ppm de CO₂ por deforestaciones y 0,25 ppm de metano por regadíos (Ruddiman, 2003; Kerr, 2004). Aunque en el transcurso del siglo pasado, el aumento del metano atmosférico ha sido muy considerable, el ritmo de incremento en los últimos años ha disminuido, por razones aún desconocidas. Algunos ligan esta desaceleración a cambios en la química atmosférica, que acelerarían la destrucción del metano, y otros piensan más bien en una disminución de las emisiones. Se ha pensado también que el aumento del azúfre contenido en los humedales y producido por las lluvias ácidas ha podido perjudicar a las bacterias metanogénicas (Gauci, 2005). Sea cual sea la causa, su incremento interanual actual en la atmósfera es casi nulo, e incluso en el año 2000 experimentó un ligero descenso absoluto (Simpson, 2002; Bousquet, 2006)

El metano se produce de forma natural por la descomposición de sustancias orgánicas en ambientes pobres en oxígeno. También se produce en el sistema digestivo de rumiantes y otros animales, en la explotación de combustibles fósiles y en la quema de biomasa. Aproximadamente la mitad de la producción de metano proviene de los sembradíos de arroz, de la actividad animal y de la acción de las termitas. Una cuarta parte proviene de tierras pantanosas y húmedas. Un 15% de la producción industrial de gas natural y carbón mineral. Los rellenos de basura y otras sustancias orgánicas en descomposición contribuyen con un 5% de las emisiones de metano. El metano contribuye actualmente con el 15% del calentamiento global, excluido el efecto del vapor de agua. Se calcula que hacia fines del siglo XXI el efecto global del metano habrá superado al producido por el dióxido de carbono. Aparentemente la humanidad tiene una capacidad muy reducida para modificar estas cifras ya que medidas drásticas tales como la reducción de la cantidad de habitantes del planeta o de sus raciones alimentarias son imposibles, luego tendremos que concluir que es muy poco lo que la humanidad puede hacer para controlar el flujo de metano a la troposfera, salvo reducir pérdidas en gasoductos, que prácticamente no tienen incidencia a nivel atmosférico.

La agricultura y la ganadería son actividades humanas productoras de metano. Todos los años, 400 millones de toneladas de metano son producidas por microbios que viven en condiciones anaeróbicas degradando la materia orgánica. Los medios en los que actúan estos microbios son muy variados: el estómago de un rumiante, el interior de un estercolero, un campo inundado para el cultivo de arroz o el fondo de una marisma. El cultivo del arroz sobre enormes extensiones encharcadas, favorece la metanogénesis en los barros de las tierras inundadas. También la prolífica cantidad mundial de animales rumiantes, en cuyos estómagos, por fermentación entérica, se produce ese gas y ha contribuido al incremento. Entre el 5 y el 10% de la masa del alimento de una vaca se transforma en metano (Dennis, 2004). Otro factor de emisiones de metano es la quema de vegetación, especialmente la quema de maleza en las sabanas tropicales que se realiza en la práctica agrícola, así como los incendios forestales.

Recientemente se ha descubierto que también las hojas vivas de los árboles y de las plantas emiten metano. El porcentaje con respecto a las emisiones totales de metano puede ser importante, oscila entre un 10% a un 30% de la fuente global, que es de unos 600 millones de toneladas anuales aproximadamente; siendo las regiones de bosques

tropicales las que más contribuyen, entre 40 y 160 millones de toneladas (Keppler, 2006). Otros cálculos rebajan mucho estas cifras y las estiman entre 10 y 60 millones de toneladas. El debate está aún abierto y se complica por el hecho de que algunas plantas parecen emitir hasta 4.000 veces más que otras (Schiermeier, 2006). En definitiva todavía no se conoce con precisión cuál es la concentración global del metano en la atmósfera, que parece ser mucho mayor sobre las selvas y las grandes ciudades.

1.6 La mitigación del cambio climático a través de la agricultura

Como se ha expresado, los cultivos y el ganado emiten CO₂, metano, óxido nitroso y otros gases, haciendo a la agricultura una fuente importante de emisiones de GEI. De acuerdo con los inventarios de emisiones que los gobiernos envían a la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático, UNFCCC, la agricultura representa alrededor del 15% de las emisiones mundiales de GEI. Agregando las emisiones originadas en la deforestación en los países en desarrollo (la agricultura es la causa principal de la deforestación), aumenta su contribución global a 26% y hasta 35% a las emisiones regionales de GEI. Alrededor del 80% de las emisiones totales originadas en la agricultura, incluyendo la deforestación provienen de países en desarrollo.

La agricultura contribuye alrededor de la mitad de las emisiones globales de dos gases potentes de efecto invernadero diferentes al carbono, como son el óxido nitroso y metano. Las emisiones de óxido nitroso desde los suelos (de la aplicación de fertilizantes y abonos orgánicos) y de metano, de la fragmentación entérica en los sistemas digestivos del ganado, representan cada una alrededor de una tercera parte de las emisiones de gases distintos al carbono que hace la agricultura y se proyecta que aumente (Rodríguez M, 2002).

1.7 Variables Agrometeorológicas

Es difícil resumir en pocas palabras los efectos de las variables agrometeorológicas en los cultivos agrícolas y las plantas en general, debido a la amplitud del tema. Las plantas y su sostén, el suelo, están estrechamente relacionados y en muchas ocasiones con una

gran dependencia de los factores y los efectos del clima que accionan sobre ellos (Celemín A.H. 2008).

Algunas de las variables agrometeorológicas, que tienen influencia en los procesos de nitrificación y desnitrificación en el suelo; ya sea de forma directa o indirecta con los flujos de N_2O emitidos, son las siguientes:

1. Radiación Solar
2. Temperatura del aire y de suelo
3. Humedad del aire y suelo
4. Precipitaciones

A continuación se hace un análisis general de los efectos de tales variables sobre las plantas y de algunas posibles acciones del ser humano para su intervención y/o modificación, en un contexto agrometeorológico.

1.7.1 Radiación solar

Con sus tres parámetros de intensidad, duración y calidad, influye sobre la actividad fotosintética de la planta incidiendo en su crecimiento y desarrollo.

El hombre es capaz de modificar los niveles de intensidad solar que reciben algunas plantaciones utilizando cobertores o manejando de modo apropiado aspectos como la densidad de siembra y la orientación de los surcos en los campos cultivados. También se regulan tales condiciones a través de los calendarios agrícolas para cultivos transitorios, ya que es conocido que existen diferencias notables en la radiación solar durante los diversos meses del año.

1.7.2 Temperatura del aire y del suelo

La temperatura del suelo acelera o retarda procesos de germinación y/o crecimiento de raíces y surte efecto sobre otras variables como la evapotranspiración y los niveles de humedad en el suelo. El hombre acciona sobre esta variable a través del laboreo del suelo y épocas del año más convenientes a sus intereses agrícolas.

La temperatura del aire puede influir sobre la apertura y cierre de las estomas en el proceso de transpiración de la planta y sobre la duración de los períodos agrícolas de los cultivos. Ambas temperaturas (del aire y del suelo), asociadas a la humedad relativa

pueden constituir factores desencadenantes de plagas o enfermedades cuando alcanzan niveles propicios para el desarrollo de esos patógenos.

1.7.3 Humedad del aire y del suelo

Estas dos variables están relacionadas con procesos fisiológicos vitales para la planta como la absorción y asimilación de nutrientes, la respiración y la fotosíntesis neta. Estas variables influyen asimismo sobre la evapotranspiración y la presencia de plagas y enfermedades en los cultivos.

El hombre actúa sobre ellas mediante prácticas como el laboreo del suelo y manejando épocas de siembra, densidades de plantación y mejorando la estructura de los suelos.

1.7.4 La precipitación

Es una de las variables agrometeorológicas más importantes para las plantas y para la actividad agrícola en general. Téngase en cuenta que alrededor del 80% de la tierra cultivada en el mundo depende de las precipitaciones al no tener riego (Ramos M., 2009). En las precipitaciones son importantes sus tres características; cantidad, intensidad y frecuencia. Está asociada a otras variables como nubosidad, temperatura, humedad del aire, velocidad del viento, evapotranspiración.

La planta necesita el agua para su crecimiento y desarrollo; por eso el hombre acciona tanto para disminuir las afectaciones y para aumentar los beneficios del agua, por lo que el riego y la actividad hidráulica se han convertido con el tiempo en disciplinas científicas muy importantes dentro de la actividad agropecuaria.

Se construyen presas para almacenar y conducir el agua y se perforan pozos para aprovechar la subterránea. Incluso se experimenta en tratar de controlar científicamente las precipitaciones. La adecuada y equitativa disponibilidad de agua es hoy uno de los problemas más graves del mundo contemporáneo.

1.8 *Brachiaria Humidicola*

Gramínea de ciclo vegetativo perenne y forma de crecimiento estolonífero, rústica y de porte bajo (Chacón L. 2005), de origen africano. Bajo condiciones de libre crecimiento, puede alcanzar 1.0 m de altura. Su floración se concentra en un corto período de tiempo.

Se adapta muy bien a suelos de fertilidad media y baja. Requiere una precipitación anual de 600 mm. Posee alta resistencia a la sequía y presenta una buena tolerancia tanto al sombreadamiento y pisoteo.

Produce en promedio 8,0 toneladas de materia seca/ha/año, con composición aproximada de 8 a 10% de proteína bruta en la materia seca. Presenta buena digestibilidad y palatabilidad media. Puede llevar cerca de 200 días para una formación satisfactoria y consecuente utilización de esta pastura. Eso se debe al hecho de que semillas de *B. humidicola* puedan presentar variados grados de dormancia. Por la característica de crecimiento estolonífero, se torna fundamental no rebajar esta pastura a menos de 10 cm, pues hasta ese punto, la especie todavía puede expresar todo su potencial productivo y nutricional (Vergara J. et al, 2006).

Según CIAT la gramínea forrajera tropical *Brachiaria humidicola*, posee un compuesto inhibidor de nitrificación en sus raíces, un fenómeno llamado 'inhibición de la nitrificación biológica (BNI). Los resultados indican que los inhibidores de la nitrificación liberados por *B. humidicola* en la raíces inhiben las bacterias nitrificantes, pero no afectan negativamente a otros microorganismos del suelo más importantes y el efecto inhibitorio varía con el tipo de suelo (GOPALAKRISHNAN, S, 2009).

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Analizar mediante modelaciones, las emisiones de N_2O desde suelos cultivados con *B. humidicola* bajo condiciones del Valle del Sinú, con base en la evaluación de las condiciones agrometeorológicas locales.

2.1.1 Objetivos específicos

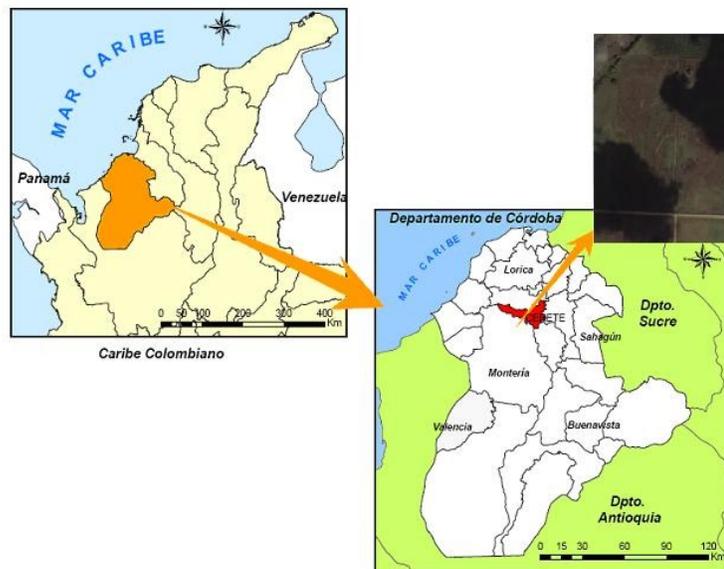
- Estudiar la influencia de variables agrometeorológicas y de manejo de pasturas en las emisiones de N_2O desde suelos agropecuarios en tres genotipos *B. humidicola* bajo condiciones del Valle del Sinú
- Analizar la importancia relativa y total de las condiciones agrometeorológicas en la modelación de emisiones de N_2O , en escenarios agropecuarios del Valle del Sinú
- Analizar la capacidad que tiene la *B. humidicola* para inhibir emisiones de N_2O bajo las condiciones del Valle del Sinú

3. METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

El estudio se desarrolló en el Centro de Investigación Turipaná de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - CORPOICA, ubicado en el municipio de Cereté, departamento de Córdoba - Colombia, con centro de geo-referenciación en la longitud $75^{\circ} 47' 32.81$ W y latitud $8^{\circ} 50' 32.81$ N a una altura de 14 msnm. Este centro de investigación es un punto representativo del Valle medio del Sinú (Figura 3.1) el que se ubica aproximadamente entre las coordenadas $7^{\circ} 26'$ y $9^{\circ} 26'$ de latitud N y entre 75° y $76^{\circ} 32'$ de longitud W. El valle del Sinú limita por el Norte con la desembocadura del río Sinú (Bahía Cispatá), por el Sur con las estribaciones del cerro Murrucucú en el municipio de Tierralta, por el Este con las estribaciones occidentales de la serranía de San Jerónimo y por el Oeste limita con Antioquia y el Este de la microrregión de Urabá.

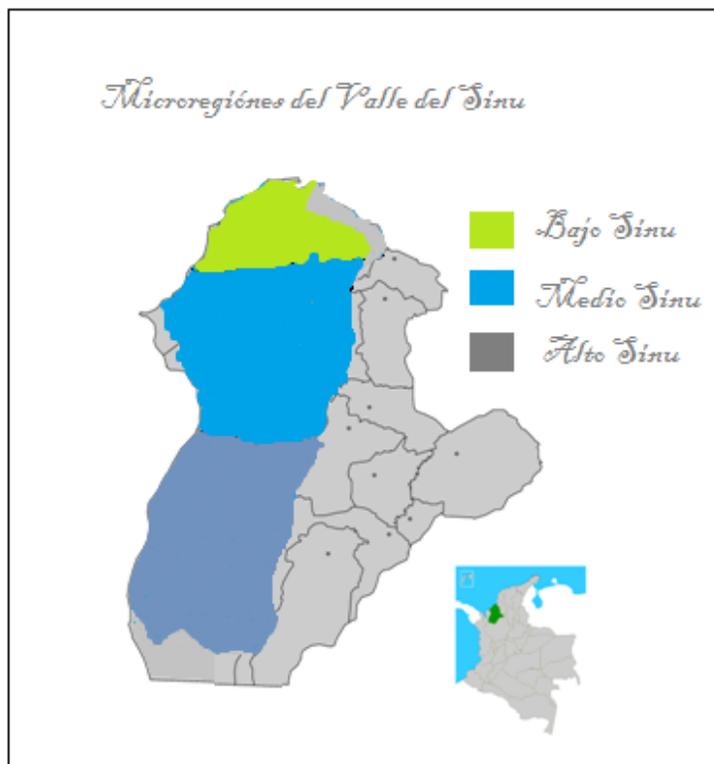
Figura 3.1: Ubicación del lote La Electrificadora en el Centro de Investigación Turipaná
CORPOICA



Fuente: CORPOICA-C.I TURIPANA

Esta microrregión está conformada por los siguientes municipios del departamento de Córdoba: Tierralta, Valencia, Canalete, Montería, San Carlos, sector oeste de Ciénaga de Oro, Cereté, San Pelayo, Lórica, San Andrés de Sotavento, Purísima, Momil, Chimá, San Bernardo del Viento, San Antero, Puerto Escondido, Moñitos, Los Córdoba y sector oeste de Puerto Libertador. El Valle del Sinú se divide en tres zonas (Figura. 3.2): las zonas del Alto, Medio y Bajo Sinú (López A, 1998).

Figura 3.2: Zona de la Microrregión del Sinú



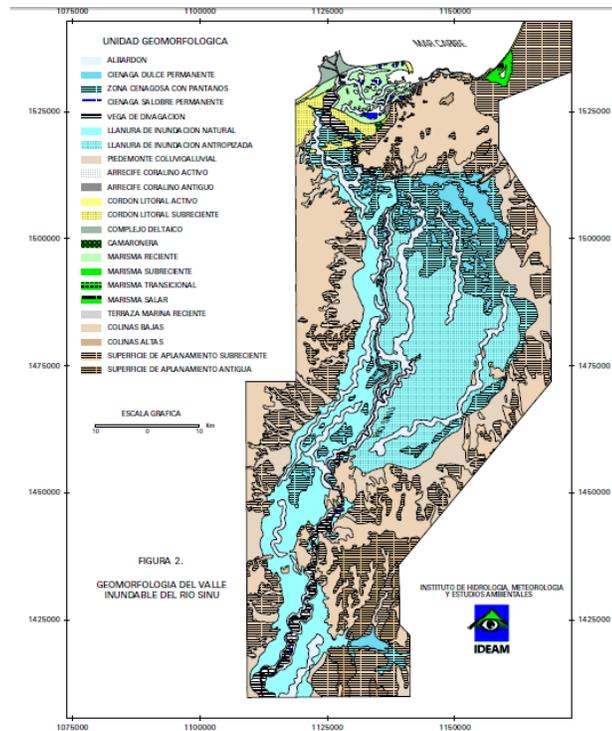
Fuente: Lopez A, 1998: Modificado en esta investigación

La morfología plana del Valle y sus características climáticas indican que la mayor cantidad de caudal del río Sinú es generada en la parte alta de la cuenca, en tanto que la llanura sirve como área de regulación y amortiguación hídrica con sus ciénagas y cubetas (Figura 3.3) (IDEAM 1998)

Las inundaciones se relacionan con el ascenso y la permanencia durante un tiempo largo de un nivel excesivo de agua, cualquiera que sea su origen. Bajo condiciones naturales, este fenómeno se deriva de tres factores interdependientes:

El desborde del río principal, el encharcamiento por lluvias locales y los aportes laterales de afluentes.

Figura 3.3. Geomorfología del valle inundable del río Sinú



Fuente: IDEAM AÑO 1998.

En la microrregión del Valle del Sinú la precipitación tiene un comportamiento monomodal (Figura 3.4), la época de lluvias está comprendida entre Abril y Noviembre, con un rango de 110 a 182 mm en promedio mensual, donde septiembre es el mes más lluvioso y noviembre el mes de menor volumen de lluvia y la época seca está comprendida entre diciembre y marzo, siendo febrero el mes más seco.

3.2 Datos utilizados

La información utilizada en la investigación corresponde a mediciones que se realizaron en campo, en el lote la electrificadora experimento 1 en CORPOICA – C.I Turipaná entre octubre del 2009 y noviembre de 2010 en las fechas establecidas en la tabla 3.1.

Se midieron las siguientes variables:

Humedad del suelo (Hs) a través de la técnica del terrón o método gravimétrico. Es aceptado como el estándar para la medición del contenido de agua en el suelo. Implica

pasar una muestra húmeda de suelo (200 g aproximadamente), secarla por 48 horas a 105 – 110 °C y repesar la muestra. Generalmente se expresa como la relación entre la masa de agua perdida y la masa de suelo seco (Salgado E, 2001; Radulovich R., 2009):

$$Hs=(\text{masa del suelo húmedo} - \text{masa del suelo seco})/\text{masa de suelo seco}$$

Mediante la técnica de cámara cerrada, gases emitidos (N_2O y CH_4), desde suelos de parcelas cultivadas con tres genotipos de *Brachiaria humidicola*, CIAT 679, CIAT 16888 y CIAT 26159.

Adicionalmente se estableció una parcela de control con suelo descubierto.

En el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) se determinaron los flujos de N_2O y CH_4 mediante procesos estadísticos y ecuaciones químico-físicas.

3.3 Diseño del experimento

Se establecieron en el experimento las accesiones de *Brachiaria humidicola* CIAT 679, CIAT 16888 y CIAT 26159, bajo tres niveles de fertilización nitrogenada con urea (46% de N) con dosis de 0 kg N/ ha, 150 kg N/ha y 300 kg N/ha, aplicadas en las fechas que se registran en la tabla 3.1. Adicionalmente se dejó un control, donde se manejó el suelo totalmente descubierto.

El área sembrada con cada variedad, que conformaba cada parcela individual, era de 100 metros cuadrados; las parcelas fueron divididas en tres subparcelas iguales con un área de 33.3 metros cuadrados respectivamente, donde se aplicaban las diferentes dosis de fertilización nitrogenada. Se dejaron espacios de un metro entre tratamientos de fertilización y de dos metros entre accesiones, con áreas de tránsito de 5 metros.

El nitrógeno correspondiente a cada tratamiento se fraccionó en 3 dosis y se aplicó en época de lluvias después de los cortes de uniformización de las parcelas.

Tabla 3.2: Fechas de muestreos, fertilización y época

Muestreo	Fecha	Tiempo (días)	Fertilización	Época
1	28-oct-09	0	No	Lluviosa
2	30-nov-09	33	No	Seca
3	29-dic-09	62	No	Seca
4	27-ene-10	91	No	Seca
5	26-feb-10	121	No	Seca
6	06-abr-10	160	No	Seca
7	30-abr-10	184	Si	Lluviosa
8	28-may-10	212	Si	Lluviosa
9	23-jun-10	238	Si	Lluviosa
10	29-jul-10	274	Si	Lluviosa
11	31-ago-10	307	Si	Lluviosa
12	29-sep-10	336	Si	Lluviosa
13	30-oct-10	367	Si	Lluviosa
14	21-nov-10	389	Si	Lluviosa

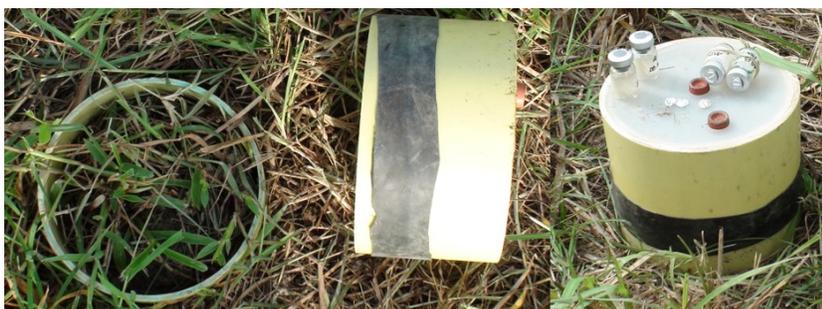
3.4 Medición de gases del suelo

Para medir gases de efecto de invernadero emitidos del suelo se usó la técnica de la cámara cerrada estática, la cual es utilizada a nivel internacional para estos efectos. Esta técnica ha sido estandarizada y validada por CIAT (Chu, H et al., 2007). En la técnica de la cámara cerrada se utiliza una cámara cilíndrica de PVC que se instala en cada sitio de muestreo, de la cual se extraen muestras del aire que está en contacto con el suelo, que contienen los gases que se van a evaluar (N_2O , CH_4). En cada tratamiento de cada pastura se instalaron 4 cámaras en las cuales se tomaron 4 muestras de gases por cada cámara, como se describe a continuación.

3.4.1 Instalación de anillos

Los anillos que son un componente de la cámara, tienen $25 \pm 0,01$ cm de diámetro y $7,5 \pm 0,01$ cm de altura, sobresalen entre 2-3 cm de la superficie, lo que permite la instalación de la parte superior de la cámara cerrada. Los anillos permanecen fijos en su lugar durante todo el periodo del muestreo. Al momento del muestreo, se instalan las cámaras de PVC ($10 \pm 0,01$ cm de alto, $25 \pm 0,01$ cm diámetro) sobre los anillos instalados en el campo. Las cámaras se cierran herméticamente con una banda de caucho. Para cada cámara se tomaron muestras de aire correspondientes a los tiempos 0, 10, 20 y 30 minutos, contados a partir de la instalación de la cámara. Se utilizan cámaras con un orificio de venteo para equilibrar la presión interna y externa a la cámara (foto 1).

Foto 1: Instalación de anillos y cámara



3.4.2 Toma de muestra de gases

Se utilizaron jeringas plásticas de $20 \pm 0,1$ mL conectadas a una válvula de plástico. Con el émbolo de la jeringa completamente en el fondo de la misma (volumen dentro de la jeringa igual a cero) y la válvula en posición abierta, se introdujo la aguja de la jeringa en uno de los tapones de caucho de la cámara. Se tomaron $20 \pm 0,1$ mL de aire y luego se cerró la válvula. Se extrajo la jeringa, se abrió la válvula y se evacuó $5 \pm 0,1$ mL del aire, tras lo cual se cierra la válvula. La aguja de la jeringa se introduce en el frasco con vacío para inyectar los $15 \pm 0,1$ mL de muestra.

Una de las cámaras se equipó con un termómetro digital, que permitió registrar la temperatura para cada uno de los tiempos; esta temperatura es fundamental para calcular el flujo de gas a determinar (foto 2).

Foto 2: Toma de muestra de gases



3.4.3 Análisis de las muestras de gases

Las muestras fueron analizadas en un cromatógrafo de gases Shimadzu GC-14A, equipado con detector de ionización de llama (FID) en el análisis del metano y detector de captura de electrones (ECD) para el análisis del óxido nitroso. Las condiciones cromatográficas del análisis fueron siguientes:

Precolumna: Porapak Q (80-100 mesh), 1 metro de longitud y 2 mm de diámetro interno

Columna: Porapak Q (80-100 mesh), 2 metros de longitud y 2 mm de diámetro interno

Fase móvil: Nitrógeno de alta pureza

Flujo: 22 mL/min

Temperatura del Horno: 70 °C

Temperatura del Inyector: 80 °C

Temperatura del detector: 320 °C

Finalmente, con las concentraciones que registra el equipo, las temperaturas tomadas en campo, las dimensiones de la cámara de muestreo y la ecuación de los gases, se obtienen los flujos netos del metano y el óxido nitroso.

3.5 Análisis estadísticos

En primer lugar se efectuó un análisis estadístico descriptivo – exploratorio de las series de los flujos de N₂O y CH₄ en relación con las variables agrometeorológicas, humedad del suelo, precipitación y temperatura del aire. Se calcularon los coeficientes de correlación de Spearman y Pearson.

En segunda instancia se estimaron modelos estadísticos empíricos lineales, a través de análisis de regresión lineal simple y múltiple, y no lineales mediante transformaciones de tipo logarítmicas. Estos modelos simulan los flujos emitidos de N₂O y CH₄ a través de una función dependiente de la humedad del suelo (Hs) y/o temperatura máxima del aire del día antes del muestreo (Tmax), Temperatura mínima del aire (Tmin) y temperatura promedio del aire (Tprom) del día del muestreo.

Para realizar el análisis estadístico se usó el programa STATGRAPHICS, se utilizó como complemento para el análisis y presentación de resultados el programa EXCEL y se realizaron las graficas o figura respectivas de los resultados con el programa Golden Software Grapher.

3.5.1 Correlación de Pearson y Spearman

El coeficiente de correlación de Pearson viene definido por la siguiente expresión:

$$r_{xy} = \frac{\frac{\sum XY}{N} - \bar{X}\bar{Y}}{S_x S_y} = \frac{\frac{\sum XY}{N} - \frac{\sum X}{N} \frac{\sum Y}{N}}{\sqrt{\frac{\sum X^2}{N} - \left(\frac{\sum X}{N}\right)^2} \sqrt{\frac{\sum Y^2}{N} - \left(\frac{\sum Y}{N}\right)^2}} = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{N \sum X^2 (\sum X)^2} \sqrt{N \sum Y^2 (\sum Y)^2}}$$

El coeficiente de correlación de Pearson oscila entre -1 y +1. No obstante ha de indicarse que la magnitud de la relación vienen especificada por el valor numérico del coeficiente, el signo refleja la dirección de tal valor. En este sentido, tan fuerte es una relación de +1 como de -1. En el primer caso la relación es perfecta positiva y en el segundo perfecta negativa.

El coeficiente de correlación de Spearman, ρ (ro) es una medida de la correlación (la asociación o interdependencia) entre dos variables aleatorias continuas. Para calcular ρ , los datos son ordenados y reemplazados por su respectivo orden.

El estadístico ρ viene dado por la expresión:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N(N^2 - 1)}$$

Donde D es la diferencia entre los correspondientes estadísticos de orden de x - y. N es el número de parejas.

Se tiene que considerar la existencia de datos idénticos a la hora de ordenarlos, aunque si éstos son pocos, se puede ignorar tal circunstancia. La interpretación del coeficiente de Spearman es igual que la del coeficiente de correlación de Pearson. Oscila entre -1 y +1, indicando asociaciones negativas o positivas respectivamente, cero (0), significa no correlación pero no independencia.

3.5.2 Análisis de regresión lineal

Un modelo de regresión lineal simple consiste en ajustar una relación lineal entre dos series de datos. Es decir, se postula que la serie de datos Y_i depende linealmente de la serie X_i :

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \epsilon_i \quad \text{Ec 3.1}$$

Donde β_0 y β_1 son parámetros que se estiman a través de mínimos cuadrados y ϵ_i es la serie de residuos del modelo. Comúnmente β_0 se le denomina intercepto y a β_1 la pendiente. Los residuos ϵ_i , si el modelo es correcto; es decir, si la variable X_i logra explicar toda la variabilidad de la serie Y_i a través del modelo, serán una serie aleatoria no autocorrelacionada de media cero (una serie de ruido blanco) (Canavo, 1988; Wei, 2006). Se denomina variable independiente a la serie X_i , y variable dependiente a la serie Y_i .

Una regresión lineal múltiple es generalización de la regresión lineal simple, donde la serie Y_i depende de varias series $X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ki}$, que conforman el conjunto de variables independientes de la serie dependiente Y_i :

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \epsilon_i \quad \text{Ec 3.2}$$

Los parámetros β_i se estiman a través de mínimos cuadrados y se espera que la serie ϵ_i conforme un ruido blanco, si el modelo es correcto. Las series X_{ki} deben ser independientes entre sí; es decir, ninguna de ellas debe poder expresarse como una combinación lineal de las demás, ya que de lo contrario, se presenta el problema de la multicolinealidad (Canavo, 1988) y los parámetros no queden correctamente estimados.

3.6 Modelos DNDC

El modelo Desnitrificación - Descomposición (Denitrification - Decomposition / DNDC) es un modelo de simulación de los ciclos de carbono y nitrógeno en los suelos, según principios biogeoquímicos, en diversos agro-ecosistemas. El modelo puede ser utilizado para predecir el crecimiento del cultivo, la temperatura del suelo y los regímenes de la humedad, la dinámica del carbono del suelo, la lixiviación de nitrógeno y las emisiones de gases como el óxido nitroso (N_2O), el óxido nítrico (NO), nitrógeno (N_2), amoníaco (NH_3), el metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2).

