

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**



FACULTAD DE CIENCIAS

**EVALUACIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO
INVERNADERO COMO INDICADORES DE CALIDAD DE
DISTINTOS SUELOS EN FUNCIÓN DE SU USO EN LAS
LAGUNAS DE CHASCHOC (EMILIANO ZAPATA, TABASCO,
MEXICO)**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I O L O G A

P R E S E N T A:

ANA KAREN PEÑA LOPEZ



**DIRECTORA DE TESIS
DRA. NATHALIE ROBERTE CHANTAL CABIROL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, D.F. 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Datos del Jurado

1. Datos del alumno
Peña
López
Ana Karen
5514778578
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
307279424
2. Datos del tutor
Dra.
Cabirol
Nathalie Roberte Chantal
3. Datos del sinodal 1
Dra.
Claudia
Ponce de León
Hill
4. Datos del sinodal 2
M. en C.
María Julia
Carabias
Lillo
5. Datos del sinodal 3
Dra.
María del Pilar
Ortega
Larrocea
6. Datos del sinodal 4
Dr.
Alejandro
Ponce
Mendoza
7. Datos del trabajo escrito:
Evaluación de la emisión de gases de efecto invernadero como indicadores de calidad de distintos suelos en función de su uso en las Lagunas de Chaschoc (Emiliano Zapata, Tabasco), México.
94 págs.
2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la **UNAM** por todos los beneficios y apoyos que me ha brindado como alumna desde el nivel medio superior.

A la **Dra. Nathalie Cabirol** por su valiosa tutoría, todo su apoyo y conocimiento que me compartió.

Al **CONACYT** por el apoyo económico otorgado para la realización del **Proyecto FOMIX TAB-2012-C-28-194316** “Retos para la sustentabilidad en la cuenca del Usumacinta en Tabasco: Ecosistemas, Cambio Climático y Respuesta Social.”.

Al **Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste (CCGDS)** de Tabasco y al **COMECyT** por sus diferentes apoyos económicos otorgados para la realización de la presente tesis.

A **Dr. Marcelo Rojas Oropeza**, por estar presente durante el proceso de la elaboración de esta tesis y por su confianza.

Al **Dr. Alejandro Ponce Mendoza** para su participación en las estadísticas de la producción de gases de efecto invernadero estudiados.

A cada uno de mis sinodales: **Dra. Claudia Alejandra Ponce de León Hill, M. en C. Julia Carabias Lillo, Dra. María del Pilar Ortega Larrocea y Dr. Alejandro Ponce Mendoza** por su tiempo en la revisión de este trabajo y por las observaciones realizadas al mismo.

A **M. en C. María del Socorro Galicia Palacios, Dra. Rosalía Ramos Bello** por su apoyo en laboratorio.

A **Mario, Nora, Columba, Oscar y Cedric** por su apoyo en laboratorio y campo.

Al **Dr. Luc Dendooven** por permitirme utilizar las instalaciones de su laboratorio en el CINVESTAV para realizar los análisis fisicoquímicos.

A **Dr. Marco Luna Guido, Daniel y Blanca** por su apoyo durante mi estancia en el CINVESTAV y asesoría en la interpretación de los análisis fisicoquímicos y biológicos

A los estudiantes de la **UJAT** y a los **lancheros de Emiliano Zapata**, especialmente **Miguel Ángel Carabeo Vásquez** y su familia por su apoyo en campo.

A cada uno de mis profesores de carrera por instruirme a lo largo de este trayecto, especialmente al **Prof. Luis Carlos Vásquez (Lu)**.

A la **Dra. Guadalupe Barajas** por su asesoría en Bioestadística.

DEDICATORIA

*A mi **mamá** y **papá** por todo su cariño, su confianza y apoyo.*

*A mi **tía Marilú** que ha sido como una segunda mamá para mí.*

*A mi esposo **Adrián** por su paciencia, comprensión, apoyo y amor.*

*A mi hija **Abril**, quien me ha enseñado a ser fuerte y darme ánimo para salir adelante, crecer, ser una mejor persona y madre.*

*También a la **familia Gutiérrez Aguilar** quien me ha apoyado y me ha hecho sentir como una integrante más de su familia.*

*A mis hermanos **Enrique, Abraham y Vianey** por recordarme que uno no debe dejar morir a su niño interno, ni mucho menos perder el asombro por las cosas.*

*A mi **tío Fredy** quien amablemente me facilitaba su lap para mis trabajos académicos.*

*A mis **abuelitos, Mari, Tacho y Lulú**, quienes siempre me han mostrado su cariño apoyándome, consintiéndome y siendo mis escuchas.*

*A mis **amigas Ximena y Victoria así como a su familia**, por abrirme las puertas de su casa cálidamente y permitirme seguir adelante en mi camino sin preocuparme por techo en muchas noches.*

*A mis amigos **Nayeli, Isaí, Alejandra, Sandra, Cesar, Lupita, Eduardo, Angi y Claudia** por esos momentos de convivencia cercana, experiencias de todos colores y por hacerme sentir que no estoy sola.*

Gracias a toda esta gente tan linda que amo sinceramente y que me ha acompañado en mi camino y que sin cada uno de ellos, llegar hasta aquí, hubiera sido muy difícil.

*Si te rindes hoy,
de nada servirá el esfuerzo que hiciste e hicieron por ti ayer.*

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	II
DEDICATORIA.....	IV
LISTA DE TABLAS	IV
LISTA DE FIGURAS.....	V
1 RESUMEN	1
2 INTRODUCCION	3
3 MARCO TEORICO	6
3.1 El suelo, calidad función e importancia para la producción primaria.....	6
3.1.1 Características fisicoquímicas del suelo.	7
3.1.2 Características biológicas del suelo.....	9
3.2 Humedales	10
3.2.1 Definición, clasificación y función	10
3.2.2 Tipo de suelo en humedales tropicales	14
3.2.3 Ciclos biogeoquímicos en los humedales	15
3.2.4 Contaminación-perturbación por actividades antropogénicas.....	23
3.3 Áreas naturales protegidas, como una solución	27
3.3.1 Qué son e importancia	27
3.3.2 Humedales, experiencia Centla	27
3.4 Sitio de estudio: Lagunas Chaschoc.....	29
4 JUSTIFICACION	31
5 HIPOTESIS.....	32
6 OBJETIVO GENERAL	32
6.1 Objetivos particulares	32
7 MATERIALES Y METODO.....	33
7.1 Sitio de Muestreo	33
7.2 Definición de suelos.....	33
7.3 Muestreo.....	33
7.4 Cinética de producción de gases	35
7.5 Muestras de suelo.....	36
7.6 Caracterización del suelo.....	38
7.7 Cálculo de emisión de GEI	39

8	RESULTADOS	41
8.1	Niveles del agua.....	41
8.2	Caracterización física del suelo	42
8.2.1	Textura.....	42
8.2.2	Humedad	42
8.3	Caracterización química del suelo	43
8.3.1	pH	43
8.3.2	Conductividad eléctrica	44
8.4	Caracterización biológica del suelo.....	45
8.4.1	Materia Orgánica.....	45
8.4.2	Seguimiento del nitrógeno	46
8.4.3	Cinética de producción de gases.....	51
9	DISCUSION	59
9.1	Características físico-químicas del suelo	59
9.2	Características biológicas del suelo.....	62
9.2.1	Materia Orgánica.....	62
9.2.2	Seguimiento del nitrógeno NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-	64
9.2.3	Producción de GEI.....	66
9.3	Servicios ecosistémicos de las Lagunas de Chaschoc (en términos de los ciclos biogeoquímicos).....	74
9.3.1	Apoyo o soporte	74
9.3.2	Regulación	75
9.3.3	Aprovisionamiento.....	75
10	CONCLUSIONES	76
11	BIBLIOGRAFIA.....	78
12	ANEXOS.....	87
12.1	ANEXO 1	87
12.1.1	DETERMINACION DE HUMEDAD	87
12.1.2	COMPUESTOS NITROGENADOS: NITRATO, NITRITO Y AMONIO.....	87
12.1.3	EXTRACCIÓN DE FORMAS DE NITRÓGENO.....	87
12.1.4	CARBONO TOTAL, CARBONO ORGÁNICO Y NITRÓGENO TOTAL	88
12.1.5	CROMATOGRAFÍA DE GASES.....	88

12.2 ANEXO 2.....	89
12.2.1 DATOS CRUDOS PARA LA CARACTERIZACION DEL SUELO.....	89
12.3 ANEXO 3.....	95
12.3.1 Formas orgánicas e inorgánicas de C y N.....	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Servicios ambientales que proporcionan los humedales continentales. (García, 2006; Keddy, 2010; “Política Nacional de Humedales”, s. f.).....	12
Tabla 2. Fuente de emisiones globales de GEI (flujo de producción anual global (Tg/ año ⁻¹) (Mosier y Freney, s. f; Jallow, 1995; Bouwman, 1996; Strömberg, 1998; Bouwman, et al., 2002; Ding, et al., 2004; Abril, 2005; Oenema, et al., 2005; Denman, et al., 2007; Marani y Alvalá, 2007; EPA, 2010; Laanbroek, 2010; Chhabra, et al., 2013; Liengaard, et al., 2012; Yang, et al., 2013; Ortiz-Cornejo, et al., 2015).....	22
Tabla 3. Poder de calentamiento de los principales GEI. (Tomado de IPCC, 2007).....	23
Tabla 4. Definición de uso de suelo.....	33
Tabla 5. Sitios de estudio.....	34
Tabla 6. Las muestras de suelo que se tomaron, se señalan con un punto negro (n= 47) a continuación.....	37
Tabla 7. Métodos utilizados en la caracterización fisicoquímica del suelo.....	38
Tabla 8. Métodos utilizados en la caracterización biológica del suelo.....	38
Tabla 9. Textura de las zonas de transición.....	42
Tabla 10. Porcentaje de humedad.....	42
Tabla 11. Valores medios, desviación estándar y significancia para la caracterización de pH del suelo.....	43
Tabla 13. Valores medios, desviación estándar y significancia.....	45
Tabla 14. Valores medios ($X \pm DS$) y significancia para el porcentaje de COT y Ntot.....	50
Tabla 15. Valores medios ($X \pm DS$) y significancia para la relación C/N.....	50
Tabla 16. Emisión puntual de CO ₂ en suelos agrícola y ganadero, y de humedal drenado.....	68
Tabla 17. Emisión puntual de N ₂ O en suelos agrícolas, ganaderos y de humedales naturales.....	70
Tabla 18. Algunos ejemplos de producción de N inorgánico en conjunto con las emisiones de N ₂ O citadas en la Tabla 17.....	71
Tabla 19. Emisión puntual de CH ₄ en suelos agrícolas, ganaderos y de humedales naturales.....	74
Tabla 20. Porcentaje de humedad.....	89
Tabla 21. pH.....	89
Tabla 22. Conductividad eléctrica (dS/m 25°C).....	89
Tabla 23. Porcentaje de materia orgánica.....	90
Tabla 24. Compuestos nitrogenados: nitrato, nitrito y amonio (mg NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄ ⁺ /kg ⁻¹ ·SS).....	90
Tabla 25. Porcentaje de carbono orgánico total y nitrógeno total.....	91
Tabla 26. Relación carbono nitrógeno.....	91
Tabla 27. Análisis de los valores promedios y desviación estándar de la producción de a) CO ₂ , b) CH ₄ y c) N ₂ O (mg/ d · m ²) a lo largo de los pulsos de inundación (diferencias significativas indicadas con letras).....	91
Tabla 28. Análisis de los valores promedios y desviación estándar de la producción de a) CO ₂ , b) CH ₄ y c) N ₂ O (mg/ d · m ²) en los diferentes usos de suelo (diferencias significativas indicadas con letras).....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Perfil de un suelo terrestre típico comparado con el de un humedal. (Fuente: modificado de Keddy (2010)).....	14
Figura 2. Ciclo del carbono en los humedales. Las principales rutas ilustradas son la fotosíntesis, fermentación, metanogénesis y oxidación del metano (aerobia y anaerobia) (Tomado de Mitsch y Gosselink, 2015).	16
Figura 3. Ciclo del nitrógeno en los humedales (Tomado de Mitsch y Gosselink, 2015). (Anammox, Oxidación anaerobia del amonio).....	19
Figura 4. Ubicación de Emiliano Zapata en México.	29
Figura 5. Ubicación de las zonas de muestreo: Canal Usumacinta, Laguna Chaschoc (LC), Canal Pochote (CP), Canal San Ignacio (CSI) y Laguna Gaytán Chico (LG).	35
Figura 6. Zonas de muestreo P (suelo con pasto), A (sumergido) y L (límite).	35
Figura 7. Bidón con septo y termómetro adaptados. Foto: Nathalie Cabirol 2013.....	36
Figura 8. Campanas distribuidas a lo largo del margen del canal (por cuadruplicado indicadas con las flechas). Foto: Nathalie Cabirol 2013.	36
Figura 9. Toma de muestras de suelo no inundado en el lugar de cada campana. Foto: Nathalie Cabirol 2014.	37
Figura 10. Toma de muestras de suelo inundado con la ayuda de un nucleador. Foto: Nathalie Cabirol 2013....	37
Figura 11. Curva patrón del CO ₂ del que se obtiene la ecuación de la recta para calcular la concentración de la muestra de gas inyectada.	39
Figura 12. Perfil del canal/laguna representando la altura que alcanzó el agua durante el pulso de inundación máxima (noviembre), junto con los niveles de agosto y marzo, mismos que no variaron en gran medida.	41
Figura 13. a) Valores medios de pH entre los diferentes usos de suelo y b) pulsos de inundación (Diferencias significativas expresadas en letras).	43
Figura 14. CE entre los diferentes pulsos de inundación (Diferencias significativas expresadas en letras.).....	45
Figura 15. Media y SD para el porcentaje de MO en los diferentes usos de suelo	45
Figura 16. Comportamiento del NH ₄ ⁺ en los diferentes usos de suelo a lo largo de los pulsos de inundación en agosto, noviembre y marzo (datos extraídos de la Tabla 5 del Anexo 2).	46
Figura 17. Comportamiento de NO ₂ ⁻ en los diferentes usos de suelo a lo largo de los pulsos de inundación en agosto, noviembre y marzo (datos extraídos de la Tabla 5 del Anexo 2).	47
Figura 18. Comportamiento de NO ₃ ⁻ en los diferentes usos de suelo a lo largo de los pulsos de inundación en agosto, noviembre y marzo (datos extraídos de la Tabla 5 del Anexo 2).	48
Figura 19. a) Distribución del nitrógeno inorgánico en los diferentes usos de suelo y b) a lo largo de los diferentes pulsos de inundación en agosto, noviembre y marzo.	49
Figura 20. Producción de CO ₂ (mg / d · m ²) en las zonas de transición a) pasto, b) sumergido y c) límite, en los diferentes pulsos de inundación. Las diferencias significativas están indicadas con letras y representan el análisis post hoc de manera independiente.....	52
Figura 21. Producción de CO ₂ (mg / d · m ²) a lo largo de los pulsos de inundación entre los diferentes usos de suelo. Diferencias significativas indicadas con letras.	53
Figura 22. Producción de CH ₄ (mg / d · m ²) en las zonas de transición a) pasto, b) sumergido y c) límite, en los diferentes pulsos de inundación. Las diferencias significativas están indicadas con letras y representan el análisis post hoc de manera independiente.....	54
Figura 23. Producción de CH ₄ (mg / d · m ²) a lo largo de los pulsos de inundación entre los diferentes usos de suelo. Diferencias significativas indicadas con letras.	55

Figura 24. Producción de N ₂ O (mg / d · m ²) en las zonas de transición a) pasto, b) sumergido y c) límite, en los diferentes pulsos de inundación. Las diferencias significativas están indicadas con letras y representan el análisis post hoc de manera independiente.....	56
Figura 25. Producción de N ₂ O (mg / d · m ²) a lo largo de los pulsos de inundación entre los diferentes usos de suelo. Diferencias significativas indicadas con letras.	57
Figura 26. Comparación entre las emisiones promedio de CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O (eje secundario) a lo largo de los pulsos de inundación.	58
Figura 27. Transformación biológica del N que dan lugar a la formación de N ₂ O: parcial nitrificación – desnitrificación, es una ruta alterna de la nitrificación (Adaptado de Oenema, et al., 2005).	69
Figura 28. Distribución del C orgánico e inorgánico (mg/m ²) en las Lagunas de Chaschoc a lo largo de los pulsos de inundación.	95
Figura 29. Distribución del N orgánico e inorgánico (mg/m ²) en las Lagunas de Chaschoc a lo largo de los pulsos de inundación. En marzo no se determinó el N _{tot} , por lo tanto no se pudo determinar el N orgánico.	95

1 RESUMEN

Los humedales desempeñan servicios de apoyo y regulación, mismos que promueven la retención, exportación y reciclaje de sedimentos y nutrientes, así como la depuración de cuerpos de agua y suelo gracias principalmente a la vegetación y microorganismos que en ellos habitan. El objetivo de esta investigación fue evaluar la calidad de distintos suelos en función de su uso a través de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a lo largo de tres pulsos de inundación. Se caracterizó el suelo y se monitorearon los flujos de CO_2 , CH_4 y N_2O en los tres pulsos de inundación. En el pulso de noviembre la mayoría de los suelos se inundaron, a excepción de un réplica del suelo agrícola, y ganadero. En agosto y marzo el nivel del agua fue más homogéneo en los diferentes suelos. La textura fue en la mayoría de los suelos fina en los tres pulsos de inundación. El porcentaje de humedad osciló en los valores del 50% en los 3 pulsos en todos los suelos. El suelo natural presentó un pH neutro a diferencia del resto cuyo pH calificó como medianamente alcalino. Los suelos natural, ganadero y agrícola resultaron salinos. El porcentaje de materia orgánica (MO) para el suelo natural fue significativamente alto, respecto al agrícola y tránsito urbano en donde fue bajo; el ganadero y el mixto presentaron MO medio. La concentración de amonio fue homogénea entre los diferentes suelos; se presentó baja ($\sim 10 \text{ mg N / kg}^{-1} \cdot \text{SS}$) en agosto; en noviembre aumentó ($\sim 65 \text{ mg N / kg}^{-1} \cdot \text{SS}$) y para la temporada de estiaje disminuyó significativamente ($\sim 0 \text{ mg N / kg}^{-1} \cdot \text{SS}$). El nitrito fue escaso en todos los suelos durante los tres pulsos de inundación, osciló entre 0 y $5 \text{ mg N / kg}^{-1} \cdot \text{SS}$. De igual modo el nitrato también fue escaso en todos los suelos durante los tres pulsos de inundación, osciló entre 0 y $7 \text{ mg N / kg}^{-1} \cdot \text{SS}$. El porcentaje de N total a lo largo del estudio fue en promedio de 0.25, valor considerado como extremadamente alto y el Carbono orgánico total fue en promedio de 3.44. La relación C/N fue en promedio de 15 a lo largo del estudio sin presentar diferencias significativas. La producción de CO_2 se registró en menor medida en el mes de marzo – suelo sumergido ($9.2 \text{ mg/día} \cdot \text{m}^2$) y en mayor medida de igual modo en el mes de marzo – suelo pasto ($76.57 \text{ mg/día} \cdot \text{m}^2$). La menor producción de CH_4 se presentó en el mes de marzo ($0.01 \text{ mg/día} \cdot \text{m}^2$) y la mayor en el mes de noviembre ($76.3 \text{ mg/día} \cdot \text{m}^2$). Por su parte, la producción de N_2O osciló entre 0 y $0.86 \text{ mg/día} \cdot \text{m}^2$ correspondientes al mes de marzo y noviembre respectivamente. En cuanto a la producción de CO_2 por uso, la mayor se registró en el suelo ganadero de marzo ($76.6 \text{ mg/día} \cdot \text{m}^2$) y la menor en el mismo pero del mes de noviembre ($0 \text{ mg/día} \cdot \text{m}^2$). La

menor emisión de CH₄ se detectó en el suelo de tránsito urbano y agrícola (0.01 mg/día•m²); la mayor fue en el suelo ganadero (74.3 mg/día•m²). La producción de N₂O osciló entre 0 mg/día•m² de los suelos mixto, agrícola y ganadero, y 0.86 mg/día•m² del natural. De manera general, no se apreciaron diferencias claras en los parámetros fisicoquímicos ni en la emisión de GEI entre los distintos usos de suelo, comportamiento que se puede relacionar con la resiliencia del humedal. Por lo tanto, en base a la evaluación de la emisión de GEI, el humedal está desempeñando adecuadamente sus funciones en términos de los ciclos biogeoquímicos relacionados con los servicios de apoyo, regulación y aprovisionamiento propios de este ecosistema.

