

# Emisiones de N<sub>2</sub>O y condiciones de producción en suelos de Coatzacoalcos, Veracruz, México

José Adrián Saldaña Munive<sup>1,\*</sup>, Luis Gerardo Ruiz Suárez<sup>2</sup>, Eleazar Sevilla Díaz<sup>3</sup>, Rolando Rueda Luna<sup>1</sup>  
y José Antonio Ticante Roldan<sup>1</sup>

Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas, Instituto de Ciencias<sup>1</sup>, Centro de Ciencias de la Atmósfera<sup>2</sup>,  
Unidad de Ciencias del Desarrollo Regional<sup>3</sup>

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla<sup>1</sup>, Universidad Nacional Autónoma de México<sup>2</sup>,  
Universidad Autónoma de Guerrero<sup>3</sup>

Puebla, Pue.<sup>1</sup>; Coyoacán, D.F.<sup>2</sup>; Acapulco de Juárez, Gro.<sup>3</sup>; México

\*Autor de correspondencia: adrian.saldana@correo.buap.mx]

**Abstract**— Nitrous oxide emissions were evaluated in soils within the Jaguaroundi Ecological Park, located in Coatzacoalcos, Veracruz, Mexico. This evaluation was conducted using static chambers in three sampling areas: Permanent and seasonal flooding area (A1), Reforestation area (A2), and Conservation area (A3). The soils present acid pH, loamy clay to loamy clay loam texture, medium to high organic matter content, and middles levels of nitrogen. Sampling was carried out during both dry and rainy periods in March and July, resulting in average flux values per site (three chambers, five flow measurements, and six concentrations). The annual average values ranged from 172 to 778 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>, helping identify both emission sites and sinks for this gas.

**Keyword**— nitrous oxide, greenhouse gases, tropical soils, vegetation cover.

**Resumen**— Se evaluaron emisiones de óxido nitroso en suelos del Parque Ecológico Jaguaroundi, en Coatzacoalcos Veracruz, México, utilizando cámaras estáticas, en 3 áreas de muestreo: Área de inundación permanente y temporal (A1), Área de reforestación (A2) y Área de conservación (A3). Los suelos muestran pH ácido, textura franco arcillosa a franco arcillo limosa, contenidos medios a altos de materia orgánica y cantidades medias de nitrógeno. Se realizaron muestreos en periodo seco y lluvioso durante marzo y julio obteniéndose flujos promedio por sitio (tres cámaras, cinco valores de flujo y seis concentraciones), los valores anuales promedio se hallan entre 172 y 778 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>, localizando sitios que emiten este gas, así como sumideros.

**Palabras claves**— óxido nitroso, GEI, suelos tropicales, cobertura vegetal.

## I. INTRODUCCIÓN

El óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) es considerado un gas de efecto invernadero [1], involucrado en la destrucción catalítica de la capa de ozono [2, 3, 4, 5], desde hace 40 años, a una tasa de 0.2-0.3 % año<sup>-1</sup> [6, 7], por la agricultura y sus prácticas que producen aproximadamente el 90% de emisiones antropogénicas como resultado de la alteración de actividades microbiológicas que afectan al ciclo de nitrógeno [7, 8].

Las emisiones de este gas en suelo se originan por nitrificación y desnitrificación [9, 10, 11, 3, 12, 13, 14, 15], producto de condiciones aeróbicas y anaeróbicas respectivamente [16] y promovidas por factores climáticos y de suelos, como humedad, temperatura, contenido de nitrato y amonio en suelos, carbón fácilmente metabolizable, pH, textura, el manejo del suelo y sus interacciones [7] así como el potencial redox [11].

Los suelos en los trópicos húmedos contribuyen con cantidades importantes de N<sub>2</sub>O al presupuesto global [17, 3], ya que sus condiciones los identifican como fuente natural de producción [17, 18], y además son áreas con más superficie y menos estudiadas [13]. Esta contribución se produce por el cambio en el uso del suelo en los trópicos [17, 19]. Y los grandes flujos observados se asocian con tasas relativamente

altas del nitrógeno reciclado en las selvas [20]. En estos suelos la temperatura y el contenido de humedad son óptimos para los procesos biológicos la mayor parte del año, con producciones enormes de  $N_2O$  [1].

Se han reportado tasas más altas de desnitrificación y liberación de este gas en selvas tropicales que en bosques templados [17]. El incremento en su concentración está directamente asociado con actividades agrícolas que afectan el ciclo de N. Cuando los ecosistemas tropicales se convierten en agrícolas, pastizales o silvícolas, usando fertilización nitrogenada [21, 22] se tiene un incremento potencial de las emisiones de  $N_2O$  [13].

La humedad en el suelo determina el ambiente biogeoquímico para los microorganismos, afectando la disponibilidad de nutrientes como el carbón orgánico, amonio y nitrato, y su incremento podría además diluir la concentración de estos nutrientes, pero también la población microbiana en el espacio poroso saturado con agua (WFPS), y para estimar las emisiones de  $N_2O$  actuales y futuras es necesario identificar estas fuentes y los procesos involucrados en su producción [1].

La cuantificación de flujos de  $N_2O$  en ecosistemas terrestres se hace con cámaras que cubren la superficie del suelo. Este método permanece como opción sobre áreas grandes, así como para estudios a micro escala, estos sistemas son económicos y simples de operar, e involucran la acumulación del gas en dispositivos cerrados con flujo continuo [23].