Los suelos agrícolas pueden actuar como una fuente o un sumidero de los tres gases de efecto invernadero, N_2O , (CO_2) y CH_4 . Los flujos de estos gases se derivan de procesos biológicos y dependen de muchos factores que a veces tienen retroalimentación e interacciones complejas. Comprender los impactos de las actividades humanas en las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los suelos es vital para mitigar los efectos negativos sobre el cambio climático. Como las emisiones de gases de efecto invernadero desde los suelos son el resultado de procesos microbianos, las emisiones presentan un alto grado de variabilidad temporal y espacial. La medición directa de las emisiones de gas de efecto invernadero con fines de inventario es poco práctica ya que requeriría muchas mediciones que se deben hacer en grandes áreas y durante un largo tiempo. Muchos países utilizan el valor por defecto de la metodología de la IPCC, para calcular las emisiones de N_2O de los suelos agrícolas para sus inventarios nacionales. Este método supone simplemente una fija proporción (factor de emisión) del N aplicado se emite como N_2O . El factor de emisión se dedujo de un número limitado de observaciones, que representa un valor promedio de todos los tipos de suelo, las condiciones climáticas y las prácticas de gestión. Como las emisiones de N_2O son muy sensibles a todos estos factores, hay un alto grado de incertidumbre asociada con el

factor de emisión. Además, el método de factor de emisión no tiene en cuenta muchas de las prácticas de gestión que podrían reducir las emisiones de N_2O (Por ejemplo; el calendario de fertilización, número de dosis de aplicaciones de fertilizantes, el uso de inhibidores nitrificantes, entre otros). Por estas razones el desarrollo de un enfoque basado en procesos es deseable. El desarrollo de un modelo basado en procesos, no sólo permite que la simulación de las emisiones agrícolas de GEI en un rango de escala hasta el nivel nacional o mundial, sino también la exploración de posibles estrategias de mitigación. Además, debido a que el modelo DNDC simula las interacciones en el suelo con diferentes procesos, es posible determinar estrategias que reduzcan las emisiones y evaluar consecuencias adversas, como la reducción de la producción o el aumento de la lixiviación de nitrato. El modelo DNDC se desarrolló originalmente para simular las emisiones de N_2O de los sitios cultivados en los EE.UU (Li et al., 1992). Desde entonces ha sido utilizado y ampliado por numerosas investigaciones grupos que cubren una amplia gama de países y sistemas de producción. Por lo anterior y por el gran número de trabajos en el que se ha usado este modelo; se determinó usarlo en el presenta trabajo, para la simulación de flujos de N_2O .

En esta investigación se usó el modelo DNDC - Versión 9.3, desarrollado por el Instituto de Estudios de la Tierra, los Océanos y el Espacio de la Universidad de New Hampshire – Estados Unidos. Este modelo funciona bajo Windows y ha sido usado y calibrado en países como China, India, Nueva Zelanda y Vietnam, entre otros (Mendez et al., 2009; Donna L et al 2010; Giltrap et al 2010; Cheng-I et al ,2005 y Saggat S. et al., 2004). Como todo modelo, DNDC requiere el ingreso de diversos parámetros y variables para su funcionamiento, como información de clima, información sobre el suelo, y información de la gestión agrícola.

Descripción del modelo

Desde su desarrollo inicial otros investigadores han modificado el modelo para adaptarlo a otros sistemas de producción y muchas de estas modificaciones se han incorporado más tarde a versiones del modelo DNDC. El modelo DNDC consta de cinco sub -modelos que interactúan entre sí:

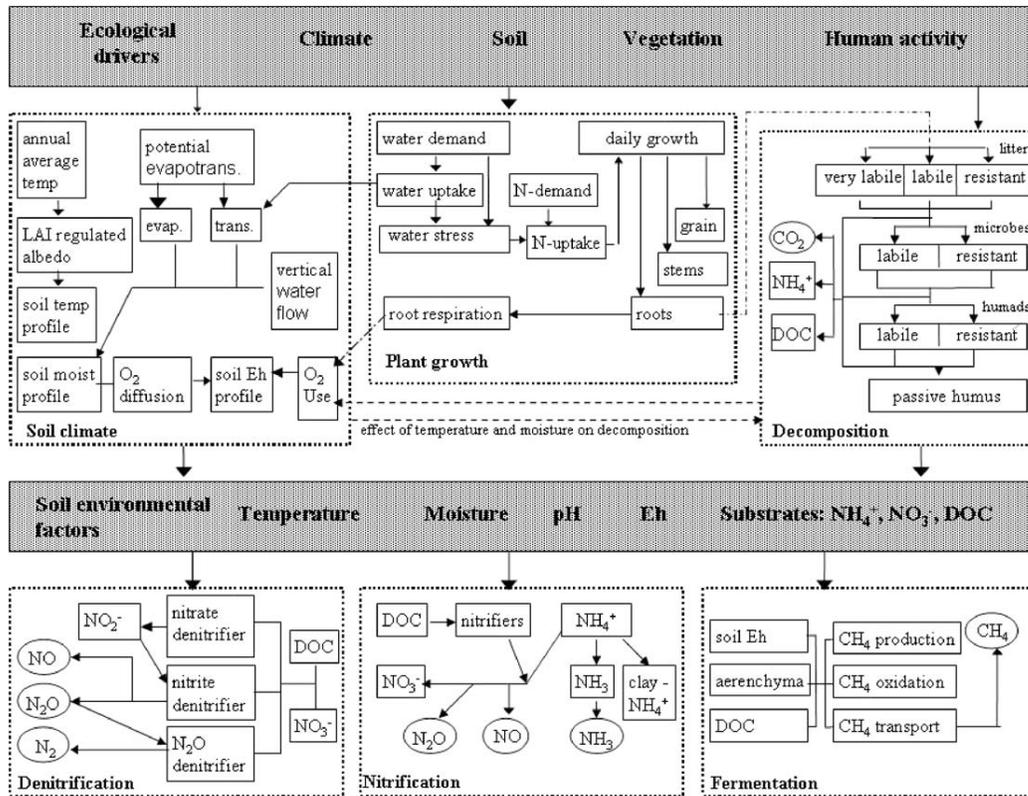
Termo-hidráulico, Descomposición aeróbica, Desnitrificación, Fermentación y Crecimiento de la planta (que contiene sub-rutinas para el manejo de las prácticas del cultivo; tales como la rotación de cultivos, laboreo, riego, fertilización inorgánica y orgánica a través de la adición de estiércol).

Los primeros tres sub-modelos se describen en Li et al. (1992), mientras que Li et al. (1994) describe sub-modelos para el crecimiento de las plantas y de gestión de la tierra. Un régimen dinámico que describe la evolución del potencial redox del suelo fue añadido en DNDC para la simulación de procesos de fermentación (Li, 2000, 2007). Simulaciones de N_2O , CH_4 y NH_3 se describen en el Li (2000, 2007). La figura. 3.4, muestra cómo los diferentes componentes del modelo interactuar.

El modelo DNDC trata el suelo como una serie de discretas capas horizontales (Hasta una profundidad de 50 cm). Dentro de cada capa las propiedades del suelo se supone que son uniformes. Algunas de las propiedades físicas del suelo tales como la densidad aparente, porosidad y los parámetros hidráulicos se asumen como una constante en todas las capas, sin embargo, la mayoría de las propiedades suelos, la humedad del suelo, temperatura, pH, carbono y piscinas de nitrógeno, puede variar entre las capas.

Los parámetros por defecto del suelo, en el modelo DNDC, se basaron en valores promedio de EE.UU. lo cual es necesario calibrar y ajustar estos valores a condiciones locales de Colombia. Los investigadores de otros países a menudo tienden a parametrizar las propiedades del suelo para las condiciones locales y a veces optan por modificar las ecuaciones del modelo para adaptarse mejor a estas condiciones locales. Muchos investigadores han creado variantes de DNDC de sistemas específicos (por ejemplo, los humedales-DNDC, Bosque-DNDC, NZDNDC, Reino Unido-DNDC) (Donna,G., et al. 2009). .

Figura 3.4. Representación esquemática de la estructura del modelo DNDC



Fuente:Li, 2000

El crecimiento de las plantas se basa en una curva de crecimiento del cultivo (especifica para el tipo de planta) para calcular la absorción diaria de N requerida. Este N se extrae de la NO₃ disponible en el suelo y NH₄⁺ Piscinas (en proporción al tamaño relativo de cada grupo) hasta la profundidad de las raíces de las plantas. La tasa de crecimiento diario está sujeta a la disponibilidad de agua y de N en el perfil del suelo. Un detallado aspecto fisiológicos / fenológico del crecimiento de las plantas fue desarrollado por Zhang et al. (2002) y se puede utilizar como una alternativa estándar al modelo el crecimiento de las plantas, en caso de no tener disponible datos detallados sobre el crecimiento de las plantas (Donna,G., et al. 2009).

Modelo DNDC para simular el pastoreo durante todo el año de pastoreo, tiene en cuenta los siguientes módulos:

EL crecimiento de una pradera perenne; invertir el orden en que la infiltración del suelo y los procesos de drenaje; relación entre la temperatura del aire y temperatura de la superficie del suelo; cambios en el umbral de la humedad del suelo para el proceso de desnitrificación sobre la base de las recientes observaciones experimentales de laboratorio y estudios de campo de los suelos de pastoreo; la cuantificación de las entradas de N y animales de pastoreo, y la modificación de la evapotranspiración potencial utilizar la ecuación de Priestley y Taylor la humedad del suelo en lugar de la fórmula de Thornthwaite (Donna,G., et al. 2009).

3.6.1 Datos de Entrada para DNDC

A manera de guía se describe en forma resumida la información utilizada para la simulación del proceso de desnitrificación y descomposición en suelos del Valle del Sinú cultivados con genotipos de *Brachiaria humidicola* mediante el modelos DNDC.

- **Variables de clima**

DNDC necesita datos diarios de las variables temperatura máxima, temperatura mínima en °C, radiación solar en MJ/m²/día y precipitación en cm. Para una simulación significativa estas cuatro variables deben ser registradas por una estación meteorológica muy cercana al sitio del experimento. Para el uso del modelo en esta investigación se usaron datos de una estación meteorológica del IDEAM (Convenio IDEAM-CORPOICA), en predios del CORPOICA- C.I Turipaná, aproximadamente a 500m del experimento. Para estimar los datos de radiación solar a partir de datos de brillo solar, mediante la ecuación o algoritmo de Angstrom, se utilizó el modelo CROPWAT 8.0.

Los archivos de los datos meteorológicos diarios deben estar en texto simple; es decir, formato ASCII. Cada año tiene un archivo individual. El archivo de los datos del clima puede ser construido en cinco formatos diferentes en función de la disponibilidad del original de la fuente de datos o el propósito de la simulación.

En este estudio se utilizo la forma 3.

```
IA1987
1 -0.5 -4.5 0.0 1.23
2 0.0 -1.2 1.2 1.59

3 3.5 0.8 0.5 3.20
4 5.7 2.0 0.0 2.25
.
365 5.6 -0.2 0.0 1.11
```

Donde la primera línea es un nombre de archivo. La primera columna contiene el día consecutivo del año, la segunda columna corresponde a la temperatura máxima diaria de aire en °C, la tercera columna contiene la temperatura mínima diaria del aire en °C, la cuarta columna contiene la precipitación diaria en cm y la última columna la radiación solar MJ/m²/día.

- **Entrada de información para las propiedades del suelo**

La mayor parte de esta información fue suministrada por CORPOICA-TURIPANA y la restante se tomó de la literatura temática.

Latitud en grados	8,55 N *
Concentración de N en la lluvia (mg N / l)	0,53 **
Concentración de CO ₂ atmosférico (ppm)	365 **
Tipo de uso de la tierra	Pastizales secos / Pasto *
Textura del suelo	Franco-Arcillo *
La densidad aparente (g/cm ³)	1,3 *
Fracción arcilla	0,41
pH del suelo	6,0 *
Contenido inicial de C orgánico en superficie del suelo (kg C / kg)	0,05 **
Concentración inicial de NO ₃ ⁻ en la superficie del suelo (mg N / kg)	25 **
Concentración inicial NH ₄ ⁺ en la superficie del suelo (mg N / kg)	5 **
Porosidad (%)	0,476 *
WFPS a capacidad de campo	0,578 **
WFPS en el punto de marchitez	0,27 **
Profundidad de la capa de retención de agua (cm)	100 *
Pendiente (%)	0 *
Hidro-conductividad (m/hr)	0,00882 **

*datos suministrados por CORPOICA-C.I Turipaná

** datos tomados de la literatura temática (Modelo DNDC)

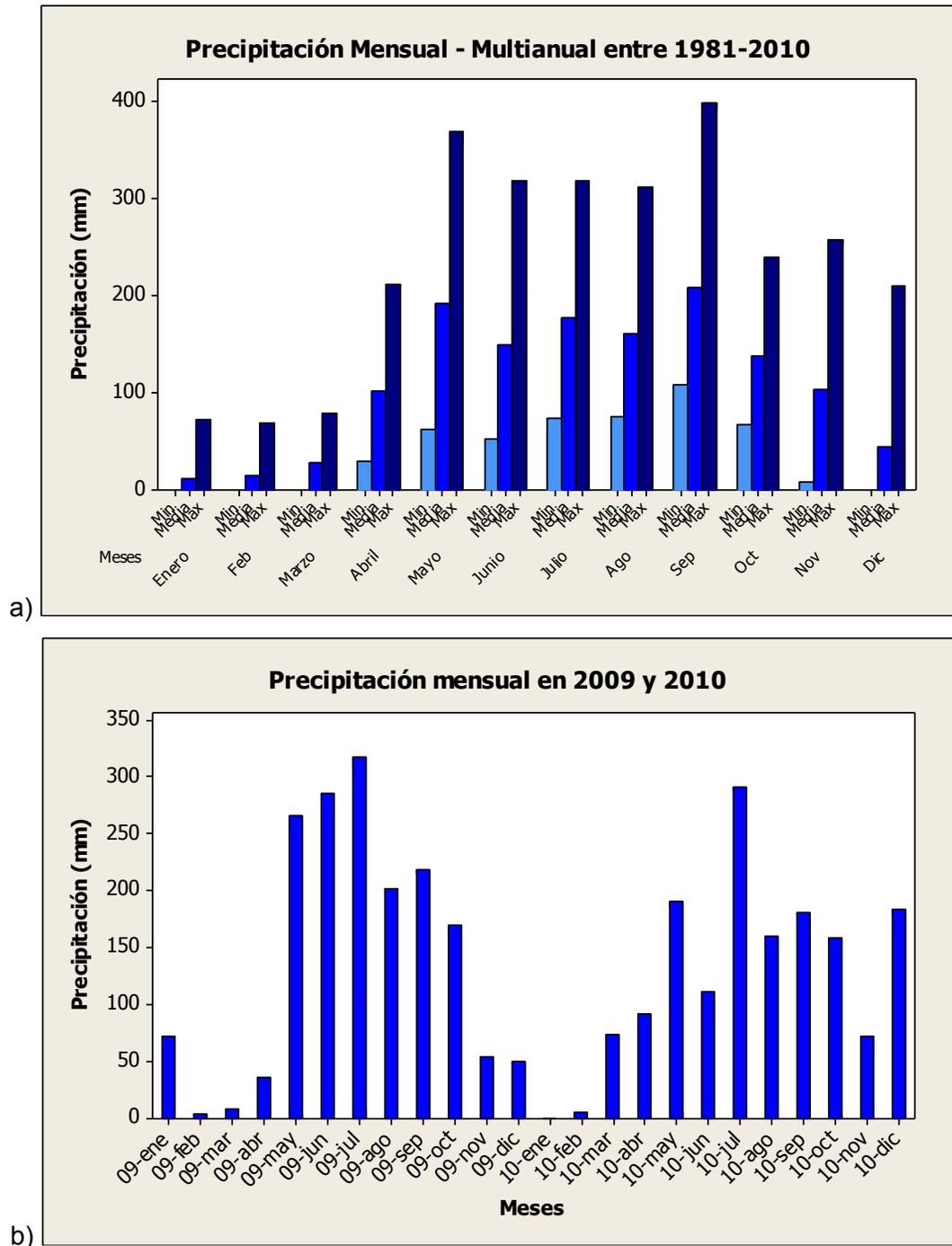
4.RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Condiciones agrometeorológicas

En la figura 4.1.a; se muestra la tendencia en la precipitación mensual-multianual entre 1981 a 2010 de la estación Turipaná, en Cereté; en ella se observa que la precipitación tiene un comportamiento monomodal, se presenta una época de lluviosa en el año, comprendida entre mediado de abril y noviembre, con un rango de lluvia entre 100 a 209 mm en promedio mensual, donde septiembre es el mes más lluvioso y los meses de menores volumen de lluvia son abril y noviembre; nótese que en esta época las valores máximos absolutos se presentan es septiembre y mayo, con valores cercanos a 400 mm y la precipitación mínima absoluta mensual se presentó en noviembre. También se aprecia una época seca que está comprendida entre diciembre y marzo, siendo enero, febrero y hasta mediado del mes de marzo seco, donde se presentan lluvias eventuales en algunos años; en el periodo de la serie se presentó una lluvia mensual absoluta en diciembre de 180 mm, donde lo normal es que se presenten volúmenes alrededor de los 50 mm. La precipitación media anual de oscila alrededor de 1332 mm, con valores máximos absoluto anual de 1834 mm y un mínimo absoluto de precipitación de 1000 mm.

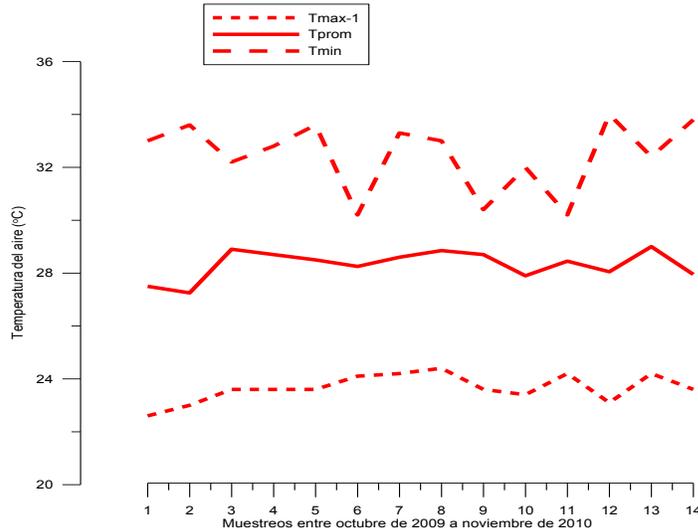
En la figura 4.1.b se presenta los volúmenes de lluvia mensual de los años 2009 y 2010, registrados en la estación de Turipaná; donde se aprecia que el mes más lluvioso en los dos años fue julio. Aún cuando el mes de diciembre está clasificado climáticamente como seco, la precipitación total en diciembre de 2010 fue abundante y alcanzó los 180 mm. Las temperaturas medias, mínimas y máximas medias del aire se aprecian en la figura 4.2.

Figura 4. 1.a). Precipitación mensual –multianual entre 1981 a 2010 en la estación Turipaná- Cereté. b) Precipitación entre Octubre de 2009 y noviembre de 2010 en la estación Turipaná- Cereté



Fuente: Estación meteorológica IDEAM - CORPOICA (C.I Turipaná)

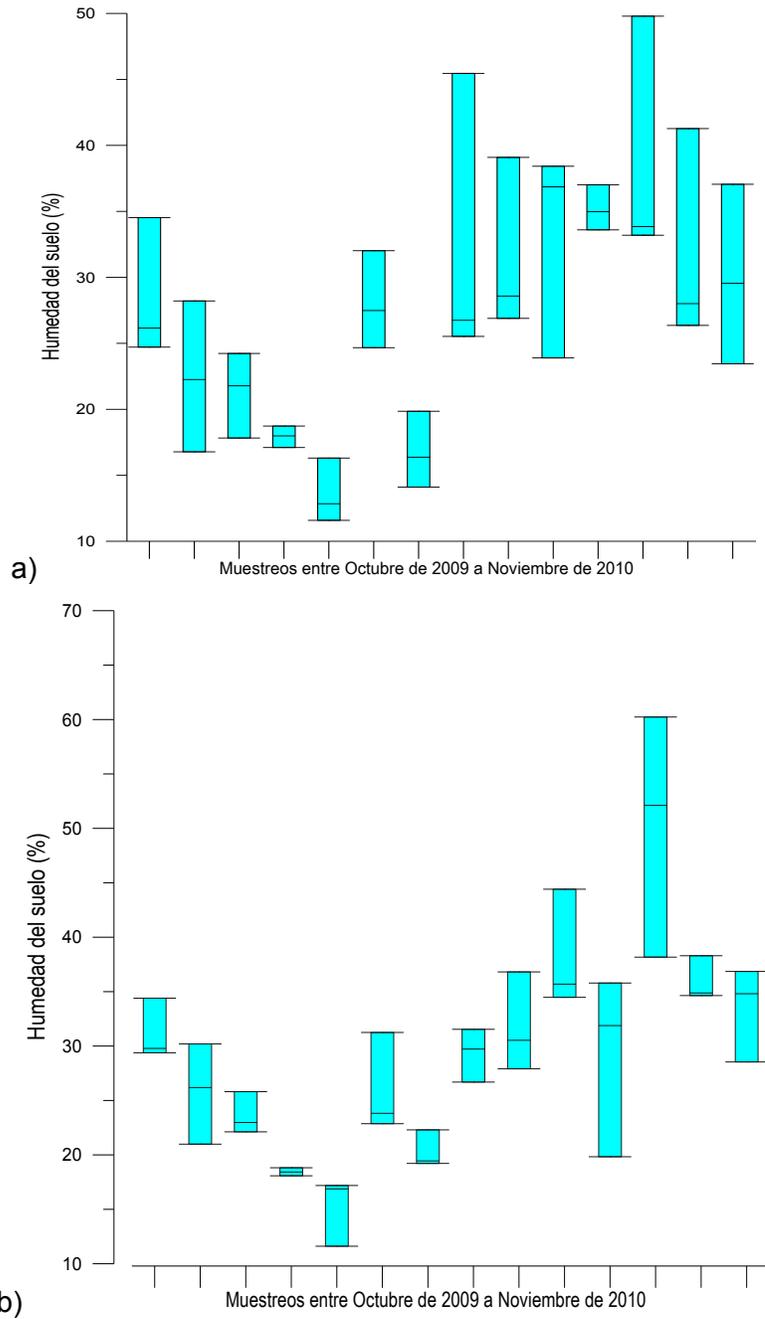
Figura 4.2. Temperatura del aire representativa en la zona de estudio



Fuente: Estación meteorológica IDEAM- CORPOICA (C.I Turipaná)

En las figuras 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 se representa la humedad del suelo en las parcelas muestreadas en el lote la electrificadora en CORPOICA – C.I Turipaná entre el periodo de octubre de 2009 y noviembre de 2010; según monitoreos realizados los días de las tomas de medidas de gases, usando la técnica del terrón. Teniendo en cuenta las condiciones agrometeorológicas medidas como textura, precipitación, temperatura y observaciones de campo se define que valores de la humedad del suelo menor del 25% en parcelas cultivadas con *Brachiaria humidicola*, clasifican en rangos bajos de contenido de agua, asociados a la época seca y para valores mayores de 25% se clasificaron en rangos altos de contenidos de agua en el suelo característicos de la época de lluvia. Para el tratamiento de control, valores de la humedad del suelo menores de 23% representan rangos bajos y valores mayores de 23% representan rangos altos.

Figura 4.3: Humedad del suelo (%) en las cuatros muestras tomadas en parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679: a) sin aplicación de fertilizante, b) con aplicación de 150 KgN/ha /años de fertilizante y c) con aplicación de 300 KgN/ha /años de fertilizante.



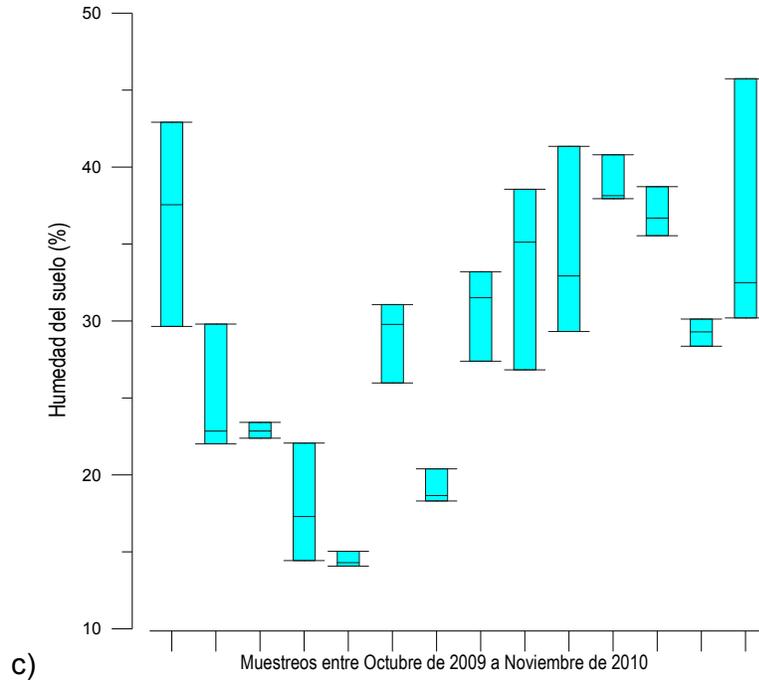
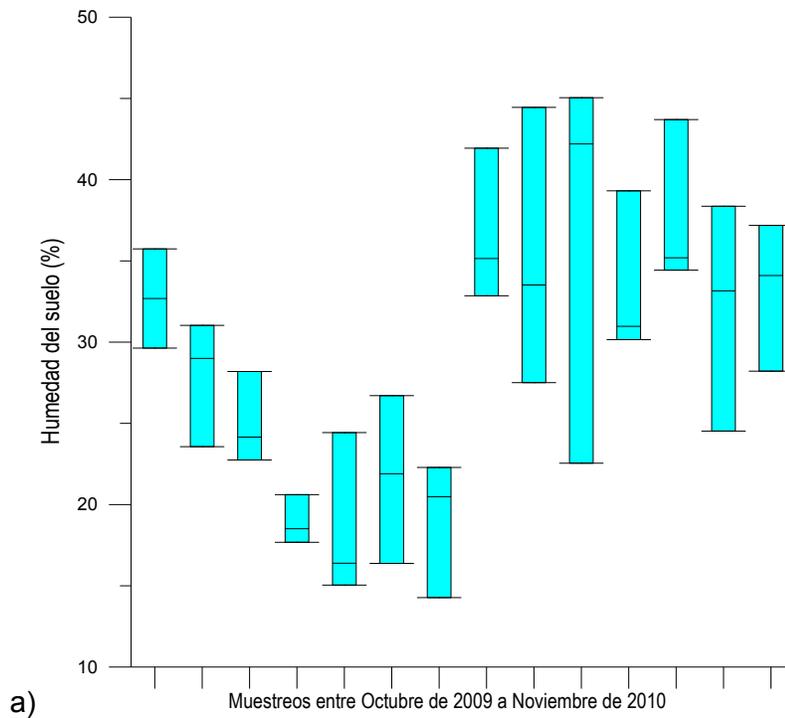


Figura 4.4: Humedad del suelo (%) en las cuatros muestras tomadas en parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888: a) sin aplicación de fertilizante, b) con aplicación de 150 KgN/ha /años de fertilizante y c) con aplicación de 300 KgN/ha /años de fertilizante.



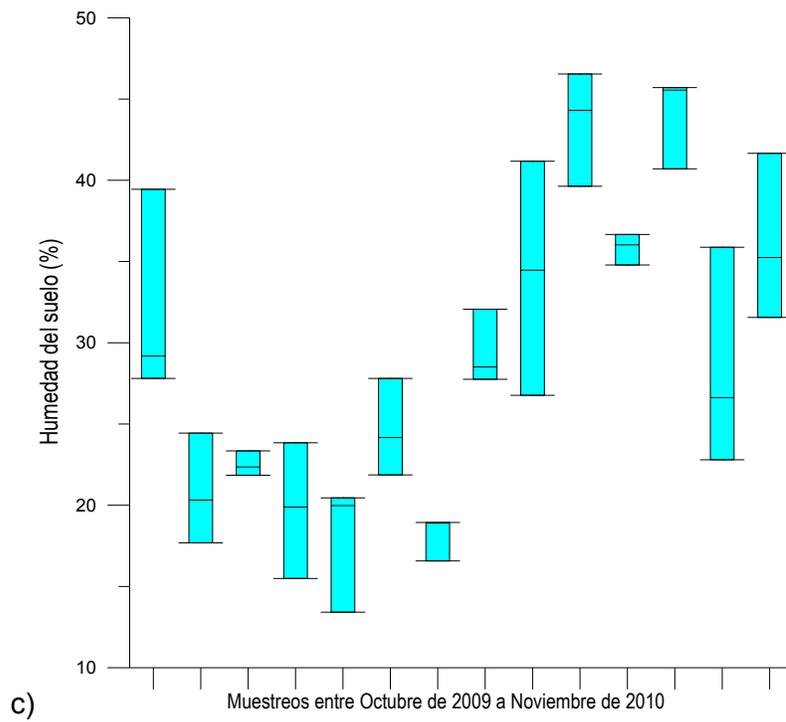
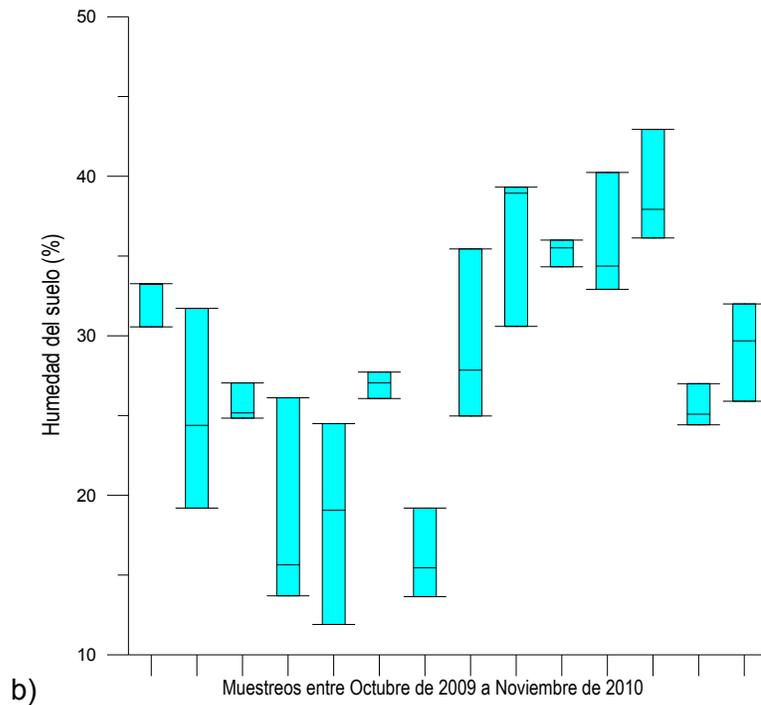
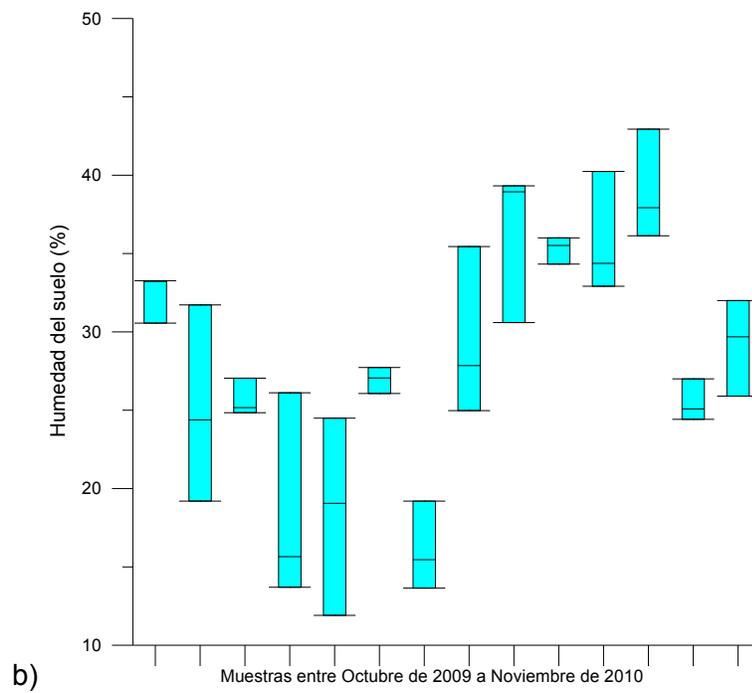
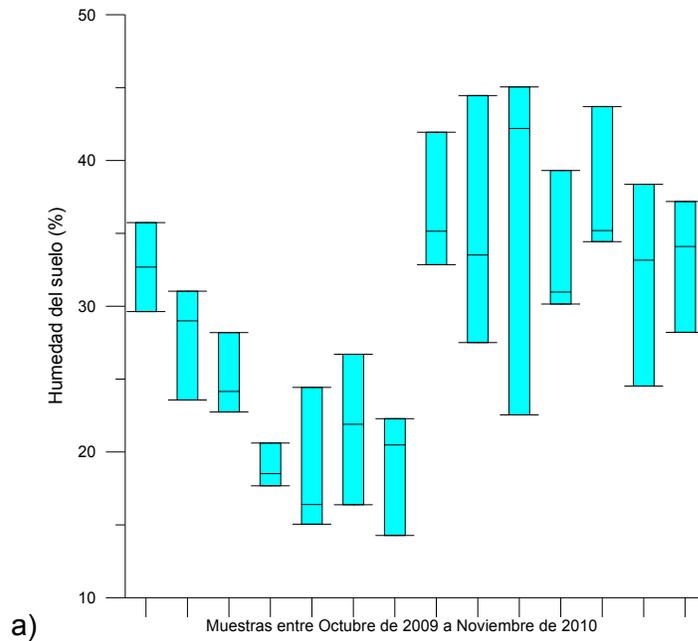


Figura 4.5: Humedad del suelo (%) en las cuatros muestras tomadas en parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159: a) sin aplicación de fertilizante, b) con aplicación de 150 KgN/ha /años de fertilizante y c) con aplicación de 300 KgN/ha /años de fertilizante.