2 INTRODUCCION

Los humedales son uno de los ecosistemas ecológicos de mayor relevancia en nuestro planeta. Son de los espacios más productivos del mundo (sobre los Humedales, 2004): son cunas de diversidad biológica, productividad primaria y fuentes de agua. Por lo tanto son indispensables por los innumerables servicios ecosistémicos que brindan, desde suministro de agua dulce, alimentos, materiales de construcción, y biodiversidad, hasta control de crecidas, recarga de aguas subterráneas y mitigación del cambio climático. De igual manera, estos ecosistemas fungen como purificadores gracias al importante reciclaje de nutrientes que en su sustrato ocurre a través de los ciclos biogeoquímicos.

Los ciclos biogeoquímicos permiten el flujo de nutrientes en los ecosistemas, donde están siendo constantemente catabolizados y anabolizados por los organismos pertenecientes a los 3 dominios. Uno de los productos de los ciclos biogeoquímicos son los gases de efecto invernadero (GEI), como resultado del procesamiento del carbono (C) y nitrógeno (N), macronutrientes constituyentes principales de la célula.

Los GEI son aquéllos que en la atmósfera regulan naturalmente la radiación emitida por la superficie terrestre, retienen el calor y producen el fenómeno conocido como efecto invernadero (IPCC, 2007). Los GEI se emiten de forma natural en concentraciones relativamente bajas; sin embargo, la actividad humana ha cambiado significativamente las concentraciones de GEI en la atmósfera.

Es así que la evaluación de la emisión de GEI a través del estudio de los ciclos biogeoquímicos del carbono y del nitrógeno puede fungir como indicador de actividad microbiana y en general, de la homeostasis en el ecosistema, los cuales pueden cambiar en función de un cambio de uso de suelo, de contaminación o degradación. La acumulación de materia y energía en el ambiente puede ser modificada por procesos químicos que contaminan y esta acumulación interfiere en los ciclos biogeoquímicos que se llevan a cabo en forma espontánea y que pueden ser influenciados por la actividad antropogénica (Solís y López, 2003).

Los ciclos biogeoquímicos del C y del N presentan dinámicas diferentes en el suelo en función de la condición en la que se encuentre en su estado natural, las cuales pueden fungir como indicador de la calidad del suelo, relacionado con su capacidad de producción primaria. Dicha calidad se puede ver afectada por el uso y las prácticas agrícolas, por lo cual es importante el mantenimiento de la calidad del suelo. Además, esto último genera diversos beneficios: *a)* económicos, *b)* en términos de productividad, *c)* promueve el uso racional de fertilizantes y plaguicidas en los suelos de uso agropecuario, debido a que la disponibilidad de los nutrientes es la adecuada para una óptima productividad, *d)* mejora la calidad del aire y agua, y *e)* disminuye la producción de GEI (Navarro y Navarro, 2000).

Dentro del ciclo de carbono los humedales desempeñan un papel importante. La captación de C se realiza en su mayoría a través de las plantas que fijan el CO₂ de la atmósfera y lo convierten a carbono orgánico (C_{org}). Ligado a esto, en los humedales existen gradientes de óxido-reducción, que influyen fuertemente el destino y las transformaciones de la materia orgánica, mismas que determinarán si un humedal actúa como fuente de gases de efecto invernadero o como una trampa o reserva de C (Hernández, 2010).

Por su parte, los compuestos nitrogenados son esenciales en el crecimiento vegetal de los humedales, mismo que, junto con otros factores, estimula los ciclos biogeoquímicos de este ecosistema. El aporte de N al ecosistema se realiza de manera natural. Sin embargo, es uno de los principales constituyentes de agua residual y deben su importancia a procesos como la eutroficación, su efecto en el contenido de oxígeno de los cuerpos de agua receptores y su toxicidad en especies acuáticas (Kadlec y Wallace, 2009).

A pesar de la relevancia, pocos estudios existen sobre el funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos del C y N en humedales tropicales (Sjögersten, et al., 2014). Entonces son necesarios mayores estudios experimentales en estos ecosistemas para poder definir de manera más apropiada el papel de los humedales tropicales en la producción de GEI, y en la reserva de macronutrientes. Estos estudios permitirán entender la dinámica de los ciclos biogeoquímicos en estas condiciones y así conocer el impacto que genera el cambio de uso de suelo a través del empleo de los GEI como indicadores de calidad de suelo.

Las Lagunas de Chaschoc, ubicadas en el municipio de Emiliano Zapata (Tabasco), constituyen un ecosistema de tipo humedal tropical. Las lagunas desempeñan funciones ecológicas fundamentales, como es la regulación de los regímenes hidrológicos. Además, aportan servicios ambientales y beneficios socioeconómicos para las poblaciones humanas. Asimismo, este tipo de ecosistema funge como un importante 'depósito' de carbono que si se llegara a perturbar, generalmente por cambio de uso de suelo con fines ganaderos o agrícolas, se liberarían grandes cantidades de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero a la atmósfera. De ahí la importancia de estudiar el estado actual de este ecosistema en el que se desarrollan actividades antropogénicas (vivienda, explotación de recursos naturales, agricultura, ganadería, pesca, como predominantes) y no cuenta con ningún tipo de protección y regulación jurídica. Por esta razón, se propone estudiar el comportamiento y estado del humedal a través de la evaluación de la emisión de GEI y parámetros fisicoquímicos como indicadores de la calidad del suelo de este ecosistema. Es importante realizar investigación sobre el diagnóstico del estado de los humedales para evitar su pérdida y adoptar medidas de conservación de los recursos que nos brindan y de utilización racional.

3 MARCO TEORICO

3.1 El suelo, calidad, función e importancia para la producción primaria.

Se denomina suelo a la parte superficial de la corteza terrestre: es un cuerpo natural compuesto de minerales, materia orgánica, seres vivos, agua y aire, que se encuentran en interacción mediante procesos físicos, químicos y biológicos (Gerrard, 2006).

Los suelos son cuerpos dinámicos que desempeñan múltiples funciones y prestan múltiples servicios, por lo que son un componente crítico de la biosfera. Entre las principales funciones de los suelos caben destacar las siguientes (Porta, et al, 2013; ISRIC, 2014):

- Producción de biomasa. Los suelos sustentan la producción de biomasa puesto que proveen los nutrientes, agua y la base de soporte, ya sea para la vegetación natural o cultivos para la agricultura y la silvicultura.
- Regulación del flujo y calidad del agua. El suelo actúa como un filtro natural al mantener y mejorar la calidad del agua que lo atraviesa. En adición, regula el ciclo hidrológico al controlar la entrada de agua en el suelo (infiltración), almacenamiento y transferencia de agua.
- Fijación de gases de efecto invernadero. El suelo permite el secuestro de carbono, al retener grandes cantidades de materia orgánica durante mucho tiempo.
- Provee hábitat biológico y reserva genética, al ser un medio poroso para mantener vida subterránea y al ser firme para soportar vida superficial.
- Sirve de soporte físico de actividades humanas: vivienda, industria, infraestructura, etc.

El suelo es un recurso natural finito, por lo cual aunado las vitales funciones que desempeña, es indispensable conservarlo fértil. Dentro de cualquier hábitat natural o campo de cultivo, la fertilidad del suelo es uno de los caracteres más importantes. La fertilidad del suelo es un concepto que incluye sus componentes físicos, químicos y biológicos y desde el punto de vista forestal y agrícola un suelo fértil debe: i) promover el crecimiento de las raíces, ii) mantener y proporcionar agua, iii) proporcionar, mantener y reciclar nutrientes necesarios para las plantas en cada momento, en la cantidad necesaria y de forma asimilable iv) promover intercambio gaseoso y v) promover la actividad biológica del suelo (Bautista y

Palma-López, 2005; Casas, 2011). Es entonces que la conservación de dicha fertilidad es esencial tanto en el mantenimiento de un equilibrio ecológico en los ecosistemas naturales (productividad primaria) como en los campos de cultivo, ya que permitirá obtener producciones agrícolas máximas (Porta, et al, 2013). Las principales degradaciones que la afectan pueden ser: el sellamiento superficial, compactación, erosión, remoción del suelo, pérdida de nutrientes o de la materia orgánica por degradación física, química y biológica, respectivamente. Además puede haber contaminación, todo lo anterior debido a una sobreexplotación (De las Heras, 2003).

3.1.1 Características fisicoquímicas del suelo.

3.1.1.1 Características físicas del suelo.

Las propiedades específicas de un suelo a considerar en condiciones húmedas y secas son la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la retención de nutrimentos de las plantas, etc. Están íntimamente conectados con las características físicas del suelo (Porta, et al, 2003).

Textura. La textura de un suelo está determinada por las cantidades de partículas minerales inorgánicas (medidas como porcentajes en peso) de diferentes tamaños o granulometrías (arena, limo y arcilla) que contiene. La proporción y magnitud de muchas reacciones físicas, químicas y biológicas en los suelos están gobernadas por la textura, debido a que ésta determina el tamaño de la superficie de contacto del grano, sobre la cual ocurren las reacciones (Huerta, 2010).

Las partículas de arena son comparativamente de tamaño grande (0.05-2mm) y, por lo tanto, exponen una superficie pequeña comparada con la expuesta por un peso igual de partículas de arcilla o de limo. La función que ésta tiene en las actividades físicas y químicas de un suelo es casi insignificante. Las arenas aumentan el tamaño de los espacios de los poros entre las partículas, facilitando el movimiento del aire y del agua de drenaje.

El tamaño de partícula de los limos va de 0.002 a 0.05mm, tiene una velocidad de intemperización más rápida y una liberación de nutrimentos solubles para el crecimiento vegetal mayor que la arena. Los suelos limosos tienen gran capacidad para retener agua disponible para el crecimiento vegetal.

El tamaño de partícula de los suelos arcillosos es menor a 0.002mm; tienen la capacidad de retener agua contra la fuerza de gravedad. La fracción de arcilla, en la mayoría de los suelos, está compuesta de minerales que difieren grandemente en composición y propiedades en comparación con la arena y el limo. El componente arcilloso de un suelo es fundamental para determinar muchas características de éste, debido a que las partículas de arcilla tienen un área superficial mayor. Cada partícula de arcilla tiene cargas eléctricas negativas en su superficie externa que atraen y retienen cationes de manera reversible. Muchos cationes como potasio (K^+) y magnesio (Mg^{2+}), son esenciales para el crecimiento vegetal y son retenidos en el suelo por las partículas de arcilla (Huerta, 2010).

Humedad. La humedad del suelo influye en muchas propiedades físicas, tales como la densidad aparente, espacio poroso, compactación, penetrabilidad, resistencia al corte, consistencia, succión total de agua y color del suelo. La humedad del suelo es muy dinámica y depende del clima, vegetación, profundidad del suelo, y de las características y condiciones físicas del perfil. Se entiende por humedad del suelo a la masa de agua contenida por unidad de masa de sólidos del suelo. La humedad del suelo se puede expresar volumétricamente, con base en el volumen. La humedad volumétrica, generalmente, se calcula como un porcentaje del volumen total del suelo (Flores y Alcalá, 2013). La importancia del agua en el suelo recae en que transporta en disolución, nutrientes, sales solubles, compuestos orgánicos solubles y contaminantes, así como materia en suspensión, mismos que representan un efecto sobre la productividad de un suelo.

3.1.1.2 Características químicas del suelo

La química de suelo es la ciencia que estudia las propiedades químicas del suelo y de sus componentes inorgánicos y orgánicos, así como las reacciones entre la materia y los procesos de su transformación dentro de esa mezcla que es la matriz del suelo (Huerta, 2010).

pH. El pH (potencial de hidrógeno) determina el grado de adsorción de iones (H^+) por las partículas del suelo e indica si un suelo está ácido, neutro o alcalino; además de ser una variable que influye en un amplio espectro de sus propiedades biológicas y químicas. Es el indicador principal en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en su solubilidad, movilidad y disponibilidad. De igual manera, el pH del suelo influye sobre muchos

contaminantes afectando su tasa de descomposición biogeoquímica, solubilidad y su adsorción (FAO, 2014).

Salinidad. Se refiere a la acumulación de sales solubles en agua dentro del suelo y se puede medir a través de la conductividad eléctrica (CE). Las sales más comunes se encuentran en combinaciones de los cationes de sodio, calcio, magnesio y potasio con los aniones de cloro, sulfato y carbonatos. Se analiza a 25°C y la unidad que se utiliza es deciSiemens por metro (dS/m). La salinización elevada en el suelo causada, por ejemplo, por sobreexplotación, lleva a la degradación de los suelos y la vegetación (FAO, 2014).

3.1.2 Características biológicas del suelo.

Estas características atañen las funciones del suelo, como la tasa de respiración, de descomposición, cantidad y formas de los nutrientes y productividad del suelo. Cabe mencionar que la microbiota edáfica es parte primordial de las características biológicas de un suelo, ya que aporta al suelo sus funciones enzimáticas participativas en los ciclos biogeoquímicos.

Materia orgánica. La vegetación fija el carbono de la atmósfera por fotosíntesis transportándolo a materia viva de las plantas. También microorganismos autótrofos lo fijan a biomasa microbiana. La materia orgánica, entonces, se compone mayoritariamente de los restos de tejidos vegetales, además de la biomasa microbiana y en segundo plano, de los residuos animales. Los organismos del suelo descomponen esta materia transformándola a Materia Orgánica del suelo (MO). La MO se encuentra en diferentes grados de descomposición y se distingue en diversas fracciones como lábiles (compuestas de hidratos de carbono, ligninas, proteínas, taninos, ácidos grasos) o fracciones húmicas (ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas), las cuales permiten el secuestro del carbono. El carbono se libera por los organismos vivos y se vuelve a emitir a la atmósfera como producto de la respiración de los organismos (organismos del suelo y raíces) en forma de dióxido de carbono o metano, este último especialmente en condiciones de encharcamiento del suelo produciendo anaerobiosis (FAO, 2014).

La MO es soporte de la estructura del suelo, lo que evita que las partículas se disgreguen, manteniendo la macroporosidad y con ello la capacidad de aireación, la retención de agua,

de nutrientes y minerales altamente aprovechables a las plantas por estar a bajas tensiones. Estos aspectos promueven el aumento de la fertilidad del suelo, reducción de la erosión, aumento de la infiltración de agua, aumento de la actividad biológica y por consiguiente, mayor productividad primaria del suelo (Acevedo, 2006).

Nitrógeno del suelo. El nitrógeno del suelo es uno de los elementos de mayor importancia para la nutrición de las plantas y más ampliamente distribuido en la naturaleza. Se asimila por las plantas en forma catiónica de amonio NH_4^+ o aniónica de nitrato NO_3^- . A pesar de su amplia distribución en la naturaleza, se encuentra en forma orgánica por lo que no se pueden asimilar directamente. Además existen las formas gaseosas del N pero son muy pequeñas y difíciles de detectar como óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2), amoníaco (NH_3) y nitrógeno molecular presente en la atmósfera del suelo (N_2) (FAO, 2014).

Relación Carbono/Nitrógeno. Los microorganismos del suelo necesitan un balance de nutrientes para formar sus células y obtener energía, principalmente carbono y nitrógeno. El carbono es necesario para crecer y multiplicarse y el nitrógeno es esencial para sintetizar componentes celulares tales como aminoácidos, enzimas y DNA. En promedio, los microorganismos deben incorporar en sus células cerca de ocho partes de carbono por cada una de nitrógeno. Debido a que sólo una tercera parte del carbono metabolizado se incorpora a las células (el resto se pierde en la respiración en forma de CO_2), los organismos necesitan 1g de N por cada 24 g de C en su “alimento”. Si la relación de C/N excede a 25:1, los microorganismos demandarán nitrógeno y terminarán por agotarlo afectando directamente el crecimiento de la vegetación (Brady y Weil, 2008); y cuando no hay suficiente carbono para convertir en proteínas el nitrógeno disponible, los organismos hacen uso total del carbono y eliminan el exceso de nitrógeno en forma de amoníaco, el cual se escapa y se pierde en la atmósfera (Jiménez, 2012).

3.2 Humedales

3.2.1 Definición, clasificación y función

3.2.1.1 Definición

Los humedales son “las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua

marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros" (¿Qué es un humedal?, s. f.). Son ecosistemas extremadamente dinámicos, capaces de cambiar en sus características, en forma anual, estacional e incluso día a día. Además se presentan en una amplia gama de tamaños, clima, tipos de suelos, profundidades, química del agua, comunidades vegetales, especies de plantas y animales, es por ello que son más difíciles de clasificar que la mayoría de las unidades ecológicas del paisaje (García, 2006).

3.2.1.2 Clasificación

En general, se reconocen varios tipos de humedales principales. Su clasificación consiste en el reconocimiento y ubicación en un marco lógico basado en sus características geomorfológicas, fisiográficas, hidrológicas, geoquímicas y de vegetación, mostrando cinco tipos principales (García, 2006; sobre los Humedales, 2004):

- *marinos* (humedales costeros, inclusive lagunas costeras, costas rocosas y arrecifes de coral);
- *estuarinos* (incluidos deltas, marismas de marea y manglares);
- *lacustres* (humedales asociados con lagos);
- *ribereños* (humedales adyacentes a ríos y arroyos); y
- *palustres* (es decir, “pantanosos” – marismas, pantanos y ciénagas).

Todos comparten una propiedad primordial: el agua juega un rol fundamental en el ecosistema, en la determinación de su estructura y funciones ecológicas.

3.2.1.3 Función y servicios ambientales

Las características de estos ecosistemas se pueden agrupar en componentes, funciones y propiedades. Los componentes son los rasgos bióticos y no bióticos. Abarcan el suelo, el agua, y la biota en general. Las interacciones de estos componentes se expresan en funciones, con inclusión del ciclo de nutrientes, el intercambio de aguas superficiales y subterráneas, así como entre la superficie y la atmósfera. Además, el sistema tiene propiedades, como la diversidad de especies (Barbier, et al., 1997). Los componentes de los humedales aportan muchos servicios de gran valor. En la siguiente tabla se describen los servicios ambientales que proporcionan los humedales.

Tabla 1. Servicios ambientales que proporcionan los humedales continentales. (García, 2006; Keddy, 2010; “Política Nacional de Humedales”, s. f.)