Con el propósito de abordar esta temática se propusieron los siguientes objetivos:

a) Determinar las emisiones de  $N_2O$  en suelos con condiciones de producción diferente (inundados, reforestados y conservados) en el Parque ecológico Jaguarundi del complejo petroquímico de la Cangrejera, en Coatzacoalcos, Veracruz, México.

b) Conocer la dinámica de emisión de este gas de efecto invernadero a través de sus factores de producción.

## II. SITIO DE ESTUDIO

El Parque ecológico Jaguarundi se encuentra ubicado en la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz, México en las coordenadas  $18^{\circ}06'-18^{\circ}05'N$ ,  $94^{\circ}19'-94^{\circ}23'W$ , dentro del complejo petroquímico La Cangrejera de las instalaciones de PEMEX, donde se ubicaron 3 áreas: Área 1, con dos sitios, uno permanentemente inundado y con vegetación de Popal-Tular (A1S1), otro con pastizal, inundado solo en el periodo lluvioso (A1S2) a una altura de 17-19 msnm; Área 2 (reforestación) con tres sitios, uno en Ladera alta o cumbre (A2S1) con vegetación de Acahual Cerrado Maduro, otro en ladera media (A2S2) con la misma vegetación y un tercero (A2S3) en ladera con pastizal y ubicados entre 29-44 msnm; Área 3 (conservación) también con tres sitios: Ladera alta (A3S1) con Acahual Cerrado Maduro, Ladera media (A3S2) con el mismo tipo de vegetación y por ultimo Ladera baja (A3S3) con vegetación de pastizal a 28-34 msnm. Los suelos pertenecen al grupo de los Gleysoles para el área 1, Acrisoles y Cambisoles para las otras dos áreas, el pH de estos suelos es ácido (3.5 a 4.2 en la época seca y de 3.72 a 5.16 en la lluviosa), con contenido medio de carbono orgánico (12.65 a 128.46 mg/g) y de bajo a medio en nitrógeno (0.01 a 0.3%), con textura Franca a Franca arcillo limosa (Tabla I).

Tabla I. Textura y Cobertura vegetal asociada con sitios de muestreo

Sitios	Textura	Superficie/Vegetación
A1S1	Arcillo limoso (RL)	Planicie permanentemente inundada (Popal-Tular)
A1S2	Franco arcilloso (CR)	Planicie con pastizal inundada temporalmente
A2S1	Franco (C)	Ladera Alta con Acahual Maduro
A2S2	Franco arcillo limoso (CRL)	Ladera Media Acahual Maduro;
A2S3	Franco arcilloso (CR)	Ladera Baja con Pastizal
A3S1	Franco (C)	Ladera Alta con Acahual Maduro
A3S2	Franco arcilloso (CR)	Ladera Media Acahual Maduro;
A3S3	Franco arcillo limoso (CRL)	Ladera Baja con Pastizal

### III. MÉTODOS

Se utilizó el método de cámara estática [24, 25, 26, 13, 27, 28, 29, 30], diseñada en tubo PVC, sanitario, de 8 pulg. de diámetro en color blanco, con 10 cm. de alto, que consta de una tapa del mismo material con conexiones Swagelock (reductores pasamuros de 1/4, 2 por cámara), que se inserta en otro tubo enterrado a 2 cm. de profundidad que cubre un área superficial de 260.015 cm<sup>2</sup> y tiene un volumen de 2601.55 cc., Figura 1.

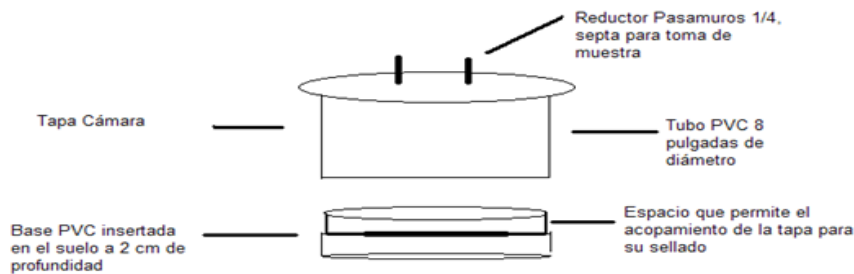


Fig. 1 Cámara de muestreo de gases en suelos hecha en tubo PVC de 8 pulgadas.

Se colocó la cámara en los sitios siguiendo el método propuesto por Longoria et al. [30], marcando la superficie del suelo y colocando 3 cámaras por sitio, buscando homogeneidad en el terreno considerando un mismo plano por altitud, y cubierta vegetal, con lo cual se determinan emisiones puntuales, que permiten evaluar la dinámica de producción por sitio en áreas grandes.

Se tomo la temperatura al interior de la cámara antes de cerrarla, y la temperatura ambiente y de suelo utilizando Termopares (tipo T Cobre-Constantan), para registrar variaciones y corregir las emisiones.

Además, se determinó la humedad relativa (sensor MET ONE 083C-1-35), la Presión ambiental (sensor MET ONE 090D) y la salinidad de los suelos cercanos a la cámara (conductímetro HANNA HI 99310), a través del Datalogger (Campbell Scientific 21 X SM 4M).

Se tomó la primera muestra al cerrar la cámara insertando la jeringa (gastight) en la septa colocada en los reductores, extrayendo un volumen de 20 ml. que se inyecta en un vial (headspace) de 20 ml al vacío, previamente etiquetado, tomando 6 muestras por cámara, con 6 diferentes tiempos ( $t_0, t_1, t_2, \dots, t_5$ ). El muestreo en un sitio, por el número de cámaras y el número de muestras representa un total de 18 submuestras por sitio, y por día en dos periodos diferentes.