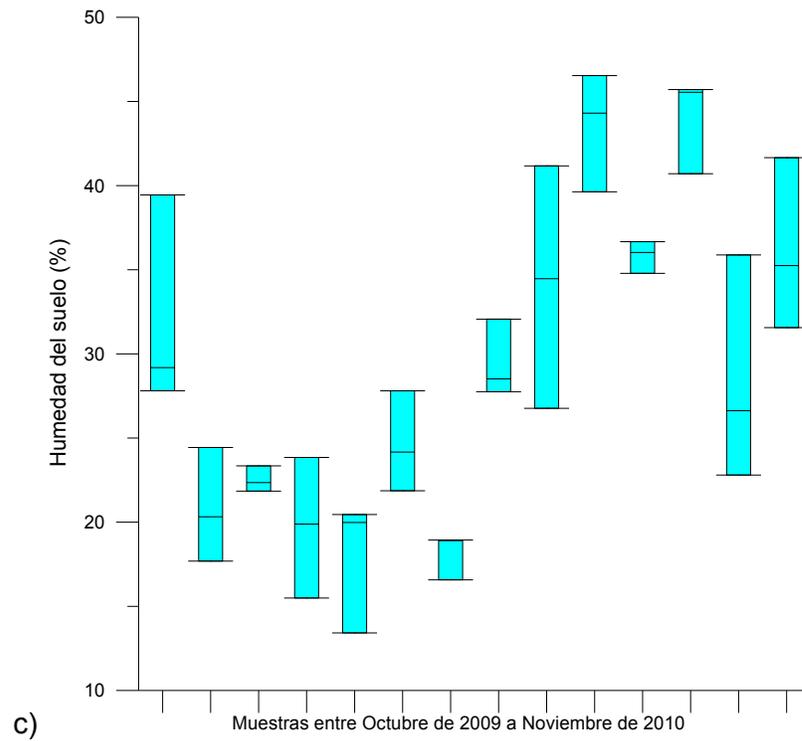
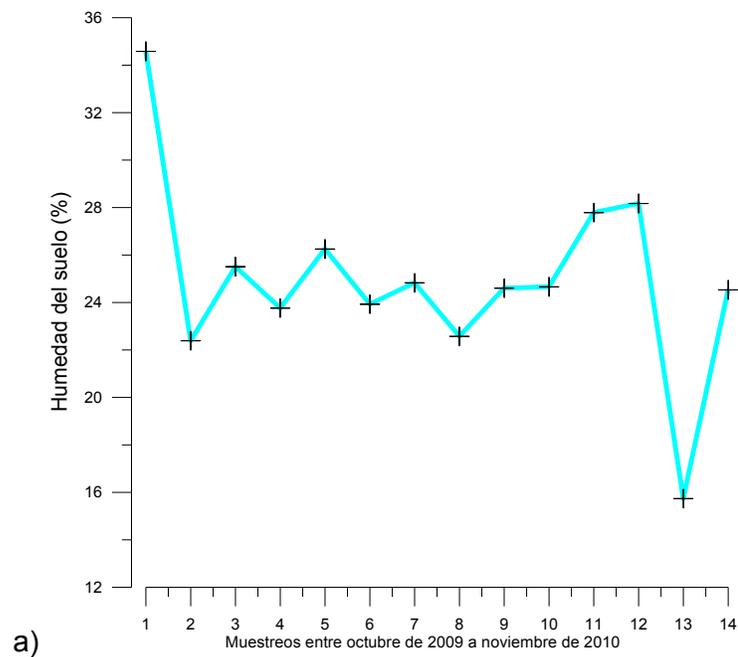
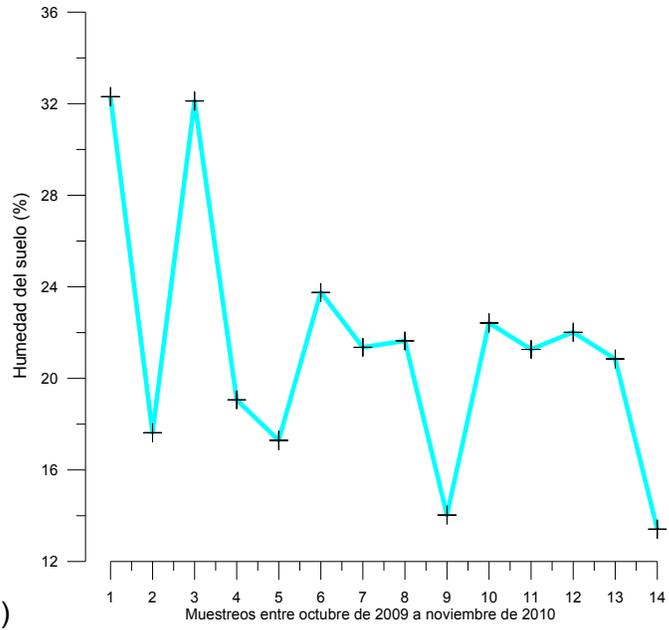
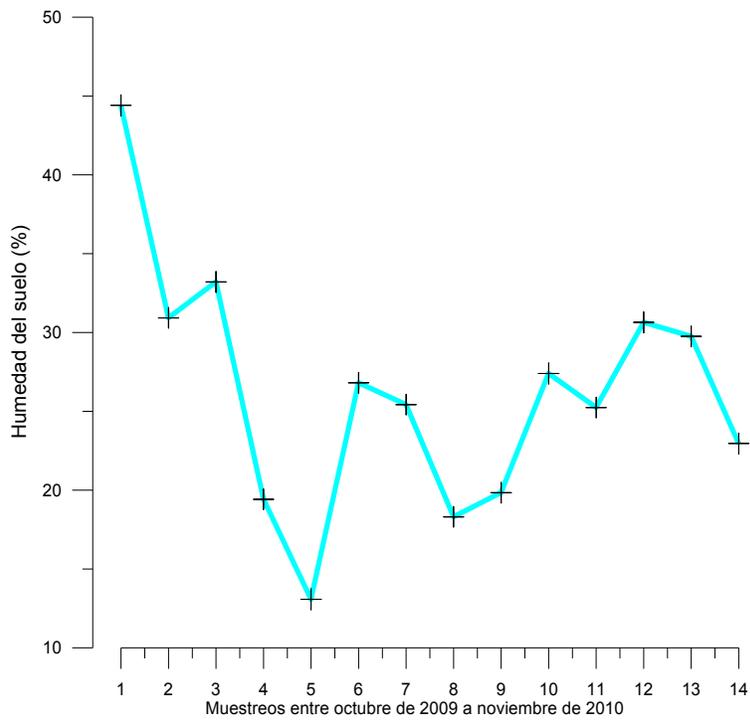


Figura 4.6: Humedad del suelo (%) tomadas en parcelas de suelo descubierto: a) sin aplicación de fertilizante, b) con aplicación de 150 KgN/ha /años de fertilizante y c) con aplicación de 300 KgN/ha /años de fertilizante.





b)



c)

4.2 Análisis de los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas con diferentes coberturas y aplicaciones de N.

Al analizar los flujos de N₂O emitidos desde el suelo de las parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159 con aplicación de dosis de 0, 150 y 300 KgN/ha/año de fertilizante, no se encontraron diferencias significativas ($p>0,05$) entre ellos. Aunque se presenta una tendencia a aumentar las emisiones de flujos con el aumento de la dosis de fertilizante nitrogenado (Tabla 4.1; Figura 4.7.a).

Los flujos de N₂O emitidos desde el suelo de las parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888, con aplicación de dosis de 0, 150 y 300 KgN/ha/año de fertilizante, presentaron una diferencia significativa ($p<0,05$). También se aprecia un aumento de las emisiones de los flujos de N₂O con el aumento de la dosis de fertilizante nitrogenado (Tabla 4.1; Figura 4.7.b).

Los flujos de N₂O emitidos desde el suelo de las parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679, mostraron que existe una diferencia significativa ($p<0,05$) y se aprecian dos grupos homogéneos, y se presenta un aumento de las emisiones de los flujos de N₂O con el aumento de la dosis de fertilizante nitrogenado (Tabla 4.1; Figura 4.7.c).

En las tres accesiones de *Brachiaria humidicola*, presentaron las mayores emisiones en las parcelas con aplicación de dosis de 300 KgN/ha/año de fertilizante, debido a que en estas se aplicó la mayor cantidad de dosis N.

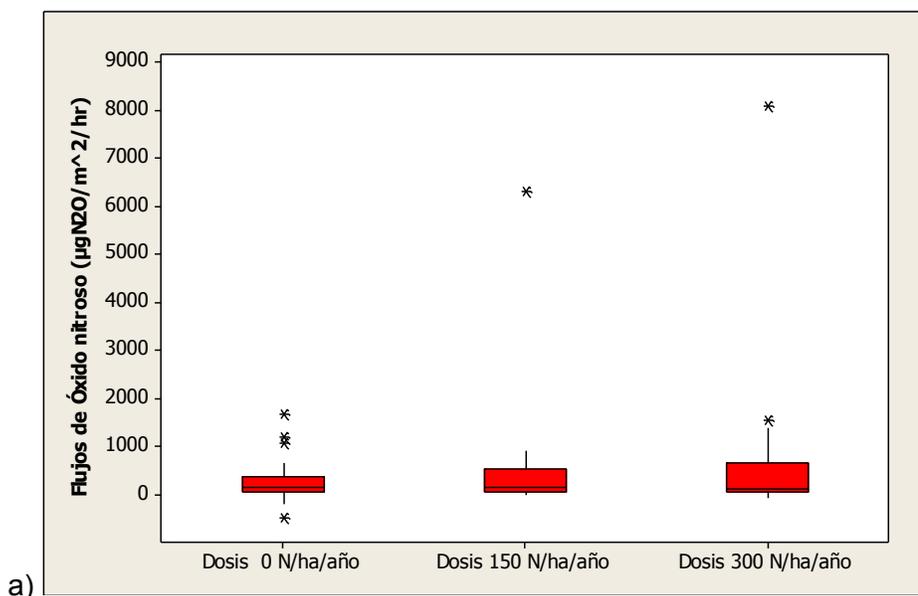
Los flujos de N₂O emitidos desde el suelo descubierto, en parcelas con aplicación de dosis de 0, 150 y 300 KgN/ha/año de fertilizante, no mostraron diferencias significativas ($p>0,05$) (Tabla 4.1). En este caso se presenta un aumento de las emisiones de los flujos de N₂O en las parcelas con dosis de fertilizante de 0 a 150 KgN/ha/año, pero en las parcelas con dosis de fertilizante de 300 KgN/ha/año registrando los menores flujos de emitidos (Figura 4.7.d). Una de las posibles causas es la ocurrencia de pérdidas de N por volatilización de la urea aplicada. Los factores que mayor impacto tienen sobre la volatilización de amoníaco (NH₃) es la aplicación de fuertes dosis de urea; ya que entre mayor sea la dosis aplicada, más amonio será producido y por lo tanto la volatilización del NH₃ será cuantitativamente más significativa. Otro factor que también pudo incidir es la temperatura y la humedad del suelo, ya que éstas regulan la actividad biológica

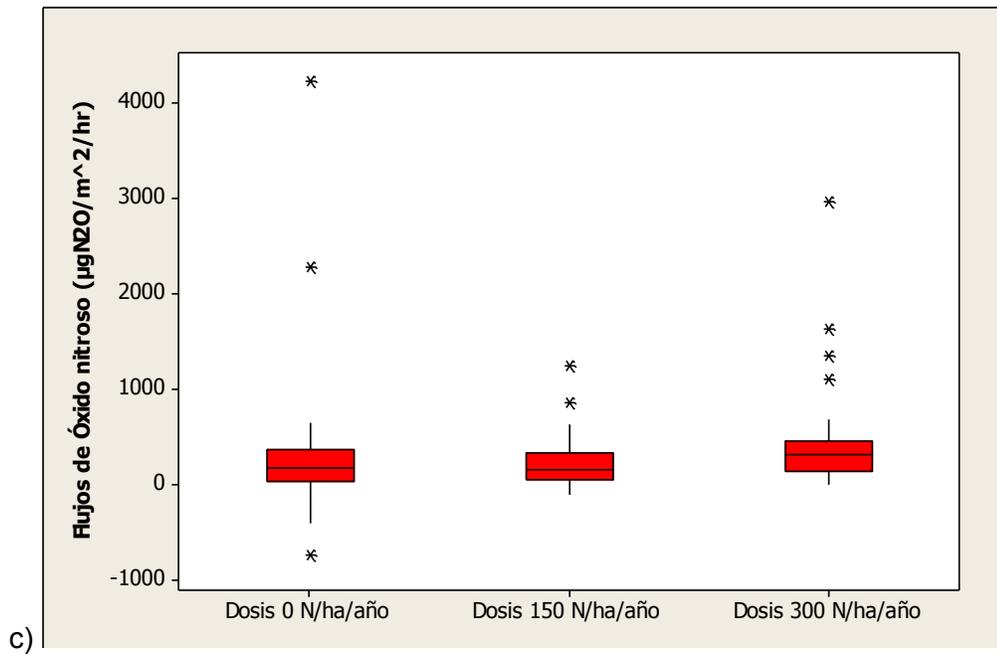
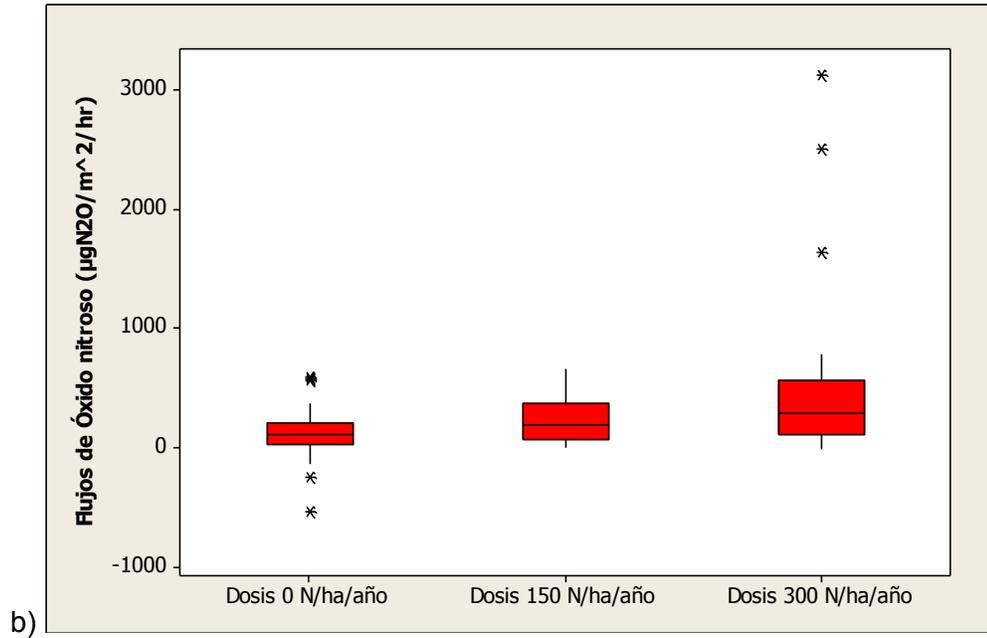
del suelo. Por lo tanto, la actividad microbiana productora de la enzima ureasa depende directamente de estos parámetros. De todas maneras no se debe tener en cuenta solo un factor sino las condiciones predisponentes a la ocurrencia del proceso de volatilización, que integra a varios factores juntos. Los cuales no fueron temáticos de estudio del presente trabajo.

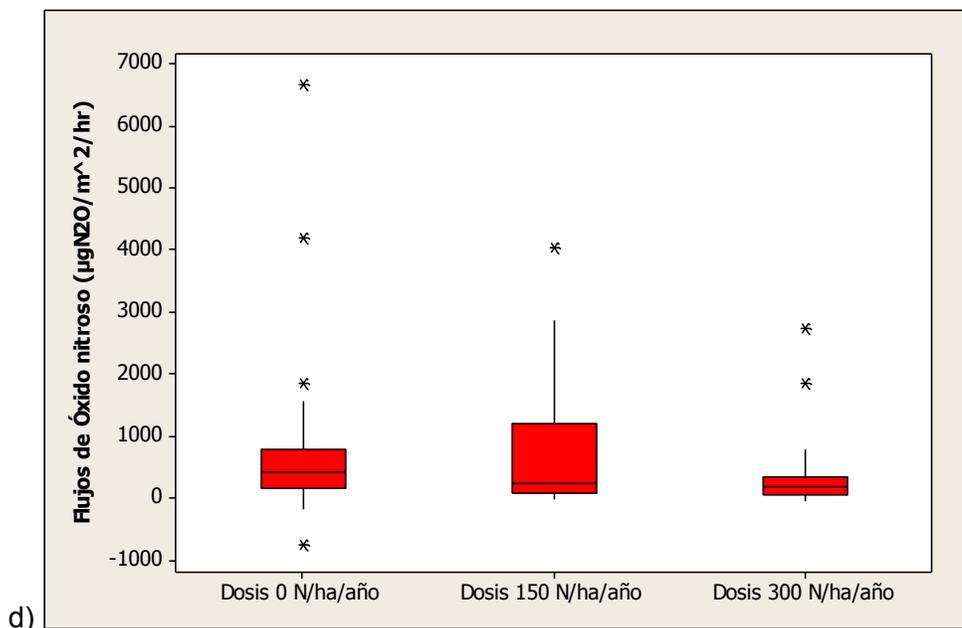
Tabla 4.1. Análisis de los flujos medios de N_2O ($\mu gN_2O/m^2/hr$) emitidos desde el suelo con diferentes coberturas, y con tres dosis de fertilizante nitrogenado; usando el método de la diferencia significativa de Fisher, con un nivel de confianza del 95%

Cobertura Fertilizante	<i>B.h</i> CIAT 26159		<i>B.h</i> CIAT 16888		<i>B.h</i> CIAT 679		Suelo descubierto	
	Flujo medio	Grupos homogéneos	Flujo medio	Grupos homogéneos	Flujo medio	Grupos homogéneos	Flujo medio	Grupos homogéneos
Dosis (KgN/ha/año)								
0	262,292	a	118,182	b	223,299	f	726,52	h
150	451,949	a	242,15	c	234,643	f	825,102	h
300	631,782	a	510,599	d	489,036	g	357,807	h

Figura 4.7. Representación de la serie de los flujos de N_2O ($\mu gN_2O/m^2/hr$) emitidos desde suelo de parcelas con tres dosis de fertilizantes nitrogenado. a) Parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159; b) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 16888; c) Parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679 y d) Parcelas con el suelo descubierto.







En la tabla 4.2, se muestra que existe una diferencia significativa ($p < 0,05$) entre los flujos de N_2O emitidos con diferentes coberturas con dosis nula de fertilizantes (0 KgN/ha/año).

Los flujos de N_2O emitidos desde suelos descubiertos y suelos con *B.h* CIAT 16888, son los que tienen la mayor diferencia significativa ($p < 0,05$). Los flujos medios de N_2O para *B.h* CIAT 16888, CIAT 26159 y CIAT 679 no presentaron una diferencia significativa ($p > 0,05$). En tabla 4.2 se puede apreciar que existen dos grupos homogéneos de las muestras y que existen diferencias significativas entre los flujos de N_2O emitidos desde suelos desnudos y los flujos de N_2O emitidos desde suelos cultivados con *B.h* CIAT 16888. También se presenta que los flujos de N_2O emitidos del suelo cultivado con las tres accesiones de *Brachiaria humidicola* son menores en relación con los emitidos desde el suelo descubierta. Por otra parte, de los tres genotipos de *Brachiaria humidicola*, la *B.h* CIAT 16888 tiene los menores flujos de N_2O (Figura 4.8).

En época de lluvias se aprecia que existe una diferencia significativa ($p < 0,05$), entre los flujos medios de N_2O emitidos en los suelos con diferentes coberturas (Tabla 4.2, Figura 4.9.a). Se encontró que los flujos de N_2O de los suelos cultivados con *B.h* CIAT 16888, CIAT 679 y CIAT 26159, tienen una diferencia significativa con los flujos de N_2O de suelos descubiertos. Se puede ver en la tabla 4.2 y figura 4.9.a que el suelo cultivado

con los diversos genotipos de *Brachiaria humidicola* inhibe los flujos de N₂O, en comparación con los flujos de N₂O emitidos desde suelo descubierto en época de lluvia.

Por el contrario, en épocas secas no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los flujos medios de N₂O de suelos con diferentes coberturas (Tabla 4.2, figura 4.9.b). Los mayores flujos de N₂O se registraron en época de lluvia; de las tres pasturas en estudio, la que presentó los menores flujos de N₂O fue la *B.h* CIAT 16888, analizando en ambas épocas, así como en todo el periodo de estudio (Tabla 4.2, Figura 4.8 y 4.9). Estudios realizados por Subbarao G et. al., (2009) y Moreta D. et. al., (2009), mostraron que la pastura *Brachiaria humidicola* tiene la capacidad de inhibir emisiones de N₂O; este mismo comportamiento se presentó en los tres genotipos de *Brachiaria humidicola* CIAT 679, CIAT 16888 y CIAT 26159 bajo las condiciones ambientales del Valle del Sinú.

La figura 4.10.a muestra que las medias de humedad del suelo en diferente cobertura tiene una diferencia significativa ($p = 0,0001 < 0,05$), y en las parcelas con suelos descubierto y cultivadas con *B.h* CIAT 679 presentaron el menor contenido de agua en el suelo y los niveles más altos de humedad del suelos se presentaron en las parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159 y 16888. La mayor capacidad de inhibir emisiones de N₂O se presentó en época de lluvia, principalmente en la pastura *B.h* CIAT 16888. La mayor actividad del proceso de emisiones de N₂O se presentó en época de lluvia y las parcelas con suelo descubierto y cultivadas con *B.h* CIAT 679 se comportan como emisores y los suelos cultivados con las accesiones *B.h* CIAT 26159 y 16888 se comportaron como sumideros de N₂O en esta época. Lo anterior se podría asociar con niveles muy altos e incluso con excesos de humedad en los suelos, que limitan los procesos microbiológicos que generan los flujos de N₂O. Lo anterior corrobora las investigaciones desarrolladas por CIAT en esta gramínea, en la que encontraron que posee un compuesto inhibidor de nitrificación en sus raíces (GOPALAKRISHNAN, S, 2009), que es responsable de un manejo radicalmente mejorado del nitrógeno en el suelo.

Tabla 4.2. Análisis de los flujos medios de N_2O ($\mu gN_2O/m^2/hr$) de suelos con diferentes coberturas, en parcelas con dosis nulas de fertilizantes (0 KgN/ha/año); usando el método de la diferencia significativa de Fisher, con un nivel de confianza del 95%.

Cobertura del suelo	Todo el periodo de estudio		Época de lluvia		Época seca	
	Flujo medio	Grupos homogéneos	Flujo medio	Grupos homogéneos	Flujo medio	Grupos homogéneos
16888	93,0315	a	118,182	c	60,6739	e
26159	195,55	ab	262,292	c	168,364	ef
679	242,157	ab	323,46	c	153,837	ef
Suelo descubierto	317,349	b	726,52	d	76,7697	e

Figura 4.8. Representación de la serie de los flujos de N_2O ($\mu gN_2O/m^2/hr$) emitidos desde suelos de parcelas con diferentes coberturas, sin fertilización nitrogenada.

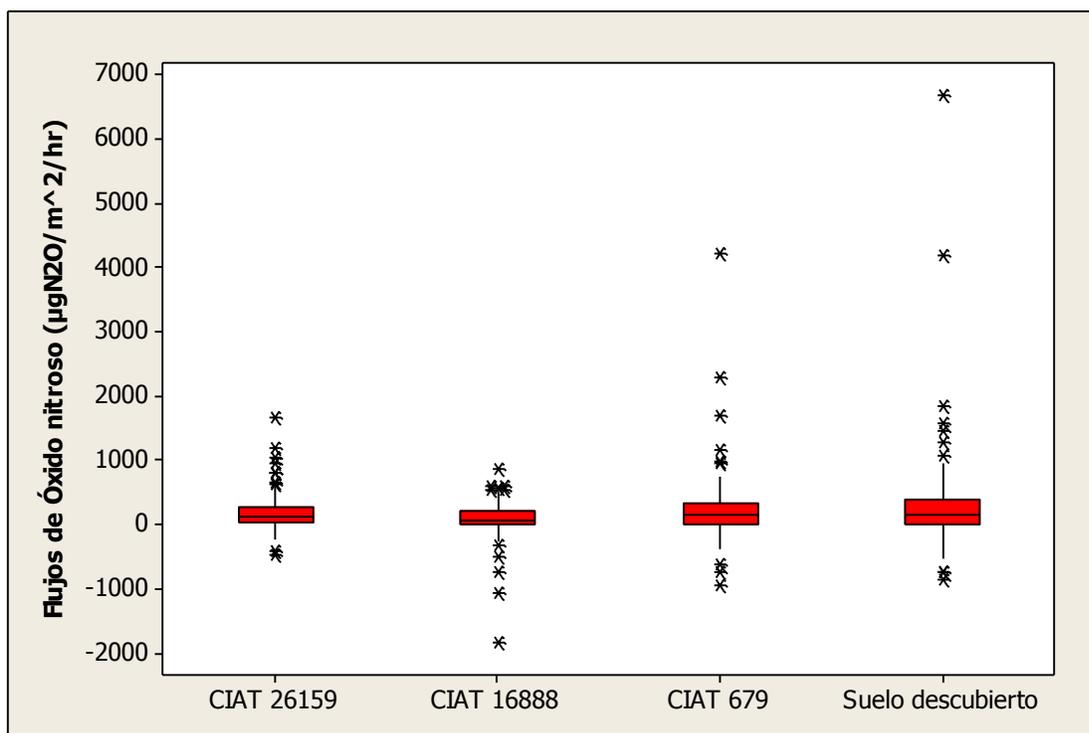
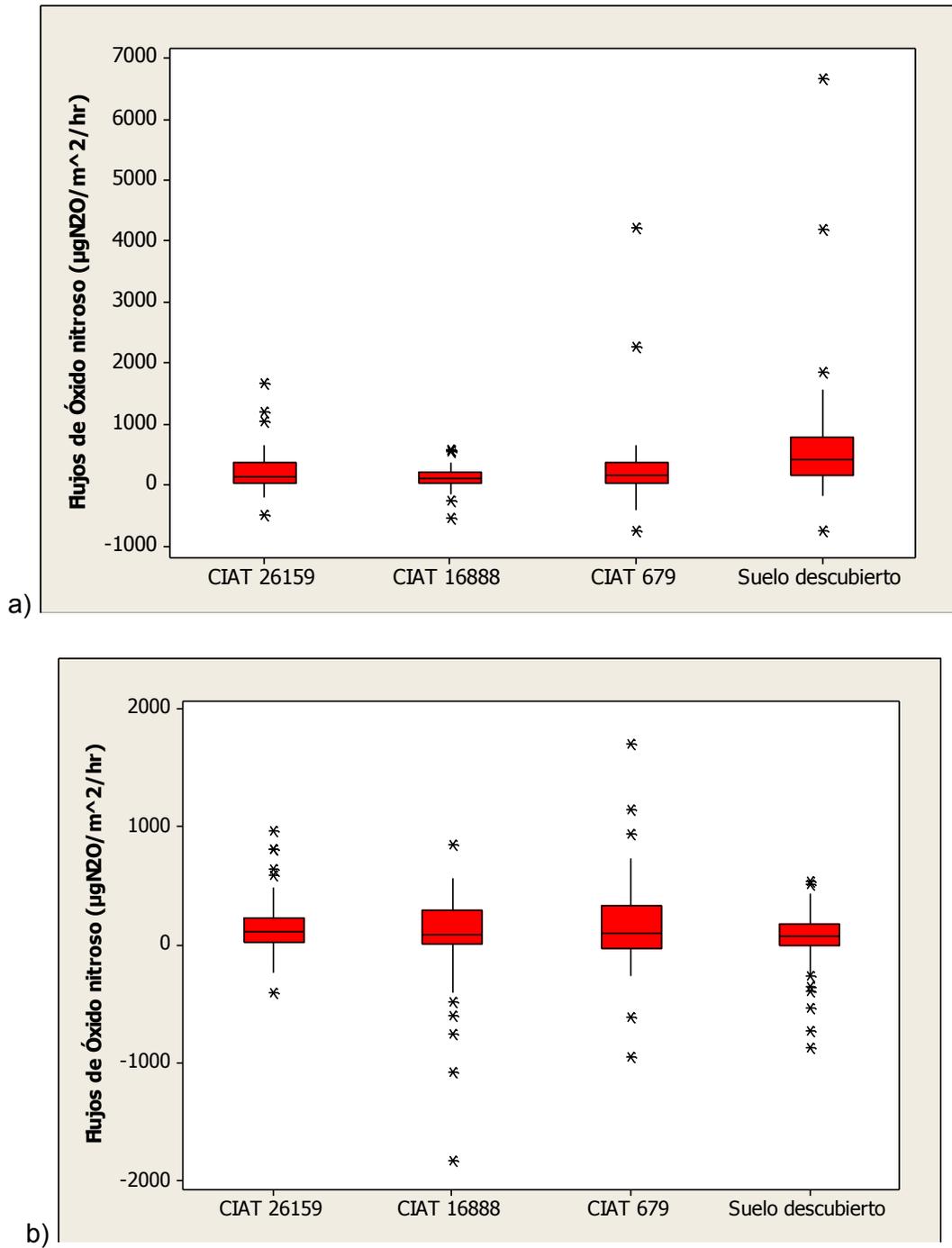


Figura 4.9. Representación de la serie de los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas con diferentes coberturas: a) en época de lluvia sin fertilizantes nitrogenado. b) En época seca.