Servicios de apoyo	
Retención y exportación de sedimentos y nutrientes	<i>La vegetación de humedales tiene la capacidad de absorber, almacenar y reciclar nutrientes, materia orgánica y desechos antropogénicos disueltos en el agua y en el suelo. Los nutrientes son liberados de vuelta al ecosistema cuando la planta muere, cuando tira sus hojas o es consumida. Los manglares, los pastos marinos y las selvas inundables se consideran entre los más productivos. Mantienen la fertilidad del suelo y evitan su erosión. Productores importantes de biomasa.</i>
Reservorio	<i>Los diferentes tipos de humedales que existen mantienen diversas comunidades vegetales, múltiples micro- y macroinvertebrados, así como vertebrados. La proporción de especies endémicas es una de las características más importantes de los humedales.</i>
Diversidad biológica (y genética)	<i>Cuanto mayor es la biodiversidad, mayor probabilidad de estabilidad del ecosistema, así sustentan una importante diversidad biológica; son lugar de anidación y reproducción de muchas especies terrestres y acuáticas.</i>
Servicios de regulación	
Control de inundaciones	<i>Los humedales que se encuentran en llanuras de inundación, como lagos y pantanos de agua dulce, son reservorios de agua de gran valor. Estos humedales, así como los humedales continentales cercanos a las riberas de los ríos funcionan como un almacén natural de agua, lo que permite distribuir el exceso de agua en un área mayor y a su vez, reduce la profundidad y velocidad a la que se transporta el agua excedente de los ríos y escurrimientos durante la temporada de lluvias. Con ello, retienen sedimentos que, de otra manera, llegan a los ríos, azolvándolos y favoreciendo que se desborden. Los suelos de los popales y de las selvas inundables son capaces de almacenar siete veces su peso en agua.</i>
Control de enfermedades	<i>Los humedales actúan como barreras físicas y biológicas que regulan y controlan el desplazamiento de enfermedades.</i>
Recarga o reposición de agua subterránea	<i>Cuando los humedales se encuentran sobre suelos permeables ubicados encima de los acuíferos, el agua del humedal puede filtrarse hacia el acuífero subyacente, desempeñando un papel fundamental para su recarga.</i>
Depuración de agua	<i>La vegetación y otros organismos que forman parte de los humedales funcionan como filtros biológicos que tienen la capacidad de retener sedimentos y procesar contaminantes y sustancias tóxicas de las aguas naturales y residuales.</i>
Protección ante eventos extremos hidrometeorológicos	<i>Los humedales actúan como barreras que protegen del efecto de tormentas y huracanes, debido a que las raíces de la vegetación de humedales refuerzan la erosión provocada por el viento.</i>

<p>Mitigación y adaptación ante los efectos del cambio climático – regulación de GEI</p>	<p>Los humedales que se encuentran en buen estado, tienen un papel fundamental en la respuesta ante el cambio climático y la regulación de los procesos climáticos naturales (mediante el ciclo del agua, el mantenimiento de la biodiversidad, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la amortiguación de los impactos).</p> <p>Regulación importante del ciclo del carbono: liberan continuamente metano a la atmósfera, el cual mantiene la concentración de oxígeno molecular atmosférico en un nivel de ~21 %. Una molécula de metano transforma rápidamente dos moléculas de oxígeno en una de dióxido de carbono y dos de agua. Además, funcionan como sumideros de carbón, lo que contribuye a reducir los niveles de gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera.</p>
<p>Servicio de aprovisionamiento</p>	
<p>Provisión de productos</p>	<p>Los humedales proveen al ser humano una diversidad de productos de origen mineral, vegetal y animal, cuya explotación varía en intensidad y escala, desde usos domésticos hasta un aprovechamiento intensivo para comercialización.</p> <p>Los productos provenientes de humedales incluyen alimentos básicos, como alimentos de origen agrícola; de origen animal, principalmente de pesquerías y aves acuáticas. Cerca de dos terceras partes de los peces de valor comercial dependen en alguna etapa de su ciclo de vida de los humedales, en especial aquellos con manglares, los estuarios y otros humedales marinos.</p> <p>Materiales de construcción: madera y hojas para techar. Materiales de uso doméstico: leña, aceite vegetal, sal, plantas medicinales, fibras para textiles (tallos y hojas para tejidos) y forraje para animales, medicinas tradicionales (por ejemplo de la corteza de mangle), colorantes y taninos. Recursos energéticos como la turba.</p>
<p>Tierras agrícolas fértiles</p>	<p>La inundación periódica de las praderas de aluvión y otros humedales promueve la fertilidad del suelo y mantiene la de las tierras ribereñas. Así como los restos de plantas y animales se almacenan creando una fuente importante de materia orgánica y suelo nutritivo.</p>
<p>Servicios culturales</p>	
<p>Recreación y turismo</p>	<p>La diversidad biológica de los humedales y su valor paisajístico son atractivos para el desarrollo de diversos usos recreativos (como el ecoturismo o turismo de naturaleza) que pueden generar ingresos a comunidades locales y a nivel nacional.</p>
<p>Valores culturales</p>	<p>Los humedales pueden estar relacionados con los valores culturales, que incluyen aspectos como las áreas de asentamiento, la construcción de vivienda y edificios tradicionales, la realización de actividades primarias, el uso culinario de plantas y animales, elaboración de productos artesanales y herramientas, la recreación, el conocimiento, los sistemas de creencias y las prácticas sociales.</p>
<p>Investigación científica</p>	<p>Fomento de la comunicación e intercambio de información sobre la función, manejo y conservación de los humedales. Elaboración de programas de inventario, monitoreo, capacitación, educación y concientización del público; y preparación de planes de manejo/gestión integrados que abarquen los humedales en todos sus aspectos y sus relaciones con las actividades antropogénicas.</p>

3.2.2 Tipo de suelo en humedales tropicales

Los suelos hídricos son uno de los tres componentes principales de los humedales, en conjunto con las plantas macrófitas e hidrófitas, y el agua. En climas tropicales estos suelos presentan una dinámica actividad microbiana ya que las temperaturas son ideales para su desarrollo.

Los suelos hídricos son aquellos formados bajo condiciones de saturación de agua, por un período suficientemente largo (más de 5% de la temporada de crecimiento), de tal manera que desarrollan condiciones reductoras (Hernández, 2010). Las características específicas de este tipo de suelo se ilustran en la Figura 1, en donde las principales diferencias son la presencia/ausencia de oxígeno (los espacios intersticiales del suelo se saturan de agua y el oxígeno es rápidamente consumido por la respiración de microorganismos y por las raíces de las plantas). En un suelo hídrico la oxidación de la materia orgánica cesa provocando su acumulación; la lixiviación es escasa y emisión de metano, amonio y sulfuro de hierro (por actividad microbiana). En general, las condiciones de inundación intermitente le confiere a los humedales condiciones de reducción y oxidación (potencial redox), por lo que estos ecosistemas desempeñan un papel importante en la transformación de elementos de los ciclos biogeoquímicos (Keddy, 2010).

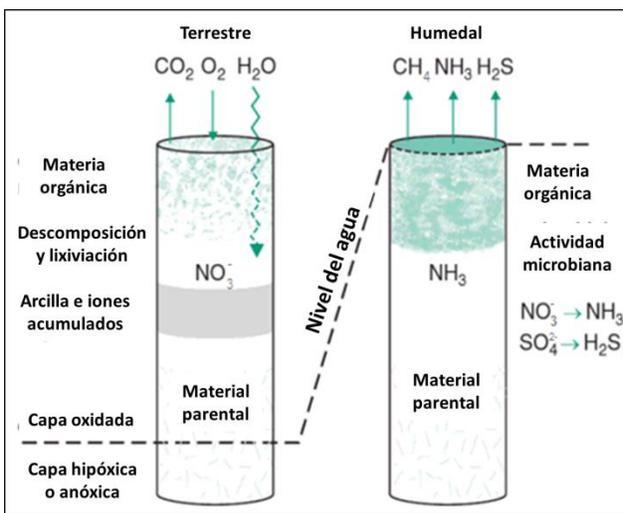


Figura 1. Perfil de un suelo terrestre típico comparado con el de un humedal. (Fuente: modificado de Keddy (2010)).

3.2.3 Ciclos biogeoquímicos en los humedales

Al transporte y la transformación de los elementos químicos en los ecosistemas, se conoce como ciclos biogeoquímicos y son influidos por procesos físicos, químicos y biológicos. Muchos de los elementos químicos son constantemente consumidos, excretados y/o transformados por los seres vivos, principalmente microorganismos. Esto aplica para aquellos elementos que constituyen una parte significativa de la biomasa en el planeta (carbono, nitrógeno, azufre y fósforo). (Brady y Weil, 2008; Oren, 2008).

3.2.3.1 Ciclo del carbono (generalidades)

En principio, si dominan condiciones aerobias, el dióxido de carbono CO_2 presente en la atmósfera es absorbido por las plantas, las cianobacterias y microalgas para ser transformado en carbohidratos mediante la *fotosíntesis* oxigénica ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{carbohidratos} + \text{O}_2$). Estos carbohidratos permiten la formación de componentes orgánicos en la biomasa del organismo. También el CO_2 puede ser fijado por fotosíntesis anoxigénica (bacterias fotosintéticas anaerobias rojas o verdes) o por quimiosíntesis (microorganismos autotrófos) (Berlanga, 2001). El material orgánico obtenido es sujeto a los procesos de degradación, los cuales mediante *respiración* aerobia, retorna el carbono del suelo a la atmósfera como CO_2 . Sin embargo, en un humedal también prevalecen condiciones anóxicas que llevan al carbono por distintas vías (Tan, 2009; Mitsch y Gosselink, 2015).

Fermentación. La fermentación de la materia orgánica ocurre cuando la MO se degrada en varios productos orgánicos tales como: ácidos orgánicos o alcoholes en anaerobiosis, mediante la participación de microorganismos anaerobios facultativos, sin intervención de la cadena respiratoria (Mitsch y Gosselink, 2015). Por lo tanto, el aporte de energía para los microorganismos es menor que en una respiración.

Metanogénesis. Es una respiración anaerobia. Ocurre cuando arqueas metanógenas utilizan el CO_2 o acetato como aceptor de electrones para la producción de metano. Este proceso requiere extremas condiciones reductoras (Mitsch y Gosselink, 2015).

Oxidación de metano. Ocurre en presencia moderada de oxígeno (oxidación aerobia) y en ausencia de oxígeno (oxidación anaerobia) por diferentes grupos de bacterias respectivamente, donde el compuesto que se obtiene al final es CO_2 . Las bacterias que

oxidan el CH₄ son llamadas bacterias o arqueas metanotróficas y son abundantes en la columna de agua, en la interfase aeróbica del sedimento y agua, así como en la zona de la rizósfera. La oxidación anaerobia, se realiza principalmente en los humedales por varios grupos de Archaea, en la zona de transición de reducción de sulfato (con agua salobre) o reducción del nitrato (con agua dulce) y metanogénesis.

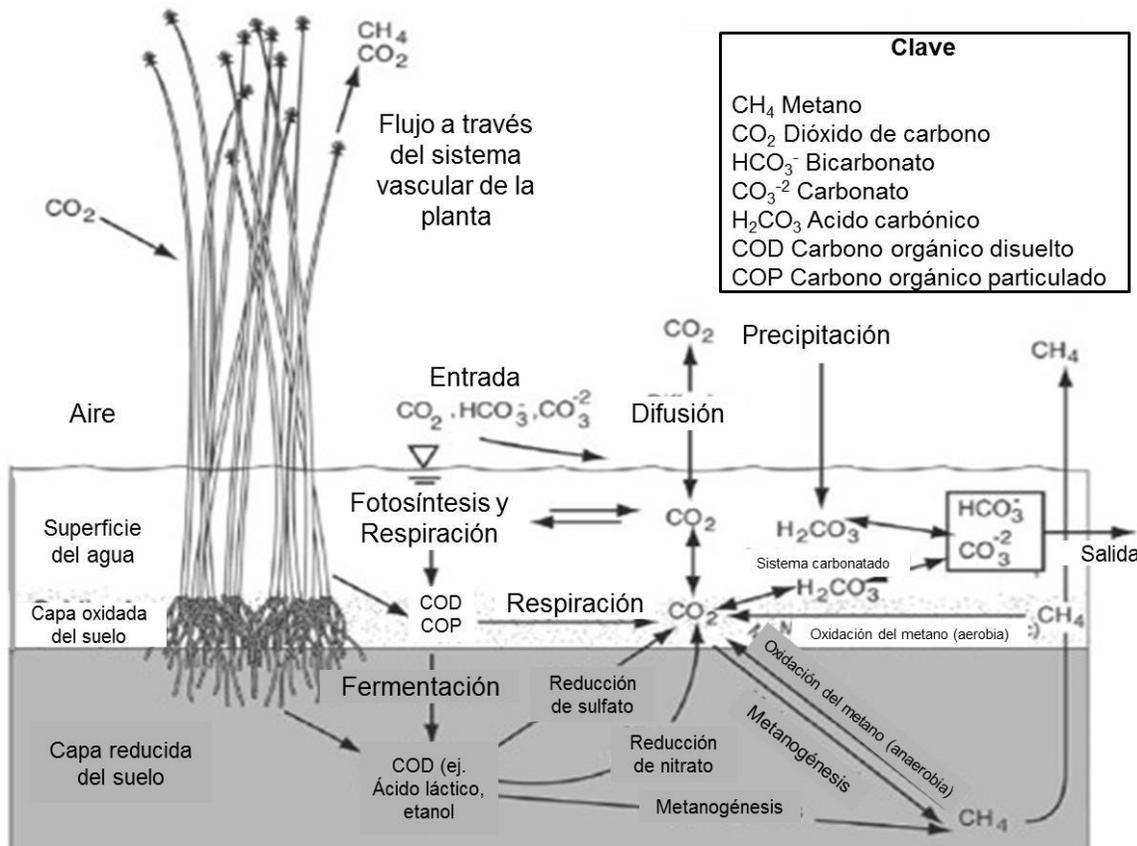


Figura 2. Ciclo del carbono en los humedales. Las principales rutas ilustradas son la fotosíntesis, fermentación, metanogénesis y oxidación del metano (aerobia y anaerobia) (Tomado de Mitsch y Gosselink, 2015).

El ciclo del carbono deja al descubierto que el suelo es un productor natural de gases de efecto invernadero tales como el CH₄ y CO₂. Sin embargo, la cantidad liberada de estos gases a través de la descomposición natural es mínima en comparación con la producida por actividades antropogénicas como la quema de combustibles provenientes de automóviles, la industrial, incendios forestales; o bien cuando ecosistemas naturales como los humedales son degradados por contaminación o cambio de uso de suelo (Tan, 2009).

3.2.3.2 Ciclo del nitrógeno (generalidades)

El nitrógeno gaseoso (N_2) constituye el 79% de los gases en la atmósfera, donde se encuentra su depósito más grande. De forma natural sólo ciertas bacterias, el vulcanismo y los rayos pueden convertir el N_2 en formas capaces de ingresar en las redes tróficas. De todos los nutrientes requeridos para el crecimiento vegetal, el N suele ser el más escaso y resulta ser esencial para el desarrollo de las plantas (Márquez, 2009): en los suelos inundados, es uno de los nutrientes más limitantes.

El ciclo del nitrógeno comienza cuando el N_2 se reduce a amonio (NH_4^+), a este proceso se le llama *fijación biológica del nitrógeno*. En los humedales, ocurre en el agua superficial, en las capas aerobias y anaerobias del suelo, en las hojas, tallos y rizósfera oxidante de las plantas. En condiciones reductoras, se lleva a cabo por bacterias y algas que tienen la enzima nitrogenasa; y en zonas aerobias, por bacterias simbiotes o no simbiotes del género *Rhizobium* o *Bradyrhizobium*, o por ciertos actinomicetos (Mitsch y Gosselink, 2015).

Mineralización del nitrógeno. Se refiere a las reacciones biológicas que transforman el nitrógeno orgánico (N_{org}) encontrado en el suelo como resultado de la descomposición de MO a amonio. El N_{org} se encuentra en la forma de compuestos orgánicos complejos como proteínas o ácidos nucleicos y son degradados por microorganismos que los utilizan para elaborar sus propios componentes celulares y liberan el exceso de nitrógeno en forma de amoniaco (NH_3) o amonio (NH_4^+), este proceso es mejor conocido como *amonificación*. Una vez formado el amonio puede tomar varias rutas: i) puede ser absorbido por las plantas a través de las raíces (*asimilación*), ii) ser utilizado por microorganismos anaerobios para formar de nuevo a MO, o ser iii) convertido a nitrato (*nitrificación*) (Jiménez, 2012; Mitsch y Gosselink, 2015).

Nitrificación. Es un proceso respiratorio aerobio en el cual el amoniaco y los iones amonio son oxidados en dos pasos, principalmente por microorganismos del género *Nitrosomonas* sp., a nitrito (NO_2^-) y éste es transformado a nitrato (NO_3^-) por *Nitrobacter* sp.. Sin embargo, en los humedales predominan las capas de suelo anaerobias y el amonio puede ser oxidado anaeróticamente por las bacterias Anammox (Oxidantes anaerobias del Amonio, principalmente de tipo Planctomycetes) hasta el N_2 . No obstante, el gradiente entre altas y

bajas concentraciones de amonio, presentes en las capas inferiores reducidas y las capas superiores oxidadas del suelo respectivamente, promueve una difusión ascendente del amonio (aunque lenta) a zonas oxigenadas del suelo. El nitrato y el amonio son las únicas formas asimilables por las plantas (Jiménez, 2012; Mitsch y Gosselink, 2015).

Desnitrificación. Ocurre cuando el nitrato se reduce generando gases como óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N₂O) y dinitrógeno (N₂) mediante la intervención de microorganismos desnitrificantes –en su mayoría Proteobacterias– bajo condiciones anaerobias, donde el suelo se encuentra saturado por agua. Dicha reacción es disimilatoria, ya que el nitrógeno no está siendo integrado como biomasa celular. Es una vía de pérdida del nitrógeno por ser productos gaseosos, lo que representa un problema para las plantas y otros organismos del suelo. Sin embargo, para el tratamiento de aguas es beneficiosa ya que convierte NO₃⁻ en N₂ (Jiménez, 2012). La reacción puede resumirse de la siguiente manera:



Como se observa, el N₂O se puede formar como producto de la desnitrificación. Sin embargo, también ocurre en la nitrificación, ya que se produce hidroxilamina (NH₂OH) como intermediario entre la oxidación del NH₃ y NO₂, el N₂O se produce como un bioproducto de la oxidación del NH₃ (Márquez, 2009). El N₂O es un gas que tiene implicaciones ambientales, ya que produce lluvia ácida, es un gas de efecto invernadero y contribuye con las reacciones que destruyen la capa de ozono (Tan, 2009).

Los humedales naturales ocupan sólo el 5-6% de la superficie terrestre (Hernández, 2010; Mitsch y Gosselink, 2015), pero a pesar de ello desempeñan un papel importante en la regulación del clima a través del almacenamiento de carbono, la producción de metano y óxido nitroso. La fijación de carbono en los humedales bajo condiciones anaerobias ofrece las condiciones únicas para el almacenamiento de carbono a largo plazo y en gran medida. Sin embargo, este proceso de captura está íntimamente ligado a la emisión de metano (Whiting y Chanton, 2001). La emisión de N₂O, por su parte, está condicionada a medios anaerobios y a la cantidad de nitrógeno que quede disponible, ya que gran parte se asimila por microorganismos y plantas, se lixivia o volatiliza.

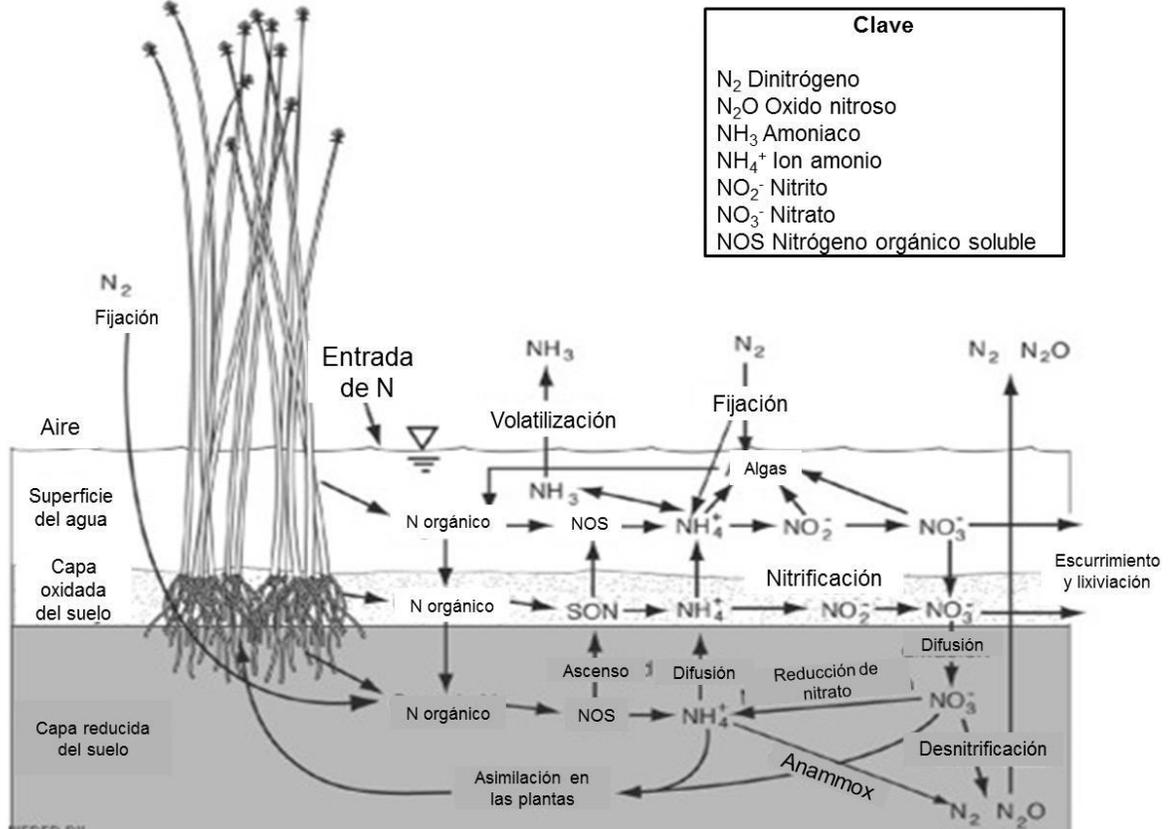


Figura 3. Ciclo del nitrógeno en los humedales (Tomado de Mitsch y Gosselink, 2015). (Anammox, Oxidación anaerobia del amonio).