Las emisiones de N<sub>2</sub>O se analizaron por medio de cromatografía de gases con las siguientes especificaciones:

Cromatógrafo de gases Tracor 540 con detector de captura de electrones (GC-ECD), columna Porapak Q 2.0 m de largo y 3mm, de diámetro interno, con una mezcla de argón y metano como gas acarreador. La toma de muestra se llevó a cabo con jeringa gas-tight de 10 ml (SGE), tomando 2 ml del vial e inyectando directamente al cromatógrafo y en corrida de 10 minutos se determinó por medio del pico característico en un tiempo de retención de 8 minutos las áreas correspondientes de acuerdo a la concentración de cada muestra analizada (El análisis cualitativo fue por tiempos de retención absolutos). El análisis cuantitativo se llevó a cabo con un estándar de óxido nitroso (ALPHAGAZ, 99.995%). Las diluciones se llevaron a cabo por el método de presiones parciales.

Se obtuvieron flujos promedio por sitio. Cada valor por sitio representa la media aritmética de tres cámaras con cinco valores de flujo y seis de concentración determinados por coeficientes de regresión de la curva de calibración y calculados los flujos por regresión utilizando tiempos acumulados a partir de la primera toma de muestra y el flujo considerado como incremento en concentración en función del volumen de la cámara, así como el área superficial cubierta utilizando la formula:

$$F = (\Delta C * 10^{-9} * V_c * \rho) / (\Delta t * A_c) \tag{1}$$

Donde  $\Delta C$ = incremento en concentración (ppb),  $V_c$  = volumen de la cámara,  $\rho$ = densidad calculada a partir de la ley de los gases,  $\Delta t$  = incremento en tiempo y  $A_c$  = área de la cámara, obteniéndose los flujos que se muestran en los resultados y discusión.

Las propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo se determinaron por el grupo de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM.

#### IV. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El paquete de software Statgraphics Plus 4.1 fue utilizado para realizar análisis de varianza de los datos y para calcular coeficientes de regresión entre las diferentes variables de suelo y los flujos de emisión de N<sub>2</sub>O. El nivel de confianza para la Significancia estadística fue determinado por la prueba t-student.

#### V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla II. se presentan flujos de emisión de óxido nitroso por cámara, en los dos periodos, cabe observar que los flujos del periodo lluvioso se incrementan como producto del aumento de agua en el suelo lo que favorece su liberación como producto del intercambio gaseoso.

Tabla II. Flujos de emisión de N<sub>2</sub>O por periodo.

	A1S1	A1S2	A2S1	A2S2	A2S3	A3S1	A3S2	A3S3
μg N <sub>2</sub> O-N/m <sup>2</sup> h	<b>Secas</b>							
	3.69	-5.28	-0.17	0.41	1.33	1.73	-1.17	-1.71
	7.28	8.45	0.61	-2.98	2.72	-1.68	1.17	-0.34
	14.9	0.93	1.14	0.42	-0.21	-3.66	-0.31	-0.84
	<b>Lluvias</b>							
	403	706	39.8	626	-112	120	183	174
	72.9	763	2.62	370	-28.1	-214	63.4	187
	-128	-135	53.2	848	-4.78	114	114	166

En la Tabla III. se presentan resultados de propiedades físicas y químicas de los sitios muestreados, los cuales se asociaron con los flujos obtenidos para identificar las propiedades que influyen en la producción de óxido nitroso.

Tabla III. Propiedades Físicas y Químicas de los sitios seleccionados para el muestreo de N<sub>2</sub>O en dos periodos diferentes.

SECAS							
Sitios	Densidad Aparente g/cm <sup>3</sup>	Fósforo Bray mg/kg	Carbono orgánico mg/g	Nitrógeno Total (%)	pH en KCl 1:2.5	Conductividad Eléctrica mS/cm	Capacidad Máxima Retención Agua
A1S1	0.2	0.83	110.45	0.77	3.95	0.61	88.48
A1S2	0.88	1.63	33.64	0.22	3.67	0.3	71.8
A2S1	1.04	1.46	27.36	0.21	3.69	0.18	53.97
A2S2	1.08	1.65	24.18	0.23	3.52	0.15	51.62
A2S3	1.35	0.62	16.88	0.19	4.24	0.09	55.39
A3S1	0.96	0.92	33.04	0.27	3.56	0.16	61.89
A3S2	1.12	0.71	25.04	0.14	3.92	0.12	53.48
A3S3	0.61	0.2	37.57	0.12	4.19	0.2	71.12
Lluvias							
A1S1	0.2	0.83	110.45	0.77	4.13	0.56	110.13
A1S2	0.88	1.63	33.64	0.22	4.2	0.25	81
A2S1	1.04	1.46	27.36	0.21	4.36	0.11	68.09
A2S2	1.08	1.65	24.18	0.23	3.81	0.15	75.8
A2S3	1.35	0.62	16.88	0.19	4.33	0.17	79.85
A3S1	0.96	0.92	33.04	0.27	4.25	0.17	67.94
A3S2	1.12	0.71	25.04	0.14	3.82	0.22	69.19
A3S3	0.61	0.2	37.57	0.12	4.92	0.12	66.36

### Variación diaria de N<sub>2</sub>O

Las concentraciones de óxido nitroso fueron mínimas durante las primeras horas del día y se incrementaron después del mediodía por cambios en la temperatura tanto ambiental como de suelo que influyen sobre la de la cámara, lo que concuerda con lo señalado por [31] sin embargo se hace hincapié que, aunque existe tendencia al incremento en concentración es necesario mencionar que existen pulsos de emisión de N<sub>2</sub>O. Lo cual puede observarse en la Figura 2 donde las concentraciones del área inundada con vegetación de popal-tular (A1S1) se deben a la variación de propiedades de suelo de los sitios donde se realizó el muestreo, entendiéndose que los contenidos de C y N y su disponibilidad ejercen una influencia directa sobre la actividad microbiana. [32] mencionan que la cantidad de carbono disponible es de gran importancia para los procesos de desnitrificación.