4.3 Evaluación de la humedad del suelo en parcelas con diferentes coberturas

La humedad el suelo entre octubre del 2009 a noviembre de 2010 en parcelas con diferentes coberturas, no presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$). En el suelo de las parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888, presentaron el mayor contenido de humedad (Tabla 4.3; Figura 4.10). Aunque en época de lluvia existe una diferencia significativa ($p < 0,05$) de la humedad del suelo de las parcelas con diferentes coberturas y en el suelo de las parcelas cultivadas con los tres genotipos de *Brachiaria humidicola*, mantenían el mayor contenido de agua, en comparación con el suelo descubierto (Tabla 4.3; Figura 4.11.a). En época seca existe una diferencia significativa ($p < 0,05$) de la humedad del suelo de las parcelas con diferentes coberturas. Pero en esta época el suelo descubierto es la que tiene el mayor contenido de agua en promedio (Tabla 4.3, Figura 4.11.b). De las tres accesiones de *Brachiaria humidicola* en estudio, solo la *B.h* CIAT 16888 tuvo el mayor contenido de agua en el suelo tanto en época seca, como en época de lluvia y la que mantuvo el menor contenido de agua en el suelo en las dos épocas fue la *B.h* CIAT 679 (Tabla 4.3; Figura 4. 10 y 4.11).

Tabla 4.3. Análisis de las medias de la humedad del suelo (%) de parcelas con diferentes coberturas, sin aplicación de fertilizantes nitrogenado; usando el método de la diferencia significativa de Fisher, con un nivel de confianza del 95%.

Cobertura del suelo	Todo el Periodo de estudio		Época de lluvia		Época seca	
	Media	Grupos homogéneos	Media	Grupos homogéneos	Media	Grupos homogéneos
679	25,4766	a	32,5175	b	20,9069	d
26159	26,6193	a	34,1372	b	21,9206	d
16888	27,2342	a	34,8284	b	22,3818	de
Suelo descubierto	25,3584	a	27,9359	c	23,7079	e

Figura 4.10. Representación de la serie de la humedad del suelo (%) en todo el periodo de estudio en parcelas con diferentes coberturas, sin aplicación de fertilizantes nitrogenado

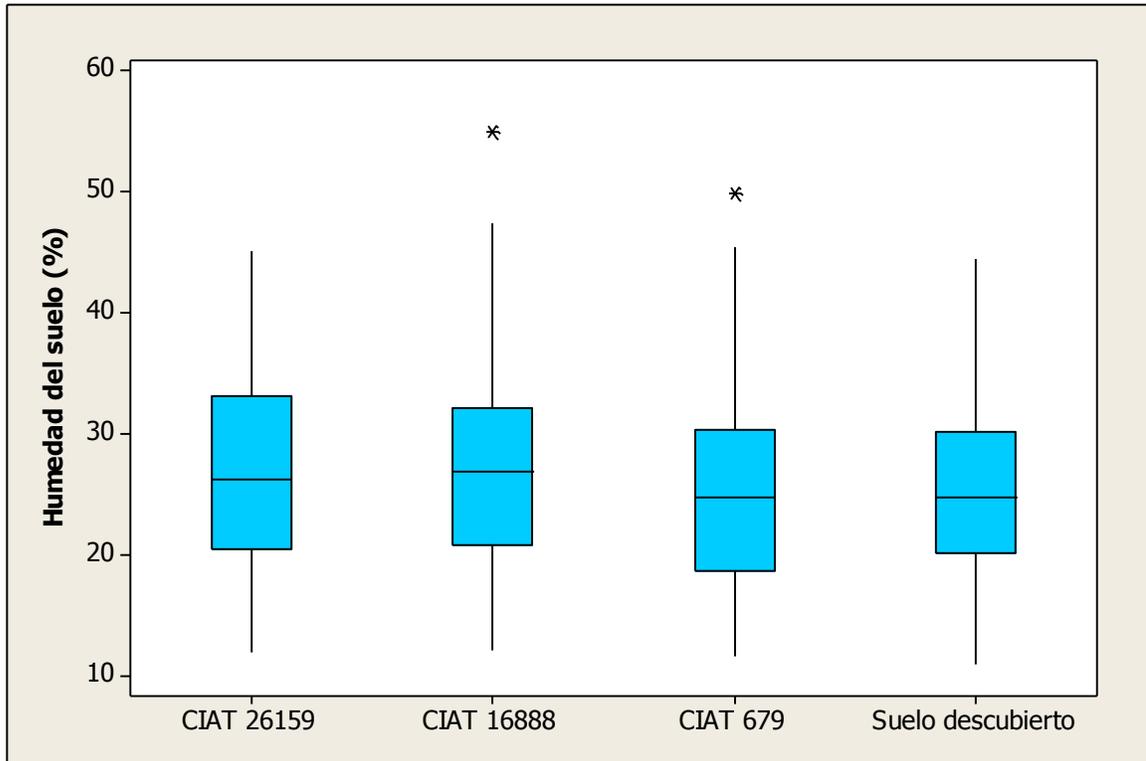
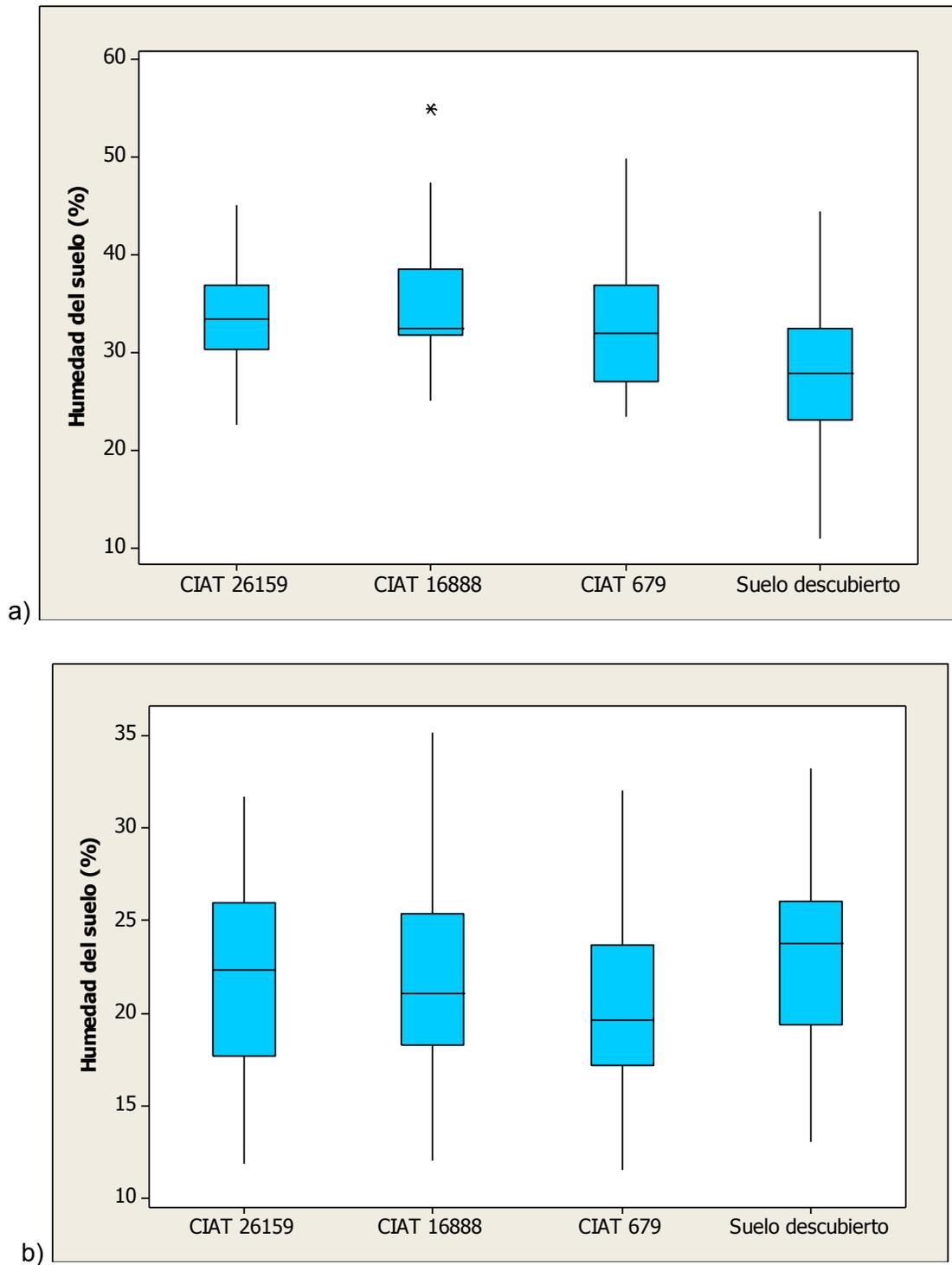


Figura 4.11. Representación de la serie de la humedad del suelo (%) en parcelas con diferentes coberturas; a) en época de lluvia sin aplicación de fertilizantes nitrogenado. b) En época seca.



4.4 Relación entre flujos de óxido nitroso y la humedad del suelo

4.4.1 Relación de los flujos de N₂O de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159 con la humedad del suelo.

En la Figura 4.12.a se aprecia la relación general de los flujos de N₂O emitidos en parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159, con la humedad del suelo entre octubre de 2009 y diciembre de 2010. Allí se observa que no existe una relación lineal entre flujos y humedad del suelo; los coeficientes de correlación de Pearson no son significativos ($P < 0,1$). Para profundizar en este análisis, en la figura 4.12.b., se representan los flujos de N₂O agrupados en relación a los intervalos de humedad del suelo; se aprecia que cuando la humedad del suelo es menor a 23% y mayor a 31% los flujos de N₂O tienden a aumentar si se incrementa la humedad del suelo, ya que se presentan coeficientes de correlación positivos y ligeramente significativos ($p < 0,1$) (Tabla. 4.4). No obstante en el intervalo de humedad del suelo de 23 - 31% los flujos de N₂O tienden a disminuir con el aumento de la humedad del suelo, con un coeficiente de correlación negativo ligeramente significativo ($p < 0,1$) (Tabla 4.4). La relación de los flujos de N₂O con la humedad del suelo, es más fuerte y positiva cuando la humedad del suelo es menor de 23% y mayor que 40%; es decir que en condiciones bajo el punto de marchites y sobre la capacidad de campo del suelo, favorecen al aumento de las emisiones de los flujos de N₂O. De lo anterior se deduce que en suelos cultivados con esta gramínea, presentan evidencia que las emisiones de los flujos en estudio, son causados por procesos de nitrificación y desnitrificación; presentándose respectivamente en época seca y época de lluvia.

Figura 4.12. a.) Relación entre el flujo de N_2O de suelos cultivados con *B.h* CIAT 26159 y la humedad del suelo entre octubre del 2009 a noviembre de 2010. b) Relación entre el flujo N_2O de suelos cultivado con *B.h* CIAT 26159 y la humedad del suelo por intervalos.

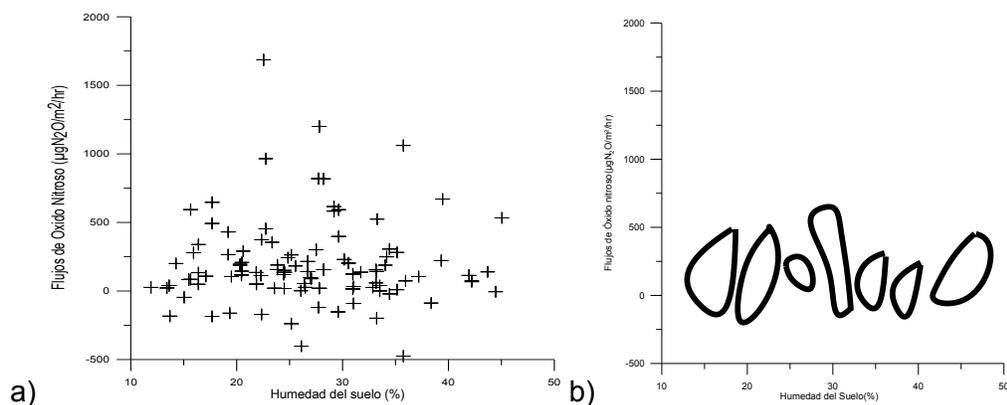


Tabla 4.4: Coeficientes de correlación de PEARSON entre los flujos de N_2O de suelos cultivados con *B.h* CIAT 26159 entre octubre del 2009 y noviembre de 2010 y humedad del suelo por intervalos, para un valor de significancia $p < 0,1$.

Valor del Coeficiente de correlación de PEARSON	Tendencia del flujo de N_2O con relación a la Humedad suelo	Intervalos de humedad del suelo (%)	Variación del flujo N_2O ($\mu gN_2O/m^2/hr$)
0.42	Aumenta	<19	(-185,30) – 646,64
0,37	Aumenta	19 – 23	(-171,23) – 1685,71
-0.29	Disminuye	23-27	(-402,7) – 355,53
-0.23	Disminuye	27-31	(-119,46) – 1199,75
0.31	Aumenta	31-35	(-198,31) - 523,87
0.15	Aumenta	35-40	(-474,88) – 1061,36
0.56	Aumenta	>40	(-5,25) – 533,48

4.4.2 Relación de los flujos de N₂O de parcelas cultivadas con B.h CIAT 16888 con la humedad del suelo.

En la Figura 4.13.a, se presenta la relación de los flujos de N₂O de suelos con *B.h* CIAT 16888 con la humedad del suelo entre octubre de 2009 a diciembre de 2010. Se observa que no existe una relación lineal entre tales variables; los coeficiente de correlación de Pearson no son significativos ($P < 0,1$) En la figura 4.13.b., se representan los flujos de N₂O agrupados por intervalos de humedad del suelo. Se aprecia que para valores de la humedad del suelo menores a 23% los flujos de N₂O presentan una tendencia a disminuir con el aumento de la humedad del suelo, ya que tienen un coeficiente de correlación negativo y significativo ($p < 0,1$) (Tabla. 4.5), pero con valores de humedad del suelo mayores de 23%, los flujos de N₂O presentan una tendencia a aumentar con el aumento de la humedad del suelo, varían según se aprecia en la tabla 4.5., y tienen coeficientes de correlación positivos y significativos ($p < 0,1$) (Tabla. 4.5).

La relación de los flujos de N₂O con la humedad del suelo, es más fuerte cuando la humedad del suelo es menor de 18% y cuando es mayor 34%. Aunque, cuando la humedad es menor de 18 %, las condiciones son favorables para reducir las emisiones de flujos de N₂O; es decir que en condiciones del suelo bajo el punto de marchites, las emisiones son menores. Contrariamente cuando la humedad del suelo es mayor de 34%, o esta sobre la capacidad de campo, las condiciones son favorables para el aumento de las emisiones de los flujos de N₂O. De lo anterior se deduce que el mayor responsable de las emisiones de los flujos en estudios es el proceso de desnitrificación.

Figura 4.13. a.) Relación entre el flujo de N_2O emitido desde suelos cultivado con *B.h* CIAT 16888 y la humedad del suelo entre octubre del 2009 a noviembre de 2010. b.) Relación entre el flujo de N_2O emitido desde suelos cultivado con *B.h* CIAT 16888 con humedad del suelo por intervalos

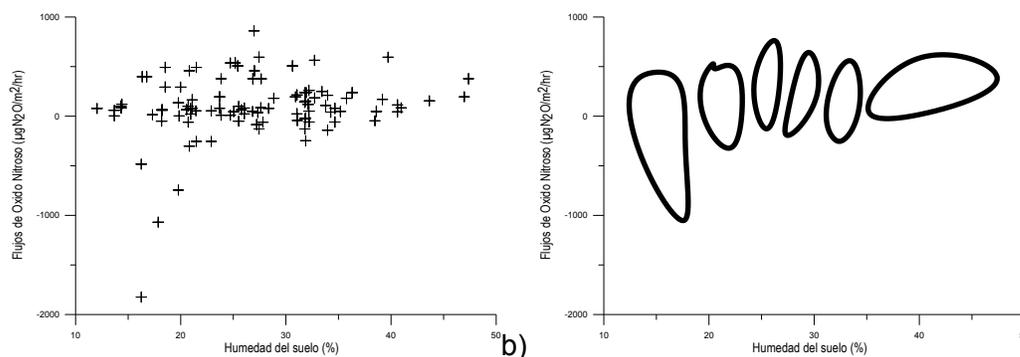


Tabla 4.5: Coeficiente de relación entre los flujos de N_2O emitido desde suelos cultivados con *B.h* CIAT 16888 entre octubre del 2009 a noviembre de 2010 con humedad del suelo por intervalos, para un valor de significancia $p < 0,1$.

Valor del Coeficiente de correlación de PEARSON	Tendencia del flujo de N_2O con relación a la Hs	Intervalos de humedad del suelo (%)	Variación del flujo N_2O ($\mu gN_2O/m^2/hr$)
-0,37	Disminuye	<18	-1823,94 – 397,86
-0,15	Disminuye	18-23	-745,08 – 491,88
0,21	Aumenta	23 - 27	-50,65 – 859,93
0,24	Aumenta	27 - 31	-128,74– 594,91
0,16	Aumenta	31 - 34	-246,91 – 564,41
0,42	Aumenta	> 34	-58,86 – 594,91

4.4.3 Relación de los flujos de N_2O de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679 con la humedad del suelo.

En la Figura 4.14.a, se presenta la relación de los flujos de N_2O de suelos con *B.h* CIAT 679, con la humedad del suelo entre octubre de 2009 a diciembre de 2010. Se observa que no existe una relación lineal entre tales variables. Los coeficientes de correlación de Pearson no son significativo ($P < 0,1$). En la figura 4.14.b., se representan los flujos de N_2O agrupados por intervalos de humedad del suelo. Se aprecia que para valores de la humedad del suelo menores a 18% y entre 24 - 40 %, los flujos de N_2O presentan una tendencia a aumentar con el aumento de la humedad del suelo, ya que tienen un coeficiente de relación positivo y significativo ($p < 0,1$) (Tabla. 4.6). Para valores de la humedad del suelo entre 18 - 22% y mayores de 40%, los flujos de N_2O presentaron una tendencia a disminuir con el aumento de la humedad del suelo, ya que tienen un coeficiente de relación negativo y significativo ($P < 0,1$) y para valores de la humedad del suelo entre 22-24%, los flujos no presentan una relación apreciablemente significativa ($p < 0,1$) con la humedad del suelo. Debido a la variabilidad de la tendencia de la relación de la humedad del suelo y las emisiones de los flujos de N_2O desde suelos cultivados con esta gramínea; aunque no es muy fuerte la relación, se observa una leve influencia del proceso de desnitrificación.

Figura 4.14. a.) Relación entre el flujo de N_2O emitido desde suelos cultivado con *B.h* CIAT 679 y la humedad del suelo entre octubre del 2009 a noviembre de 2010. b.) Relación entre el flujo de N_2O emitido desde suelos cultivado con *B.h* CIAT 679 con humedad del suelo por intervalos.

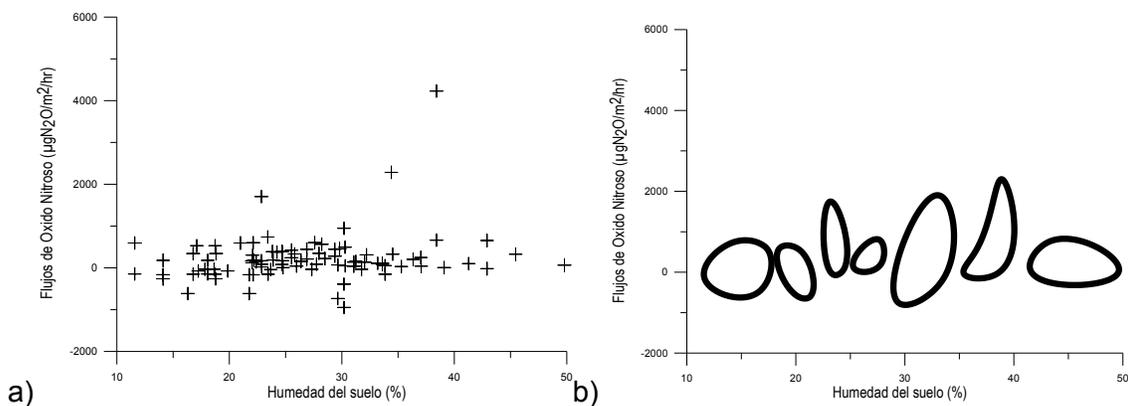


Tabla 4.6: Coeficiente de relación entre los flujos de N₂O emitido desde suelos cultivados con *B.h* CIAT 679 entre octubre del 2009 a noviembre de 2010 con humedad del suelo por intervalos, para un valor de significancia $p < 0,1$.

Valor del Coeficiente de correlación de PEARSON	Tendencia del flujo de N ₂ O con relación a la Hs	Intervalos de humedad del suelo (%)	Variación del flujo N ₂ O (µgN ₂ O/m ² /hr)
0,25	Aumenta	<18	-196,08 -1155,94
-0,25	Disminuye	18 -22	-614,55 – 594,54
0,03	No hay tendencia	22-24	-166,76 – 1705,32
0,15	Aumenta	24-29	-34,6- 603,39
0,29	Aumenta	29-35	-947,60 – 2284,74
0,38	Aumenta	35-40	5,99 – 4229,73
-0,18	Disminuye	>40	-19,55 – 654,26

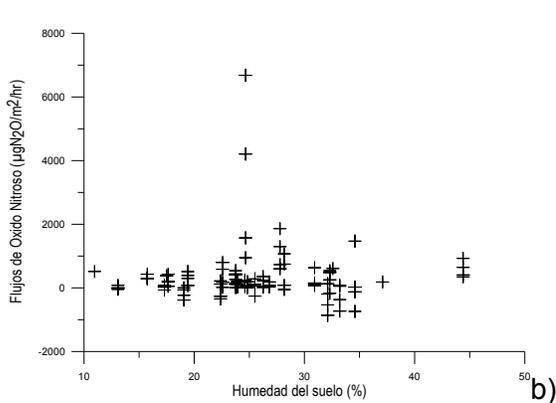
4.4.4 Relación de los flujos de N₂O de parcelas con suelos descubierto con la humedad del suelo.

En la Figura 4.15. a) se presenta la relación de los flujos de N₂O de suelos descubiertos con la humedad del suelo entre octubre de 2009 a diciembre de 2010. Se observa que no existe una relación lineal entre tales variables. Los coeficientes de correlación de Pearson no significativos ($P < 0,1$). En la figura 4.15. b) se representan los flujos de N₂O agrupados por intervalos de humedad del suelo. Se aprecia que para valores de la humedad del suelo menores a 20% y entre 24 a 31%, los flujos de N₂O presentan una tendencia a disminuir con el aumento de la humedad del suelo, ya que tienen un coeficiente de relación negativo y significativo ($P < 0,1$) (Tabla. 4.7), pero con valores entre 20 -24% y mayores de 31%, los flujos de N₂O tienen una tendencia aumentar con el aumento de la humedad del suelo, varían según se aprecia en la tabla 4,7, y tienen coeficientes de correlación positivos y significativos ($P < 0,1$).

La relación de los flujos de N_2O con la humedad del suelo, es más fuerte cuando la humedad del suelo es mayor de 24%. Aunque entre el rango de humedad del suelo de 24 a 31%, las condiciones favorecen a una disminución de las emisiones del flujo en estudio; pero para humedades del suelo mayores de 31%, favorecen al aumento de las emisiones. De lo anterior se deduce que en el suelo descubierto, presenta evidencia que las emisiones de los flujos de N_2O , son causados por procesos de desnitrificación.

Figura 4.15.a.) Relación entre los flujo de N_2O emitidos desde suelos descubiertos y la humedad del suelo entre octubre del 2009 a noviembre de 2010. b). Relación de los flujo de N_2O emitidos desde suelos descubiertos con humedad del suelo por intervalos

a)



b)

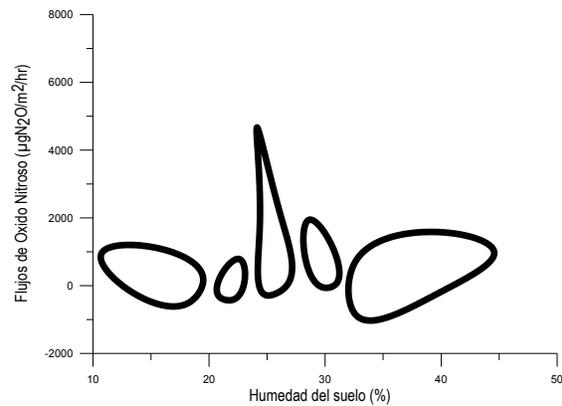


Tabla 4.7: Coeficiente de relación entre flujos de N₂O emitidos desde suelos descubiertos entre octubre del 2009 a noviembre de 2010 con humedad del suelo por intervalos, para un valor de significancia $p < 0,1$.

Valor del Coeficiente de correlación de PEARSON	Tendencia del flujo de N ₂ O con relación a la Hs	Intervalos de humedad del suelo (%)	Variación del flujo N ₂ O ($\mu\text{gN}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{hr}$)
-0,13	Disminuye	<20	-383,21 – 516,12
0,13	Aumenta	20- 24	-344,61 - 800,23
-0,33	Disminuye	24 – 27	-257,49 - 6682,31
-0,51	Disminuye	27-31	-52,29-1861,49
0,42	Aumenta	>31	-861,11 – 1469,70

4.4.5 Relaciones entre flujos de N₂O y Humedad del suelo en época seca y de lluvias con diferentes dosis de fertilización.

Al analizar la relación entre los flujos de N₂O en suelos con diferentes coberturas y la humedad del suelo en época seca y época de lluvias, se encontró una relación linealmente negativa, significativa ($p < 0,1$), en suelos de las parcelas cultivadas con *B.h* 26159 en época de lluvia (Tabla 4.8), es decir, que al aumentar la humedad del suelo en época de lluvia, las emisiones de flujos de N₂O procedentes desde suelos cultivados con esta pastura tiende a disminuir. Esto se podría asociar con niveles muy altos e incluso con excesos de humedad en los suelos, que limitan los procesos microbiológicos que generan los flujos mencionados, se activaría los compuesto que posee esta pastura en sus raíces, la cual tienen la capacidad de inhibir la nitrificación (GOPALAKRISHNAN, S, 2009) y así mejorar el manejo del nitrógeno en el suelo. También se observa que en dicha época en los suelos de las parcelas cultivadas con esta pastura, la aplicación de nitrógeno induce una relación linealmente positiva y significativa ($p < 0,1$); es decir, los flujos de N₂O de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159 presentan una tendencia a aumentar con el aumento de la humedad del suelo en época de lluvia con aplicación de

dosis de 150 y 300 KgN/ha/año.(Tabla 4.8). En época seca los flujos de N₂O emitidos en parcelas con diferentes coberturas, no presentan una relación linealmente significativa ($p < 0,1$) (Tabla 4.8).

Los flujos de N₂O de suelos con *B.h* CIAT 16888 y *B.h* CIAT 679, no tienen relaciones linealmente significativas ($p < 0,1$) (Tabla 4.9 y 4.10), en ninguno de los casos y épocas, salvo en los suelos de las parcelas cultivados con la pastura *B.h* CIAT 16888, con aplicación de dosis de 150 KgN/ha/año de fertilizante, donde se aprecia una relación linealmente positiva y significativa ($p < 0,1$) (Tabla 4.9).

Los flujos de N₂O de suelo descubierto, presentaron una relación linealmente negativa significativa en época seca (Tabla 4 11), es decir que tienden a disminuir con el aumento de la humedad del suelo. En época de lluvias y con aplicación de fertilizantes, no se aprecia una relación linealmente significativa entre flujos N₂O y la humedad del suelo (Tabla 4.11).

Tabla 4.8. Coeficientes de relación entre los flujos de N₂O de el suelo con *B.h* CIAT 26159 y Hs en época seca y época de lluvia con fertilizante N, con $p < 0,1$.

Dosis de kgN/ha/año	Época seca		Época de lluvia	
	Coef. Pearson	Coef. Spearman	Coef. Pearson	Coef. Spearman
0	0,06 P=0,7474	0,0042 P=0,9813	-0,3460 P=0,0524	-0,2876 P=0,100
150			0,3085 P=0,0859	0,6414 P=0,0004
300			0,3138 P=0,0803	0,2200 P=0,2206

P es el valor de la probabilidad

Tabla 4.9. Coeficientes de relación entre los flujos de N₂O de suelos con *B.h* CIAT 16888 y Hs en época seca y época de lluvia con fertilizante N, con p<0,1.

Dosis de kgN/ha/año	Época seca		Época de lluvia	
	Coef. Pearson	Coef. Spearman	Coef. Pearson	Coef. Spearman
0	0,2433 P=0,2122	0,1868 P=0,3317	0,0723 P=0,7147	0,0438 P=0,8199
150			0,3407 P=0,0760	0,4470 P=0,0202
300			-0,0802 P=0,6851	0,2671 P=0,1652

Tabla 4.10. Coeficientes de relación entre los flujos de N₂O de suelos con *B.h* CIAT 679 y Hs en época seca y época de lluvia con fertilizante N, con p<0,1.

Dosis de kgN/ha/año	Época seca		Época de lluvia	
	Coef. Pearson	Coef. Spearman	Coef. Pearson	Coef. Spearman
0	-0,1261 P=0,5225	0,0156 P=0,9353	0,1436 P=0,4661	-0,0591 P=0,7586
150			0,1553 P=0,4301	0,1624 P=0,3987
300			0,1349 P=0,4937	0,1013 P=0,5985

Tabla 4.11. Coeficientes de relación entre los flujos de N₂O de suelos descubiertos y Hs en época seca y época de lluvia con fertilizante N, con p<0,1.

Dosis de kgN/ha/año	Época seca		Época de lluvia	
	Coef. Pearson	Coef. Spearman	Coef. Pearson	Coef. Spearman
0	-0,3301 P=0,0862	-0,0571 P=0,7666	-0,0698 P=0,7242	-0,0926 P=0,6303
150			0,3769 P=0,0480	0,4490 P=0,0197
300			0,1788 P=0,3627	0,2550 P=0,1852

P es el valor de la probabilidad

4.4.6 Relación de los flujos acumulados de N₂O y la Precipitación

En la tabla 4.12 se muestran los coeficientes de correlación lineal entre los flujos acumulados de N₂O y la precipitación acumulada entre muestreos entre octubre de 2009 y noviembre de 2010. Se aprecia que en suelos descubiertos existe una relación lineal positiva y significativa (p<0,1).