3.2.3.3 Gases de efecto invernadero como indicadores de calidad del suelo.

Calidad del suelo

El concepto de la calidad del suelo se entiende como la capacidad del mismo para cumplir con sus funciones (en general de producción biológica, protección ambiental y mantenimiento de la salud humana). La calidad de un *suelo natural* contempla funciones tales como productividad biológica, soporte para el crecimiento de la cobertura vegetal, regulación y almacenamiento del flujo hídrico en el medio ambiente y regulación del ciclo biogeoquímico de elementos. Es por esto, que el mantenimiento de la calidad del suelo es crítico para un ambiente sostenible. De los ciclos biogeoquímicos, principalmente del carbono y nitrógeno, derivan procesos y elementos que circulan del suelo al aire, al agua y entre los seres vivos; durante dichos procesos pueden sufrir alteraciones por contaminantes generados por el

hombre, que se pueden ver reflejadas en la tasa de emisión de gases provenientes del suelo: entre ellos CO₂, CH₄ y N₂O (Miralles, 2006; Guerra, 2009; Navarrete, et al., 2011).

La evaluación de la calidad del suelo es un proceso de conocimiento de la dinámica que presentan las propiedades edáficas. Dicho conocimiento es eficaz para evaluar la sustentabilidad de las prácticas de manejo del suelo (Navarrete, et al., 2011).

La calidad del suelo debe ser evaluada basándose en su *funcionalidad* específica, dentro de las cuales destacan por ejemplo, la regulación de los ciclos biogeoquímicos. Para esto, se pueden utilizar indicadores que reflejen cambios en la capacidad del suelo para funcionar. Un *indicador* es una variable o suma de variables que proporcionan información de manera simplificada sobre una situación compleja, permitiendo evaluar su evolución a lo largo del tiempo y la comparación entre espacios; de manera más específica, un *indicador ambiental* nos arrojará información sobre un fenómeno ambiental complejo, permitirá conocer y evaluar el estado y la variación de la calidad ambiental (Uribeondo y Cañas, 2014).

Los indicadores ambientales son estadísticas claves seleccionadas que representan o resumen un aspecto significativo del estado del ambiente, la sostenibilidad de los recursos naturales y las actividades humanas relacionadas. Enfatizan tendencias en los cambios ambientales, los factores de estrés que causan esos cambios, cómo los ecosistemas y sus componentes están relacionando a dichos cambios, y las respuestas de la sociedad para prevenir, reducir o aminorar los factores de estrés.

(Uribeondo y Cañas, 2014).

Dichos indicadores deberán ser sensibles al cambio, un cambio que ocurra en respuesta al uso o manejo del suelo, así por ejemplo, los cambios en el contenido de materia orgánica pueden indicar cambios en la productividad del suelo (USDA-NRSC-SQI, 2001).

Los indicadores de calidad del suelo deben cumplir con las siguientes condiciones (Navarrete, et al., 2011):

- Que sean fáciles de medir.
- Que midan los cambios en las funciones del suelo.
- Que abarquen las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

- Que sean accesibles a los evaluadores y aplicables en condiciones de campo.
- Que sean sensibles a las variaciones climáticas y de manejo.

Asimismo, los indicadores de calidad del suelo deben permitir (Navarrete, et al., 2011):

- Analizar la situación actual del suelo con respecto a la funcionalidad específica que se evalúa.
- Identificar los puntos críticos respecto de su sustentabilidad.
- Prever los impactos de una intervención y minimizarlos.
- Ayudar en la toma de decisiones.

Las propiedades biológicas del suelo son muy dinámicas por lo que tienen la ventaja de servir de señales tempranas de degradación o de mejoría del suelo. Las propiedades biológicas y bioquímicas (respiración del suelo, biomasa microbiana, microorganismos y otros) son más sensibles y son parámetros valiosos en la interpretación de la dinámica de la materia orgánica y los procesos de transformación de los residuos orgánicos. Además, dan rápida respuesta a los cambios en el manejo del suelo, son sensibles al estrés ambiental y son factibles de medir (Navarrete, et al., 2011).

Gases de efecto invernadero como indicadores de calidad del suelo

La emisión de gases como CO₂, CH₄ y N₂O ocurre de manera natural. Sin embargo, está documentado que han incrementado en gran medida debido a actividades antropogénicas que van desde la quema de combustibles y cambio de uso de suelo (actividades agropecuarias); cuyas tasas de producción rebasan por mucho las naturales (Tabla 2). Este aumento de emisiones refleja una alteración en la regulación de los ciclos biogeoquímicos como función del suelo (IPCC, 2007; Collins, et al., 2013) y con ello pérdida de otras funciones tales como la producción de biomasa o secuestro de carbono; además dicha emisión está sujeta a cambios climáticos como son el estiaje o temporada de lluvias. Es así que, a través de la comparación de la estimación de emisión de gases de fuentes naturales contra fuentes naturales alteradas o bien, antropogénicas, la estimación de la tasa de producción de gases es una herramienta que puede fungir como indicador y permitir evaluar si existen procesos que están alterando la calidad del suelo, ya que cuando los humedales

son perturbados o sobrecargados de nutrientes reflejan una emisión de gases diferente a la emitida naturalmente.

Tabla 2. Fuente de emisiones globales de GEI (flujo de producción anual global (Tg/ año⁻¹) (Mosier y Freney, s. f; Jallow, 1995; Bouwman, 1996; Strömberg, 1998; Bouwman, et al., 2002; Ding, et al., 2004; Abril, 2005; Oenema, et al., 2005; Denman, et al., 2007; Marani y Alvalá, 2007; EPA, 2010; Laanbroek, 2010; Chhabra, et al., 2013; Liengaard, et al., 2012; Yang, et al., 2013; Ortiz-Cornejo, et al., 2015).

	CO ₂ ^a	CH ₄ ^b	N ₂ O ^c
Actividad agrícola	1.7 Ej. México. 4.4e ⁻¹⁰ – 2.2e ⁻⁶ d	Global: 39 – 112 Ej. China: 8.11; 18.23	Global: 2.8 – 3.5
Actividad ganadera	-----	Global: 81- 91 Ej. India: 6.9 – 10.4	Global: 1.5
Humedales	Ej. Suecia: 6 ¹ , China: 3.15e ⁻⁶ , EUA: 0.0004	Global: 100 – 231 Trópico: 66 Ej. Brasil: 3.3, China: 0.5; 1.76; 2.69	Global: 0.03 – 3 Trópicos: 3 Ej. Brasil: 0.3

a. El IPCC (1996) estima que el 80 a 85% del CO₂ emitido globalmente a la atmósfera proviene del uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural) para producir energía que a su vez se utiliza para transporte, calor, y generación de electricidad. Otra fuente importante proviene de los cambios en el uso de la tierra, fundamentalmente la deforestación (15 y el 20%). Se considera que los sistemas agropecuario o forestal secuestran más carbono (como CO₂) del que emiten (Baethgen y Martino, 2000). Los humedales, por su parte, son considerados como sumideros de CO₂, ya que este gas es tomado de la atmósfera y convertido a C orgánico por las plantas. Se ha estimado que el C orgánico en suelos del mundo es de 1500 Pg (Pg = 10¹⁵ g), cerca de 2 a 5 veces más que en la atmósfera y cerca de 2.7 veces más que la reserva biótica que comprende a las plantas de la tierra (Whiting y Chanton, 2001; Hernández, 2010).

¹. 6 tg/año⁻¹ contribuye con menos del 0.05% de CO₂ a la atmósfera ya que una estimación del flujo de CO₂/año⁻¹ en el 2011 alcanzó la cifra de 13.5 Pg C/año⁻¹ (Collins, et al., 2013).

b. La principal fuente natural de CH₄ a la atmósfera son los humedales (25%), fuentes naturales adicionales incluyen las termitas, los océanos, la vegetación (8%). Las actividades humanas que producen CH₄ incluyen las actividades agropecuarias fermentación entérica y producción de arroz (30%) y el resto proviene de la producción de energía a partir de los sistemas energéticos basados en petróleo y gas natural y la descomposición de basura. (Denman, et al., 2007; Mitsch y Gosselink, 2015).

c. Se estima que un 70% del total de emisiones de N₂O en el mundo provienen de los suelos de regiones agropecuarias (Houghton, 1996). El resto incluye fuentes naturales (océano, oxidación química en la atmósfera y del suelo de ecosistemas acuáticos naturales).

d. Los estudios sobre GEI *in situ* en humedales naturales tropicales son escasos (Sjögersten, et al., 2014). En México sólo se encontró un estudio sobre emisión de GEI del suelo que se realizó en chinampas de Xochimilco (Ortiz-Cornejo, et al., 2015). De hecho, esta tesis sería el primero realizado *in situ* en humedales naturales tropicales.

El CO₂, CH₄ y N₂O son gases que absorben radiación de longitud de onda larga y causan que la Tierra se caliente (Tabla 3) (Mitsch y Gosselink, 2015), por lo cual son conocidos como gases de efecto invernadero (GEI). Los GEI son aquéllos que en la atmósfera regulan

naturalmente la radiación retenida sobre la emitida por la superficie terrestre; al retener el calor, producen el fenómeno conocido como efecto invernadero (IPCC, 2007).

Tabla 3. Poder de calentamiento de los principales GEI. (Tomado de IPCC, 2007).

	Poder de calentamiento (en un periodo de 100 años)	Tiempo de vida (años)	Contribución al calentamiento global (%)
CO₂	1	5-200	60
CH₄	25	12	20
N₂O	298	114	6

3.2.4 Contaminación-perturbación por actividades antropogénicas

Desafortunadamente, a pesar de los múltiples servicios ambientales que brindan los humedales, éstos siguen figurando entre los ecosistemas más amenazados del mundo, sobre todo a causa de la continua desecación, conversión, contaminación (por eliminación de desechos y sobrepastoreo), sobreexplotación de sus recursos y modificaciones hidrológicas (modificación del flujo, cantidad o calidad del agua) (sobre los Humedales, 2004; García, 2006; “Política Nacional de Humedales”, s. f.). De hecho, se estima que globalmente se han perdido el 50% de ellos (Mitsch y Gosselink, 2015) y en México, según Landgrave y Moreno-Casasola (2012), de un total 128,123.91 km² de humedales potenciales (6.52% del territorio total del país) se ha perdido el 62.1% (69,684 km²). En ese mismo año la CONABIO lanzó una publicación en la cual se reconoce la inminente necesidad de incrementar esfuerzos para proteger, rehabilitar y manejar sustentablemente los ambientes acuáticos continentales y su biodiversidad junto con el recurso hídrico de manera integral (CONABIO, 2012).

La opinión de que los humedales son tierras inservibles, se origina de la ignorancia o apreciaciones erróneas del valor de sus bienes y servicios, ha redundado en su conversión para destinarlos a usos agropecuarios, industriales, urbanos, turísticos o acuícolas (Barbier, et al., 1997; “Política Nacional de Humedales”, s. f.).

3.2.4.1 Actividad agrícola y ganadera (Efectos en el suelo y emisión de GEI – Plaguicidas, fertilizantes, emisiones de metano y óxido nitroso)

Agricultura

Desde los inicios de la actividad agrícola, los humedales ribereños han sido reconocidos como zonas terrestres valiosas para la producción de alimentos y forraje, debido a los suelos fértiles que tienen como consecuencia de la normal deposición de sedimentos durante los eventos de inundación. En el curso de la historia, los humedales han sido reclamados para la agricultura en muchas partes del mundo, mismos que han manifestado perder gran parte de su carácter original, dando lugar a una disminución de su biodiversidad y a la reducción del cumplimiento de sus funciones originales. Y aunque la protección de los humedales es oficialmente una prioridad, las amenazas de ser drenados, cambio de uso de suelo, contaminación por adición de fertilizantes (que comprometen la calidad del suelo, por modificar algunas de sus propiedades, y la de aguas subterráneas por ser lixiviados) y pesticidas continúa latente (Verhoeven y Setter, 2010).

Está demostrado que la agricultura libera cantidades significativas de CO₂, CH₄ y N₂O. El dióxido de carbono es liberado en gran medida por el drenado de los humedales, por la descomposición microbiana o quema de residuos vegetales y oxidación de la materia orgánica del suelo al quedar al descubierto y por ser fuente de carbono para los cultivos. El metano se produce cuando los materiales orgánicos se descomponen en condiciones anóxicas, sobre todo en cultivos de arroz que se encuentran bajo condiciones de inundación; otra fuente es la descomposición de abonos naturales. El óxido nitroso se genera por la transformación microbiana de nitrógeno en los suelos, y aumenta donde el N disponible excede los requerimientos de las plantas (especialmente en condiciones inundadas) debido a la adición de fertilizantes sintéticos y/o naturales (orina y heces fecales) y a un mayor uso de cultivos fijadores de nitrógeno (Smith, et al., 2008; Verhoeven y Setter, 2010).

Asimismo, la actividad agrícola implica el empleo de plaguicidas que pueden ejercer un efecto negativo en la calidad del suelo ya que se ha reportado que los insecticidas

frecuentemente eliminan a un amplio espectro de organismos, reduciendo de esta manera la diversidad biológica del suelo que ayuda a mantener su equilibrio biogeoquímico. De igual manera con los herbicidas, pues su uso reduce la diversidad vegetal, por lo cual disminuye la resiliencia del sistema (Brady y Weil, 2008; Szöcs, et al., 2012).

Además, los pesticidas organoclorados como organofosforados contribuyen a la emisión de GEI como CO₂ y CH₄ a la atmósfera, esto como producto de su degradación a través de la mineralización y de la cual resultan otras moléculas inorgánicas simples tales como el amonio, nitrato y agua (Cornejo y Jamet, 2000; Kanekar, et al., 2004; Meleiro, et al., 2011; Heimpel, et al., 2013; Odukkathil y Vasudevan, 2015). Por su parte, el efecto de los plaguicidas en la emisión de N₂O es muy variado ya que depende de muchos factores, por ejemplo la cantidad de plaguicida, la estructura química del plaguicida, temperatura ambiental, humedad y textura del suelo, tipo de cultivo, etc. Se han encontrado efectos tanto de inhibición como de incremento en la emisión de los gases (Márquez, 2009).

Ganadería

La ganadería es un recurso global que proporciona importantes beneficios a la sociedad, incluidos los alimentos, ingresos económicos, nutrientes del suelo, empleo, herramienta de tracción, y ropa. Sin embargo, en el proceso la ganadería utiliza una gran cantidad de recursos naturales: por ejemplo, los sistemas ganaderos ocupan aproximadamente el 30% de la superficie terrestre libre de hielo del planeta y representan el 8% del uso total de agua dulce (Thornton y Herrero, 2010). De esta manera, la creciente demanda por productos de la ganadería representa una amenaza para los humedales ya que con facilidad son ocupados para el pastoreo.

Se ha encontrado que la actividad ganadera altera significativamente cada aspecto de la estructura y función del suelo, incluyendo la porosidad, microbiota, ciclo de nutrientes, productividad y tasas de erosión (herbivoría); de manera más específica, otros estudios han demostrado que el sobrepastoreo incrementa la compactación del suelo, disminuye o incrementa excesivamente la disponibilidad de nutrientes y la cantidad de materia orgánica, disminuyendo así la fertilidad del suelo (Roberson, 1996).

Otro de los inconvenientes de la ganadería es que es un gran contribuyente al problema del cambio climático. Según algunas estimaciones, aportan el 18% de las emisiones globales de GEI antropogénicos, de las cuales el 32% son el CO₂, el 31% N₂O y 25% CH₄. La emisión de CO₂ es debida al uso de la tierra con sus cambios (producción de alimento, deforestación); el N₂O es a partir de estiércol y orina (aporte de NH₃); y el CH₄ proviene de la respiración anaerobia del rumen por metanogénesis (Oenema, et al., 2005; Thornton y Herrero, 2010; Chhabra, et al., 2013; Collins, et al., 2013).

3.2.4.2 Experiencias en agricultura sustentable

Se ha documentado que la producción alimenticia se dobló en los pasados 40 años correspondiente a la revolución verde, cuyos costos fueron pérdidas considerables de biodiversidad, alteración de los ciclos biogeoquímicos globales, problemas por eutroficación y toxicidad de cuerpos de agua dulceacuícolas, así como alteración de las funciones de regulación de ecosistemas. Actualmente, existe el reto de doblar la producción alimenticia de nuevo para los siguientes 50 años. Es entonces en este contexto, que ha comenzado a desarrollarse un nuevo paradigma: actividad agropecuaria sustentable, lo cual se traduce por garantizar la producción agrícola sin comprometer otras funciones del ecosistema, que signifiquen un daño severo o irreversible al humedal, con respecto a las necesidades presentes y futuras (Kibblewhite, et al., 2008; Verhoeven y Settler, 2010).

Algunas de las prácticas que se han aplicado son: cultivar sin el empleo de fertilizantes o pesticidas químicos, plantear una regulación en cuanto a la descarga de aguas residuales y disposición de desechos sólidos. También, es necesario considerar la rotación de cultivos, el control en la aplicación de abonos naturales, una regulación de la intensidad y terrenos destinados al pastoreo, así como evitar la pérdida de cubierta vegetal del suelo, y mantener el régimen hidrológico del humedal intacto, entre otros (Kibblewhite, et al., 2008; Smith, et al., 2008); todo esto con el fin de no alterar los ciclos biogeoquímicos que reinan en el suelo e influyen directamente en su fertilidad, misma que como ya se ha mencionado, permite el mantenimiento de un equilibrio en los ecosistemas naturales.

3.3 Áreas naturales protegidas, como una solución

3.3.1 Qué son e importancia

Las áreas naturales protegidas (ANP) son *“zonas del territorio nacional sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, en donde los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano o que sus ecosistemas y funciones integrales requieren ser preservadas y restauradas, las cuales están sujetas al régimen previsto en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) y demás ordenamientos aplicables”* (CONANP, 2007; CONANP, s. f.; PROFEPA, s. f.)

La misión de las ANP es vigilar que el aprovechamiento de los recursos dentro de la zona se realice de manera sustentable, preservando la flora y fauna particular del ecosistema; permitir y propiciar la investigación y estudio de los ecosistemas con el objetivo de generar conocimiento y transmitir aquellas prácticas o tecnologías que faciliten el aprovechamiento sustentable de los mismos y, a su vez, proteger el entorno de las zonas históricas, arqueológicas y turísticas de valor e importancia cultural y recreativa (UACJ, 2013).

Esta protección es la forma tradicional de evitar que se alteren las condiciones naturales que inciden en el buen funcionamiento de un ecosistema y su biodiversidad. Es importante mencionar que no pretende evitar el cambio, si no que ocurra de una manera natural incluyendo algunos regímenes de disturbio que les son intrínsecos. Es decir, busca mantener el sistema dentro de sus "límites de cambio aceptables" simplemente evitando intervenir en él o haciéndolo sólo en casos muy concretos y de manera muy sutil ya que se sabe que un ecosistema, en este caso un humedal, previamente degradado tiene menor capacidad de respuesta a alteraciones antropogénicas y condiciones ambientales adversas (“Política Nacional de Humedales”, s. f).

3.3.2 Humedales, experiencia Centla

Actualmente se cuentan con 176 ANP federales decretadas en el país, de las cuales en 60 se encuentran incluidos humedales. En el estado de Tabasco se localizan los Pantanos de

Centla declarados como ANP en 1987 y en 1992 como Reserva de la Biosfera (RBPC); en 1995 fueron incluidos como sitio de importancia internacional dentro de la Convención relativa a humedales (SERNAPAM, s. f.); y en 2006, Área de Interés para la Conservación de Aves (AICA), considerado como Sitio MAB (por sus siglas en inglés Programa el Hombre y la Biosfera (*Man and the Biosphere Programme*) de la UNESCO).

Esta ANP se estableció ante presiones y amenazas, tales como el desarrollo urbano, explotación petrolera, la tala clandestina, cacería ilegal, incendios forestales, expansión de frontera agrícola, ganadería extensiva, contaminación (agua y suelo) y desarrollo industrial principalmente. La declaración de esta zona como ANP ha promovido la aplicación de acciones de protección, conservación, restauración y aprovechamiento sustentable de sus recursos naturales, previéndose acciones en el corto mediano y largo plazo (CONANP, s. f.).