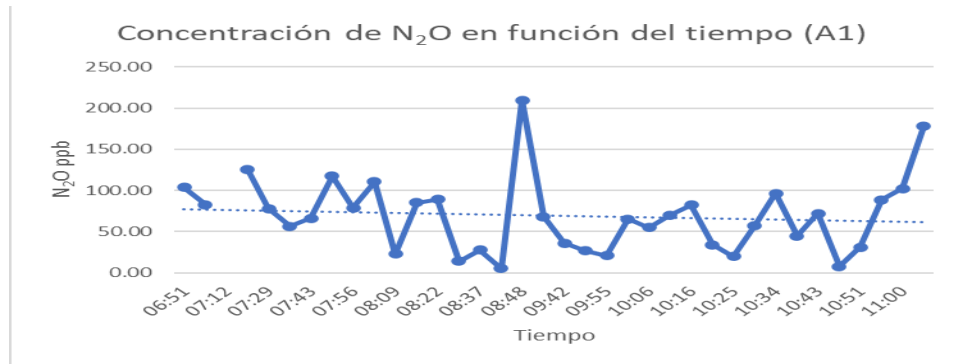


Fig. 2 Variación en la concentración de N<sub>2</sub>O en función del tiempo para el área inundada.

Por otro lado, se observa que las concentraciones totales para el área de reforestación (Fig. 3) muestran un perfil continuo con una tendencia al incremento no muy notable que sin embargo muestra el comportamiento complejo de la actividad microbiana y en consecuencia la producción de N<sub>2</sub>O a lo largo del día, es necesario comentar que por la posición de la cámara y asociado con la cubierta vegetal se observa mayor producción cuando el suelo se encuentra descubierto y con algún grado de modificación, lo cual se puede comprobar con los contenidos de carbono en los suelos de esta área.

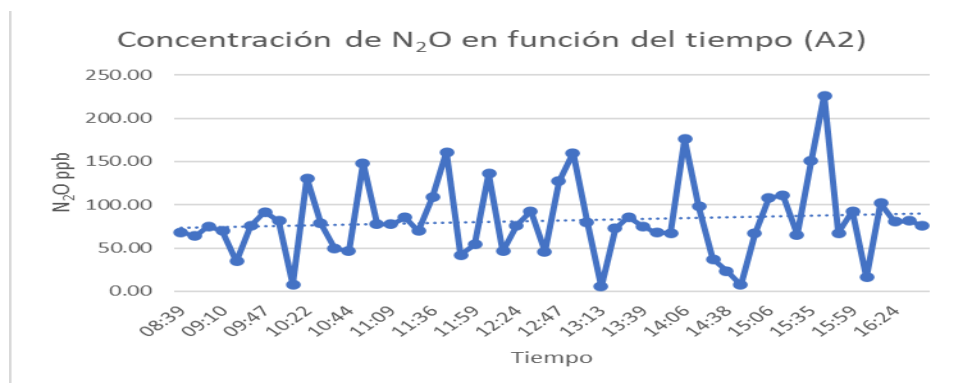


Fig. 3 Variación en la concentración de N<sub>2</sub>O con respecto al tiempo para el área de reforestación.

Así también se observa una tendencia más clara de incremento, que sin embargo contrasta con el nivel de conservación del área puesto que dicha producción es más constante en sus valores individuales lo que refleja una dinámica de producción continua con valores más bajos de producción de N<sub>2</sub>O, pero que en suma presentan las concentraciones más bajas (Fig. 4).

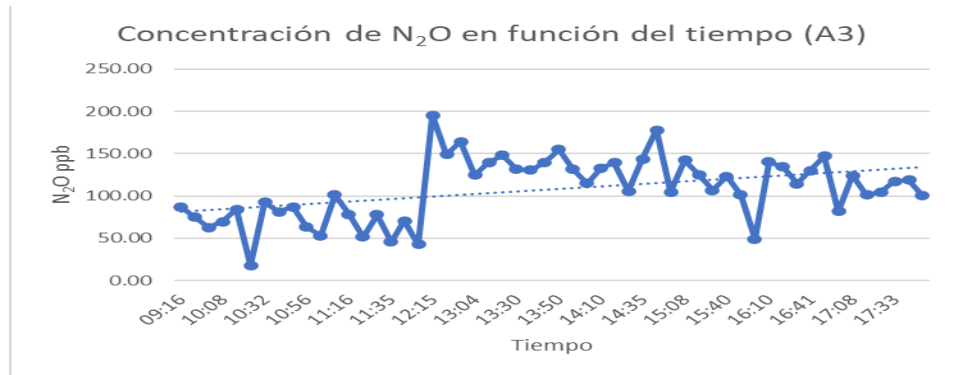


Fig. 4 Variación en la concentración de N<sub>2</sub>O con respecto al tiempo para el área de conservación.

Las concentraciones se obtuvieron del muestreo realizado durante el mes de marzo para el periodo seco y durante el mes de julio para el periodo lluvioso.