En suelos con *B.h* CIAT 26159, *B.h* CIAT16888 y *B.h* CIAT 679, aunque los coeficientes de correlación no son significativos (p<0,1) (Tabla 4.12), sus valores son negativos, lo que indicaría una tendencia a disminuir los flujos N₂O con el aumento de la precipitación.

Tabla 4.12. Coeficiente de correlación entre los flujos de N₂O acumulados emitidos desde suelos cultivados con tres genotipos de *Brachiaria humidicola* y suelo descubierto, con la precipitación acumulado en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.

Cobertura	Coef. Pearson	Coef. Spearman
B.h CIAT 26159	-0,3666 P=0,1973	-0,3916 P=0,1579
B.h CIAT 16888	-0,3897 P=0,1684	-0,2926 P=0,2914
B.h CIAT 679	-0,2432 P=0,4020	-0,2332 P= 0,4004
Suelos descubierto	0,3821 P=0,1776	0,7481 P=0,0070

P es el valor de la probabilidad

4.4.7 Relación entre flujos de N₂O bajo diversas aplicaciones de nitrógeno, con humedad del suelo y temperatura del aire

En parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679; solo las parcelas con aplicación de 150 kg N/ha/año, tiene un coeficiente de Spearman significativo ($p < 0,1$) y positivo, entre el flujo de N₂O y la humedad del suelo (Tabla 4.14), aunque el coeficiente de Pearson es positivo pero no es significativo ($p < 0,1$) (Tabla 4.13). La relación de flujos de N₂O con temperatura de aire, es lineal, negativa y significativa ($p < 0,1$) con la temperatura mínima y media solamente en los suelos de parcelas de *B.h* CIAT 679 con aplicación de 150 kgN/ha/año; esta relación se aprecia a través del coeficiente de Pearson (Tabla 4.14), que implica que al disminuir la temperatura mínima o la temperatura promedio del aire los flujos de N₂O en parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679 aumentan. Lo que indica que

las temperaturas bajas en la zona de estudio en esta parcela, favorecen a los procesos de desnitrificación.

Al analizar los flujos de N_2O en parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888; se encontró que con aplicaciones de 150 y 300 kgN/ha/año, los coeficientes de Pearson y Spearman son significativos ($p < 0,05$) y positivos, con la humedad del suelo (Tabla 4.15 y 4.16). La relación entre flujos de N_2O y temperatura del aire, no es linealmente significativa ($p < 0,1$) en ningunos de los tres casos estudiados (Tabla 4.15 y 4.16).

Al analizar los flujos de N_2O emitidos desde parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159; se encontró que solamente en los suelos de parcelas con aplicación de fertilizante nitrogenado, tienen coeficientes de Pearson y Spearman significativos ($p < 0,1$) y positivos, entre el flujo de N_2O y la humedad del suelo (Tabla 4.17 y 4.18). La relación de los flujos de N_2O con la temperatura del aire, es linealmente significativa ($p < 0,1$) y negativa, con la temperatura media en parcelas con aplicación de 150 kgN/ha/año, en las parcelas con aplicación de 300 kgN/ha/año se observa una relación lineal significativa ($p < 0,1$) y negativa con la temperatura mínima y temperatura media (Tabla 4.17 y 4.18), lo que implica que al aumentar la temperatura media o mínima del aire, los flujos de N_2O emitidos en dicha pastura disminuyen. De acuerdo los resultados anteriores, el proceso de desnitrificación es el mayor responsable de la causa de emisiones de los flujos de GEI en estudio, y en los suelos del Valle del Sinú cultivados con esta gramínea las bajas temperaturas activan los procesos de desnitrificación.

Los flujos de N_2O de parcelas con suelo descubierto; presentaron un coeficiente de relación de Spearman significativo ($p < 0,05$) y positivo, entre el flujo de N_2O y la humedad del suelo en parcelas con aplicación de 150 kgN/ha/año (Tabla 4.19 y 4.20). Los flujos de N_2O presentaron una relación lineal significativa ($p < 0,1$) con la temperatura del aire media en parcelas con aplicación de 300 kgN/ha/año (Tabla 4.19 y 4.20). Lo que implica que al aumentar la temperatura media, los flujos de N_2O tienden a disminuir. Este resultado muestra que en los suelos del Valle del Sinú, las altas temperaturas, favorecen a la reducción de las emisiones de flujos de N_2O y el proceso de desnitrificación es sensible a variables como la humedad del suelo y temperatura. Lo anterior indica que para escenarios locales de cambio climático, donde se presenten aumento de la temperatura, esta favorece a una disminución de las emisiones de dicho gas.

Tabla 4.13: Coeficientes de correlación de Pearson entre los flujos de N₂O de suelos con *B.h* CIAT 679 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.

	Hs-0	Hs- 150	Hs- 300	Tmin	Tmax-1	T prom
N ₂ O-0	0,2197 P=0,4505	---	---	-0,2006 P=0,4917	-0,3910 P=0,1669	-0,1852 P=0,5261
N ₂ O-150	---	0,3901 P=0,1679	---	-0,5358 P=0,0483	-0,1407 P=0,6313	-0,4611 P=0,0970
N ₂ O-300	---	---	0,3501 P=0,2198	0,0937 P=0,7501	-0,3549 P=0,2131	0,2495 P=0,3896

P es la probabilidad

Tabla 4.14: Coeficientes de correlación de Spearman entre los flujos de N₂O de suelos con *B.h* CIAT 679 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0$

	Hs-0	Hs- 150	Hs- 300	Tmin	Tmax-1	T prom
N ₂ O-0	0,1956 P=0,4806	---	---	-0,2597 P=0,3491	-0,4388 P=0,1136	-0,1980 P=0,4752
N ₂ O-150	---	0,5560 P=0,0450	---	-0,4449 P=0,1087	-0,0198 P=0,9430	-0,4246 P=0,1258
N ₂ O-300	---	---	0,3231 P=0,2441	0,0384 P=0,8899	-0,3947 P=0,1547	0,2376 p=0,3916

P es la probabilidad

Tabla 4.15: Coeficientes de correlación de Pearson entre los flujos de N₂O de suelos con *B.h* CIAT 16888 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de p<0,1.

	Hs-0	Hs- 150	Hs- 300	Tmin	Tmax-1	Tprom
N ₂ O-0	-0,0989 P=0,7366	---	---	-0,3187 P=0,2667	0,1950 P=0,5042	0,1042 P=0,7230
N ₂ O-150	---	0,5557 P=0,0391	---	-0,0810 P=0,7831	-0,0214 P=0,9422	-0,3077 P=0,2845
N ₂ O-300	---	---	0,7959 P=0,0007	-0,1657 P=0,5712	-0,0504 P=0,8642	-0,3433 P=0,2295

P es la probabilidad

Tabla 4.16: Coeficientes de correlación de Spearman entre los flujos de N₂O de suelos con *B.h* CIAT 16888 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de p<0

	Hs-0	Hs- 150	Hs- 300	Tmin	Tmax-1	Tprom
N ₂ O-0	-0,0725 P=0,7937	---	---	-0,2190 P=0,4297	0,2624 P=0,3441	0,0704 P=0,7996
N ₂ O-150	---	0,6044 P=0,0293	---	-0,2416 P=0,3837	0,0088 P=0,9746	-0,3410 P=0,2188
N ₂ O-300	---	---	0,7626 P=0,0060	-0,2597 P=0,3491	-0,0044 P=0,9873	-0,6183 P=0,0258

P es la probabilidad

Tabla 4.17.: Coeficientes de correlación de Pearson entre los flujos de suelos con *B.h* CIAT 26159 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.

	Hs-0	Hs- 150	Hs- 300	Tmin	Tmax-1	Tprom
N ₂ O-0	0,4939 P=0,0726	---	---	-0,1210 P=0,6802	-0,0980 P=0,7388	0,0850 P=0,7726
N ₂ O-150	---	0,0067 P=0,9820	---	-0,3024 P=0,2933	0,0272 P=0,9264	-0,4714 P=0,0888
N ₂ O-300	---	---	0,3982 P=0,1585	-0,4995 P=0,0690	0,3573 P=0,2098	-0,5130 P=0,0607

P es la probabilidad

Tabla 4.18: Coeficientes de correlación se Spearman entre los flujos de N₂O de suelos con *B.h* CIAT 26159 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0$

	Hs-0	Hs- 150	Hs- 300	Tmin	Tmax-1	Tprom
N ₂ O-0	0,6440 P=0,0202	---	---	-0,1739 P=0,5307	-0,0838 P=0,7626	-0,2134 P=0,4416
N ₂ O-150	---	0,2132 P=0,4421	---	-0,2145 P=0,4392	0,0419 P=0,8799	-0,5677 P=0,0407
N ₂ O-300	---	---	0,3407 P=0,2193	-0,4765 P=0,0858	0,3528 P=0,2033	-0,5567 P=0,0447

P es la probabilidad

Tabla 4.19: Coeficientes de correlación de Pearson entre los flujos de N₂O de parcelas de suelo descubierto usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de p<0,1.

	Hs-0	Hs- 150	Hs- 300	Tmin	Tmax-1	Tprom
N ₂ O-0	-0,0033 P=0,9909	---	---	0,1098 P=0,7086	-0,1602 P=0,5842	-0,0521 P=0,8596
N ₂ O-150	---	0,4194 P=0,1355	---	-0,0477 P=0,8715	-0,1090 P=0,7108	-0,2013 P=0,4902
N ₂ O-300	---	---	0,2712 P=0,3484	-0,3043 P=0,2901	-0,0202 P=0,9454	-0,5207 P=0,0562

P es la probabilidad

Tabla 4.20: Coeficientes de correlación de Spearman entre los flujos de N₂O de parcelas de suelo descubierto usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de p<0,1.

	Hs-0	Hs- 150	Hs- 300	Tmin	Tmax-1	Tprom
N ₂ O-0	0,0857 P=0,7573	---	---	0,1107 P=0,6899	-0,0419 P=0,8799	-0,1012 P=0,7152
N ₂ O-150	---	0,5385 P=0,052	---	-0,1694 P=0,5414	-0,2602 P=0,3482	-0,2024 P=0,4655
N ₂ O-300	---	---	0,2044 P=0,4611	-0,3681 P=0,1845	-0,0066 P=0,9810	-0,5963 P=0,0316

P es la probabilidad

4.5 Modelos estadísticos empíricos de flujos de Óxido Nitroso en función de diversas condiciones agrícolas y agrometeorológicas

En los modelos que se presentan y analizan en esta sección, se consideran las siguientes variables agrometeorológicas, ya detalladas en las secciones precedentes:

H_s	Humedad del suelo (%)
T_{min}	Temperatura mínima del aire del día del muestreo (°C)
T_{max-1}	Temperatura máxima del aire del día anterior del muestreo (°C)
T_{prom}	Temperatura promedio del aire del día del muestreo (°C)

4.5.1 Modelación agrometeorológica de los flujos de N_2O de parcelas cultivadas con B.h CIAT 679 con aplicación de 0, 150 y 300 Kg N/ha/año

Caso 1. Modelación en suelos sin aplicación de fertilizante nitrogenado

Los flujos de N_2O de parcelas con B.h CIAT 679 sin aplicación de fertilizante nitrogenado, tienen una relación no lineal significativa ($p < 0,05$) con una función $F(H_s, T_{min}, T_{max-1})$, que involucra humedad del suelo, temperatura mínima del día del muestreo y temperatura máxima del día anterior al muestreo. Este modelo tiene la siguiente expresión:

$$\xi N_2O-0 (H_s, T_{min}, T_{max-1}) = [EXP(-0,232077 + 1,02325 F(H_s, T_{min}, T_{max-1})) - 10]^{1/2} \quad (Ec. 4.1)$$

Con

$$R^2 = 30 \%; \quad r = 0,55$$

$$P = 0,0415 < 0,05$$

Donde

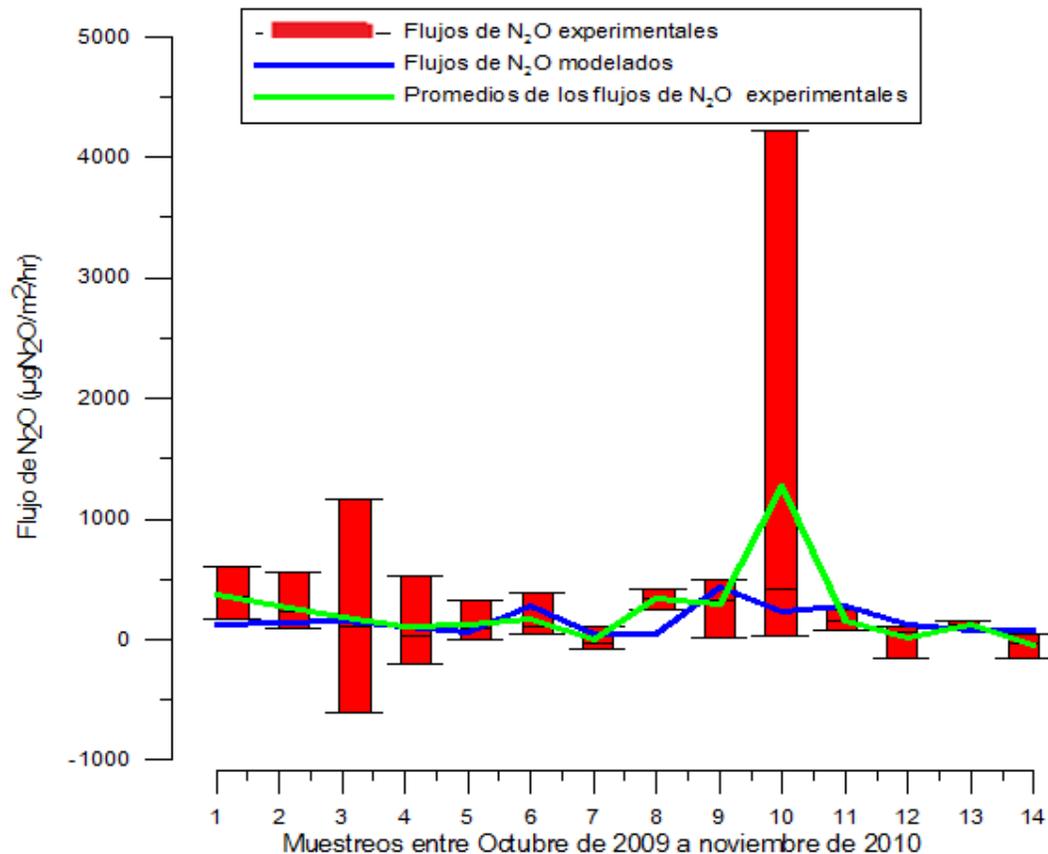
$$F(H_s, T_{min}, T_{max-1}) = 0,020183H_s + 89,014 - 1,965T_{min} - 1,0253T_{max-1}$$

La ecuación 4.1, explica en un 30% la variabilidad de los flujos de N_2O de la variedad B.h CIAT 679 sin aplicación de fertilizante nitrogenado, a través de una función dependiente de las variables antes señaladas. La modelación de los flujos de N_2O está representada por una función de tipo exponencial. Los datos modelados tienen un coeficiente de correlación significativo ($p < 0,05$) de 0,55. En la ecuación 4.1., representada gráficamente en la figura 4.15, se aprecia que al aumentar la temperatura

máxima del aire el día anterior al muestro y la temperatura mínima del día del muestro, los flujos de N_2O emitidos desde suelos cultivados con *B.h* CIAT 679, tienden a disminuir y al aumentar la humedad del suelo los flujos N_2O tienden aumentar, esta tendencia también se aprecia en las tablas 4.13 y 4.14, aunque estos valores de los coeficientes de relación no son significativos ($p < 0,1$).

En la figura 4.16, se muestran los datos de los flujos de N_2O en los cuatro puntos muestreados entre octubre de 2009 y noviembre de 2010. Se aprecia que la mayor variabilidad se dio en el muestro décimo que coincide con el período más lluvioso del periodo de estudio (Figura 4.3.a) y con la menor oscilación diaria de la temperatura (Figura 4.2).

Figura 4.16: Flujos de N_2O experimental, promedio y modelado; emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679 sin aplicación de fertilizante nitrogenado entre octubre de 2009 a noviembre de 2010.



Caso 2: Modelación en suelos con aplicación de 150 KgN/ha/año de fertilizante.

Los flujos de N₂O en parcelas con *B.h* CIAT 679 y aplicación de 150 KgN/ha/año, tienen una relación lineal significativa ($p < 0,05$) con la humedad del suelo, temperatura mínima del día del muestreo y la temperatura máxima del día anterior al muestreo, como se aprecia en la siguiente ecuación.

$$E_{N_2O-150} (Hs, T_{min}, T_{max-1}) = 7419,3 + 5,64482Hs - 236,49T_{min} - 54,997T_{max-1} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Con

$$R^2 = 49\%, \quad r = 0,7$$

$$P = 0,0241 < 0,05$$

La ecuación 4.2, explica en un 49% la variabilidad de los flujos de N₂O de suelos con *B.h* CIAT 679, con aplicación de 150 KgN/ha/año. Esta variabilidad es explicada a través de una relación lineal con las variables temperatura del aire mínima del día del muestro, temperatura máxima del día anterior al muestreo y humedad del suelo. Los flujos calculados a través del modelo teórico tienen un alto coeficiente de correlación (0,7) con los flujos de N₂O emitidos.

En la ecuación 4.2., se aprecia que al aumentar la temperatura máxima del aire del día anterior al muestro y la temperatura mínima del día del muestro, los flujos de N₂O tienden a disminuir y al aumentar el contenido de agua del suelo los flujos de N₂O tienden a aumentar. Lo anterior también se muestra en los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman de las tablas 4.13 y 4.14.

Caso 3. Modelación en suelos con aplicación de 300 KgN/ha/año de fertilizante.

Los flujos de N₂O emitidos con *B.h* CIAT 679 y aplicación de 300 KgN/ha/año, tienen una relación no lineal significativa ($p < 0,1$) con una función dependiente de humedad del suelo, temperatura mínima del día del muestreo y temperatura máxima del día anterior al muestreo, como se observa en la siguiente expresión:

$$E_{N_2O-300} (Hs, T_{min}, T_{max-1}) = [-17,0245 + 1,79235(7,53302Hs + 33,486T_{min} - 19,628T_{max-1})^{1/2}]^2 \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Con

R=18,5 %, r=0,43 y p= <0,1

La ecuación 4.3, explica en un 18,5% el patrón de la variabilidad de los flujos de N₂O, a través de una función dependiente de las variables temperatura del aire mínima del día del muestro, temperatura máxima del día anterior al muestreo y humedad del suelo. El coeficiente de correlación es de 0,43. De la ecuación 4.3., se deduce que al aumentar la temperatura máxima del aire los flujos de N₂O tienden a disminuir, pero al aumentar el contenido de agua del suelo y la temperatura mínima los flujos de N₂O tienden a aumentar.

Caso 4. Modelo general para los diversos niveles de fertilización y de condiciones agrometeorológicas, variedad CIAT 679

El modelo de la ecuación 4.4., es significativo (p<0,05) y representativo para flujos de N₂O en suelos con *B.h* CIAT 679 y aplicaciones de 0, 150 y 300 Kg N/ha/año.

$$F_{N_2O} = \text{EXP}[5,01671 + 0,00304111 * \mathcal{E}_{N_2O}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1})] \quad (\text{E.c.4.4})$$

R²=31%

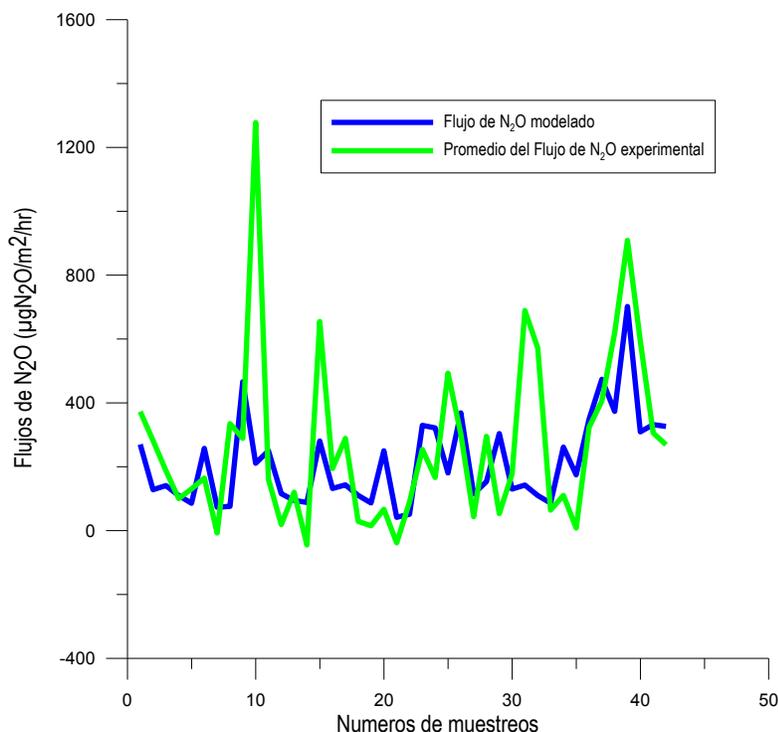
P= 0,0001 < 0,05

Donde

$$\mathcal{E}_{N_2O}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}) = \begin{cases} \mathcal{E}_{N_2O-0}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}); \text{ Ec.4.1} & \text{si la dosis es 0 KgN/ha/año} \\ \mathcal{E}_{N_2O-150}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}); \text{ Ec.4.2} & \text{si la dosis es 150 KgN/ha/año} \\ \mathcal{E}_{N_2O-300}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}); \text{ Ec.4.3} & \text{si la dosis es 300 KgN/ha/año} \end{cases}$$

La variabilidad de los flujos de N₂O es explicada en un 31%, a través de una función dependiente de la humedad del suelo, temperatura mínima y temperatura máxima (Figura 4.17). Los flujos calculados con la ecuación 4.4., tienen un coeficiente de correlación de 0,559 con los estimados con la técnica de la cámara cerrada.

Figura 4.17: Flujos de N_2O experimental, promedio y modelado; emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679 con aplicación de diferentes dosis de fertilizante entre octubre de 2009 a noviembre de 2010;



Como resumen de lo antes anotado, se puede indicar que las variables agrometeorológicas humedad del suelo y temperatura del aire, tienen una relación no lineal significativa ($p < 0,1$) con los flujos de N_2O en suelos con la variedad *B.h* CIAT 679 en los tratamientos de fertilización de 0 y 300 KgN/ha/años, pero en parcelas con fertilización de 150 Kg N/ha/año se presenta una relación lineal significativa ($p < 0,1$). En estas relaciones se evidencia que incrementos de la humedad del suelo favorecen el aumento de los flujos de N_2O . Por otra parte, incrementos en la temperatura del aire inducen una disminución de las emisiones de los flujos de N_2O .

En los caso 1, 2 y 3; se corroboran que el mayor responsable de la causa de las emisiones desde suelos cultivados con esta gramínea, es el proceso de desnitrificación, y el aumento de la temperatura favorece a reducir las emisiones de N_2O . Aunque en el caso 3, se presenta que aumentos de la temperatura mínima favorecen al incremento de los flujos de dicho gas; este efecto de debe tal vez a la pérdida de N por volatilización, por la alta dosis de urea aplicada, asociada con los efectos del aumento de la temperatura mínima.

4.5.2 Modelación agrometeorológica de los Flujos de N₂O en suelos cultivados con *B.h* CIAT 16888

Caso 1: Modelación en suelos sin aplicación de fertilizante nitrogenado

Los flujos de N₂O en parcelas con *B.h* CIAT 16888 sin aplicación de fertilizante nitrogenado, tienen una relación no lineal significativa ($p < 0,05$) con una función $F(H_s, T_{\min}, T_{\max-1})$, dependiente de la humedad del suelo, temperatura mínima del día del muestreo y temperatura máxima del día anterior al muestreo, según se expresa en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} E_{N_2O-0}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}) = \\ = \text{EXP}[F(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}) / [-0,0892946 F(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}) + 1,43477]] - 10 \end{aligned} \quad (\text{E.c. 4.5})$$

Con

$$R_2 = 29,7 \% \quad r = 0,54$$

$$p = 0,0441 < 0,05$$

Donde

$$F(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}) = 0,0100387H_s - 0,11559T_{\min} + 0,2178T_{\max-1}$$

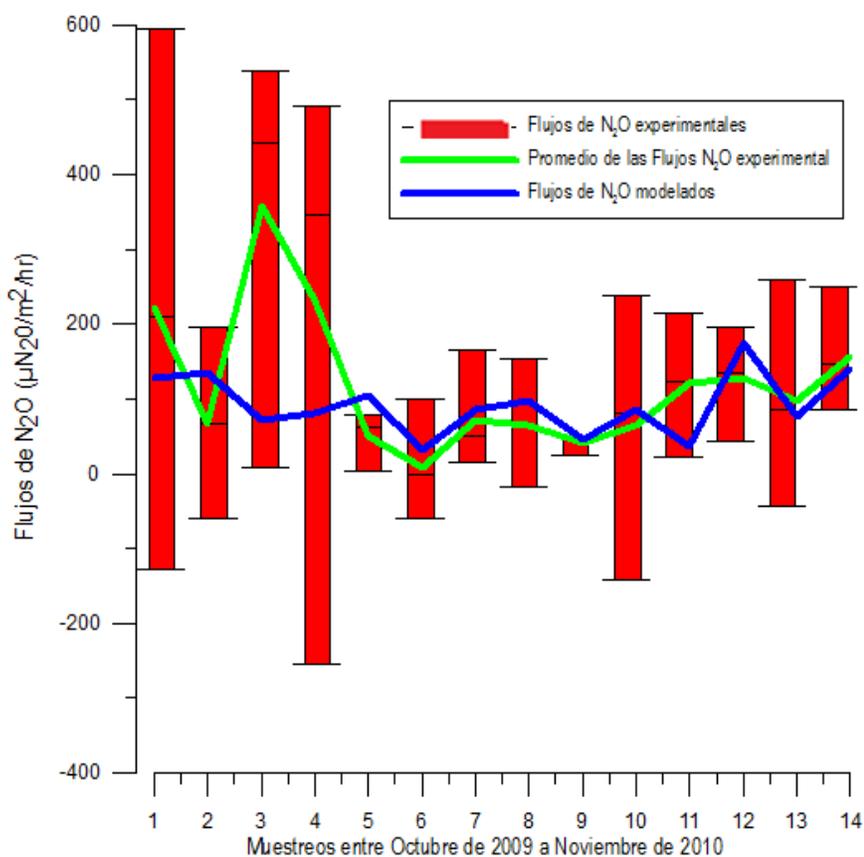
La ecuación 4.5, explica en un 29,7% la variabilidad del patrón de los flujos de N₂O, mediante una relación de tipo exponencial con una función dependiente de la temperatura del aire mínima del día del muestreo, temperatura máxima del día anterior al muestreo y la humedad del suelo. Los datos modelados teóricamente con la ecuación 4.5, tienen un coeficiente de correlación de 0,54 con los flujos de N₂O.

En la ecuación 4.5., se observa que al aumentar la temperatura mínima los valores de la función $F(H_s, T_{\min}, T_{\max-1})$ disminuyen y los flujos de N₂O tienden a disminuir; al aumentar la humedad del suelo y la temperatura máxima los valores de la función $F(H_s, T_{\min}, T_{\max-1})$ aumentan, y los flujos N₂O tienden a aumentar. Esta tendencia también se aprecia en las tablas 4.15 y 4.16, aunque estos valores de los coeficientes de correlación no son significativos ($p < 0,1$).

En la figura 4.18, se muestran los datos de los flujos de N₂O en cuatro puntos monitoreados entre octubre de 2009 y noviembre de 2010. Se aprecia que la mayor

variabilidad se dio en el cuarto muestreo. Los máximos valores de los flujos N_2O se dieron a inicios de la época seca y las mayor variaciones entre muestreo se dieron en la misma época.

Figura 4.18: Flujos de N_2O experimental, promedio y modelado; emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888 sin aplicación de fertilizante nitrogenado entre octubre de 2009 a noviembre de 2010.



Caso 2: Modelación en suelos con aplicación de 150 KgN/ha/año de fertilizante.

En este caso los flujos de N_2O tienen una relación lineal significativa ($p < 0,05$) con la humedad del suelo, como se aprecia en la siguiente expresión.

$$E_{N_2O-0}(H_s) = -545,997 + 23,5198H_s \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Con

$$R^2 = 30,9 \% \quad r = 0,56$$

$$p = 0,0391 < 0,05$$

La ecuación 4.6, explica en un 30,9% la variabilidad de los flujos de N₂O. Los aumentos de la humedad del suelo, favorecen al incremento de los flujos de N₂O. Los datos de flujos de N₂O calculados con la ecuación 4.6 tienen un coeficiente de correlación de 0,56 con los estimados a través de la técnica de la cámara cerrada.

Caso 3: Modelación en suelos con aplicación de 300 KgN/ha/año de fertilizantes

Para este escenario, los flujos de N₂O tienen una relación no lineal significativa (p<0,05) con una función dependiente de la humedad del suelo, temperatura mínima del día del muestreo y la temperatura máxima del día anterior al muestreo, como se aprecia en la siguiente expresión.

$$\begin{aligned} \text{£}_{\text{N2O-300}}(\text{Hs}, T_{\text{min}}, T_{\text{max-1}}) = \\ =(\text{EXP}[9,11484 + 0,161504\text{HS} - 0,1T_{\text{min}} - 0,017886T_{\text{max-1}}] - 10)^2 \end{aligned} \quad (\text{E.c } 4.7)$$

Con

$$R^2 = 61\% \quad r = 0,78$$

$$P = 0,0010 < 0,05$$

La ecuación 4.7, explica en un 61% el patrón de la variabilidad de los flujos de N₂O, a través de una relación exponencial con la temperatura del aire mínima del día del muestreo, temperatura máxima del día anterior al muestreo y humedad del suelo. Los flujos N₂O calculados con la ecuación 4.7 tienen un coeficiente de correlación de 0,78, con los flujos de N₂O estimados con la técnica de la cámara cerrada.