Sin embargo, al igual que la mayor parte del territorio nacional, las ANP siguen siendo sujetas a presiones que modifican su entorno para atender actividades productivas que han beneficiado a algunos sectores de la población y para otros han representado pérdida de oportunidades y recursos naturales. Como prueba de lo anterior, estudios realizados en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, aún declarada ya como ANP, apuntan que esta zona aún se encuentra bajo presión antropogénica, pues se han encontrado alteraciones relacionadas con la deforestación y cambios de uso del suelo, presencia de poblados, canales, caminos, incendios y actividades de la industria petrolera. En este contexto, las políticas de Estado y programas de desarrollo fueron mal orientados hacia los usos agropecuario y forestal, los cuales se han traducido en un debate entre el combate a la pobreza y el desarrollo sostenible (Guerra-Martínez y Ochoa-Gaona, 2008); Macías, et al., 2014).

La ejecución de PROFEPA o CONANP para tratar de mitigar o frenar dichos proyectos dentro de esta ANP y de la mayoría de ANPs deja en evidencia lo incongruente de las políticas gubernamentales, ya que por un lado se promueven programas productivos que rompen el equilibrio ecológico, y por otro, limitan a los mismos programas como mitigación ambiental. Por ejemplo, por parte de la SAGARPA, la ganadería es una de las actividades que recibe mayor estímulo por parte de programas de gobierno o sistemas crediticios,

generando acciones para ganar terrenos a los pantanos, lo cual provoca el decaimiento de la salud de los diferentes objetos de conservación.

Por lo tanto, la reversibilidad de las amenazas como la mencionada y la implementación de acciones de protección tanto en la RBPC como en otras ANPs que presenten la misma problemática, se puede lograr con trabajos de gestión y programas compatibles entre diferentes sectores por medio de una coordinación interinstitucional o con la aplicación de programas de colaboración que posibiliten el real y eficiente cumplimiento de conservación y desarrollo socio-económico de las ANP, y con ello se mitiguen los impactos negativos sobre los valores, bienes y servicios que éstas ofrecen.

3.4 Sitio de estudio: Lagunas Chaschoc

Las Lagunas de Chaschoc se encuentran en el municipio de Emiliano Zapata (Figura 4), el cual conforma uno de los 17 municipios del estado de Tabasco. Se localiza entre las coordenadas $17^{\circ} 44'$ latitud norte y entre $91^{\circ} 46'$ longitud oeste, dentro de la subregión Ríos en la región del Usumacinta. La mayor parte de la superficie es plana.



Figura 4. Ubicación de Emiliano Zapata en México.

Hidrografía. Las lagunas de Chaschoc, junto con las lagunas de Mariche, Saquilá, Seja, San Ignacio, San Marcos, San Francisco, Guanal, Chacamax, Chinchil y Nueva Esperanza conforman el potencial lacustre (32,800 ha) y con ello el humedal, del río Usumacinta en el municipio de Emiliano Zapata (Municipios de Tabasco, s. f.).

El principal río es el Usumacinta, el último río de México que no presenta modificaciones de su curso. Recibe por su margen izquierda las aguas del río Chacamax, así como las de los arroyos Hondo, Jobo, Pochote y otros de menor importancia.

Orografía. Se encuentran lomeríos que no sobrepasan una altura mayor de los 30 msnm (metros sobre el nivel del mar), localizados en el centro del municipio y en los alrededores de la cabecera municipal (Municipios de Tabasco, s. f.).

Clima. Es cálido-húmedo, con abundantes lluvias en verano. Tiene una temperatura media anual de 26.55°C, siendo la máxima media mensual en mayo de 30.9°C, con 22.7°C y la mínima media en enero y febrero con 22.7°C; la máxima y mínima absolutas alcanzan los 43°C y 14°C, respectivamente. El régimen de precipitación se caracteriza por un total de caída de agua de 1,864 mm anuales, con un promedio máxima mensual de 318 mm en el mes de septiembre y mínima mensual de 12 mm en el mes de abril. La humedad relativa promedio anual se estima en 80%, con máxima de 85% en febrero y marzo, la mínima de 75% en mayo. Las mayores velocidades del viento se concentran en los meses de noviembre y diciembre con velocidades que alcanzan los 32 km/h, presentándose en junio las menores, con velocidad de 18 km/h (Municipios de Tabasco, s. f.).

Edafología. La mayor parte de la superficie está clasificada como gleysoles, que son generalmente de textura arcillosas o francas y presentan problemas de exceso de humedad por drenaje deficiente.

Uso de suelo. Pastizal cultivado (45.7 %), agricultura (15.8%) y zona urbana (1.1%).

Vegetación. Selva (22.5%), Tular (4.9%), pastizal inducido (4.1%) y sabana (0.03%) (INEGI, 2008).

Las Lagunas de Chaschoc constituyen un ecosistema de tipo humedal ribereño (humedales adyacentes a ríos y arroyos), puesto que encaja con la definición de humedal de acuerdo a la Convención Ramsar (Barbier, et al., 1997; García, 2006).

Este sitio ingresar al listado de Áreas Naturales Protegidas (estatal o federal), ya que es una zona que, por su diversidad así como su riqueza biológica (selva mediana y baja, de tinto *Haematoxylum campechianum*, vegetación hidrófita), contiene aves de ambientes hidrófitos y riparios, y es parte de la distribución geográfica del manatí (*Trichechus manatus*) y del mono saraguato aullador (el pardo, *Alouatta palliata*; y el negro, *Alouatta pigra*), los cuales están amenazados (enlistado en la NOM-059-SEMARNAT-2001). El sitio también provee belleza escénica. Por lo tanto, es compatible con una política de protección y conservación (Cámara, et al., 2011). Conjuntamente, se busca que este humedal se anexe al listado de los sitios Ramsar, puesto que no ha sido considerado. Ante esto, cabe mencionar que los Pantanos de Centla, sitio Ramsar, se conectan con las Lagunas de Chaschoc por medio del río Usumacinta. De hecho, gran parte del estado de Tabasco posee características que le permiten ser considerados como uno de los ecosistemas más representativos de la biosfera, tales como estar dominado en un 39% de su territorio por selva tropical perennifolia y vegetación acuática, así mismo por albergar a los ríos Grijalva y Usumacinta, los más caudalosos del país, mismos que mantienen regímenes hidrológicos únicos (“Política Nacional de Humedales”, s. f.).

4 JUSTIFICACION

El presente constituye una aportación al proyecto general “Retos para la Sustentabilidad en la Cuenca del Río Usumacinta en Tabasco: Ecosistemas, Cambio Climático y Respuesta Social” con subproyecto: Análisis del estado del ecosistema de las Lagunas de Chaschoc (Emiliano Zapata, Tabasco) y su funcionamiento a través del estudio de los ciclos biogeoquímicos del carbono y nitrógeno, la biodiversidad microbiana, la faunística y florística, junto con la calidad de agua y la hidrología” llevado a cabo por el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste, la Universidad Nacional Autónoma de México, EcoSur y la Universidad de Juárez Autónoma de Tabasco. El proyecto se estableció ante la factibilidad de que las Lagunas puedan ingresar como Áreas Naturales Protegidas (estatal o federal), ya que es una zona que por su diversidad, así como su riqueza biológica y belleza escénica es

compatible con una política de protección y conservación. Conjuntamente, se busca que este humedal se anexe al listado de los sitios Ramsar, puesto que no ha sido considerado.

La elección de la emisión de GEI como indicador de calidad de suelo fue debido a que éstos no se mencionan, en conjunto, en diversos compendios de indicadores (Bautista, et al., 2004; Cantú, et al., 2007; Esty, et al., 2008).

5 HIPOTESIS

Se espera que tanto la emisión de GEI, como los parámetros fisicoquímicos no sean diferentes en los suelos de uso antropogénico respecto al natural dado que los humedales desempeñan servicios de apoyo y regulación, mismos que promueven la retención, exportación y reciclaje de sedimentos y nutrientes, así como la depuración de cuerpos de agua y suelo gracias principalmente a la vegetación y microorganismos.

Ho: la emisión de GEI y los parámetros fisicoquímicos del suelo natural no mostrarán ninguna diferencia con respecto a los suelos con uso antropogénico.

H1: la emisión de GEI y los parámetros fisicoquímicos se comportarán de manera diferente en el suelo natural respecto al suelo de uso antropogénico.

6 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la calidad de distintos suelos, en función de su uso, a través de la emisión de GEI como indicador, en tres momentos de transición hidráulica, en las Lagunas de Chaschoc, Tabasco.

6.1 Objetivos particulares

- Evaluar la emisión de CO₂, CH₄ y N₂O de distintos suelos (del ecosistema natural, agrícola, ganadero, de tránsito urbano y mixto) durante tres momentos de transición hidráulica: lluvia y estiaje (baja/alta (agosto); alta/alta (noviembre); y alta/baja (marzo)).

- Evaluar la dinámica fisicoquímica del carbono y nitrógeno de distintos suelos, en tres momentos de transición hidráulica: lluvia y estiaje (baja/alta (agosto); alta/alta (noviembre); y alta/baja (marzo)).
- Estimar la calidad de cada suelo mediante el análisis de funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos del carbono y nitrógeno en los suelos estudiados.

7 MATERIALES Y METODO

7.1 Sitio de Muestreo

Descrito en el apartado 2.4.

7.2 Definición de suelos

En este estudio, los varios usos de suelo se definieron según lo presentado en la tabla 4.

Tabla 4. Definición de uso de suelo.

Usos de suelo	Descripción
Natural	Suelo en el que las actividades antropogénicas no tienen incidencia y hay predominancia de fauna nativa (por ej. mono aullador).
Agrícola	Suelo agrícola en el que se cultiva principalmente maíz, frijol y calabaza.
Ganadero	Suelo que se utiliza para pastoreo de ganado, se cultiva el pasto humidícola como la <i>B. brizantha</i> para los mismos fines.
Tránsito urbano	Suelo en el que ocurre un habitual tránsito urbano; y/o paso y estacionamiento de lanchas; y/o paso de ganado.
Mixto	Suelo en el que se practica la agricultura, se utiliza para pastoreo de ganado (aunque no de manera habitual) además de ser un sitio de tránsito urbano.

7.3 Muestreo

El muestreo se realizó en los meses de agosto y noviembre de 2013, así como en marzo de 2014, que correspondieron a tres momentos de pulsos de inundación: lluvia y estiaje (baja/alta por llegada de lluvias, alta/alta cuando se registra el nivel máximo del agua, y alta/baja, mismos que correspondieron a los meses de agosto, noviembre y marzo respectivamente).

El muestreo se llevó a cabo en suelo de la ribera de los canales que conectan al río Usumacinta con las lagunas, y en las propias lagunas de los distintos *sitios* (Tabla 4, Figura 5). Dichos sitios se determinaron en función al uso de suelo (Tabla 5) y en cada uno de ellos se muestreó la *zona de transición* terrestre/acuática (Figura 6), esto es:

- en suelo expuesto: suelo con presencia de pasto (designado como “P”), generalmente no se inunda en temporada de lluvias, que es cuando el nivel del agua llega al máximo;
- suelo sumergido: suelo que está cubierto por el nivel del agua en temporada de lluvias, (designado como “A”);
- y el suelo que se encontraba al margen del río, (designado como “L”) en temporada de estiaje.

Tabla 5. Sitios de estudio

Sitios	Uso de suelo**	Ubicación geográfica	
Canal Usumacinta* (CU)	Tránsito urbano (entrada al humedal)	1 (entrada)	17°45'42.82" N 91°44'20.49" O
	Agrícola (salida/entrada)	2(salida/entrada)	17°51'05.73" N 91°46'36.95" O
Laguna Chaschoc (LC)	Suelo natural	1	17°47'55.50" N 91°43'55.84" O
		2	17°48'02.05" N 91°43'22.46" O
Laguna Gaytán Chico (LG)	Suelo natural	1	17°50'00.61" N 91°46'01.64" O
	Suelo de uso agrícola	2	17°50'36.80" N 91°45'26.35" O
Canal San Ignacio (CSI)	Suelo de uso agrícola	1	17°51'07.76" N 91°46'10.22" O
		2	17°50'47.79" N 91°45'38.71" O
Canal Pochote (CP)	Suelo de uso ganadero	1	17°46'26.48" N 91°44'23.97" O
	Suelo de uso mixto (ganadero y agrícola)	2	17°46'53.08" N 91°44'23.21" O

*Canal Usumacinta corresponde a la entrada y salida del humedal y se encuentra en contacto directo con el paso del río Usumacinta.

**Cabe aclarar que cuando se apunta más de un uso de suelo a un sitio es porque en él se desarrollan diferentes actividades pero en lugares independientes.

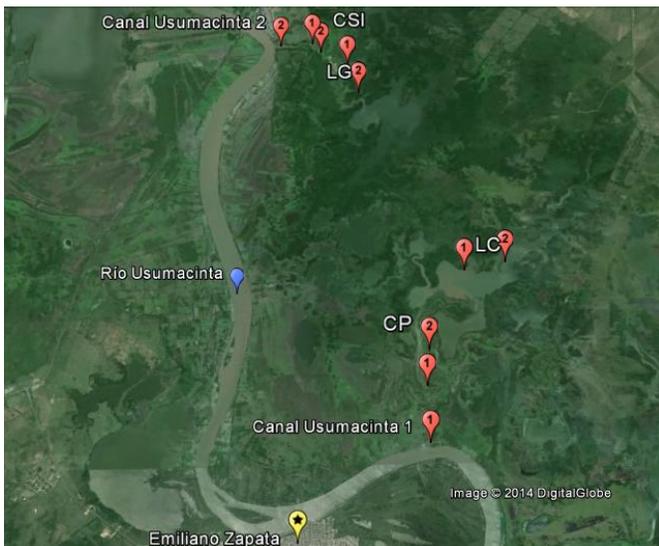


Figura 5. Ubicación de las zonas de muestreo: Canal Usumacinta, Laguna Chaschoc (LC), Canal Pochote (CP), Canal San Ignacio (CSI) y Laguna Gaytán Chico (LG).

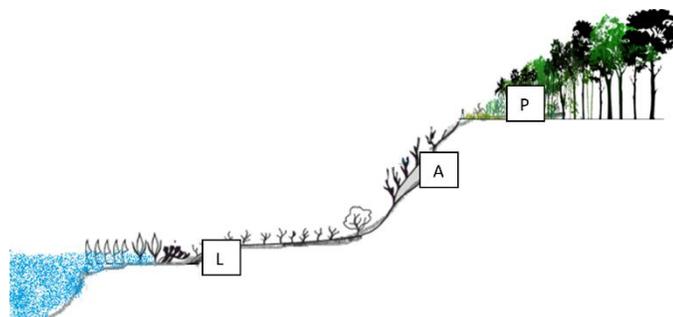


Figura 6. Zonas de muestreo P (suelo con pasto), A (sumergido) y L (límite).

Se eligieron diez sitios y no en todos se muestrearon las tres zonas –P, A, L–, lo cual se designó como *no determinado* (y se señala con un guión corto más adelante en la parte de resultados), debido a que el nivel del agua y/o las condiciones topográficas del sitio lo impidieron. En cada sitio se tomaron en cuenta las siguientes características: zona de transición acuática/terrestre, ubicación geográfica (GPS) y niveles del agua.

7.4 Cinética de producción de gases

La cinética de producción de los GEI (CO_2 , CH_4 y N_2O) se realizó con la Técnica de Cámara cerrada en el suelo (St Louis, et al., 2000). Cada cámara se adaptó con un bidón de agua con un volumen de 20L; se les removió la parte basal con la ayuda de un serrucho y a cada tapa se le realizó dos agujeros para colocar un septo, mediante el cual se tomó la muestra de gas, y un termómetro bimetálico con vástago (Figura 7). La cinética se realizó por cuadruplicado (Figura 8) durante 45 minutos con toma de 20ml de gas a los 0, 15, 30 y 45 minutos respectivamente. Cada muestra de gas se conservó en un vial de 25ml de borosilicato, tapado con un septo y previamente vaciado en un volumen de 20ml.



Figura 7. Bidón con septo y termómetro adaptados. Foto: Nathalie Cabirol 2013.



Figura 8. Campanas distribuidas a lo largo del margen del canal (por cuadruplicado indicadas con las flechas). Foto: Nathalie Cabirol 2013.

7.5 Muestras de suelo

Para los sitios no inundados se tomaron los primeros 10 cm de profundidad, cuidando de quitar a lo mucho 1 cm de la parte superficial del suelo, y del mismo lugar de donde se colocó cada campana (Figura 9); en el caso de los sitios inundados se recurrió a un nucleador adaptado con un tubo de PVC de aproximadamente 4 m de largo y se tomaron los primeros 5 cm de profundidad (Figura 10). Estas muestras se guardaron en hieleras para mantenerlas a una temperatura de $\sim 4^{\circ}\text{C}$, para lo cual se cambió constantemente el hielo hasta ser analizadas en laboratorio. El total de muestras recolectadas se ilustran en la Tabla 6 ($n=47$).



Figura 9. Toma de muestras de suelo no inundado en el lugar de cada campana. Foto: Nathalie Cabirol 2014.



Figura 10. Toma de muestras de suelo inundado con la ayuda de un nucleador. Foto: Nathalie Cabirol 2013.

Tabla 6. Las muestras de suelo que se tomaron, se señalan con un punto negro (n= 47) a continuación.

	Ago			Nov			Mar		
	P	A	L	P	A	L	P	A	L
LC1	●	-	-	-	-	-	●	●	-
LC2	●	●	-	-	-	-	●	●	●
CP1	●	-	-	●	-	-	●	●	-
CP2	●	-	-	●	-	-	●	●	-
CSI1	●	-	-	●	-	-	●	●	●
CSI2	●	-	-	●	-	-	●	●	●
LG1	●	●	-	●	●	-	●	●	●
LG2	-	-	-	●	-	-	●	●	●
CU1	●	-	-	●	-	-	●	●	-
CU2	●	-	-	●	●	-	●	●	●
Total		11			10			26	

7.6 Caracterización del suelo

Se llevó a cabo una caracterización fisicoquímica del suelo en laboratorio considerando lo siguiente:

Tabla 7. Métodos utilizados en la caracterización fisicoquímica del suelo.

Análisis	Método
Textura	Procedimiento de Bouyoucos (NOM-021-RECNAT-2000)
Humedad	Método de secado a horno a 105°C (Método de Foster 1995) (anexo 1).
pH	Con agua destilada en una proporción 1:2.5. Se agitó durante 30 minutos a 130 rpm y se dejó reposar por 15 minutos. Se midió en un potenciómetro calibrado con soluciones amortiguadoras.
Salinidad	A través de la conductividad eléctrica (por el método de Extracto de saturación) (NOM-021-RECNAT-2000)

Tabla 8. Métodos utilizados en la caracterización biológica del suelo.

Análisis	Método
Materia orgánica	Método de oxidación con ácido crómico y ácido sulfúrico, desarrollado por Walkley-Black (1934). El cual se basa en la oxidación de la materia orgánica del suelo mediante el calor de la reacción de dicromato de potasio en presencia de ácido sulfúrico, formando ácido crómico cuyo exceso es valorado por titulación por sulfato ferroso y el indicador negro de bariosulfonato de difenilamina, y adicionando ácido fosfórico para eliminar la enmascaradora de los ácidos de hierro y como contribuyente al viraje de la solución.
Compuestos nitrogenados: nitratos, nitritos y amonio	A través de fotometría en un analizador automático SAN plus SYSTEM, <i>Sampler Analyzer</i> , marca Skalar, en la entidad académica CINVESTAV del IPN. Previo a este análisis se realizó una extracción del suelo con K ₂ SO ₄ 0.5M en una relación 1:5 (10g de suelo por 50 ml de solución), agitándolo y filtrado con papel filtro Whatman N° 40 (anexo 1).
Carbono orgánico total (COT) y nitrógeno total (NT)	En un Analizador elemental de CNSH, Perkin Elmer 2400 Serie II en el Laboratorio de Edafología ambiental del Instituto de Geología (UNAM) (anexo 1). Previo a este análisis cada muestra de suelo fue secada a 105°C durante 24 hrs. y se pulverizaron en un mortero de ágata para tener un polvo más fino.
Relación Carbono/Nitrógeno	Se determinó a partir de la división del carbono total sobre el nitrógeno total.
Producción de CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O	Se identificaron el CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O en la entidad académica CINVESTAV del IPN, mediante cromatografía de gases en un cromatógrafo con Detector de Ionización de Llama (FID) para CH ₄ ; y un cromatógrafo con Detector de Captura de Electrones (ECD) para CO ₂ y N ₂ O (anexo 1). Antes de cada medición se realizó una curva de calibración para cada gas: <ul style="list-style-type: none"> CO₂. Se utilizó un estándar de CO₂ de 1500 ppm y se inyectaron 0.2, 0.4 y 0.6 ml del mismo con tres repeticiones. CH₄. Se utilizó un estándar de CH₄ de 5 ppm y se inyectaron 0.2, 0.8, 1.4 y 2 ml del mismo con tres repeticiones. N₂O. Se utilizó un estándar de N₂O de 10 ppm y se inyectaron 0.2, 0.4 y 0.6 ml del mismo con tres repeticiones.