### Emisiones por áreas

En cuanto a las emisiones por áreas considerando los sitios se compararon las de Inundación (A1), la de Reforestación (A2) y Conservación (A3), obteniéndose para el periodo seco que el área de Inundación con sitio permanentemente inundado y potencialmente inundable presenta los valores más altos de producción y emisión de N<sub>2</sub>O en promedio de 8.64 y 1.37 μg de N<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>h respectivamente (Tabla IV.) siendo estos estadísticamente diferentes comparados con las otras dos áreas, lo que puede observarse en la Figura 5, que muestra que al nivel de significancia seleccionado (α = 0.05) existe evidencia de que la mayor producción y emisión de óxido nitroso en esta área se ve favorecida por el mayor porcentaje de humedad que caracteriza a estos sitios lo que determina que la actividad microbiológica en sus procesos de nitrificación y desnitrificación se vea incrementada, por lo que en el sitio permanentemente inundado el volumen de humedad y el ambiente más reductivo establecen condiciones para que el material orgánico aportado por la vegetación de Popal-Tular principalmente en lo que corresponde a los compuestos nitrogenados origina que la desnitrificación sea el proceso predominante de producción de este gas, por el contrario el sitio potencialmente inundable y con vegetación de pastizal presenta un volumen alto de carbono orgánico (33.64 μg/g) y humedad remanente que origina la transformación de los materiales nitrogenados en un ambiente más aerobio que facilita el proceso de nitrificación y que por lo tanto da origen al valor obtenido en la producción y emisión de N<sub>2</sub>O señalado.

Para el periodo lluvioso el análisis estadístico (α = 0.05) no muestra ninguna diferencia estadística entre las áreas, señalando que, aunque los valores se incrementan significativamente no hay evidencia que señale algún comportamiento distinto con respecto a las emisiones lo que puede observarse en la Figura 6.

Tabla IV. Emisiones de N<sub>2</sub>O por sitio.

Ubicación del sitio	Descripción del sitio	FE (mg N <sub>2</sub> O-N/m <sup>2</sup> h)
Inundado (sitio popal-tular)	A1S1	8.64
Inundable (sitio pastizal inundado)	A1S2	1.37
Reforestación (cima)	A2S1	0.53
Reforestación (ladera)	A2S2	-0.72
Reforestación (pastizal)	A2S3	1.28
Conservación (cima)	A3S1	-1.20
Conservación (ladera)	A3S2	-0.10
Conservación (pastizal)	A3S3	-0.97





Figura 5. Producción y emisión de N<sub>2</sub>O por áreas, periodo seco

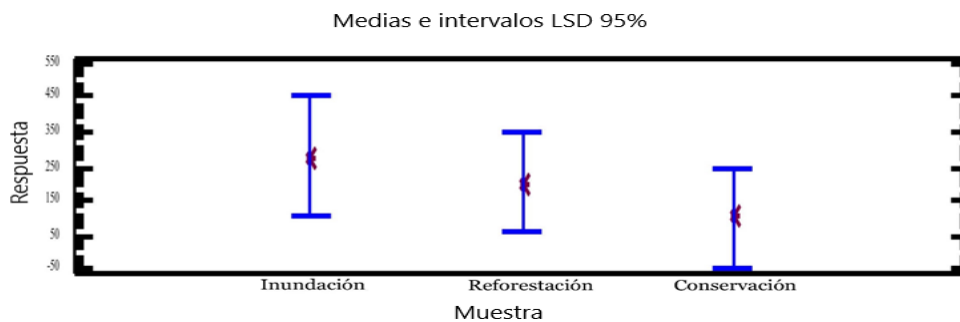


Figura 6. Producción y emisión de N<sub>2</sub>O por áreas, periodo lluvioso.

### Temperatura ambiente

Las variaciones en temperatura ambiental en el periodo seco como ya se señaló influyen de manera determinante en la temperatura del suelo y la cámara afectando la producción de óxido nitroso. [24] señalan que al incrementar la temperatura del suelo se incrementan las pérdidas de N gaseoso en suelos agrícolas y en suelos de selva. El tipo de cobertura vegetal determina la producción diferenciada de emisiones, debido al aporte orgánico y a la actividad microbiológica en un ambiente carente de oxígeno generado por condiciones de inundación que favorecen que la desnitrificación sea el principal proceso de producción de N<sub>2</sub>O. [1] señalan que en suelos con condiciones más reductivas domina la desnitrificación dando como resultado la producción y consumo de formas reducidas de nitrógeno (N<sub>2</sub>O y N<sub>2</sub>). Para el AIS1 con vegetación de Popal-Tular se presenta el mayor volumen de emisiones (8.64 µg de N<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>h) y la temperatura más alta (33.7°C), no así para el área cubierta por pastizal (AIS2) y con temperatura ambiental promedio de 27.1°C, donde el principal factor que favorece la producción de N<sub>2</sub>O en el periodo seco es el aporte permanente de materia orgánica que se recicla en un ambiente aeróbico siendo el proceso de nitrificación el encargado de producir este gas, [3] mencionan que los incrementos de N<sub>2</sub>O están asociados con la conversión de selvas a pastizales y que esto influye sobre el ciclo de N en el suelo, particularmente en la mineralización, nitrificación y desnitrificación y por lo tanto en las emisiones de óxidos de nitrógeno, asimismo la composición química del material transformado proveniente principalmente de gramíneas limita la presencia del nitrógeno en el suelo disminuyendo así la producción de N<sub>2</sub>O (1.37 µg de N<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>h). Para el área de Reforestación en el sitio A2S1 ubicado como ladera alta y con vegetación de acahual con temperatura de 31.4°C se observa que el deterioro del suelo y en consecuencia su vegetación favorece la pérdida de nutrientes principalmente de nitrógeno por