Caso 4: Modelo general para los diversos niveles de fertilización y de condiciones agrometeorológicas, variedad CIAT 16888

El modelo de la ecuación 4.8, es lineal, significativo (p<0,05) y representativo para los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888 con aplicaciones de 0, 150 y 300 Kg N/ha/año.

$$F_{\text{N2O}} = -6,67619 + 1,13288 \text{£}_{\text{N2O}}(\text{Hs}, T_{\text{min}}, T_{\text{max-1}}) \quad (\text{E.c.4.8})$$

$$R^2=49,1\% \quad r=0,7 \quad P= 0,0001 < 0,05$$

Donde

$$E_{N_2O}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}) = \begin{cases} E_{N_2O-0}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}); & \text{ec.4.5 si la dosis es 0 KgN/ha/año} \\ E_{N_2O-150}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}); & \text{ec.4.6 si la dosis es 150 KgN/ha/año} \\ E_{N_2O-300}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}); & \text{ec.4.7 si la dosis es 300 KgN/ha/año} \end{cases}$$

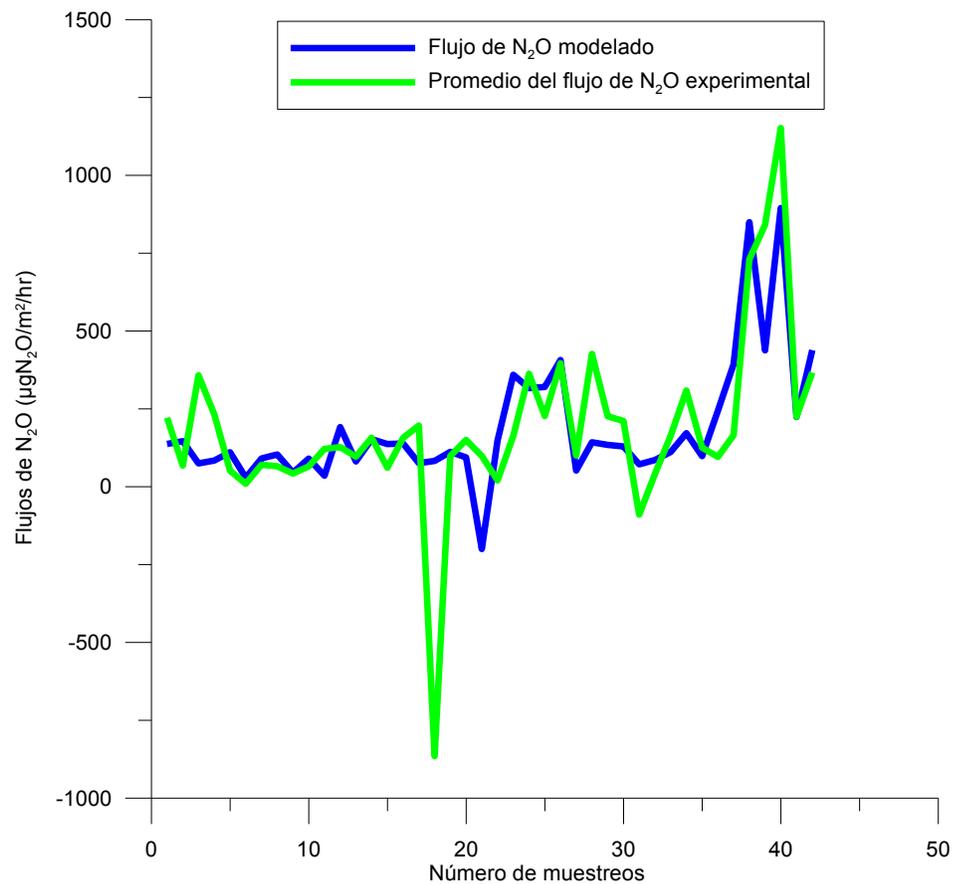
El patrón de la variabilidad de los flujos de N_2O es explicada en un 49,1%, a través de una función dependiente de la humedad del suelo, temperatura mínima del día del muestreo y la temperatura máxima del día anterior al muestreo. Los flujos calculados con la ecuación 4.8., tienen una correlación de 0,7 con los estimados con la técnica de la cámara cerrada (Figura 4.19). El muestreo del día 27 de enero de 2010 en las parcelas sin aplicación de fertilizante, presentó unos valores atípico en comparación a los demás muestreos en dichas parcelas. Para este día los valores de la humedad del suelo fueron 19% en promedio, la temperatura máxima del día anterior al muestreo fue de 32,8 °C, no es muy alta para valores que se registran para la época de la zona, y se registro una temperatura mínima de 23,6 °C, alta para valores que se registran para la época. Esta condiciones agrometeorológicas fueron ligeramente extremas para las condiciones normales de la época en la zona de estudio, lo que indica que estas condiciones limitan los procesos microbiológicos que generan los flujos N_2O . Lo cual es explicado en la ecuación 4.5, pero no es tan sensible es condiciones extremas.

Para esta accesión de *Brachiaria*, las variables agrometeorológicas humedad del suelo y temperatura del aire, tienen una relación no lineal significativa ($p < 0,1$) con los flujos de N_2O en los tratamientos de fertilización de 0 y 300 KgN/ha/año, pero en el tratamiento de fertilización de 150 KgN/ha/años se presenta una relación linealmente significativa ($p < 0,1$). En estas relaciones se evidencia que incrementos de la humedad del suelo en las parcelas con los tres tratamientos de fertilización nitrogenada, favorecen al aumento de las emisiones de los flujos de N_2O . La temperatura del aire tiene influencia en las emisiones de los flujos en los tratamiento de fertilización de 0 y 300 KgN/ha/año, y se observa que incrementos de la temperatura mínima del día de del muestreo favorecen a la disminución las emisiones de los flujos de N_2O .

En los caso 1, 2 y 3; se corroboran que el mayor responsable de la causa de las emisiones de flujo de N_2O desde el suelo, es el proceso de desnitrificación. En suelos cultivados con esta gramínea sin aplicación de fertilizante nitrogenado, bajo escenarios

locales donde la temperatura del aire tienda a aumentar el rango de oscilación diurno, está condición favorecen al incremento de las emisiones de los flujos de N_2O . Lo anterior se puede presentar tal vez porque las condiciones activan el proceso de generación de este gas, o reduce la capacidad que tiene de inhibir la *B.h* CIAT 16888.

Figura 4.19: Flujos de N_2O experimental, promedio y modelado; emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888 con aplicación de diferentes dosis de fertilizante entre octubre de 2009 a noviembre de 2010.



4.5.3 Modelación agrometeorológica de los Flujos de N_2O en suelos cultivados con *B.h* CIAT 26159

Caso 1. Modelación en suelo sin aplicación de fertilizante nitrogenado.

Para este caso, los flujos de N_2O presentan una relación no lineal significativa ($p < 0,1$) con una función $F(H_s, T_{\min}, T_{\max-1})$, que depende de la humedad del suelo, temperatura

mínima del día del muestreo y la temperatura máxima del día anterior al muestreo; como se aprecia en la siguiente expresión

$$E_{N_2O-0} (H_s, T_{min}, T_{max-1}) = EXP([1,05405 + 0,234766F (H_s, T_{min}, T_{max-1})])^2 - 10 \quad (E.c. 4.9)$$

$$R^2 = 25,5 \% \quad r = 0,5 \quad p = 0,0652 < 0,1$$

Donde

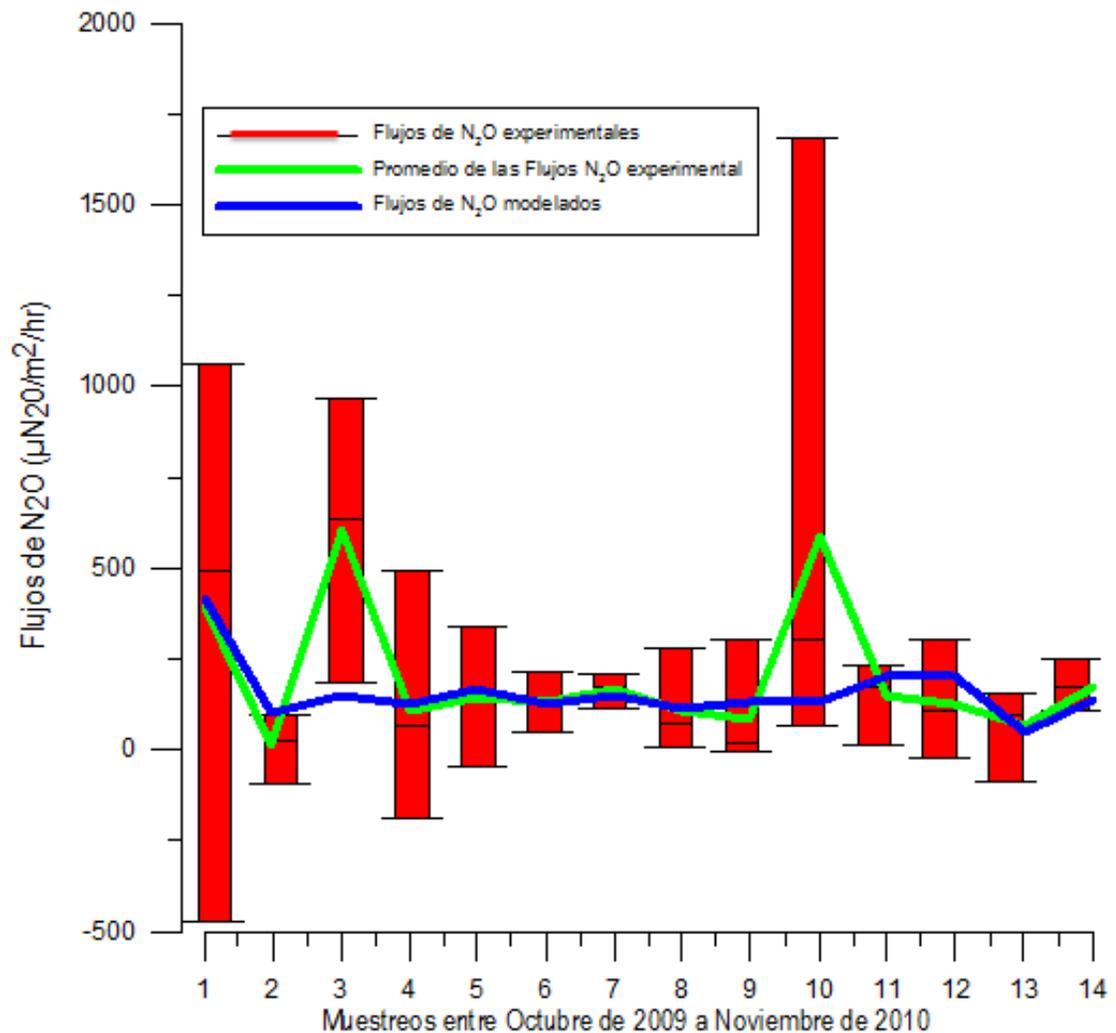
$$F (H_s, T_{min}, T_{max-1}) = 0,105557 * H_s + 0,08176 T_{min} + 0,016225 T_{max-1}$$

La ecuación 4.9, explica en un 25,5% el patrón de variabilidad de los flujos de N_2O , a través de una relación exponencial con una función dependiente de las variables agrometeorológicas en estudio. Los datos calculados con la ecuación 4.9 tienen un coeficiente de correlación de 0,5 con los estimados a través de la técnica de la cámara cerrada.

En la ecuación 4.9., se observa que al aumentar la temperatura mínima, la temperatura máxima del día anterior al muestreo y la humedad del suelo, los valores de la función $F(H_s, T_{min}, T_{max-1})$, aumentan, y los flujos N_2O tienden a aumentar, esta tendencia también se aprecia en las tablas 4.17 y 4.18.

En la figura 4.20, se muestran los datos de flujos de N_2O emitidos en las cuatro parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159 sin aplicación de fertilizante, entre octubre de 2009 a noviembre de 2010. Se aprecia que la mayor variabilidad se dio en los muestreos 1 y 10. Los máximos valores de los flujos N_2O emitidos en promedio se dieron a inicios de la época seca y las mayores variaciones entre muestreo se dieron en época de lluvia.

Figura 4.20: Flujos de N₂O experimental, promedio y modelado; emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159 sin aplicación de fertilizante nitrogenado entre octubre de 2009 a noviembre de 2010.



Caso 2: Modelación en suelos con aplicación de 150 Kg N/ha/año

En este caso, los flujos de N₂O tienen una relación no lineal significativa (p<0,05) con la temperatura promedio del aire del día del muestreo, como se aprecia en la siguiente expresión

$$F_{N_2O-0}(T_{prom}) = EXP [1/(-0,372976 + 0,000717792T_{prom}^2)]-10 \quad (Ec. 4.10)$$

$$R^2 = 26,6 \% \quad r=0,52$$

$$p= 0,0589 < 0,1$$

La ecuación 4.10, explica en un 26,6% el patrón de la variabilidad de los flujos de N₂O, a través de una relación no lineal con la temperatura promedio del aire del día del muestreo. Los flujos de N₂O calculados a través de la ecuación 4.10, tienen un coeficiente de relación de 0,52 con los estimados a través de la técnica de la cámara cerrada. En la ecuación 4.10., se observa que al aumentar la temperatura promedio del aire del día del muestreo, los flujos N₂O tienden a disminuir, esta tendencia también se aprecia en las tablas 4.17 y 4.18.

Caso 3: Modelación en suelos con aplicación de 300 Kg N/m²/año

Con este escenario, los flujos de N₂O tienen una relación lineal significativa (p<0,1) con una función F(Hs, T_{min}, T_{max-1}) dependiente de la humedad del suelo, temperatura mínima del día del muestreo y la temperatura máxima del día anterior al muestreo.

$$F_{N_2O-300}(Hs, T_{min}, T_{max-1}) = -0,0462393 + 1,00827F(Hs, T_{min}, T_{max-1}) \quad (E.c 4.11)$$

$$R^2= 29\% \quad r=0,54$$

$$P=0,0437 < 0,05$$

Donde

$$F(Hs, T_{min}, T_{max-1}) = 0,0486287 * H_S - 0,20596 T_{min} + 0,281 T_{max-1}$$

La ecuación 4.11, explica en un 29% el patrón de la variabilidad de los flujos de N₂O, a través de una relación lineal con la temperatura del aire mínima del día del muestro, temperatura máxima del día anterior al muestreo y humedad del suelo. Los flujos N₂O calculados con la ecuación 4.11 tienen un coeficiente de correlación de 0,54, con los flujos de N₂O emitidos desde el suelo de las parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159 que fueron estimados con la técnica de la cámara cerrada. En la ecuación 4.11, se aprecia que al aumentar la temperatura mínima del aire del día del muestreo, los flujos de N₂O emitidos tienden a disminuir, pero al aumentar el contenido de agua del suelo y temperatura máxima del aire del día anterior al muestreó, los flujos de N₂O tienden a aumentar.

Caso 4: Modelo general para los diversos niveles de fertilización y de condiciones agrometeorológicas, variedad CIAT 16888

El modelo de la ecuación 4.12., es lineal, significativo ($p < 0,05$) y representativo para los flujos de N_2O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888 con aplicaciones de 0, 150 y 300 Kg N/ha/año.

$$F_{N_2O} = -44,2075 + 1,14171 \mathcal{E}_{N_2O}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}) \quad (\text{E.c.4.12})$$

$$R^2 = 24\% \quad r = 0,49$$

$$P = 0,0010 < 0,05$$

Donde

$$\mathcal{E}_{N_2O}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}) = \begin{cases} \mathcal{E}_{N_2O-0}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}); & \text{ec.4.9 si la dosis es 0 KgN/ha/año} \\ \mathcal{E}_{N_2O-150}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}); & \text{ec.4.10 si la dosis es 150 KgN/ha/año} \\ \mathcal{E}_{N_2O-300}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}); & \text{ec.4.11 si la dosis es 300 KgN/ha/año} \end{cases}$$

El patrón de la variabilidad de los flujos de N_2O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159 con aplicaciones de 0, 150 y 300 KgN/ha/año de fertilizante, es explicada en un 24%, a través de una función para cada tratamiento de fertilización, dependiente de la humedad del suelo, temperatura mínima del día del muestreo y la temperatura máxima del día anterior al muestreo. Los flujos calculados con la ecuación 5.14., tienen un coeficiente de correlación de 0,49 con los estimados con la técnica de la cámara cerrada (figura 4.21.a).

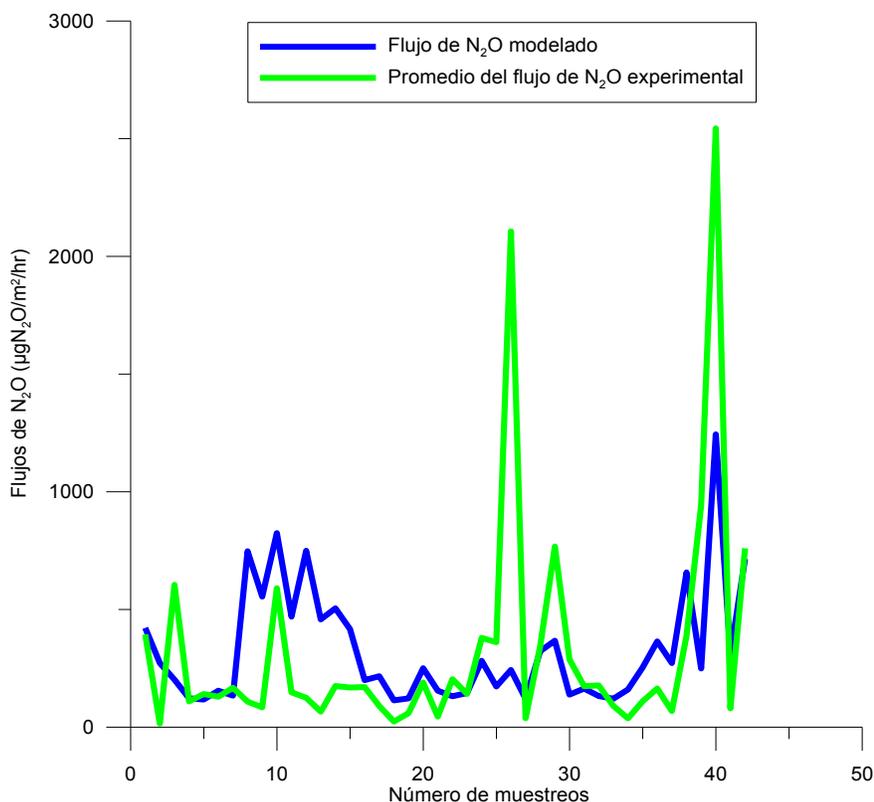
Las variables agrometeorológicas humedad del suelo y temperatura del aire, mostraron una relación no lineal significativa ($p < 0,1$) con los flujos de N_2O emitidos desde suelos con *B.h* CIAT 26159 en los tratamientos de fertilización de 0, 150 y 300 KgN/ha/año. Los incrementos de la humedad del suelo en parcelas con tratamientos de fertilización de 0 y 300 Kg N/ha/año favorecen al aumento de las emisiones de los flujos de N_2O ; en las parcelas de tratamiento de fertilización de 150 Kg N/ha/año, la humedad no evidencia ser un factor controlador de las emisiones de los flujos de N_2O .

La temperatura del aire tiene alguna influencia en los flujos de N_2O , aunque esta influencia varía entre los tratamiento de fertilización, es decir en el tratamiento sin fertilización nitrogenada, el aumento de la temperatura máxima y la temperatura mínima

favorecen el incremento de las emisiones de los flujos de N_2O . En las parcelas con tratamiento de fertilización de 150 KgN/ha/año incrementos en la temperatura promedio tienden a disminuir los flujos de N_2O .

En los caso 1 y 3; se corroboran que el mayor responsable de la causa de las emisiones de los flujos de N_2O desde el suelo, es el proceso de desnitrificación. En suelos cultivados con esta gramínea sin aplicación de fertilizante, bajo escenarios locales donde la temperatura del aire tienda aumentar, esto favorece al incremento de las emisiones de dicho gas. Lo anterior se puede presentar porque estas condiciones activan el proceso de generación de este gas o reduce la capacidad de inhibir de la *B.h* CIAT 26159.

Figura 4.21.a: Flujos de N_2O experimental, promedio y modelado; emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159 con aplicación de diferentes dosis de fertilizante entre octubre de 2009 a noviembre de 2010



4.5.4 Modelación de los flujos de N₂O emitidos desde suelos descubiertos.

Caso 1: Modelación en suelo sin aplicación de fertilizante nitrogenado.

El modelo que mejor explica el patrón de la variabilidad de los flujos de N₂O del suelo descubierto sin aplicación de fertilizantes nitrogenados es el propuesto en la ecuación 4.13 pero no es significativo ($p < 0,1$) y solo explica en un 2,6% la variabilidad de los flujos de N₂O a través de una relación no lineal de tipo exponencial con una función $F(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}, T_{\text{prom}})$ dependiente de la humedad del suelo y la temperatura mínima del aire, temperatura máxima del aire del día anterior al muestreo y temperatura promedio del día del muestreo.

$$\text{E}_{\text{N}_2\text{O}-300}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}, T_{\text{prom}}) = 66,7181 + 1,82424 \text{Exp}(0,99289 * \ln[F(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}, T_{\text{prom}})])$$

(E.c 4.13)

$$R^2 = 2,6\% \quad r = 0,16$$

$$P = 0,58 > 0,1$$

Donde

$$F(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}, T_{\text{prom}}) =$$
$$= 22,5303 + 0,197446H_s + 1,28456T_{\min} - 0,223642T_{\max-1} - 1,26559T_{\text{prom}}$$

Caso 2: Modelación en suelos con aplicación de 150 KgN/m²/año de fertilizante.

Los flujos de N₂O emitidos desde suelos descubiertos con aplicación de 150 kgN/ha/año de fertilizante, tienen una relación no lineal significativa ($p < 0,05$) de tipo exponencial con la función $F(H_s, T_{\min}, T_{\max-1})$, dependiente de la humedad del suelo, temperatura mínima del día del muestreo y la temperatura máxima del día anterior al muestreo, como se aprecia en la siguiente expresión.

$$\text{E}_{\text{N}_2\text{O}-0}(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}) = -370,791 + 3,9442 \text{EXP}[0,949189 * \ln(F(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}))]$$

(Ec. 4.14)

Con

$$R^2 = 28,8 \%; \quad r = 0,54$$

$$P = 0,0478 < 0,05$$

Donde

$$F(H_s, T_{\min}, T_{\max-1}) = 0,280717H_s + 2,81084T_{\min} - 2,17869T_{\max-1}$$

La ecuación 4.14, explica en un 28,8% el patrón de la variabilidad de los flujos de N₂O, a través de una relación no lineal, de tipo exponencial con las variables temperatura del aire mínima, temperatura máxima y humedad del suelo. Los datos calculados teóricamente con la ecuación 4.14, tienen un coeficiente de correlación significativo ($p < 0,05$) de 0,54 con los flujos de N₂O estimados a través de la técnica de la cámara cerrada. En la ecuación 4.14, se aprecia que al aumentar la temperatura máxima del aire el día anterior al muestro, los flujos de N₂O emitidos tienden a disminuir y al aumentar la humedad del suelo y la temperatura mínima del día del muestro, los flujos de N₂O tienden a aumentar.

Caso 3: Modelación en suelos con aplicación de 300 KgN/m²/año de fertilizante.

Los flujos de N₂O emitidos desde suelo descubierto con aplicación de 300 kgN/ha/año de fertilizante, tienen una relación no lineal significativa ($p < 0,05$) con una función $F(H_s, T_{\text{prom}})$, dependiente de la humedad del suelo y la temperatura promedio del día del muestro, como se aprecia en la siguiente expresión.

$$\varepsilon_{N_2O-0}(H_s, T_{\text{Prom}}) = -253,33 + 33,0611 [F(H_s, T_{\text{prom}})]^{1/2} \quad (\text{Ec. 4.15})$$

Con

$$R^2 = 28,5 \%; \quad r = 0,53$$

$$P = 0,0494 < 0,05$$

Donde

$$F(H_s, T_{\text{prom}}) = 7693,32 + 0,85625H_s - 263,44T_{\text{prom}}$$

La ecuación 4.15, explica en un 28,5% el patrón de la variabilidad de los flujos de N₂O, a través de una relación no lineal con las variables temperatura promedio del aire del muestro y humedad del suelo. El modelo teórico de la ecuación 5.18, relaciona los flujos de N₂O emitidos del suelo descubierto a través de una función raíz cuadrada con las variables agrometeorológicas. Los datos modelados teóricamente a través de la ecuación 4.15 tienen un coeficiente de correlación significativo ($p < 0,05$) de 0,53 con los flujos de N₂O estimados a través de la técnica de la cámara cerrada. En la ecuación 4.15, se

aprecia que al aumentar la temperatura promedio del aire del día del muestreo, los flujos de N₂O emitidos tienden a disminuir y al aumentar la humedad del suelo, los flujos N₂O tienden a aumentar.

Caso 4. Modelo general para los diversos niveles de fertilización y de condiciones agrometeorológicas, en suelos descubiertos

El modelo de la ecuación 4.16., es no lineal, significativo ($p < 0,05$) y representativo para aplicaciones entre 0 a 4,5 g N/m²/día.

$$F_{N_2O} = [\text{EXP}(-1,6912 + 3,93442\text{LN}(H_s) + 0,0110382K(N))]^{1/5} \quad (\text{Ec. 4.16})$$

Con

$$R^2 = 15\%$$

$$P = 0,0342 < 0,05$$

Donde

K(N) es una función dependiente de la dosis aplicada de fertilizante nitrogenado.

La ecuación 4.16., explica en un 15% el patrón de la variabilidad del flujo de N₂O emitidos desde suelos de parcelas descubiertas con aplicación de diferentes dosis de fertilizante nitrogenado, a través de una relación no lineal de tipo exponencial con la humedad del suelo y de una función K(N) que es igual a la dosis aplicada de fertilizantes en las últimas 24 horas (figura 4.21.b). Es de anotar que en los muestreos se presentaron valor atípico, los cuales no se pueden determinar su naturaleza.

Las variables agrometeorológicas: humedad del suelo y temperatura del aire, mostraron una relación no lineal significativa ($p < 0,1$) con los flujos de N₂O emitidos desde suelos de las parcelas de control (suelos descubiertos) con tratamientos de fertilización de 0, 150 y 300 KgN/ha/año.

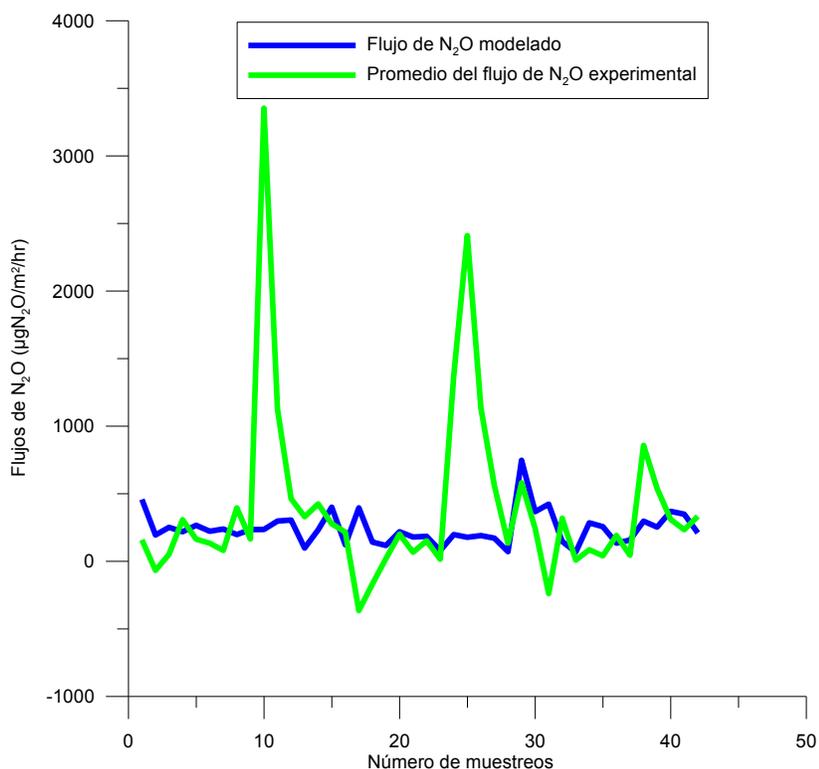
En forma general; se evidencia que la humedad del suelo es la variable agrometeorológica que mayor influencia tienen en el control de las emisiones de los flujos de N₂O; los incrementos de la humedad del suelo, favorecen el aumento de tales flujos.

La temperatura del aire tiene una menor influencia en los flujos. En las parcelas con tratamiento de fertilización 150 y 300 KgN/ha/año, se aprecia que aumentos de la

temperatura mínima del día de del muestreo favorecen el aumento de los flujos de N_2O y el aumento de la temperatura máxima del aire del día anterior al muestreo y de la temperatura promedio del día del muestreo, favorecen la disminución de las emisiones de los flujos de N_2O .

Los muestreos del día 29 de julio y 31 de agosto de 2010 en las parcelas sin aplicación de fertilizante y con aplicación 150 KgN/ha/año respectivamente, presentó valores atípicos en comparación a los demás muestreos en dichas parcelas. En estos meses el área bajo estudio registró valores de precipitación sobre lo normal, lo que saturó el contenido de humedad en el suelo, y esto activo el proceso microbiológico que generan los flujos N_2O . Lo cual es explicado en la ecuación 4.16, pero esta ecuación no es sensible a condiciones extremas.

Figura 4.21.b: Flujos de N_2O experimental, promedio y modelado por la ecuación 5.19; emitidos desde suelos de parcelas descubiertas con aplicación de diferentes dosis de fertilizante entre octubre de 2009 a noviembre de 2010.



En los caso 1, 2 y 3; corroboran resultados como que el mayor responsable de la causa de las emisiones en el suelo del Valle del Sinú es el proceso de desnitrificación, y el aumento de la temperatura favorece a reducir las emisiones de N_2O , en parcelas con

aplicación de fertilizante. Este efecto debe tal vez a la pérdida de N por volatilización, por altas dosis aplicadas de urea, asociado al aumento de la temperatura del aire.

La humedad del suelo es considerada uno de los principales reguladores y tiene múltiples efectos en las emisiones gaseosas de nitrógeno en el suelo (McTaggart et. al., 1997; Clayton et. al., 1997; Dobbie et. al., 1999). El agua es esencial para la vida y la actividad de los microorganismos. Tanto las condiciones de óxido-reducción de los suelos como la difusión de los gases son afectadas por el porcentaje de poros del suelo ocupados por agua (WFPS). El efecto de la humedad sobre las tasas de desnitrificación se da largamente a través de su efecto en la aireación, que puede ser medida a través del potencial rédox (Eh); al no contar con esta medición, no se analizó en esta investigación. El valor del contenido de agua en el suelo es un indicador del status de aireación del suelo, y por lo tanto del potencial de desnitrificación (Linn et. al., 1984). A medida que la humedad del suelo aumenta, disminuye fuertemente la difusión del O₂ hacia micro sitios metabólicamente activos (Bandibas et al., 1994) y aumenta rápidamente la fracción del suelo que se torna anaeróbica, causando fuertes aumentos en las tasas de desnitrificación (Aulakh et al., 1991b; Li et al., 1992; Dambreville et al., 2006). Granli et, al., (1994) sugieren que incrementar la aireación podría aumentar la proporción de N₂O producido por desnitrificación, debido a una mayor sensibilidad del sistema óxido nitroso-reductasa al O₂ comparado con otras enzimas de la secuencia desnitrificadora (Knowles, 1982) y a la disminución de la tasa de desnitrificación, debidas a efectos de la temperaturas (Dalal et al., 2003).

En el presente trabajo se encontró que la humedad del suelo y la temperatura del aire tienen una relación de tipo no lineal, significativa ($p < 0,1$) con las emisiones de flujos de N₂O emitidos desde suelos con diferentes coberturas y con diversos tratamientos de fertilización nitrogenada.