7.7 Cálculo de emisión de GEI

1. A partir de la cromatografía de gases se obtuvo un cromatograma de la muestra, del cual se calculó el área del pico asociada al gas de estudio. Dicha área se transformó a concentración (mol/L), aplicando la ecuación de la recta obtenida previamente de la curva patrón del gas de estudio (Figura 11).

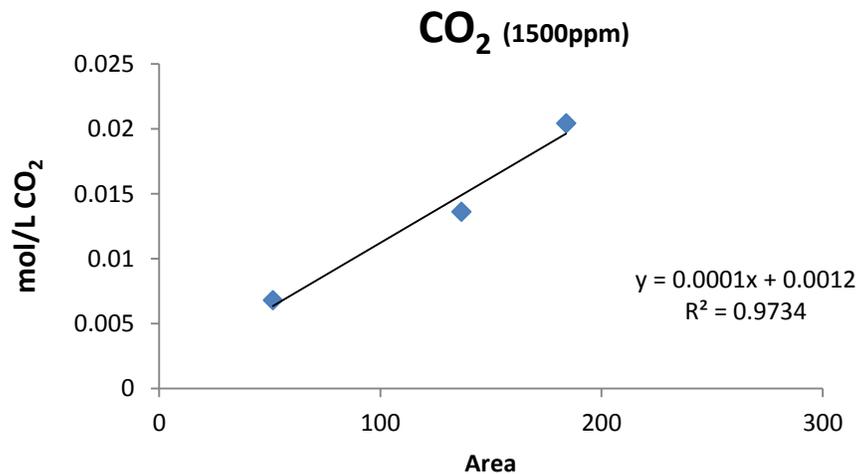


Figura 11. Curva patrón del CO₂ del que se obtiene la ecuación de la recta para calcular la concentración de la muestra de gas inyectada.

2. A partir de la concentración de gas obtenido en cada muestra se aplicó la *ecuación de estado de los gases ideales* (1) para calcular el número de moles presentes en 1ml tomado a presión atmosférica de 1 atm para Lagunas de Chaschoc (a nivel del mar) y en 1 ml tomado a presión atmosférica de 0.769 atm (585 mm Hg / 760 mm Hg) para la Ciudad de México.

$$n = \frac{P.V}{R.T} \quad (1)$$

Donde:

n es el número de moles presentes en la muestra (moles)

P es la presión atmosférica (en atmósferas)

V es el volumen de muestra asociada al área del espectro en el cromatograma (L)

R es la constante universal de los gases ideales ($R = 0.082 \text{ atm}\cdot\text{L}/\text{mol}\cdot\text{°K}$)

T es la temperatura media durante el momento de muestreo (°K)

3. Una vez conocido el número de moles, se convirtieron dichos valores a g/L para poder trabajarlos en el Paquete R (Team, 2014) para Windows X y obtener el *Flujo de gas de la campana* (g/ día· m²).

Análisis estadístico

Es importante aclarar que debido a las condiciones topográficas y al nivel del agua no fue posible tomar un número constante de muestras, razón por la cual la estadística de este estudio se vio limitada. Sin embargo, se aplicaron análisis estadísticos a grupos de estudio en general, es decir, por uso de suelo, pulso de inundación y zona de transición.

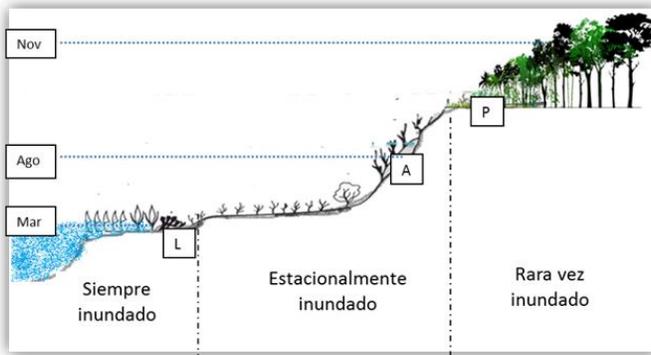
El análisis estadístico se realizó en el programa STATISTICA 7 para Windows. Para los resultados de caracterización física, química y biológica del suelo se realizaron pruebas de Kruskal-Wallis, apoyada en la prueba de normalidad aplicada a cada variable, esto con el fin de analizar las varianzas de las diferentes variables de respuesta entre los grupos de estudio: uso de suelo, pulso de inundación y zona de transición hidráulica; y así ver si se presentaban las mismas condiciones en el humedal o había un comportamiento diferente en uno de los puntos de espacio/tiempo. Posteriormente se realizaron pruebas de post-hoc para identificar donde existían diferencias, según se presentara el caso.

Para los GEI, los datos obtenidos de cada gas se les realizó una prueba de homogeneidad de varianza y normalidad, siendo esta última negativa en los tres gases, por lo que se optó por utilizar estadística no paramétrica a través de la prueba de Kruskal Wallis, con la función “Kruskal” del paquete “Agricolae” (de Mendiburu, 2014), dentro del programa R version 3.1.1 (R Core Team, 2014).

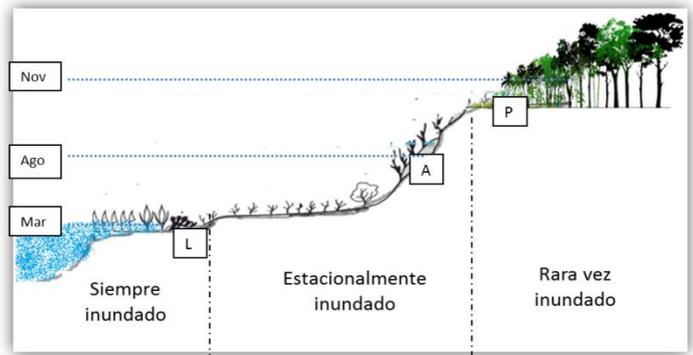
8 RESULTADOS

8.1 Niveles del agua

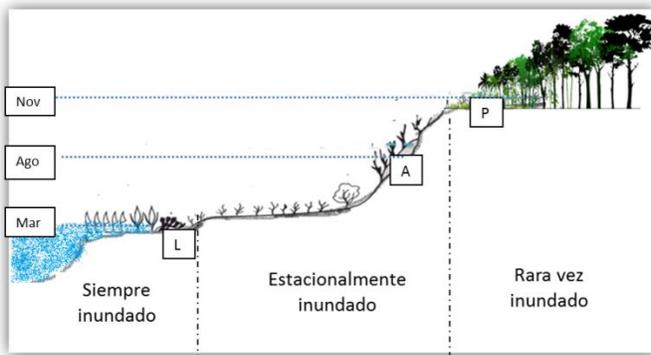
Los niveles del agua que se observaron a lo largo de los pulsos de inundación en los distintos sitios se ilustran en la Figura 12. Se puede notar en las ilustraciones que en noviembre la inundación total de los sitios no ocurrió en todos. Sin embargo, en agosto y en marzo el nivel del agua fue más homogéneo en los diferentes sitios.



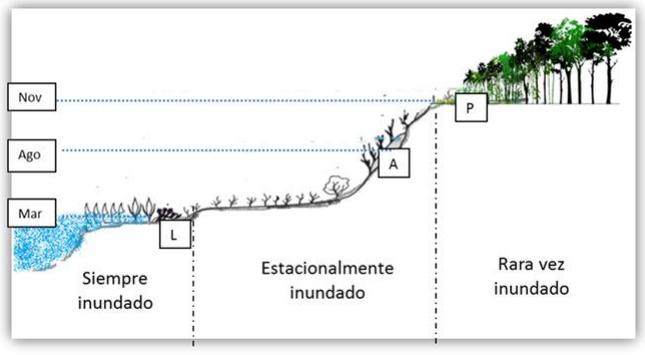
a) El nivel del agua alcanzó altura sobre el suelo de ~5 m. Sitios LG1 y LG2.



b) El nivel del agua alcanzó una altura sobre el suelo de ~3 m. Sitios LC1, LC2, CP2, CSI1 y CSI2.



c) El nivel del agua alcanzó una altura sobre el suelo de ~1 m. Sitios CU1.



d) El nivel del agua alcanzó una altura sobre el suelo de ~15 cm. Sitios CU2 y CP1.

Figura 12. Perfil del canal/laguna representando la altura que alcanzó el agua durante el pulso de inundación máxima (noviembre), junto con los niveles de agosto y marzo, mismos que no variaron en gran medida.

8.2 Caracterización física del suelo

8.2.1 Textura

Entre los diferentes suelos de estudio, la textura fue de fina a mediana según la Guía para la descripción de suelos de la FAO (2009), (Tabla 9) siendo los de textura fina los más abundantes en todos los suelos a excepción del tránsito urbano y agrícola.

Tabla 9. Textura de las zonas de transición

Sitio	Pasto	Sumergido	Límite
Natural	arcillosa	migajón arcillosa	ND
Natural	arcillosa	arcillosa	arcillosa
Natural	arcillosa	arcillosa	migajón limosa
Ganadero	arcillo limosa	migajón	ND
Mixto	arcillo limosa	migajón arcillo limosa	ND
Agrícola	arcillo limosa	migajón	migajón arcillosa
Agrícola	arcillo limosa	migajón arcillosa	migajón arcillosa
Agrícola	arcillo limosa	arcillo limosa	arcillo limosa
Agrícola	migajón arcilloso arenosa	migajón arcillosa	arcillo limosa
Tr. Urbano	migajón arcilloso arenosa	migajón	ND

Además, se observó también que el tamaño de partícula va de fino a mediano de la zona de suelo expuesto con presencia de pasto hacia al margen del río.

8.2.2 Humedad

Los valores del porcentaje de humedad fueron mayores en noviembre (42.7 ± 8.8) (n=11) y en agosto (44.3 ± 7.2) (n=10), que correspondieron con la temporada de subida del nivel del agua, a marzo (31.9 ± 7.4) (n=26) ya cuando el nivel ha disminuido.

Tabla 10. Porcentaje de humedad.

	Ago			Nov			Mar		
	P	A	L	P	A	L	P	A	L
Natural	49.12	48.00	-	58.39	-	-	36.13	40.10	48.10
Ganadero	39.03	-	-	38.59	-	-	23.40	27.70	-
Agrícola	38.35	54.15	-	39.79	50.16	-	25.93	27.33	31.13
Mixto	48.26	-	-	36.68	-	-	28.20	30.70	-
Tr. Urbano	45.94	-	-	34.17	-	-	28.20	27.60	-

8.3 Caracterización química del suelo

8.3.1 pH

El pH fue significativamente menor en los suelos naturales (*neutro*) en comparación con los otros suelos ($p=0.0004$) (Figura 13a). De manera similar, se encontraron variaciones del pH en los distintos pulsos de inundación: el suelo en noviembre fue ligeramente más *alcalino* que en marzo ($p= 0.004$) (Figura 13b) (Tabla 11). Según la NOM-021-RECNAT-2000, el suelo natural presentó un pH *neutro* y el resto (tránsito urbano, agrícola, ganadero y mixto) *medianamente alcalinos*.

Tabla 11. Valores medios, desviación estándar y significancia para la caracterización de pH del suelo.

Variable independiente ¹	Media ($X \pm DS$)	N	p	
Uso de suelo	Tránsito Ur ^a	7.75 \pm 0.2	4	0.0004
	Natural ^b	6.6 \pm 0.5	12	
	Agrícola ^a	7.4 \pm 0.6	23	
	Ganadero ^a	7.6 \pm 0.4	4	
	Mixto ^a	7.6 \pm 0.4	4	
Pulsos de inundación	Ago ^{ab}	7.3 \pm 1.0	11	0.004
	Nov ^a	7.6 \pm 0.6	10	
	Mar ^b	7.1 \pm 0.5	26	
Zona de muestreo	Pasto	7.33 \pm 0.7	27	0.5
	Sumergido	7.12 \pm 0.7	14	
	Límite	7.08 \pm 0.2	6	

¹ Diferencias significativas expresadas en letras

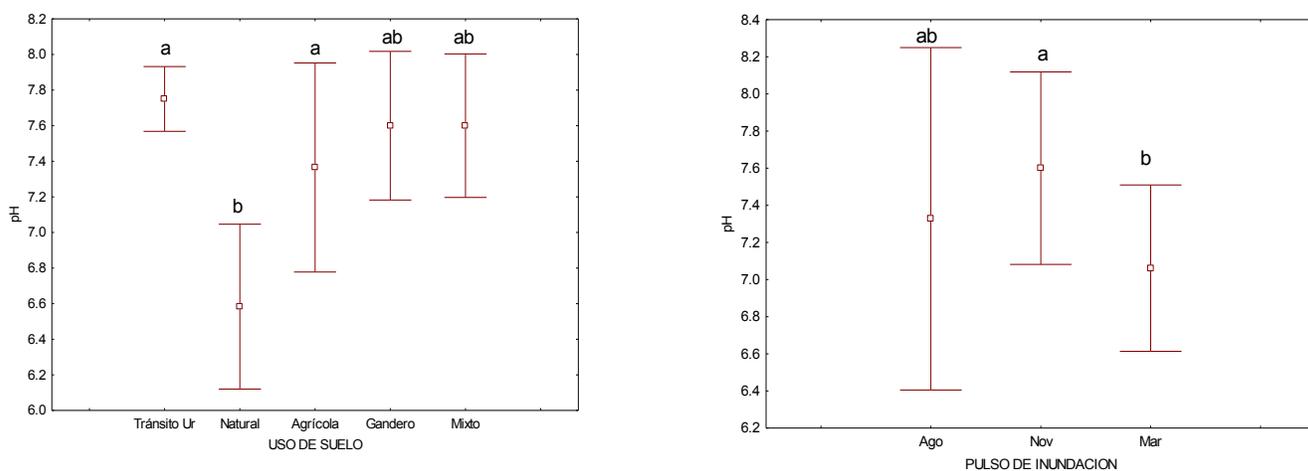


Figura 13. a) Valores medios de pH entre los diferentes usos de suelo y b) pulsos de inundación (Diferencias significativas expresadas en letras).

8.3.2 Conductividad eléctrica

Según la interpretación de la **CE** en la NOM-021-RECNAT-2000, los usos de suelo ganadero, agrícola y natural resultaron ser suelos salinos; y tanto el suelo de tránsito urbano como el mixto calificaron como suelos fuertemente salinos. En la ribera de las lagunas/canales, se observó que la salinidad disminuyó del suelo expuesto hacia el del margen que está en contacto permanente con el agua: el suelo expuesto se presentó como fuertemente salino, el sumergido como moderadamente salino y el del límite como muy ligeramente salino (Tabla 12).

Tabla 12. Valores medios, desviación estándar y significancia para la caracterización de la CE (dS/m 25°C) del suelo.

Variable independiente ¹		Media (X±DS)	N	p
Pulso de inundación	Ago ^a	19.32±12.6	11	0.006
	Nov ^b	3.62±7	10	
	Mar ^b	1.54±0.6	26	
Uso de suelo	Trans Ur.	8.97±15.7	4	0.7
	Natural	6.37±10	12	
	Agrícola	4.77±7.7	23	
	Ganadero	6.12±9.15	4	
	Mixto	10.55±18	4	
Zona de muestreo	Pasto	8.27±12	27	0.4
	Sumergido	3.85±5.98	14	
	Límite	1.95±0.6	6	

¹ Diferencias significativas indicadas con letras

No obstante todo lo anterior, en el análisis de conductividad, sólo se encontraron diferencias significativas entre los pulsos de inundación (p=0.006). El mes que presentó una conductividad mayor fue agosto y fue diferente de noviembre y marzo debido a que éstas fueron significativamente menores (Figura 14). Según la interpretación de la CE en la NOM-021-RECNAT-2000, la mayoría de los suelos en agosto, es decir, en los inicios de crecida del río, se presentaron como *extremadamente salinos*; a diferencia de noviembre y marzo que los suelos presentaron *efectos despreciables de salinidad a moderadamente salinos*.

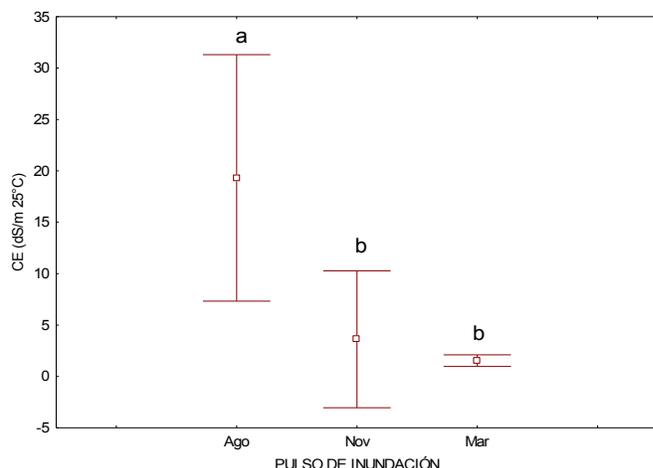


Figura 14. CE entre los diferentes pulsos de inundación (Diferencias significativas expresadas en letras.).

8.4 Caracterización biológica del suelo

8.4.1 Materia Orgánica

La materia orgánica mostró diferencias significativas entre los usos de suelo ($p=0.0006$). Según la interpretación de resultados de porcentaje de MO para suelos no volcánicos en la NOM-021-RECNAT-2000, el suelo natural calificó como *alto* y fue significativamente diferente al suelo de tránsito urbano y agrícola, mismos que clasificaron como *bajos* (Tabla 13). El ganadero y mixto tuvieron un porcentaje de MO *medio*.

Respecto a los pulsos de inundación, no se observaron variaciones ($p=0.05$) al igual que en la ribera del río ($p=0.8$) reportando en ambos casos un nivel *alto* de MO (Figura 15).

Tabla 12. Valores medios, desviación estándar y significancia para la caracterización del porcentaje de MO del suelo.

Variable independiente ¹		Media (X±DS)	N	p
Pulso de inundación	Ago	3.94±2.9	11	0.05
	Nov	3.58±2.8	9	
	Mar	3.79±3.5	26	
Uso de suelo	Trans Ur. ^{bc}	1±0.29	4	0.0006
	Natural ^a	7.32±4.13	12	
	Agrícola ^{bc}	2.75±1.36	23	
	Ganadero ^{abc}	3.36±2.3	4	
	Mixto ^{abc}	1.83±0.96	3	
Zona de muestreo	Pasto	3.61±3	26	0.8
	Sumergido	4.19±4	14	
	Límite	3.58±2.1	6	

1. Diferencias significativas expresadas en letras.

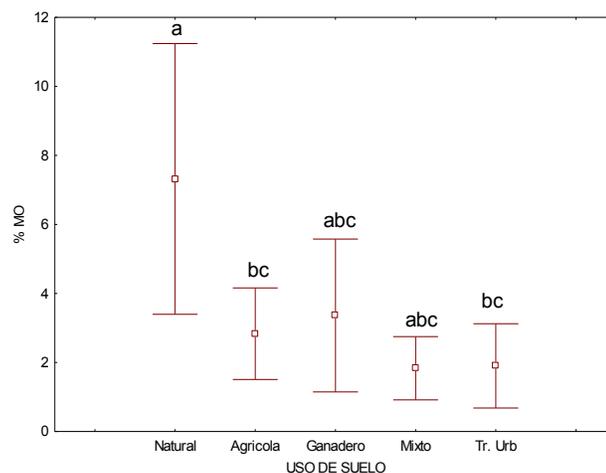


Figura 15. Media y SD para el porcentaje de MO en los diferentes usos de suelo.