escurrimiento debido al movimiento del agua además del aumento en la mineralización de los materiales carbonados y nitrogenados, lo que permite la limitada producción de  $N_2O$  ( $0.53 \mu\text{g}$  de  $N_2O/m^2h$ ), el A2S2 identificado como ladera media con vegetación de acahual con temperatura de  $33.7^\circ\text{C}$  actúa como sumidero debido a la mayor densidad de vegetación, ya que el mayor aporte de nitrógeno y el grado de conservación del sitio establece condiciones adecuadas para los diferentes procesos de transformación del N y su mayor aprovechamiento por parte de las plantas evitando de esta manera que haya una producción significativa de  $N_2O$  lo que puede identificarse por los valores negativos ( $-0.71 \mu\text{g}$  de  $N_2O/m^2h$ ). El contenido de nutrientes del suelo podría también incrementar la competencia entre microorganismos y la cubierta vegetal, agotando los depósitos de nitrógeno y consecuentemente reduciendo las emisiones, [33]. Para el A2S3 ubicado en ladera con pastizal y con la mayor temperatura ( $34.3^\circ\text{C}$ ), establece condiciones para una producción más dinámica de  $N_2O$ , ya que se presentan ambientes aeróbicos como anaeróbicos, así como zonas de captación de materiales que son migrados por el movimiento del agua y depositados en este sitio para ser transformados rápidamente con una producción significativa de este gas que se libera hacia la atmósfera ( $1.28 \mu\text{g}$  de  $N_2O/m^2h$ ). Para el área de Inventario Forestal con vegetación de acahual y con el menor grado de deterioro se observa una producción mínima debido a la protección que ejerce la cobertura vegetal sobre el suelo estableciendo condiciones óptimas de transformación de los materiales carbonados y nitrogenados en sus diferentes vías y que son consumidos en el suelo por las plantas y microorganismos por lo que la distribución de esta vegetación limita su liberación a la atmósfera para los sitios A3S1, A3S2, A3S3, que actúan como sumideros (Tabla V.)

Tabla V. Temperatura ambiente y emisiones de  $N_2O$ , periodo seco

Sitios	$\mu\text{gN}_2\text{O}/\text{m}^2\text{h}$ Promedio	T ambiente (promedio)
A1S1	8.64	33.7
A1S2	1.37	27.1
A2S1	0.53	31.4
A2S2	-0.71	33.7
A2S3	1.28	34.3
A3S1	-1.20	31.5
A3S2	-0.10	30.5
A3S3	-0.96	34.7

Para el periodo lluvioso se observó que, aunque la temperatura disminuyó en promedio para todos los sitios (Tabla VI) el factor humedad jugó un papel determinante en la producción de  $N_2O$  ya que la acción que tiene la temperatura sobre la descomposición de los materiales orgánicos incorporados a los suelos muestreados se incrementa con el excedente de humedad característico de este periodo. [16] señalan que los picos de emisiones de  $N_2O$  se asocian con las altas precipitaciones. [26] establecen que el incremento en la saturación de agua promueve la emisión de  $N_2O$  vía desnitrificación. En los suelos tropicales húmedos la temperatura y el contenido de humedad son factores óptimos para los procesos microbiológicos, [1]. [15] señalan que los flujos de  $N_2O$  a menudo se incrementan inmediatamente después de los eventos de lluvia, lo que también concuerda con lo señalado por [34]. Lo que explica que para el A1S1 haya un aumento sustancial en la producción de óxido nitroso ( $116 \mu\text{g}$  de  $N_2O/m^2h$ ), en el A1S2 el nivel de humedad y la inundación temporal favorecen la producción de este gas ( $444 \mu\text{g}$  de  $N_2O/m^2h$ ) debido a la interacción de los 2 principales procesos de producción: la nitrificación y la

desnitrificación, en A2S1 el grado de saturación limita su producción, obteniéndose un flujo bajo de emisión para este gas ( $31.9 \mu\text{g}$  de  $\text{N}_2\text{O}/\text{m}^2\text{h}$ ), no así para el A2S2 donde el intercambio gaseoso motivado por el flujo de humedad favorece la liberación de  $\text{N}_2\text{O}$  durante el drenado del exceso de agua, lo que puede explicarse por el tipo de pendiente cóncava y que por lo tanto permite que el escurrimiento superficial incremente la cantidad de N que se está transformando obteniendo un flujo de  $615 \mu\text{g}$  de  $\text{N}_2\text{O}/\text{m}^2\text{h}$ , el A2S3 que es temporalmente inundado inhibe la actividad microbológica y por lo tanto limita la producción de este gas ( $-48.4 \mu\text{g}$  de  $\text{N}_2\text{O}/\text{m}^2\text{h}$ ). El A3 en este periodo se comporta como emisor debido al efecto que tiene la humedad en lo que se refiere al intercambio gaseoso ya que los 3 sitios presentan producción y emisión de  $\text{N}_2\text{O}$  sin embargo el sitio A3S1 presenta el nivel más bajo de producción ( $6.59 \mu\text{g}$  de  $\text{N}_2\text{O}/\text{m}^2\text{h}$ ), no así para el A3S2 que presenta un volumen importante de  $\text{N}_2\text{O}$  ( $120 \mu\text{g}$  de  $\text{N}_2\text{O}/\text{m}^2\text{h}$ ) que por la posición que presenta en el entorno geográfico y por la pendiente de tipo convexo facilita la expulsión de los gases por efecto de infiltración, el A3S3 por su vegetación de pastizal y su transformación más dinámica favorece un volumen de producción mayor para esta área ( $176 \mu\text{g}$  de  $\text{N}_2\text{O}/\text{m}^2\text{h}$ ).