En general, se detectó que aumentos de la humedad del suelo favorecen el incremento de los flujos de N₂O, independientemente de la cobertura y del tratamiento de fertilización, pero el efecto de la temperatura está muy asociado con factores como la cobertura y el tratamiento de fertilización. Estas variables meteorológicas tienen influencia en los procesos de generación de este gas, es probable que la temperatura tiene influencia en la capacidad de inhibir que tiene las pasturas, especialmente la *B. humidicola* CIAT 16888 y CIAT 26159.

Los resultados muestran que los mayores flujos de N_2O se presentaron en época de lluvia, debido a que este gas es producido en el suelo mediante procesos de nitrificación y desnitrificación, los cuales están influenciados por condiciones ambientales como las precipitaciones, y por características físicas y químicas del suelo (Videla et al 2009; Dalal et ál. 2003). El contenido de oxígeno en el suelo, según Videla et al 2009 y Dalal et ál. 2003, disminuye con el aumento del contenido de agua en el suelo, favoreciendo el proceso de desnitrificación. Como los resultados de este trabajo reflejan que aumentos de la humedad del suelo favorecen incrementos de las emisiones de N_2O , se podría inferir que uno de los mayores responsables de los flujos de N_2O , es el proceso de desnitrificación, lo que coincide con los resultados de Rochette (2004) quien afirma que la desnitrificación es el principal proceso responsable de la formación de este gas y que la humedad del suelo es uno de los controladores de la producción de N_2O .

4.6 Resultados de las simulaciones con el Modelo DNDC

Los flujos de N_2O simulados con el modelo DNDC son consistentes con los resultados de flujos de N_2O estimados mediante la técnica de la cámara cerrada, para suelos cultivados con *Brachiaria humidicola* CIAT 679, CIAT 16888 y CIAT 26159, en los tratamientos sin aplicación de fertilizantes nitrogenado (Figura 4.22 a, b y c). Los flujos de N_2O modelados con DNDC no tiene diferencia significativa ($P=0,6737 >0,05$) con los flujos de N_2O estimados experimentalmente para tales variedades de *Brachiaria*.

Los flujos de N_2O simulados con el modelo DNDC con aplicaciones de fertilizantes nitrogenados, con dosis de 22,5 Kg N/ha y 45 Kg N/ha, aplicadas entre 2 y 3 días antes del muestreo (Tabla 3.1), no presentaron relaciones significativas con los flujos de N_2O estimados experimentalmente con la técnica de la cámara cerrada estática para ninguna de las tres variedades de *Brachiaria humidicola* (Figura 4.23.a, b, c y 4.25 a, b, c).

Los flujos de N_2O simulados con el modelo DNDC con mejor asociación con los determinados experimentalmente, corresponden a las parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888, con un coeficiente de correlación significativo ($p=0,0317 <0,05$) de 0,54.

En las figuras 4.24.a, b y c y 4.26 .a, b y c., se muestran los flujos de N_2O con aplicación de fertilizante de 22,5 Kg N/ha y 45 Kg N/ha, los cuales fueron simulados con un rezago

de un día con respecto a los flujos determinados en campo. En estas figuras se puede apreciar que tienen concordancia, similitud y no presentan una diferencia significativa ($p=0,4100>0,05$) con los flujos de N_2O emitidos desde parcelas aplicación de fertilizante de 22,5 KgN/ha, pero presentan una diferencia significativa ($p=0,0190<0,05$) con los flujos de N_2O emitidos desde parcelas con aplicación de fertilizante de 45,5 KgN/ha; aunque, tiene un coeficiente de relación significativo ($p<0,05$) de 0,57.

En la figura 4.27.a, b y c., se muestran los flujos de N_2O modelados en las parcelas de control de los tres tratamientos de fertilización, donde se aprecia que tienen similitud y concordancia. Además, no presentan una diferencia significativa ($p=0,3878>0,05$) entre los flujos modelados con DNDC y los estimados experimentalmente en los tratamientos de 0 y 150 KgN/ha/año de fertilización. En el tratamiento de 300 KgN/ha/año se presenta una diferencia significativa ($p=0,0154<0,05$) con los datos estimados en campo

Figura 4.22: Flujos de N_2O experimentalmente mediante la técnica de la cámara cerrada estática; emitidos desde suelos de parcelas cultivados genotipos de *Brachiaria humidicola* sin aplicación de fertilizante nitrogenado entre octubre de 2009 a diciembre de 2010.,a) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 679.,b) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 16888.,c) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 26159.

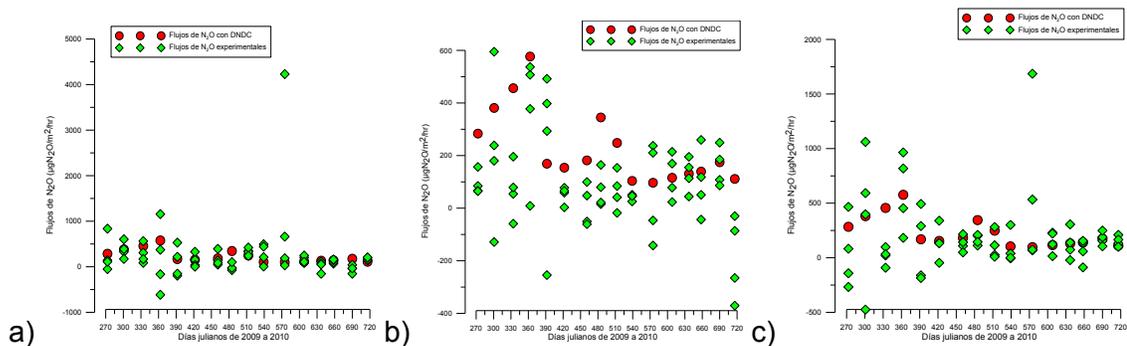


Figura 4.23: Flujos de N_2O experimentalmente mediante la técnica de la cámara cerrada estática y modelados con DNDC; emitidos desde suelos de parcelas cultivados genotipos de *Brachiaria humidicola* con aplicación de 150 KgN/ha/años de fertilizante entre octubre de 2009 a diciembre de 2010. a) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 679. b) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 16888. c) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 26159.

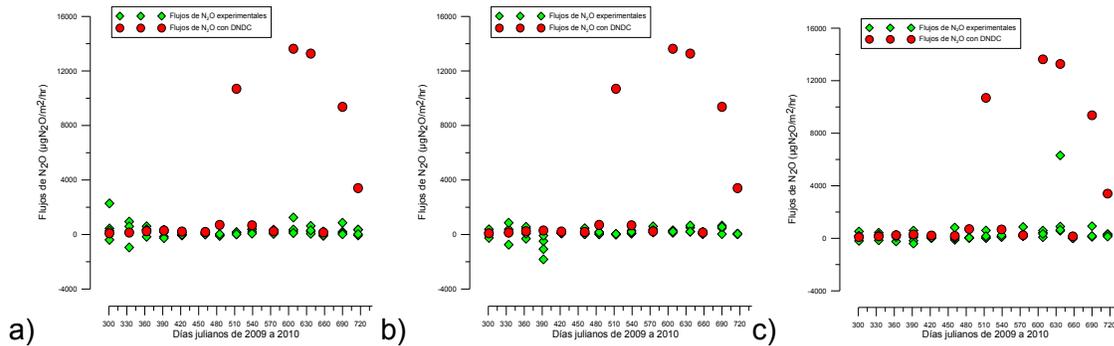


Figura 4.24: Flujos de N_2O experimentalmente mediante la técnica de la cámara cerrada estática y modelados con DNDC con un rezagó de un días; emitidos desde suelos de parcelas cultivados genotipos de *Brachiaria humidicola* con aplicación de 150 KgN/ha/años de fertilizante entre octubre de 2009 a diciembre de 2010. a) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 679. b) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 16888. c) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 26159.

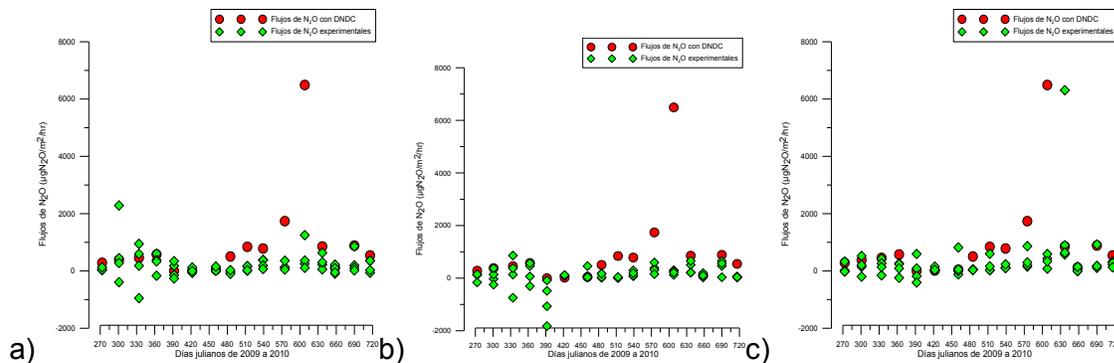


Figura 4.25: Flujos de N₂O experimentalmente mediante la técnica de la cámara cerrada estática y modelados con DNDC; emitidos desde suelos de parcelas cultivados genotipos de *Brachiaria humicicola* con aplicación de 300 KgN/ha/años de fertilizante entre octubre de 2009 a diciembre de 2010. a) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 679. b) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 16888. c) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 26159.

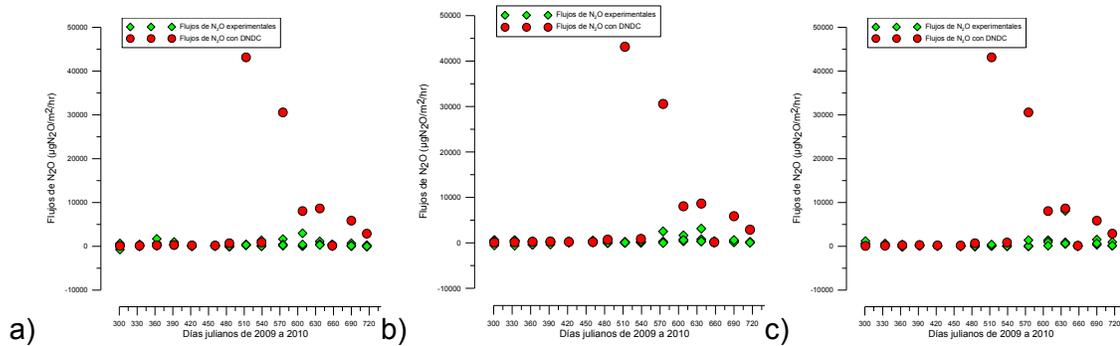


Figura 4.26: Flujos de N₂O experimentalmente mediante la técnica de la cámara cerrada estática y modelados con DNDC con un rezagó de un días; emitidos desde suelos de parcelas cultivados genotipos de *Brachiaria humicicola* con aplicación de 300 KgN/ha/años de fertilizante entre octubre de 2009 a diciembre de 2010. a) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 679. b) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 16888. c) Parcelas cultivada con *B.h* CIAT 26159.

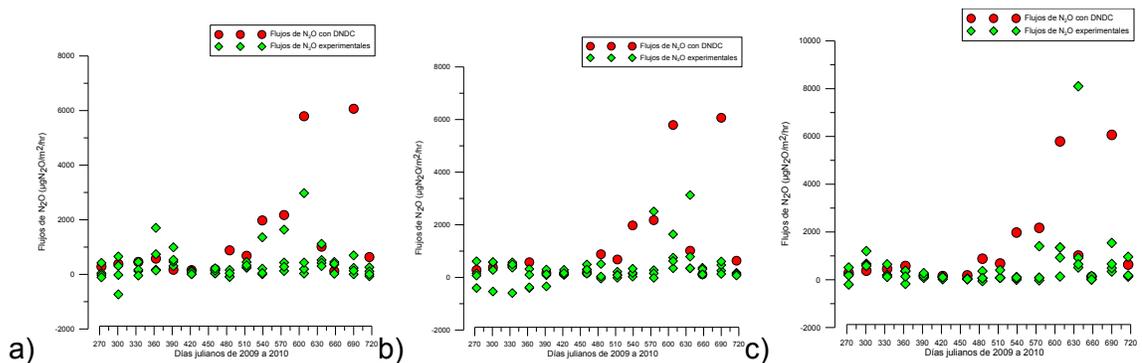
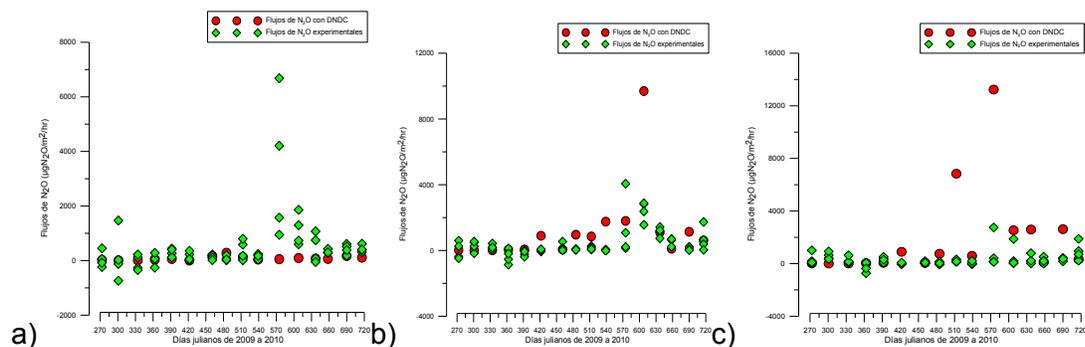


Figura 4.27: Flujos de N_2O experimentalmente mediante la técnica de la cámara cerrada estática y modelados con DNDC; emitidos desde suelos descubiertos con aplicación de dosis de fertilizante entre octubre de 2009 a diciembre de 2010. a) sin fertilizante nitrogenado. b) 150 KgN/ha/años. c) 300 KgN/ha/años.



Los flujos de N_2O modelados con DNDC presentaron, en general, una buena asociación con los determinados con la cámara cerrada sin aplicación de fertilizante.

Clayton et al. (1997) encontró que el modelo DNDC simulaba datos de flujos de N_2O generalmente buenos, para un periodo de 2 años en suelos cultivados con pastizales en el Reino Unido.

El modelo DNDC en esta investigación en general sobre estima los valores de los flujos de N_2O desde suelo con aplicación de fertilizantes nitrogenados. No obstante, si se toman los valores simulados con un rezago de un día, se ajustan a los datos experimentales o de campo. Lo anterior, no significa que el modelo DNDC no es funcional en los tratamientos con fertilización, sino que tal vez no tiene en cuenta la capacidad que tiene *Brachiaria humidicola*; de inhibir N_2O . En los resultados se aprecia que en los tratamientos de control el modelo mostró buenos resultados pero en los tratamientos de fertilización de 150 y 300 kgN/ha/año se aprecia que el modelo DNDC presenta un rezago de un día. Al no existir un estudio riguroso de las características fisiológicas de las pasturas, se hace difícil analizar aspectos como los procesos de las bacterias asociadas con ellas.

Zaixing Z. et al (2009), encontró resultado no muy satisfactorios con el modelo DNDC para flujos de N_2O emitidos en suelos de China, debido a dificultades en la parametrización, re-calibración, validación y la disponibilidad de datos para el modelo.

De acuerdo con investigaciones realizadas por Giltrap et al (2010), Cheng-I et al (2005), Sagar S. et al (2004), Brown L, et al (2002) entre otros que han validado este modelos, los resultados muestran que con el modelo DNDC a escala de campo, se estimaron de modo adecuado los flujos de N_2O , ya que presentaron similitud con los flujos de N_2O estimados mediante la metodología de la cámara cerrada estática.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- A partir del análisis realizado sobre el comportamiento de los flujos de Óxido Nitroso de suelos con diferentes coberturas y tratamientos de fertilización nitrogenada en el Valle del Sinú, se determinó que las accesiones de *Brachiaria humidicola*, CIAT 679, CIAT 16888 y CIAT 26159 tienen la capacidad de inhibir emisiones de Óxido Nitroso; la pastura *B.h* CIAT 16888 es la que presenta la mayor capacidad de inhibición de tales emisiones.
- Se corroboró que el uso de fertilizantes nitrogenados aumentan los flujos de Óxido Nitroso en suelos de parcelas cultivadas con genotipos de *Brachiaria humidicola*, bajo las condiciones ambientales del Valle del Sinú.
- En este trabajo se determinó que la humedad del suelo y la temperatura del aire tienen una relación de tipo no lineal, significativa ($p < 0,1$) con los flujos de N_2O en suelos con diferentes coberturas y tratamientos de fertilización nitrogenada; el aumento de la humedad del suelo favorece al incremento de los flujos de N_2O y la influencia de la temperatura del aire es menor ya que está muy asociada con la cobertura y con las condiciones físicas del suelo.
- Se estableció que los mayores flujos de N_2O desde suelos de parcelas cultivadas con genotipos de *Brachiaria humidicola* CIAT 679, CIAT 16888 y CIAT 26159 y en las parcelas de control de suelo descubierto, se presentan en épocas de lluvia. Se dedujo que uno de los mayores causantes de los flujos anotados, es el proceso de desnitrificación, que está muy vinculado con la humedad del suelo.

- Bajo las condiciones del Valle del Sinú las variables agrometeorológicas humedad del suelo y temperatura del aire, tienen una relación no lineal significativa ($p < 0,1$) con los flujos de N_2O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679 en los tratamientos de fertilización de 0 y 300 Kg N/ha/año.
- La humedad del suelo y la temperatura del aire, bajo las condiciones del Valle del Sinú, tienen una relación no lineal significativa ($p < 0,1$) con los flujos de N_2O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888 en los tratamientos de fertilización de 0 y 300 KgN/ha/año, y en parcelas con tratamiento de fertilización de 150 KgN/ha/años presenta una relación lineal significativa ($p < 0,1$).
- Las variables agrometeorológicas humedad del suelo y temperatura del aire, presentaron una relación no lineal significativa ($p < 0,1$) con los flujos de N_2O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159 en los tratamientos de fertilización de 0, 150 y 300 KgN/ha/año. Se detectó que un incremento de la humedad del suelo incide en el aumento de las emisiones de los flujos de N_2O en parcelas con tratamientos de fertilización de 0 y 300 KgN/ha/año. La temperatura máxima del aire del día anterior al muestreo, temperatura mínima del día de del muestreo y temperatura promedio del día del muestreo, tienen una influencia en las emisiones de los flujos de N_2O . El aumento de la temperatura máxima del aire del día anterior al muestreo y temperatura mínima del día del muestreo influyen positivamente en el incremento de las emisiones de los flujos de N_2O en parcelas sin aplicación de fertilización.
- En general, la humedad del suelo y la temperatura del aire tienen una importante influencia en el control de los flujos de Óxido Nitroso en suelos con diferentes coberturas y tratamientos de fertilizantes en el Valle del Sinú. A pesar de las complejas interacciones entre los factores reguladores que gobiernan la nitrificación y desnitrificación, el régimen hídrico del suelo se destacó como el principal regulador de las emisiones de los flujos de N_2O . Las emisiones de N_2O fueron máximas con contenidos altos de humedad en época de lluvia.

- Los flujos de Óxido Nitroso simulados con el modelo DNDC tienen concordancia con los estimados experimentalmente mediante la metodología de la cámara cerrada estática. Los flujos simulados sobre estiman los resultados medidos en parcelas con aplicación de fertilizantes nitrogenado, pero se considera que el modelo DNDC puede ser usado para simular las emisiones de los flujos de N₂O desde suelos en el Valle del Sinú cultivados con los genotipos de *Brachiaria humidicola*, CIAT 679, CIAT 16888 y CIAT 26159.
- Los resultados encontrados en esta Investigación tienen un valor práctico que contribuye para consolidar inventarios de gases de efecto invernadero; tomar decisiones de manejo agrícola, a través modelos agrometeorológica, ya sean físicos como el modelo DNDC o modelos estadísticos empíricos.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda hacer un estudio más detallado de las características de las pasturas, actividad bacterial y características físico químicas del suelo, bajo las condiciones donde se evalúe el modelo DNDC.

Se debería evaluar el modelo DNDC en otro escenario que involucre actividades agropecuarias cotidianas como el pastoreo con bovinos y otro tipo de pastizales.

El modelo DNDC sería muy útil para acelerar la aplicación de los conocimientos disponibles a nivel de campo, para la optimización de la gestión agronómica, la cuantificación de las emisiones de GEI con el cambio de uso de la tierra, y el desarrollo de opciones de mitigación de gases de efecto invernadero para las emisiones.

Esta investigación planteó un estudio más detallado de las gramíneas *Brachiaria humidicola* CIAT 16888, CIAT 26159 y especialmente por la CIAT 679; donde se evalúen bajo condiciones de escenarios de cambio climático, con el fin de analizar su capacidad de inhibir bajo estas condiciones.

A. Anexo: Análisis de Varianza

Tabla A.1: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679 sin aplicación de fertilizante nitrogenado, en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec.4.1)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	26,9648	1	26,9648	5,21	0,0415
Residuo	62,1018	12	5,17515		
Total	89,0666	13			

Tabla A.2: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679 con aplicación de 150 KgN/m²/año en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec 4.2)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	245622,	2	122811,	5,33	0,0241
Residuo	253477,	11	23043,3		
Total	499099,	13			

Tabla A.3: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679 con aplicación de 300 KgN/m²/año en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec 4.3)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	160,11	1	160,11	2,73	0,0945
Residuo	704,208	12	58,684		
Total	864,318	13			

Tabla A.4: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679 con aplicación de 0, 150 y 300 KgN/m²/año en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec. 4.4)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	6,91134	1	6,91134	18,17	0,0001
Residuo	15,2177	40	0,380443		
Total	22,1291	41			

Tabla A.5: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679 diferente dosis de fertilizante nitrogenado en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec.4.5)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	7,06359	4	1,7659	4,34	0,0056
Residuo	15,0655	37	0,407175		
Total	22,1291	41			

Tabla A.6: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888 sin aplicación de fertilizante nitrogenado, en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec.4.6)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	0,00675717	1	0,00675717	5,06	0,0441
Residuo	0,0160309	12	0,00133591		
Total	0,0227881	13			

Tabla A.7: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888 con aplicación de 150 KgN/m²/año en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec.4.7)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	381434,	1	381434,	5,36	0,0391
Residuo	853753,	12	71146,1		
Total	1,23519E6	13			

Tabla A.8: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888 con aplicación de 300 KgN/m²/año en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec.4.8)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	27,2706	1	27,2706	18,80	0,0010
Residuo	17,4057	12	1,45047		
Total	44,6763	13			

Tabla A.9: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888 con aplicación de 0, 150 y 300 KgN/m²/año en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec. 4.9)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	1,62242E6	1	1,62242E6	38,60	0,0000
Residuo	1,68117E6	40	42029,1		
Total	3,30359E6	41			

Tabla A.10: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888 diferente dosis de fertilizante nitrogenado en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec.4. 10)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	51,7286	4	12,9322	4,45	0,0049
Residuo	107,45	37	2,90405		
Total	159,178	41			

Tabla A.11: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159 sin aplicación de fertilizante nitrogenado, en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec.4.11)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	0,117786	1	0,117786	4,12	0,0652
Residuo	0,343312	12	0,0286094		
Total	0,461099	13			

Tabla A.12: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679 con aplicación de 150 KgN/m²/año en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec 4.12)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	0,00605486	1	0,00605486	4,35	0,0589
Residuo	0,016686	12	0,0013905		
Total	0,0227409	13			

Tabla A.13: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde el suelo de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679 con aplicación de 300 KgN/m²/año en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec 4.13)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	5,02602	1	5,02602	5,08	0,0437
Residuo	11,8771	12	0,989761		
Total	16,9031	13			

Tabla A.14: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159 con aplicación de 0, 150 y 300 KgN/m²/año en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec. 4.14)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	2,49857E6	1	2,49857E6	12,64	0,0010
Residuo	7,90619E6	40	197655		
Total	1,04048E7	41			

Tabla A.15: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159 diferentes dosis de fertilizante nitrogenado en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec.4.15)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	69,9412	4	17,4853	5,05	0,0024
Residuo	128,205	37	3,46499		
Total	198,146	41			

Tabla A.16: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos descubiertos con sin aplicación de fertilizante nitrogenado en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec.4.16)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	256782,	1	256782,	0,32	0,5800
Residuo	9,5272E6	12	793933,		
Total	9,78398E6	13			

Tabla A.17: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos descubiertos con aplicación de 150 KgN/m²/año de fertilizante en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec.4.17)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	2,03761E6	1	2,03761E6	4,86	0,0478
Residuo	5,03356E6	12	419463,		
Total	7,07118E6	13			

Tabla A.18: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos descubiertos con aplicación de 300 KgN/m²/año de fertilizante en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec.4.18)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	282351,	1	282351,	4,78	0,0494
Residuo	709190,	12	59099,1		
Total	991540,	13			

Tabla A.19: Análisis de varianza del modelo de los flujos de N₂O emitidos desde suelos descubiertos con diferentes dosis de fertilizante nitrogenado en función de la temperatura del aire y la humedad del suelo (Ec.4.19)

	<i>Suma de cuadrado</i>	<i>Df</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>Valor-F</i>	Valor de P
Modelo	41,8221	2	20,9111	3,69	0,0342
Residuo	221,282	39	5,67388		
Total	263,104	41			

B. Anexo: Resúmenes de cada una de los datos las variables de en estudio.

A continuación se muestran en las siguientes tablas los resúmenes de cada una de las variables de los datos seleccionados. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad, y las medidas de la forma. De particular interés son la asimetría y la curtosis estandarizada que pueden ser utilizados para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Los valores de estas estadísticas fuera del rango de -2 a 2 indican salidas significativas de la normalidad, lo que tendería a anular muchos de los procedimientos estadísticos que normalmente se aplican a estos datos. Las series que no provienen de una distribución normal se normalizan usando una transformación logarítmica.

Tabla B.1: Resumen de la estadística de las variables del flujos de N₂O emitidos desde el suelo de parcelas cultivadas con B.h CIAT 679 con diferente aplicaciones de fertilizante y las variables agrometeorológica

	Flujos de N ₂ O	Flujos de LN[(N ₂ O) ² +10]	Flujos de N ₂ O	Flujos de N ₂ O	Hs	Hs	Hs	Tmin	Tmax-1	Tprom
En parcelas con dosis (KgN/m ²)	0	0	150	300	0	150	300			
Media	241,648	9,78919	203,707	363,996	26,9393	33,0	28,8312	23,6571	32,4643	28,3286
Desviación estándar	323,405	2,61749	195,939	276,175	7,40043	0,760567	7,89421	0,524352	1,32758	0,533751
Coef. de variación	133,833%	26,7386%	96,187%	75,873%	27,4707%	2,30475%	27,3808%	2,21646%	4,08936%	1,88414%
Mínimo	-45,1611	3,8853	-38,7938	7,8713	13,3952	31,5	14,4263	22,6	30,2	27,25
Máximo	1277,57	14,3054	654,703	908,684	37,6685	34,2	38,7573	24,4	34,0	29,0
Rango	1322,73	10,4201	693,497	900,813	24,2733	2,7	24,331	1,8	3,8	1,75
Asimetría Stnd	4,28589	-1,25727	1,5264	0,697555	-0,742275	-0,323428	-0,837389	-0,645973	-1,30472	-1,0983
Curtosis Stnd.	7,02862	0,932812	0,582054	-0,571651	-0,635152	-0,409664	-0,758701	-0,287955	-0,42047	-0,269499

Modelación agrometeorológica de emisiones de Óxido Nitroso en Brachiaria humidicola bajo condiciones del Valle del Sinú

Tabla B.2: Resumen de la estadística de las variables del flujos de N₂O emitidos desde el suelo de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 21688 con diferente aplicaciones de fertilizante y las variables agrometeorológica

	Flujos de N ₂ O	Flujos de LN[(N ₂ O) ² +10]	Flujos de N ₂ O	LN[(N ₂ O) ² +10]	Flujos de N ₂ O	LN[(N ₂ O) ² +10]	Hs	Hs	Hs
En parcelas con dosis (KgN/m ²)	0	0	150	150	300	300	0	150	300
Media	120,235	4,62931	113,585	10,209	325,674	10,8574	29,4211	28,7055	30,0854
Desviación estándar	94,3169	0,750146	308,244	1,86718	344,816	1,85382	7,90265	6,30731	8,12279
Coef. de variación	78,4441%	16,2043%	271,376 %	18,2894%	105,877%	17,0743%	26,8605%	21,9725%	26,9991%
Mínimo	8,97306	2,94302	-865,251	6,03102	-90,0039	7,40723	17,0841	17,2141	14,3492
Máximo	357,648	5,90713	426,233	13,5261	1151,8	14,0982	42,9635	39,69	42,6319
Rango	348,675	2,96411	1291,48	7,49503	1241,81	6,69095	25,8794	22,4759	28,2827
Asimetría Stnd	2,13442	-0,621704	-4,06276	-0,654711	2,13856	0,227574	-0,106287	-0,805397	-0,622679
Curtosis Stnd.	1,41959	0,641667	6,77872	0,710137	1,07029	-0,145634	-0,740144	-0,125801	-0,507008

Tabla B.3: Resumen de la estadística de las variables del flujos de N₂O emitidos desde el suelo de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159 con diferente aplicaciones de fertilizante y las variables agrometeorológica

	Flujos de N ₂ O	Flujos de LN[(N ₂ O) ² +10]	Flujos de N ₂ O	LN[(N ₂ O) ² +10]	Flujos de N ₂ O	Hs	Hs	Hs	Hs
En parcelas con dosis (KgN/m ²)	0	0	150	150	300	0	0	150	300
Media	505,4	11,0719	430,101	10,7839	252,906	24,9507	6,40818	21,367	26,2442
Desviación estándar	867,533	2,25303	737,521	2,931	276,174	4,0492	0,338607	5,51844	7,69644
Coef. de variación	171,653%	20,349%	171,476 %	27,1794%	109,2%	16,2288%	5,28397%	25,8269%	29,3262%
Mínimo	-67,1621	7,8534	-364,779	5,39835	-239,532	15,7372	5,51206	13,414	13,0812
Máximo	3352,17	16,2347	2409,18	15,5741	857,113	34,5821	7,08667	32,308	44,4079
Rango	3419,33	8,38132	2773,96	10,1757	1096,64	18,8449	1,57461	18,894	31,3267
Asimetría Stnd	4,77845	1,18785	2,72175	-0,440217	0,796124	0,282355	-1,35755	1,2534	0,95144
Curtosis Stnd.	7,96852	0,630459	2,43785	-0,0835868	0,580431	2,65186	3,23769	0,606455	1,06684

C. Anexo: Humedad del suelo simulada con DNDC y medida en campo

Figura C.1: Humedad del suelo en las cuatros muestras tomadas en parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679 sin aplicación de fertilizante, y simulada con el modelo DNDC