8.4.2 Seguimiento del nitrógeno

8.4.2.1 NH_4^+ (amonio)

En la Figura 16 se observan los resultados (Tabla 5 del Anexo 2) del amonio obtenidos de los distintos usos de suelo a lo largo de los pulsos de inundación. Para casi todos los usos de suelo, a reserva del ganadero, se observó una tendencia en la que se presentó una concentración baja de amonio en agosto, que para noviembre, el momento de inundación máxima, aumentó y para la temporada de estiaje disminuye significativamente ($p=0.006$). Además podría decirse que la concentración de NH_4^+ mantuvo cierta relación con el nivel del agua, es decir, baja en estiaje y alta en lluvias, aunque dicha relación no pudo ser corroborada debido a la variabilidad de los niveles del agua de los sitios en las diferentes temporadas.

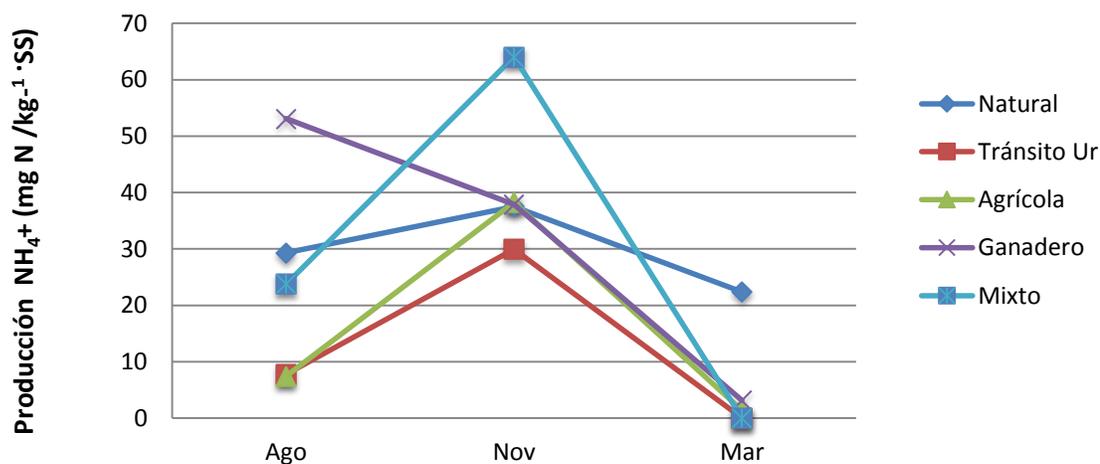


Figura 16. Comportamiento del NH_4^+ en los diferentes usos de suelo a lo largo de los pulsos de inundación en agosto, noviembre y marzo (datos extraídos de la Tabla 5 del Anexo 2).

8.4.2.2 NO_2^- (nitrito)

Posteriormente, el NH_4^+ que logró pasar a nitrito en el ciclo del nitrógeno a través de la nitrificación, fue escaso en los suelos agrícolas; pues presentaron concentraciones relativamente altas en agosto mismas que para noviembre disminuyeron casi a cero. El resto

de los suelos presentó concentraciones muy cercanas a cero en agosto y noviembre. En marzo, no se encontró nitrito en ningún suelo (Figura 17).

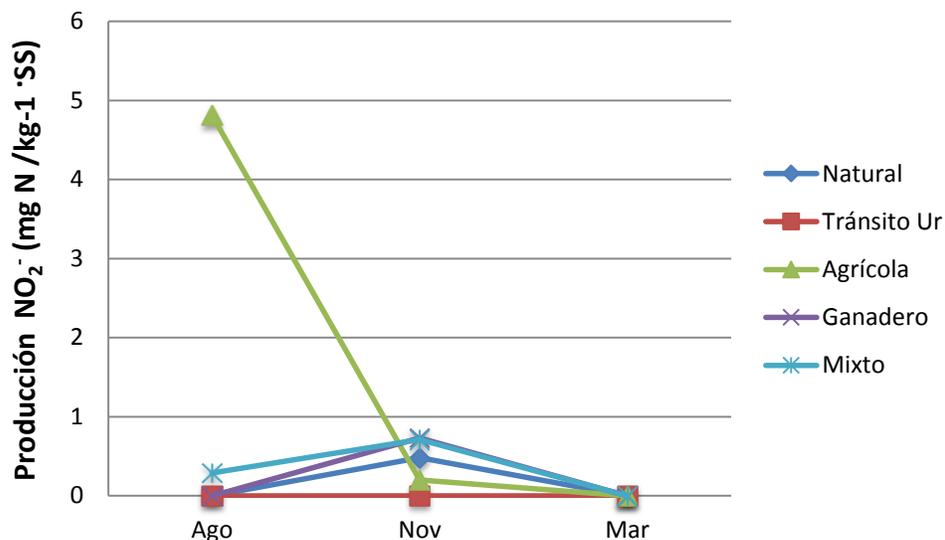


Figura 17. Comportamiento de NO_2^- en los diferentes usos de suelo a lo largo de los pulsos de inundación en agosto, noviembre y marzo (datos extraídos de la Tabla 5 del Anexo 2).

8.4.2.3 NO_3^- (nitrato)

Por su parte, la producción de nitrato fue básicamente nula para los suelos natural, ganadero y mixto durante los tres pulsos. En los suelos agrícolas y de tránsito urbano se detectó la presencia de nitrato en agosto (relativamente baja en los últimos dos) misma que fue de cero en los dos pulsos de inundación siguientes (Figura 18).

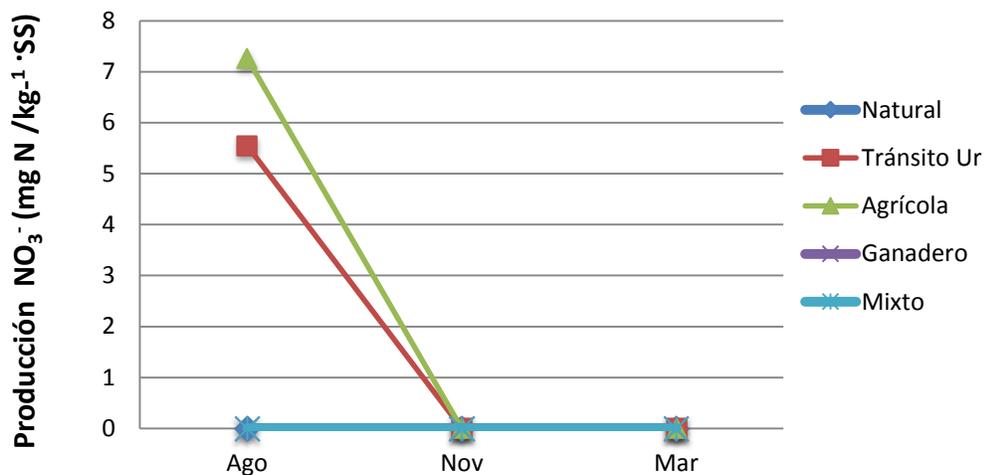


Figura 18. Comportamiento de NO_3^- en los diferentes usos de suelo a lo largo de los pulsos de inundación en agosto, noviembre y marzo (datos extraídos de la Tabla 5 del Anexo 2).

De manera general, la cantidad de nitrógeno inorgánico según la NOM-021-RECNAT-2000, fue de *alto* a *muy alto* en los diferentes suelos así como en los pulsos de inundación de agosto y noviembre, en marzo calificó como medio. El nitrógeno inorgánico presentó una distribución en la cual la concentración de amonio fue significativamente más abundante que nitrato y nitrito ($p=0.0002$) en todos los suelos, así como a lo largo de los pulsos de inundación ($p=0.04$) (Figura 19).

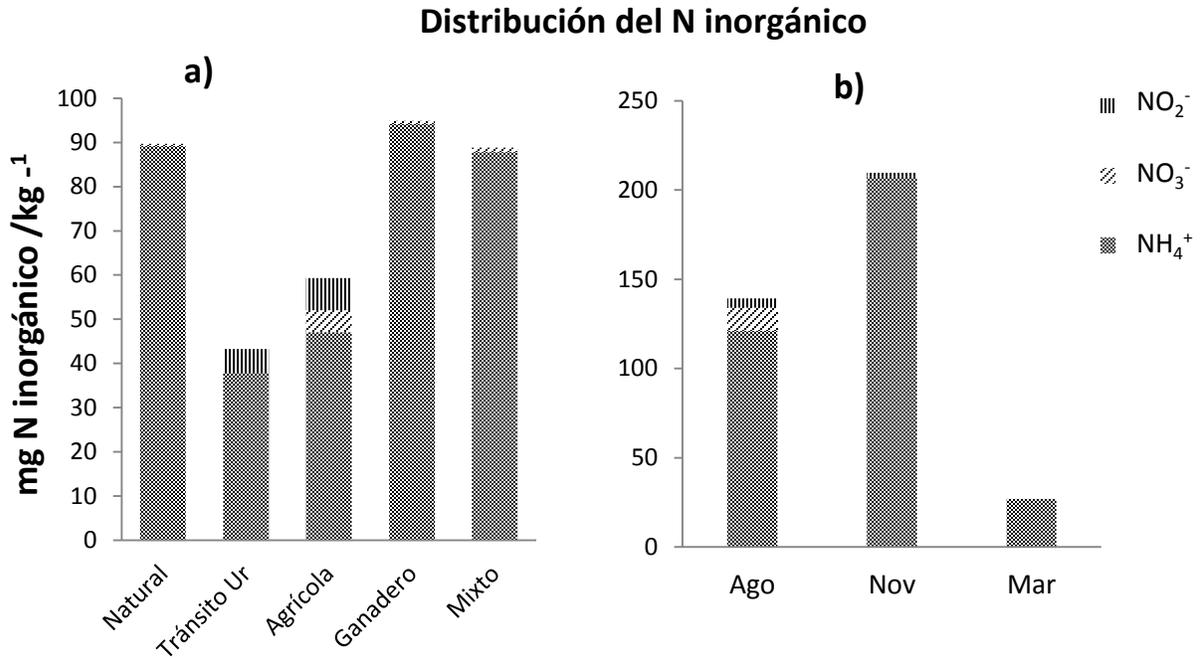


Figura 19. a) Distribución del nitrógeno inorgánico en los diferentes usos de suelo y b) a lo largo de los diferentes pulsos de inundación en agosto, noviembre y marzo.

Además, el amonio presentó una concentración significativamente mayor en noviembre en comparación con marzo ($p=0.006$); por lo que respecta al nitrito y nitrato no se pudieron analizar debido a que sus concentraciones fueron muy bajas o nulas.

8.4.2.4 Carbono orgánico total (COT) y Nitrógeno total (Ntot)

Tanto el COT como el Ntot no presentaron diferencias significativas entre los pulsos de inundación ($p=0.9$), usos de suelo ($p=0.22$) ni en zonas de muestreo ($p=0.1$). De manera general, el porcentaje de Ntot a lo largo del estudio fue en promedio de 0.25 ± 0.15 ($n=21$), valor considerado como *extremadamente rico* (Fernández, et al., 2006) y el de COT fue en promedio de 3.44 ± 1.37 ($n=21$) (Tabla 13).

Tabla 13. Valores medios ($X \pm DS$) y significancia para el porcentaje de COT y Ntot.

Variable independiente	N	COT	Ntot	COT	Ntot	
		Media ($X \pm DS$)		p		
Pulso de inundación	Ago	11	3.41±1.65	0.23±0.16	0.92	0.6
	Nov	10	3.47±1.08	0.27±0.14		
	Mar		ND	ND		
Uso de suelo	Trans Ur.	2	2.3±0.19	0.09±0.01	0.22	0.6
	Natural	4	4.7±2.6	0.45±0.23		
	Agrícola	11	3.1±0.7	0.21±0.06		
	Ganadero	2	3.5±0.26	0.22±0.02		
	Mixto	2	4.1±0.58	0.24±0.11		
Zona de muestreo	Pasto	17	3.22±1.2	0.23±0.14	0.14	0.3
	Sumergido	4	2.36±1.84	0.32±0.19		
	Límite		ND	ND		

8.4.2.5 Relación C/N

La relación C/N no mostró variaciones significativas en los diferentes pulsos de inundación ($p=0.5$), en los usos de suelo ($p=0.2$) ni en las zonas de muestreo ($p=0.9$). El promedio, de manera general fue de 15 ± 5.6 ($n=21$) (Tabla 15).

Tabla 14. Valores medios ($X \pm DS$) y significancia para la relación C/N.

Variable independiente	Media ($X \pm DS$)	N	p	
Pulso de inundación	Ago	16.5±6.7	11	0.5
	Nov	14.6±4.3	10	
	Mar	ND		
Uso de suelo	Trans Ur.	27±6.66	2	0.2
	Natural	10.3±1.48	4	
	Agrícola	14.8±3.82	11	
	Ganadero	16±2.79	2	
	Mixto	18.5±5.86	2	
Zona de muestreo	Pasto	15.7±6	17	0.9
	Sumergido	15.3±3.9	4	
	Límite	ND		

8.4.3 Cinética de producción de gases

El flujo de los gases medidos se puede consultar de manera más detallada en las Tablas 27 y 28 del Anexo 2.

8.4.3.1 Dióxido de carbono

En primera instancia, la producción de CO₂ a lo largo de los pulsos de inundación (Tabla 27 del Anexo 2) en la zona de transición *pasto* se pudo determinar en los tres pulsos de inundación y en todos los tipos de suelos, debido a que fue la zona más alta y por lo tanto más alejada del nivel del agua. Sin embargo, sólo en los suelos ganadero y una repetición del agrícola (ubicada en CSI1), el agua no logró inundarlos. Como se observa en la Figura 20, la mayor producción de CO₂ se detectó en el pulso de marzo aunque no de manera significativa ($p=0.9$). Por el contrario, la menor producción se detectó en el pulso de noviembre, lo cual fue significativo sólo en el suelo ganadero. De manera particular, el suelo de tránsito urbano presentó una tendencia diferente al resto de tipos de suelo ya que la mayor producción de CO₂ se registró en el pulso de noviembre respecto a los otros dos. No obstante todo lo anterior, la producción fue homogénea en los pulsos de inundación.

En segunda instancia, la producción de CO₂ en la zona de transición *sumergido* no se pudo medir en todos los suelos durante los tres pulsos de inundación debido al alto nivel del agua. Como se puede apreciar en la Figura 20, sólo se detectaron diferencias significativas entre los pulsos de inundación en el suelo agrícola, pues la producción en agosto fue significativamente menor que la de noviembre. Respecto al resto, la producción de CO₂ también fue homogénea.

Y en última instancia, en la zona de transición *límite* sólo se pudo muestrear en los suelos agrícola y natural. Comparando dichas producciones con las otras zonas de transición resultaron relativamente bajas.

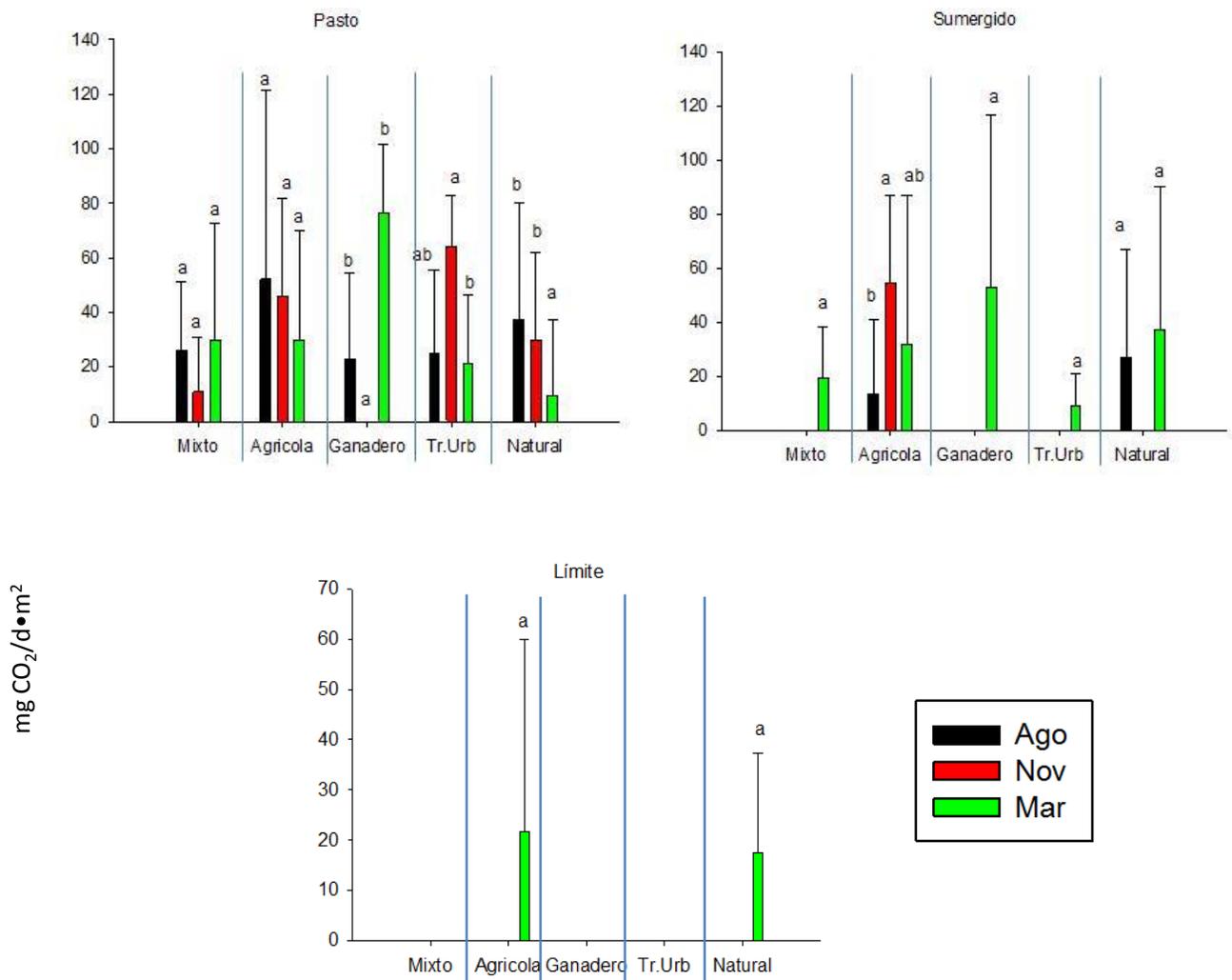


Figura 20. Producción de CO₂ (mg / d · m²) en las zonas de transición a) pasto, b) sumergido y c) límite, en los diferentes pulsos de inundación. Las diferencias significativas están indicadas con letras y representan el análisis post hoc de manera independiente.

En lo que corresponde al análisis por usos de suelo (Figura 21; Tabla 28 del Anexo 2) en el pulso de agosto no se apreciaron diferencias. En el pulso de noviembre se detectó una emisión significativamente mayor en los suelos de tránsito urbano y agrícola respecto al mixto y ganadero, y natural. En el pulso de marzo, la emisión del suelo ganadero fue significativamente mayor al resto. Y considerando las zonas de transición, las emisiones lucen homogéneas entre los diferentes usos de suelo en los tres pulsos de inundación.