Tabla 6 Temperatura ambiente y emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$ , periodo lluvioso

Sitios	$\mu\text{gN}_2\text{O}/\text{m}^2\text{h}$ Promedio	T ambiente (promedio)
A1S1	116	27.2
A1S2	444	28.6
A2S1	31.9	26.6
A2S2	615	27.2
A2S3	-48.4	28.0
A3S1	6.59	27.6
A3S2	120	28.6
A3S3	176	31.7

## VI. CONCLUSIONES

Por lo anteriormente señalado podemos concluir que las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  puntuales que se determinaron en campo son producto de factores ambientales como de suelos y que dicha interacción determina la producción de pulsos de emisión, no obstante existe evidencia de que estos flujos se incrementan con respecto al tiempo manifestando comportamientos complejos que dependen del volumen de humedad, de la temperatura y principalmente de los contenidos de N y C, determinando la producción de  $\text{N}_2\text{O}$  la actividad microbológica en sus procesos de nitrificación y desnitrificación, es decir que para el periodo seco la producción de  $\text{N}_2\text{O}$  es más constante puesto que la mineralización de los compuestos orgánicos incorporados se incrementa ya que la humedad presente que se encuentra entre un 40 y 60% facilita junto con las condiciones más aerobias los procesos de nitrificación y en consecuencia la liberación de este gas a la atmósfera, por otro lado la presencia de mayor número de plantas, su mayor distribución y su diversidad impiden la liberación de este gas ya que se consume en los diferentes procesos de transformación del N y por lo tanto el suelo junto con su cobertura vegetal actúan como sumidero, impidiendo su liberación, no así para el caso de aquellos suelos que han sido perturbados o modificados donde su actividad ha sido también cambiada por el frágil equilibrio entre el suelo y la planta que muestra una dinámica de transformación de sus materiales incorporados más acelerada y que en consecuencia tienden a perder más elementos ya sea por lixiviación o por

volatilización que es lo que particularmente preocupa puesto que estos sitios tienden a ser fuentes emisoras de N<sub>2</sub>O. Por otro lado las emisiones en lluvias muestran que las emisiones iniciales después de las primeras lluvias son altas debido al intercambio gaseoso originado por la infiltración que permite la renovación de los gases, pero posteriormente estas disminuyen por la saturación de humedad en el suelo lo que implica que el volumen de emisiones decaiga, lo que podría explicar el aumento general de las emisiones pero siendo el periodo lluvioso de 4 meses es mucho más importante considerar las emisiones en secas donde su producción es más permanente y con mayor duración.

### RECONOCIMIENTOS

Agradecemos al PROMEP (Programa de Mejoramiento al Profesorado) quien otorgo la beca por parte de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla para la realización del proyecto de doctorado, asimismo a PEMEX por las facilidades y el apoyo económico para el desarrollo del proyecto de investigación, al Sr. Melesio Saldaña Hernández por sus apoyo para la realización de las cámaras de muestreo, a la M. en C. Bertha E. Mar Morales por su apoyo en la parte logística, al M. en C. José Manuel Hernández por su apoyo en el trabajo de laboratorio y al laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología de la UNAM.

### REFERENCIAS

- [1] Weitz A.M., E. Linder, S. Frohking, P.M. Crill, and M. Keller. 2001. N<sub>2</sub>O emissions from humid tropical agricultural soils: effects of soil moisture, texture and nitrogen availability. *Soil Biology & Biochemistry*. 33:1077-1093.
- [2] Kaiser E.-A., Khors K., Kücke M., Schnug E., Munch J.C. and Heinemeyer O. 1998. Nitrous oxide release from arable soil: importance of perennial forage crops. *Biol Fertil Soils* 28: 36-43
- [3] Veldkamp, E., E. Davidson, H. Erickson, M. Keller and A. Weitz. 1999. "Soil nitrogen cycling and nitrogen oxide emissions along a pasture chronosequence in the humid tropics of Costa Rica. *Soil Biology & Biochemistry*. 31:387-394.
- [4] Jean E.T. McLain and Dean A. Martens. 2005. Nitrous oxide flux from soil amino acid mineralization. *Soil Biology & Biochemistry* 37, 289-299
- [5] Kudryarov V.N., 2022. Nitrous Oxide Emission from Fertilized Soils: An Analytical Review. *Eurasian Soil Science*. Vol. 53, No. 10, pp 1396-1407
- [6] Prinn R., Cunnold D., Rasmussen R. Simmonds P., Aylea F., Crawford A., Fraser P. and Rosen R. 1990. Atmospheric emissions and trends of nitrous oxide deduced from 10 years of ALE-GAGE data. *Journal of Geophysical Research* 95: 18369-18385
- [7] Müller C., R.R. Sherlock, P.H. Williams. 1997. Mechanistic model for nitrous oxide emission via nitrification and denitrification. *Biol. Fertil. Soils*. 24:231-238.
- [8] Xiaotong Song; Xiaotang Ju; Cairistiona F.E: Topp and Robert M. Rees. 2019. Oxygen Regulates Nitrous Oxide Production Directly in Agricultural Soils. *Environ. Sci. Technol.* 53, 21, 12539–12547
- [9] ] Smith M.S. and Tiedje J.M. 1979. Phases of denitrification following oxygen depletion in soil. *Soil Biology & Biochemistry*. 11: 261-267
- [10] Potter S.C., Riley H.R. and Klooster A.S., 1997. Simulation modeling of nitrogen trace gas emissions along an age gradient of tropical forest soils. *Ecological Modelling*. 97: 179–196.
- [11] Smith K.A., Thomson P.E., Clayton H., McTaggart I.P. and Conen F. 1998. Effects of temperature, water content and nitrogen fertilization on emissions of nitrous oxide by soils. *Atmospheric Environment* Vol. 32, No. 19: 3301-3309