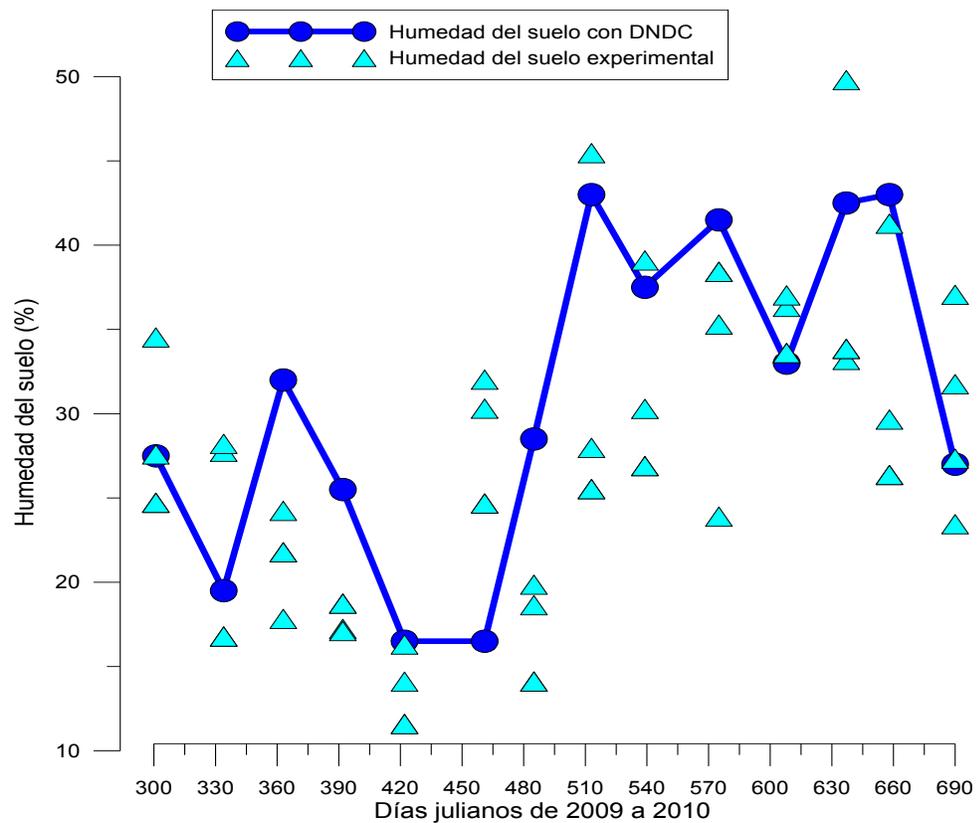
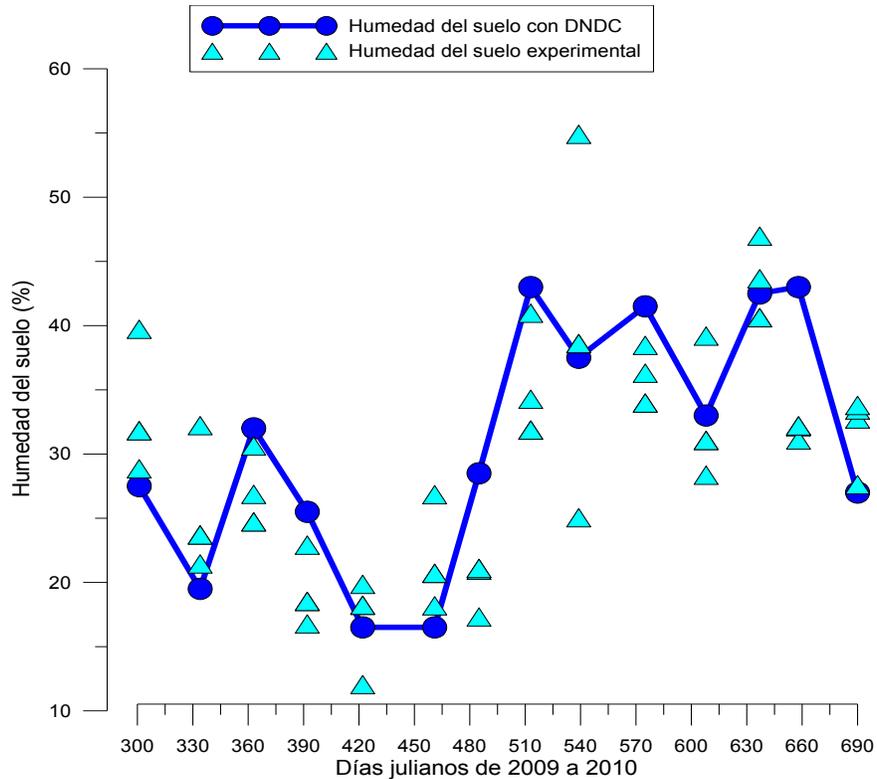


Figura C.2: Humedad del suelo en las cuatros muestras tomadas en parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888 sin aplicación de fertilizante, y simulada con el modelo DNDC



En las figuras se aprecia el promedio de la humedad del suelo simulada con el modelo DNDC entre 1 y 5 centímetros de profundidad y las medidas en campo a través de la técnica del terrón, en parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679, *B.h* CIAT 16888 y *B.h* CIAT 26159, donde se parecía una concordancia, similitud y no presentan una diferencias significativas ($p = 0,0750 > 0,1$), con coeficientes de relación significativos ($p < 0,05$) que oscilan entre 0,6785 y 0,7913.

Figura C.3: Humedad del suelo en las cuatros muestras tomadas en parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159 sin aplicación de fertilizante, y simulada con el modelo DNDC

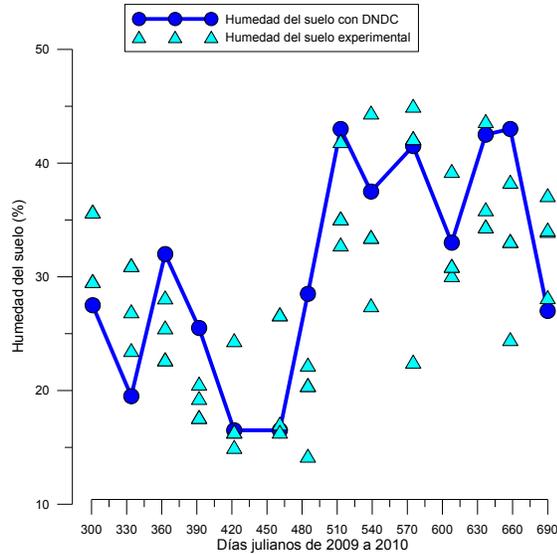
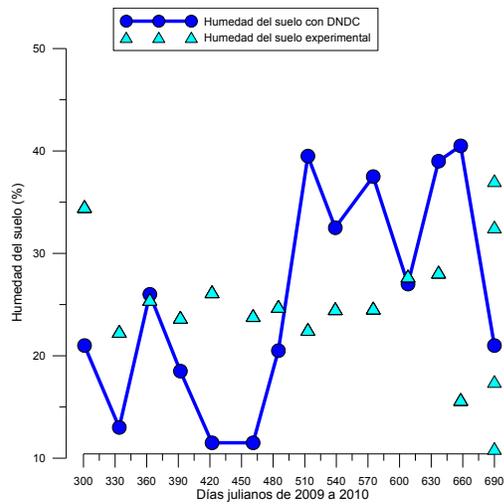


Figura C.4: Humedad del suelo en las cuatros muestras tomadas en parcelas con suelo descubierto sin aplicación de fertilizante y simulada con el modelo DNDC



D. Anexo: Ecuación para calcular flujos

Para la cuantificación de los flujos de metano y óxido nitroso se determino la concentración en (ppm) de las muestras de aire tomadas en campo por medio de la metodología de la cámara estática cerrada, en un cromatógrafo de gases Shimadzu GC – 14A, equipado con detector de ionización de llamas (FID) y detector de electrones (ECD)

Para la determinación de los flujos de GEI se relacionaron las concentraciones de metano y óxido nitroso en parte por millón cuantificadas en un cromatógrafo de gases y las dimensiones de la cámara (volumen y área de la bases de la cámara cerrada) y la temperatura dentro de la cámara, estas se procesaron en hoja electrónica para obtener los flujos de los gases, empleando la ecuación D.1 (CIAT):

Flujo del gas = Densidad del gas $\cdot (\Delta \text{ Concentración} / \Delta \text{ Tiempo}) \cdot (\text{Volumen}/\text{Área}) \cdot \text{Temperatura}$. Ec. D.1

Los valores positivos de los flujos representan una emisión desde el suelo hacia la atmosfera y los valores negativos un flujo desde la atmosfera al suelo (sumidero)

En este estudio se evaluó una ecuación D.2 planteada por Mosier y Mack (1980) obtenida mediante regresión lineal y la ley del gas ideal, que tiene en cuenta que el aumento de las concentraciones de N₂O en el espacio de la cámara en un tiempo, lo hace en forma lineal. En esta investigación se tuvo en cuenta densidad variable la temperatura.

$$F = \rho(T) \cdot (V/A) \cdot (\Delta C/\Delta t) \cdot 273/(T+273) \quad \text{Ec. D.2}$$

Donde

$$\rho(T) = \rho_0 \cdot (1 - (T+288,9414)/(508929,2 \cdot (T+68,12963))) \cdot (T-3,9863)^2$$

$\rho_0 = 1,2491 \text{ gKN/m}^3$ para un $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Donde F es el flujo de N₂O, en mg N/m²/hr, ρ_0 la densidad de N₂O en gKN/m³, V es el volumen de la cámara en m³, A es el área de la base de la cámara en m², $\Delta C/\Delta t$ es la

tasa de cambio promedio de la concentración con el tiempo en ppmv/hr y T es la temperatura en la cámara en °C.

Los flujos de N₂O calculados con la ecuación D.1 tienen un coeficiente de relación de significativo (P<0,05) de 0,64.

Un ajuste de la ecuación D.2 está dado por la Ecuación D.3 que explica en un 40,5% el patrón de variabilidad los flujos de N₂O calculados con la Ecuación D.1 a través de la ecuación D.3.

$$F_{\text{ajus}} = 122,486 + 1,17541 * \rho(T) * (V/A) * (\Delta C / \Delta t) * 273 / (T + 273) \quad \text{Ec. D.3}$$

$$R^2 = 40,5\% \quad p < 0,05$$

E. Anexo: Resultados de Metano

Al analizar los coeficientes de relación de Pearson y Spearman entre los flujos de CH₄ promedios de los muestreos de las parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679, CIAT 16888, CIAT 26159 y suelo descubierto con aplicaciones de dosis de 0, 150 y 300 kgN/ha/año de fertilizante, con las variables agrometeorológicas; humedad del suelo (Hs), temperatura máxima del aire del día anterior al muestreo (Tmax-1), temperatura mínima (Tmin) y temperatura promedio del día del muestreo (Tprom).

En las parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 679; se encontró que sólo las parcelas con aplicación de 150 kgN/ha/año de fertilizante, tuvieron coeficiente de relación de Pearson y Spearman significativo ($p < 0,1$) y positivo, entre el flujo de CH₄ y la temperatura máxima del día anterior al muestreo (Tabla E.1, y E.2), aunque estos coeficiente no fueron significativo ($p < 0,1$) en las parcelas con dosis de 0 y 300 kgN/ha/año, la relación de los flujos con la temperatura máximas del día anterior al muestreo, presentó una tendencia negativa en las parcelas sin aplicación de fertilizante nitrogenado, pero positiva en las parcelas con aplicación de 300 kgN/ha/año de fertilizante (Tabla E.1, y E.2). Lo anterior indica que existió una relación lineal entre los flujos de CH₄ y la temperatura máximas del día anterior al muestreo, ya que se apreció una tendencia a aumentar los flujos de CH₄ cuando aumentó la temperatura en parcelas con aplicación de fertilizante nitrogenado y a disminuir en las parcelas sin aplicación de fertilizante.

Tabla E.1: Coeficientes de relación de Pearson entre los flujos de CH₄ emitidos desde suelos de parcelas cultivada con *B.h* CIAT 679 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.

	Hs-0	Hs- 150	Hs- 300	Tmin	Tmax-1	Tprom
Ch4-0	0,0029			-0,0769	-0,3672	0,1113
	0,9922			0,7940	0,1965	0,7048
Ch4-150		-0,0513		-0,0903	0,4664	-0,0742
		0,8617		0,7590	0,0928	0,8010
Ch4-300			-0,0438	-0,1078	0,3266	-0,0787
			0,8818	0,7136	0,2544	0,7892

Tabla E.2: Coeficientes de relación de Spearman entre los flujos de CH₄ emitidos desde suelos de parcelas cultivada con *B.h* CIAT 679 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.

	Hs-0	Hs- 150	Hs- 300	Tmin	Tmax-1	Tprom
Ch4-0	0,2703			0,1919	-0,4212	-0,1936
	0,3297			0,4889	0,1289	0,4851
Ch4-150		-0,1824		-0,0294	0,6086	-0,0044
		0,5107		0,9157	0,0282	0,9873
Ch4-300			-0,1429	-0,2552	0,4234	-0,1892
			0,6065	0,3576	0,1269	0,4951

P es la probabilidad

En las parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888; se encontró que las parcelas con aplicación de fertilizante nitrogenado, tuvieron coeficiente de relación de Pearson y Spearman significativo ($p < 0,1$) positivo entre el flujo de CH_4 y la temperatura máxima del día anterior al muestreo, pero las parcelas con aplicación de 150 kgN/ha/año presentaron un coeficiente de Pearson significativo y negativo entre el flujo de CH_4 y la temperatura promedio del día del muestreo; aunque el coeficiente de Spearman no fue significativo ($p < 0,1$), presentó una tendencia negativa (Tabla E.3, y E.4). La relación del flujo de CH_4 con la humedad del suelo no fue significativa en ninguno de los tres casos de fertilización. Se resalta que en donde se presentó una tendencia positiva entre la relación de los flujos de CH_4 y la temperatura del aire, ya sea la máxima del día anterior o la promedio, la relación de flujos de CH_4 con la humedad del suelo fue negativa y viceversa (Tabla E.3, y E.4).

Tabla E.3: Coeficientes de relación de Pearson entre los flujos de CH_4 emitidos desde suelos de parcelas cultivada con *B.h* CIAT 16888 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.

	Hs-0	Hs- 150	Hs- 300	Tmin	Tmax-1	Tprom
Ch4-0	-0,3180 P=0,2678			-0,0810 P=0,7831	0,5332 P=0,0496	-0,0832 P=0,7775
Ch4-150		0,2377 P=0,4132		0,1099 P=0,7084	0,0220 P=0,9405	-0,4651 P=0,0938
Ch4-300			-0,3042 P=0,2903	0,2690 P=0,3524	0,1603 P=0,5841	0,3332 P=0,2444

P es la probabilidad

Tabla E.4: Coeficientes de relación de Spearman entre los flujos de CH₄ emitidos desde suelos de parcelas cultivada con *B.h* CIAT 16888 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.

	Hs-0	Hs- 150	Hs- 300	Tmin	Tmax-1	Tprom
Ch4-0	-0,2835 P=0,3067			-0,0474 P=0,8642	0,4454 P=0,100	-0,0396 P=0,8864
Ch4-150		0,3143 P=0,2571		0,2461 P=0,3748	-0,0198 P=0,9430	-0,3498 P=0,2072
Ch4-300			-0,3802 P=0,1704	0,4268 P=0,1238	0,2315 P=0,4038	0,3190 P=0,2500

P es la probabilidad

En las parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 26159 y parcelas de suelos descubierto, no presentaron coeficiente de relación de Pearson y Spearman significativo ($p < 0,1$) entre los flujos de CH₄ con las variables agrometeorológicas en ninguno de los tratamientos de fertilización (Tabla E.5, E.6, E.7 y E.8).

Tabla E.5: Coeficientes de relación de Pearson entre los flujos de CH₄ emitidos desde suelos de parcelas cultivada con *B.h* CIAT 26159 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.

	Hs-0	Hs- 150	Hs- 300	Tmin	Tmax-1	Tprom
Ch4-0	0,0723 P=0,8059			0,0022 P=0,9942	0,1042 P=0,7230	-0,3237 P=0,2590
Ch4-150		0,3080 P=0,2841		-0,3289 P=0,2508	0,0718 P=0,8073	-0,3135 P=0,2751
Ch4-300			-0,2346 P=0,4195	-0,0583 P=0,8430	-0,1152 P=0,6950	-0,2034 P=0,4855

Tabla E.6: Coeficientes de relación de Spearman entre los flujos de CH₄ emitidos desde suelos de parcelas cultivada con *B.h* CIAT 26159 usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.

	Hs-0	Hs- 150	Hs- 300	Tmin	Tmax-1	Tprom
Ch4-0	0,1429 P=0,6065			-0,0023 P=0,9935	0,3572 P=0,1977	-0,3916 P=0,1579
Ch4-150		0,3143 P=0,2571		-0,2010 P=0,4687	-0,0265 P=0,9240	-0,1474 P=0,5951
Ch4-300			-0,1736 P=0,5313	0,1377 P=0,6194	-0,2558 P=0,3564	-0,1430 P=0,6061

P es la probabilidad

Tabla E.7: Coeficientes de relación de Pearson entre los flujos de CH₄ emitidos desde suelos de parcelas descubiertas usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.

	Hs-0	Hs- 150	Hs- 300	Tmin	Tmax-1	Tprom
Ch4-0	0,0723 P=0,8059			0,0022 P=0,9942	0,1042 P=0,7230	-0,3237 P=0,2590
Ch4-150		0,3080 P=0,2841		-0,3289 P=0,2508	0,0718 P=0,8073	-0,3135 P=0,2751
Ch4-300			-0,2346 P=0,4195	-0,0583 P=0,8430	-0,1152 P=0,6950	-0,2034 P=0,4855

Tabla E.8: Coeficientes de relación de Spearman entre los flujos de CH₄ emitidos desde suelos de parcelas descubiertas usando tres aplicaciones diferente de fertilizante nitrogenado y las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura del aire, en el periodo de octubre de 2009 a noviembre de 2010, con una probabilidad de significancia de $p < 0,1$.

	Hs-0	Hs- 150	Hs- 300	Tmin	Tmax-1	Tprom
Ch4-0	0,1429 0,6065			-0,0023 P=0,9935	0,3572 P=0,1977	-0,3916 P=0,1579
Ch4-150		0,3143 P=0,2571		-0,2010 p=0,4687	-0,0265 P=0,9240	-0,1474 P=0,5951
Ch4-300			-0,1736 P=0,5313	0,1377 P=0,6194	-0,2558 P=0,3564	-0,1430 P=0,6061

P es la probabilidad

Modelos estadísticos empíricos de Metano en función de las variables agrometeorológicas

Bajo las condiciones ambientales del Valle del Sinú entre los meses de octubre de 2009 a noviembre de 2010, sólo fueron significativos ($p < 0,1$) modelos estadísticos empíricos que simulaban los flujos de CH_4 a través de relaciones con las variables agrometeorológicas en parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888 sin aplicación de fertilizante nitrogenado; los flujos de CH_4 , presentaron una relación lineal significativa ($p < 0,1$) con la humedad del suelo y la temperatura máxima del día anterior al muestreo, como se aprecia en la siguiente expresión

$$F_{\text{CH}_4}(\text{Hs}, \text{Tmax-1}) = -449,814 - 1,30666\text{Hs} + 14,6168\text{Tmax-1} \quad (\text{E.c E.1})$$

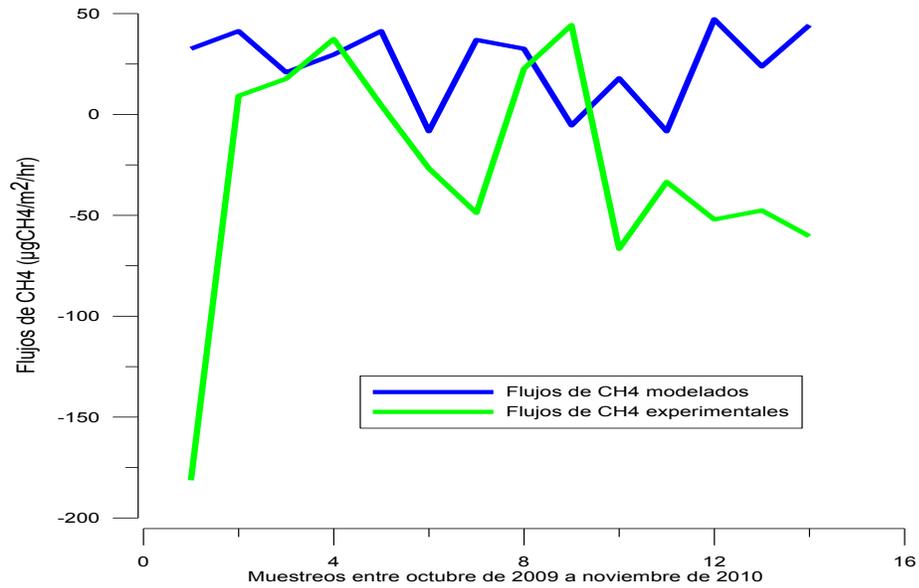
Con

$$R^2 = 35,67\%$$

$$P = 0,0884 < 0,1$$

La ecuación E.1, explica en un 35,67% el patrón de variabilidad de los flujos de CH_4 emitidos desde suelos de parcelas cultivadas con *B.h* CIAT 16888 sin aplicación de fertilizante nitrogenado, a través de una relación lineal significativa ($p < 0,1$), con las variables agrometeorológicas, humedad del suelo y temperatura máxima del aire del día antes del muestreo. En la ecuación se aprecia, que cuando aumentó la temperatura máxima del día anterior al muestreo, aumentaron los flujos de CH_4 emitidos desde el suelo, pero si el contenido de agua en el suelo aumentaba, los flujos de CH_4 disminuyeron.

Figura E.1: Flujos de CH₄ experimental y modelado por la ecuación 5.20; emitidos desde suelos de parcelas cultivados con *B.h* CIAT 16888 sin aplicación de fertilizante nitrogenado entre octubre de 2009 a noviembre de 2010.



Bibliografía

- AULAKH M.S.; Doran J.W.; Walters D.T. y Powers J.F. 1991. Legume residue and soil water effects on denitrification in soils of different textures. *Soil Biology and Biochemistry* 23: 1161-1167.
- BANDIBAS J.; VERMOESEN A.; DE GROOT C.J. Y VAN CLEEMPUT O. 1994. The effect of different moisture regimes and soil characteristics on nitrous oxide emission and consumption by different soils. *Soil Science* 158 (2): 106-114.
- BHATIA, A; PATHAK, H; AGGARWAL, P. 2004. Inventory of methane and nitrous oxide emissions from agricultural soils of India and their global warming potential. *Current Science* 87(3): 317-324
- BRONSON, K.F., NEUE, H.-U., SINGH, U., AND ABAO, E.B., JR. 1997. Automated chamber measurements of methane and nitrous oxide flux in a flooded rice soil. 1. Residue, nitrogen, and water management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 981–987.
- CANAVOS, G. C 1988., *Probabilidad y Estadística, Aplicaciones y métodos*, McGraw-Hill, Mexico. 651.p.
- CLAYTON, H; IP MCTAGGART; J PARKER; L SWAN & KA SMITH. 1997. Nitrous oxide emissions from fertilised grassland: A 2-year study of the effects of N fertiliser form and environmental conditions. *Biology and Fertility of Soils* 25: 252-260.
- DALAL R.C.; WANG W.; ROBERTSON G.P. Y PARTON W.J. 2003. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. *Australian Journal of Soil Research* 41: 165-195.
- DAMBREVILLE C.; HÉNAULT C.; BIZOUARD F.; MORVAN T.; CHAUSSOD R. Y GERMON J.C. 2006. Compared effects of long-term pig slurry and mineral fertilization on soil denitrification and its end products (N₂O, N₂). *Biology and Fertility of Soils* 42: 490-500.

- DAVIDSON, E.A. 1993. Soil water content and the ratio of nitrous oxide to nitric oxide emitted from soil. *In* The biogeochemistry of global change: radiatively active trace gases. *Edited by* R.S. Oremland. Chapman & Hall, NewYork, N.Y.
- DOBBIE, KE; IP MCTAGGART & KA SMITH. 1999. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: Variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factors. *Journal of Geophysical Research* 104(D21): 26.891-26.899.
- FIRESTONE MK & DAVIDSON EA. 1989. Microbiological bases of NO and N₂O production and consumption in soil. In Andreae MO, Jonh SDS, (Eds): Exchange of trace gases between terrestrial Ecosystems and the Atmosphere. Wiley & Sons, NY.
- GRANLI T. Y BØCKMAN O. 1994. Nitrous oxide from agriculture. *Norwegian Journal of Agricultural Science (Suppl)* 12: 7-128.
- GUILFORD JP, FRUCHTER B. 1984. Métodos y problemas especiales de correlación. En: Estadística aplicada a la psicología y la educación. Editorial MacGraw-Hill. p. 265-333.
- GOPALAKRISHNAN, S. WATANABE, T., PEARSE, S.J. (UWA), ITO, O. HOSSAIN, Z.A.K.M. SUBBARAO, G.V.. 2009. Biological nitrification inhibition by *Brachiaria humidicola* roots varies with soil type and inhibits nitrifying bacteria, but not other major soil microorganisms. *Soil Science and Plant Nutrition*
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL CLIMATE CHANGE). 1996, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Disponible en <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>
- IPCC 2000. Special report emissions scenarios. Disponible en <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>
- IPCC 2001. Climate Change 2001: The scientific basis. Houghton JT; Ding Y; Griggs DJ; Noguer M; Van der Linden PJ; Dai X (Maskell K, Johnson CA eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. 94 pp. http://www.grida.no./climate/ipcc_tar/wg1/index.htm.
- IPCC. 2006. Guidelines for National Green House Inventories. (en línea). Consultado abr 2007. Disponible en: <http://www.grida.no/climate/ipcc>

- IPCC (2007) *Climate Change 2007: Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R. and Meyer, L.A. (eds), Cambridge University Press, Cambridge, p. 852.
- KAISER EA.KOHR S, KUCKE M, SCHUNG E, HEINEMEYER O, MUNCH JC. 1998. Nitrous oxide release from arable soil: importance of N-fertilization, crops and temporal variations. *Soil Biol. Biochem* 30: 1533-1563.;
- KELLIHER, F.M.; LEDGARD, S.F.; CLARK, H.; WALCROFT, A.S.; BUCHAN, M.; SHERLOCK, R.R. (2003) A revised Nitrous Oxide Emissions Inventory for New Zealand 1990-2001. Report for the Ministry of Agriculture and Forestry, March 2003.
- KIM D., KIM J. 2002; Soil nitric and nitrous oxide emissions from agricultural and tidal flat fields in southwestern Korea; *J. Environ. Eng. Sci.* 1: 359–369 (2002).
- KNOWLES R. 1982. Denitrification. *En: Microbiological Reviews* 46(1): 43-70. Koike I. y Hattori A. 1975. Energy yields and growth of a denitrifying bacterium, *Pseudomonas denitrificans* under aerobic and denitrifying conditions. *Journal of General Microbiology* 88: 1-10.
- LI, C.S., FROLKING, S., FROLKING, T.A., 1992. A model of nitrous-oxide evolution from soil driven by rainfall events. 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres* 97, 9759–9776.
- LI, C., FROLKING, S., HARRISS, R., 1994. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global Biogeochemical Cycles* 8, 237–254.
- LI, C., 2000. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 58, 259–276.
- Li, C., 2007. Quantifying greenhouse gas emissions from soils: Scientific basis and modeling approach. *Soil Science and Plant Nutrition* 53, 344–352.
- LINN D.M. y Doran J.W. 1984. Effect of water-filled pore on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal* 48: 1267-1272.
- LÓPEZ A., 1998, Definición de Microrregiones, Zonas Biofísicas homogéneas e identificación de sistemas de producción pecuaria, CORPOICA – TURIPANÁ.

- MCTAGGART, IP; H CLAYTON; J PARKER; L SWAN & KA SMITH. 1997. Nitrous oxide emissions from grassland and spring barley, following N fertiliser application with and without nitrification inhibitors. *Biology and Fertility of Soils* 25: 261-268.
- MENDEZ, MABEL S., KURTZ, DITMAR B., 2009. Estimación de la emisión de gases de efecto invernadero en el cultivo de arroz. *Reunión de Comunicación Científica y Técnica 2009- Facultad de Ciencias Agrarias UNNE*.
- MOSIER A.R. AND MACK L. 1980. Gas chromatographic system for precise, rapid analysis of nitrous oxide. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 1121–1123.
- MORETA D., HURTADO M., SALCEDO A., CHÁVEZ L., RONDÓN M., DUQUE M., SUBBARAO G., ITO O., MILES J., LASCANO C., RAO I., ISHITANI M., 2009. Biological Nitrification Inhibition as a novel approach for Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crops. International Symposium “Root Research and Applications” RootRAP, 2–4 September 2009, Boku – Vienna, Austria.
- ROCHETTE, P; D ANGERS; G BELANGER; M CHANTIGNY; D PREVOST & G LEVESQUE. 2004. Emissions of nitrous oxide from alfalfa and soybean crops in eastern Canada. *Soil Science Society of America Journal* 68: 493-506.
- STEINFELD, H., GREBER, P.T.W., CASTEL, V., ROSALES, M. AND DE HAAN, C. 2006. *Livestock’s Long Shadow – Environmental Issues and Options*. FAO, Rome.
- SYLVIA D., HARTEL P., FUHRMANN J., ZUBERER D., 2005. Principles and Applications of soil microbiology. 2nd Edition. PEARSON Prentice Hall. Upper Saddle River. New Jersey.
- SUBBARAO G., NAKAHARA K., HURTADO M.P., ONO H., MORETA D., SALCEDO A., YOSHIHASHI A. , ISHIKAWA T., ISHITANI M., OHNISHI-KAMEYAMA M., YOSHIDA M. RONDON M., RAO I., LASCANO C., BERRY W., ITO O., 2009. Evidence for biological nitrification inhibition in Brachiaria pastures. *Agricultural Sciences*.

- SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., ALLEY, R.B., BERNTSEN, T., BINDOFF, N.L., CHEN, Z., CHIDTHAISONG, A., GREGORY, J.M., HEGERL, G.C., HEIMANN, M., HEWITSON, B., HOSKINS, B.J., JOOS, F., JOUZEL, J., KATSOV, V., LOHMANN, U., MATSUNO, T., MOLINA, M., NICHOLLS, N., OVERPECK, J., RAGA, G., RAMASWAMY, V., REN, J., RUSTICUCCI, M., SOMERVILLE, R., STOCKER, T.F., WHETTON, P., WOOD, R.A. AND WRATT, D. 2007. Technical summary. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller, H.L. (eds) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- VIDELA C., PICONE L., ZAMUNER E., MACEIRA N., 2009. Emisiones de gases desde el suelo de sistemas de engorde intensivo a corral. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata.
- ZAIXING Z., XUNHUA Z., BAOHUA X., SHENGHUI H., CHUNYAN L., 2010. A Process-based Model of N₂O Emission from a Rice-Winter Wheat Rotation Agro-Ecosystem: Structure, Validation and Sensitivity. *Advances in atmospheric sciences*, vol. 27, no. 1, 2010, 137–150.
- ZHANG, Y., LI, C., ZHOU, X., MOORE III, B., 2002. A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture. *Ecological Modelling* 151, 75–108.