- [12] Abbasi M.K. and Adams W.A. 2000. Gaseous N emission during simultaneous nitrification-denitrification associated with mineral N fertilization to a grassland soil under field conditions. *Soil Biology & Biochemistry* 32: 1251-1259
- [13] Nobre A.D., Keller M., Crill P.M. and Harriss R.C. 2001. Short-term nitrous oxide profile dynamics and emissions response to water, nitrogen and carbon additions in two tropical soils. *Biol. Fertil. Soils* 34: 363–373.
- [14] FAO and IFA, 2001. Global estimates of gaseous emissions of NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O from agricultural land. First version. 106 pp.
- [15] Dobbie K.E. and Smith K.A. 2003. Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: the impact of soil water-filled pore space and other controlling variables. *Global Change Biology* 9: 1-15
- [16] Ball B.C., J.P. Parker and A. Scott. 1999. Soil and residue management effects on cropping conditions and nitrous oxide fluxes under controlled traffic in Scotland 2. Nitrous oxide, soil N status and weather. *Soil & Tillage Research* 52: 191-201
- [17] Keller, M., Kaplan, W.A. and Wofsy, S.C., 1986. Emissions of N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> from tropical soils. *J. Geophys. Res.* 91: 11,791 – 11,802.
- [18] Matson P.A. and Vitousek P.M. 1990. Ecosystem approach to a global nitrous oxide budget. *Bioscience* 40: 667-672
- [19] Luizao, F.J., Matson P.A., Livingston G.P., Luizao R., Vitousek P.M. 1989. Nitrous oxide flux following tropical land clearing. *Global Biogeochem Cycles* 3: 281-285
- [20] García-Méndez G., Maass J.M., Matson P.A. and Vitousek P.M. 1991. Nitrogen transformations and nitrous oxide flux in a tropical deciduous forest in México. *Oecologia*. 88: 362-366
- [21] Smith K.A. 1997. The potential for feedback effects induced by global warming on emissions of nitrous oxide by soils. *Global Change Biol.* 3: 327 -338.
- [22] Pedro Antonio Núñez-Ramos; Gregorio García-Lagombra; Joaquin Caridad del Rosario y Victor José Asencio-Cuello. 2020. Mediciones de óxido nítrico (N<sub>2</sub>O) en suelo manejado bajo pastoreo con bovino de leche. *Terra Latinoamericana* 39:1-12. e813
- [23] Ambus P., H. Clayton, J.R.M. Arah, K.A. Smith and S. Christensen. 1993. Similar N<sub>2</sub>O flux from soil measured with different chamber techniques. Short communication. *Atmospheric Environment*. 27A:121-123.
- [24] Mogge, B., E.A. Kaiser, J.C. Munch. 1999. Nitrous oxide emissions and denitrification N-losses from agricultural soils in the Bornhöved Lake region: influence of organic fertilizers and land-use. *Soil Biology & Biochemistry* 31:1245-1252.
- [25] Whalen S.C. 2000. Nitrous oxide Emission from and agricultural soil fertilized with liquid swine waste or Constituents. *Soil Science of America Journal*. 64: 781-789.
- [26] Wolf, I. and R. Russow. 2000. Different pathways of formation of N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> and NO in black earth soil. *Soil Biology & Biochemistry*. 32:229-239.
- [27] Yan, X., Y. Hosen and K. Yagi. 2001. Nitrous oxide and nitric oxide emission from maize field plots as affected by N fertilizer type and application method. *Biol. Fertil. Soils*. 34:297-303
- [28] Ni, W.Z. and Z.L. Zhu. 2001. Gaseous nitrogen losses and nitrous oxide emission from a flooded paddy soil as affected by illumination and copper addition. *Biol. Fertil. Soils* 34: 460 – 462
- [29] Calderón F.J. and Jackson L.E. 2002. Rototillage, disking, and subsequent irrigation: effects on soil nitrogen dynamics microbial biomass and carbon dioxide efflux. *J. Environ. Qual.* 31:752-758.
- [30] Longoria, R.R., Carbajal, B. G., Mar, M.B.E., and Ruiz, S.G. 2003. Nitrous oxide flux in Maize and wheat cropped soils in the central region of Mexico during “El Niño” year 1998. *Atmósfera*. 231-244.

- [31] Hou, A.X., G.X. Chen, Z.P. Wang, O. Van Cleemput, and W.H. Patrick, Jr. 2000. Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice Field in Relation to Soil Redox and Microbiological Processes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:2180-2186.
- [32] Pleijel, A., Sild, J., Danielsson, H. and Klemetsson, L. 1998. Nitrous oxide emissions from a wheat field in response to elevated carbon dioxide concentration and open-top chamber enclosure. *Environmental Pollution* 102, S1: 167-171.
- [33] Yamulki, S., Harrison, R.M., Goulding, K.W.T. and Webster, C.P. 1997. N<sub>2</sub>O, NO and NO<sub>2</sub> fluxes from a grassland effect of soil pH. *Soil Biology & Biochemistry*. Vol. 29. No. 8: 1199-1208.
- [34] Bergsma, T.T., Robertson, P.G. and Ostrom, N.E. 2002. Influence of soil moisture and Land Use History on denitrification end-products. *J. Environ. Qual.* 31: 711-717.