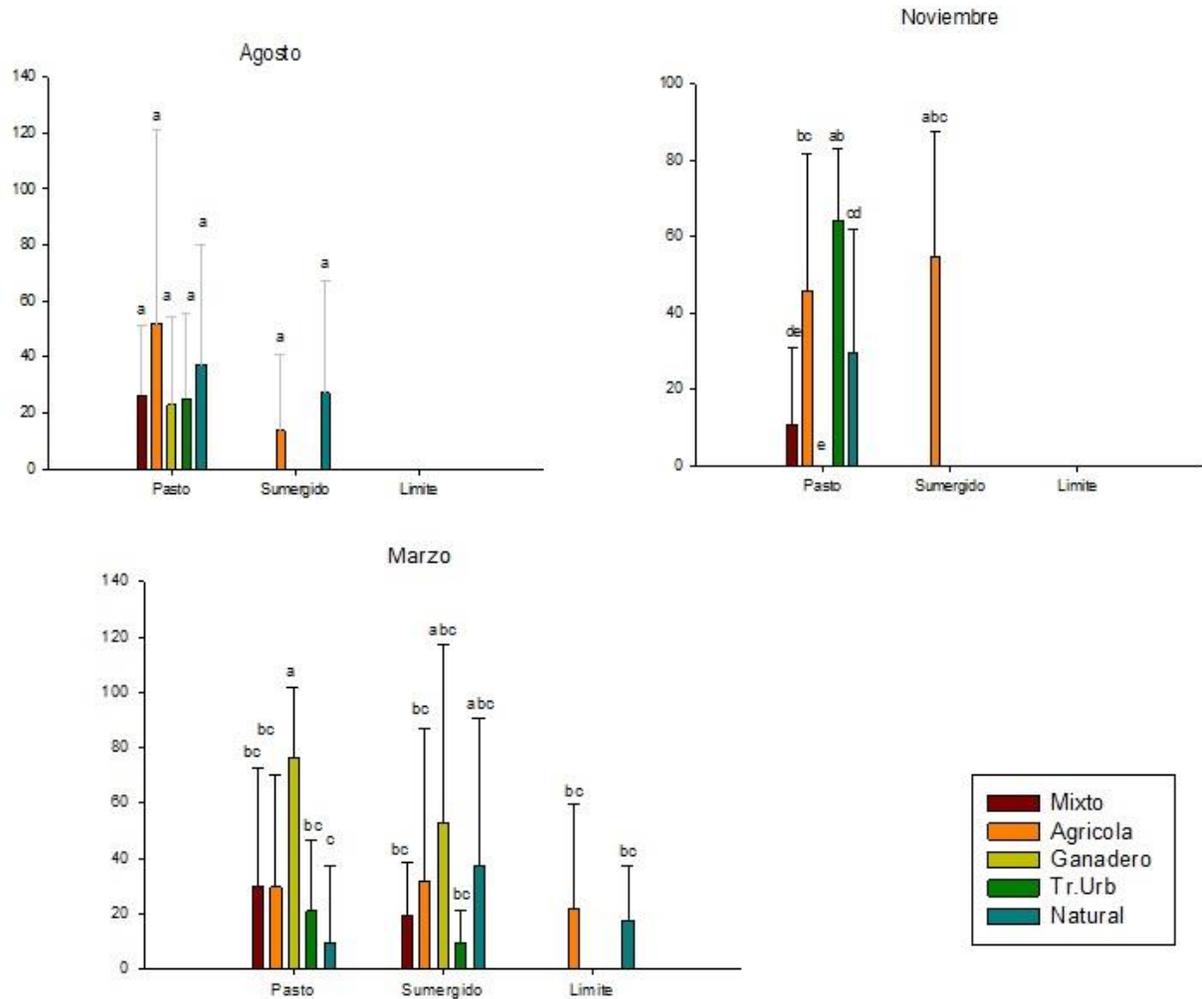


Figura 21. Producción de CO₂ (mg / d · m²) a lo largo de los pulsos de inundación entre los diferentes usos de suelo. Diferencias significativas indicadas con letras.

8.4.3.2 Metano

La producción de CH₄ resultó ser significativa (p=0.01) en el pulso de noviembre de la zona *pasto* en todos los suelos a excepción del ganadero, y en la zona *sumergido* sólo en los suelos mixto y agrícola. Por su lado, en la zona *limite* fue posible detectar producción de metano sólo en el pulso de marzo en el suelo agrícola y natural, y dicha producción fue mucho menor al compararse con las encontradas en las otras dos zonas (Figura 22; Tabla 27 del Anexo 2).

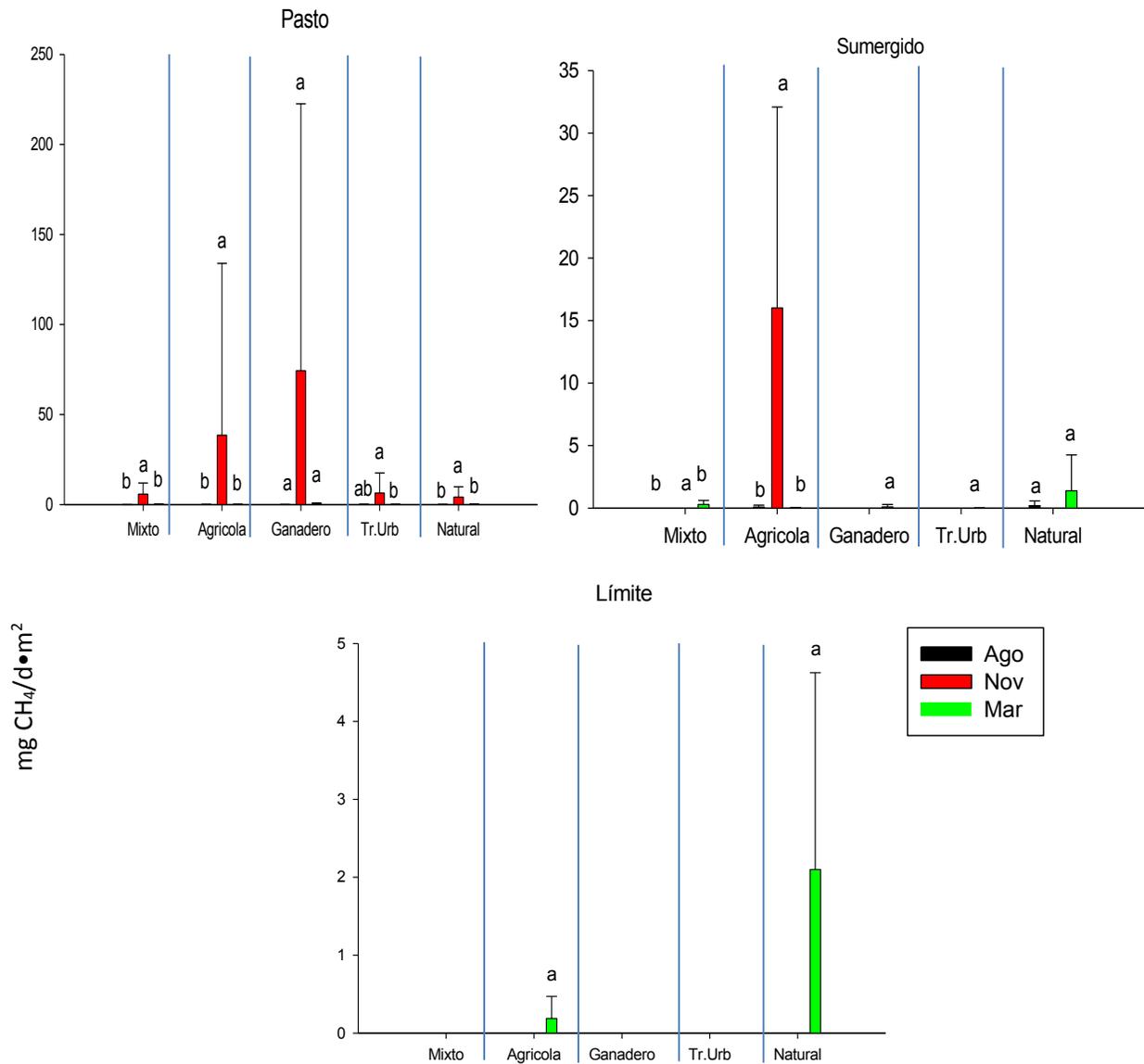


Figura 22. Producción de CH₄ (mg / d · m²) en las zonas de transición a) pasto, b) sumergido y c) límite, en los diferentes pulsos de inundación. Las diferencias significativas están indicadas con letras y representan el análisis post hoc de manera independiente.

La emisión de CH₄ medida en el pulso de agosto no presentó diferencias significativas entre los diferentes suelos ni entre las zonas; en noviembre la zona *sumergido* del suelo agrícola fue significativamente mayor a las zonas *pasto* del suelo natural y ganadero; y en marzo no se apreciaron diferencias claras entre las zonas y los diferentes usos de suelo (Figura 23; Tabla 28 del Anexo 2).

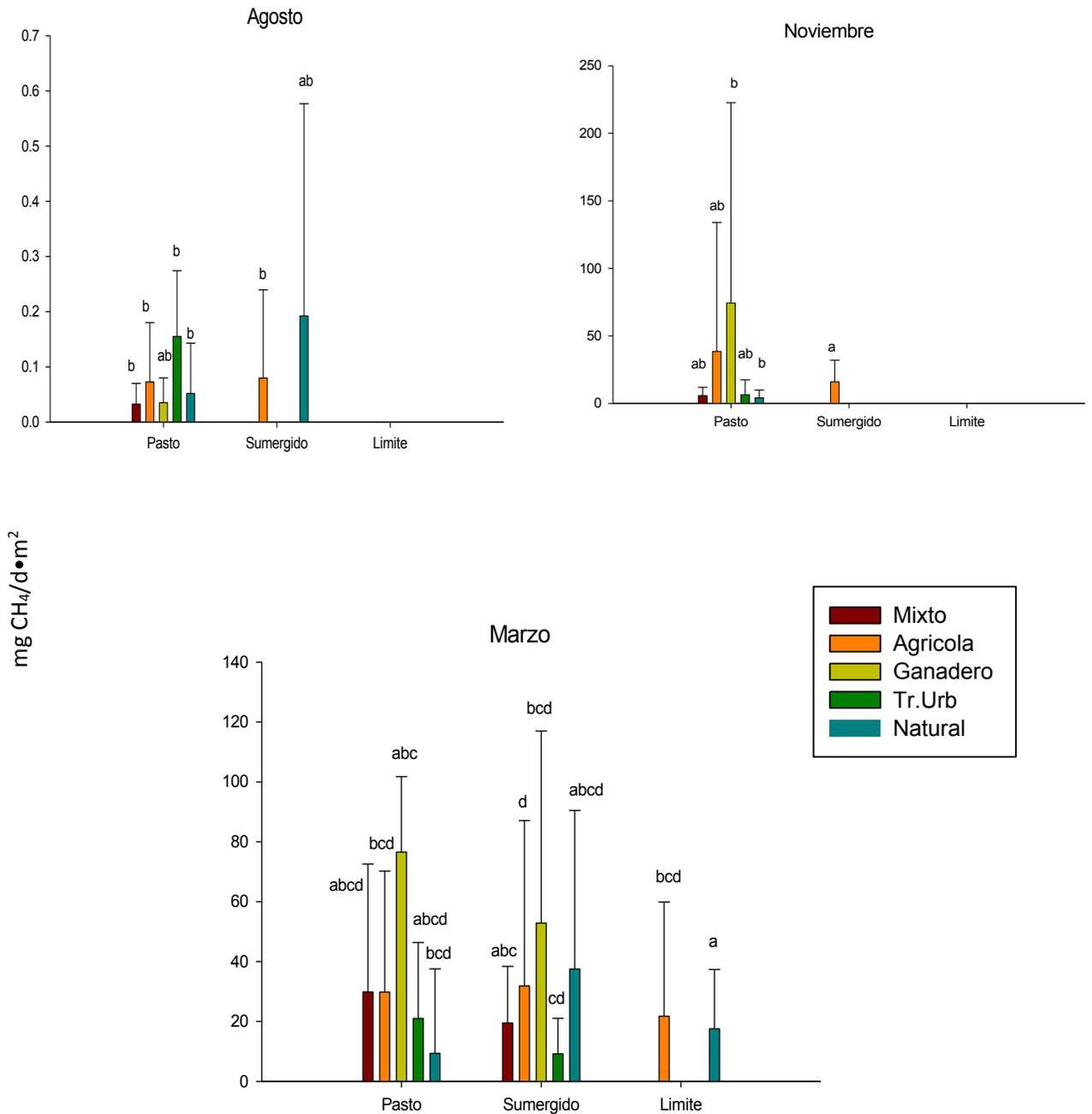


Figura 23. Producción de CH₄ (mg / d · m²) a lo largo de los pulsos de inundación entre los diferentes usos de suelo. Diferencias significativas indicadas con letras.

8.4.3.3 Óxido nítrico

Como se puede notar en la Figura 24 y en la Tabla 27 del Anexo 2, la producción de N₂O de la zona *pasto* no presentó diferencias significativas entre los pulsos de inundación en ninguno de los suelos, sin embargo fue en marzo del suelo natural que se presentó la mayor emisión. En la zona *sumergido*, sólo la producción de marzo fue significativamente mayor a la de

noviembre en el suelo agrícola; no obstante, no se asemeja a las detectadas en *pasto*. Y en la zona límite solo se pudieron muestrear los suelos agrícola y natural en el pulso de marzo sin apreciarse diferencias claras.

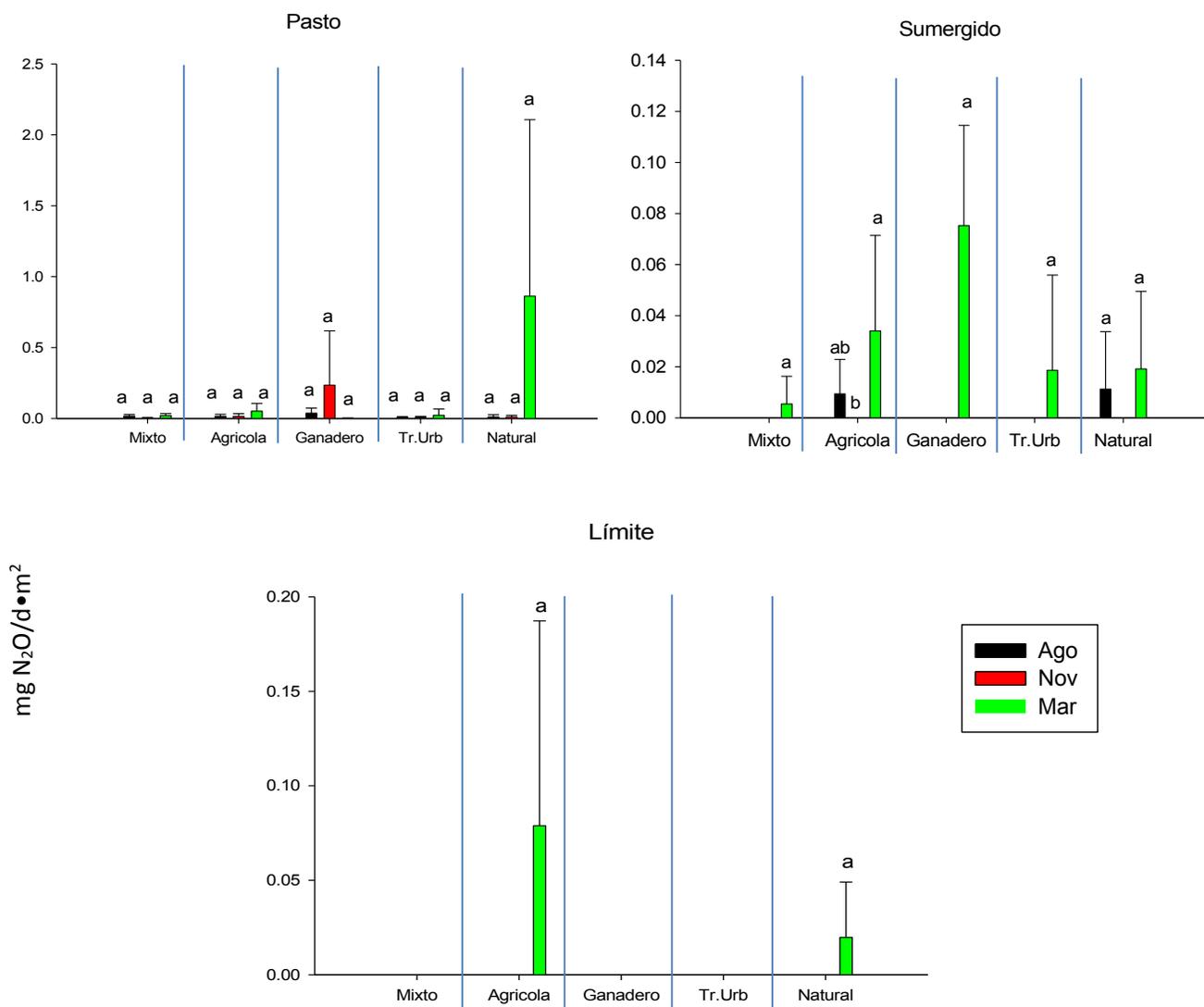


Figura 24. Producción de N₂O (mg / d · m²) en las zonas de transición a) pasto, b) sumergido y c) límite, en los diferentes pulsos de inundación. Las diferencias significativas están indicadas con letras y representan el análisis post hoc de manera independiente.

En lo que respecta al análisis por uso de suelo, no se apreciaron diferencias significativas ($p=0.5$) a lo largo de los pulsos de inundación (Figura 25 y Tabla 28 del Anexo 2).

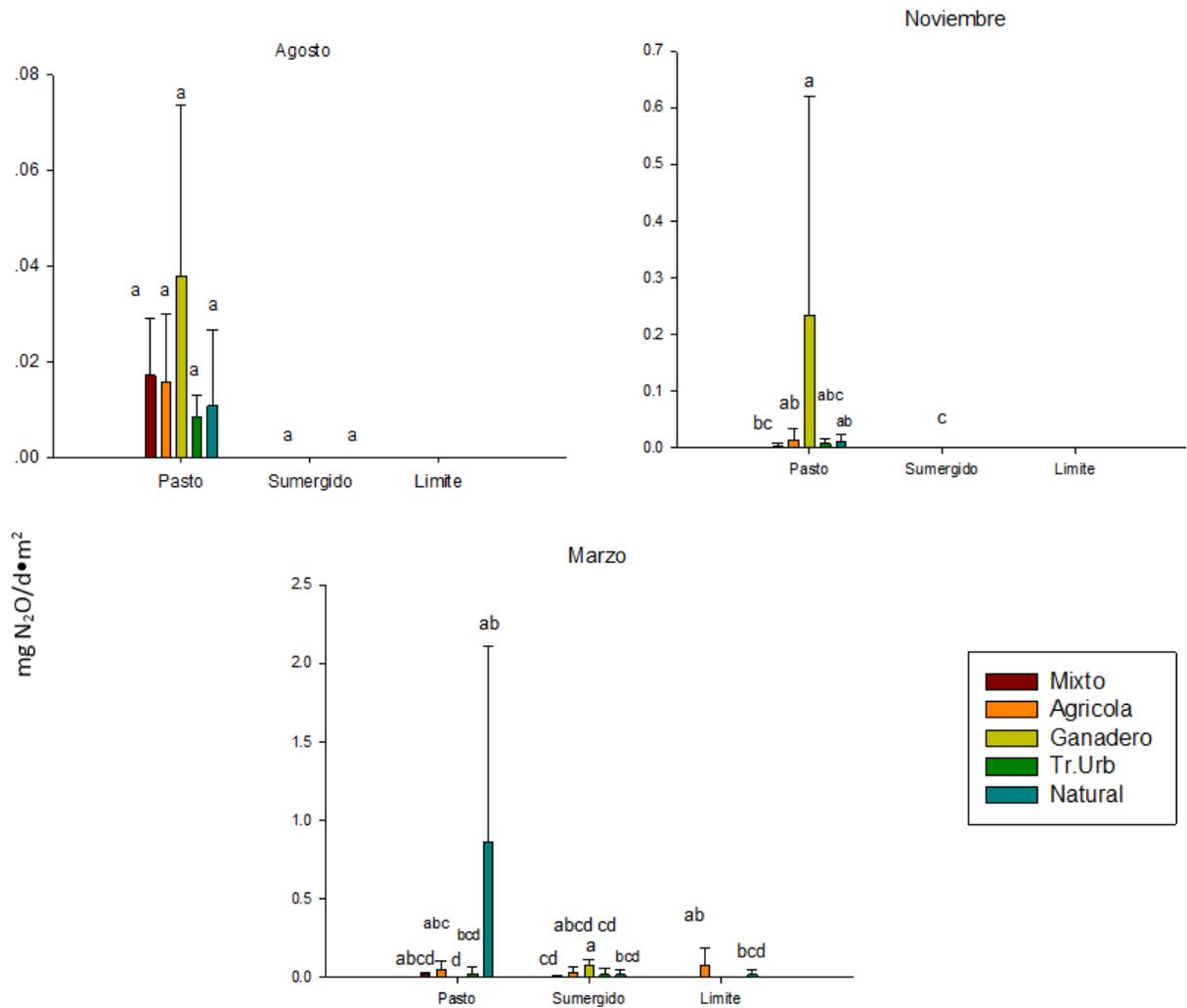


Figura 25. Producción de N₂O (mg / d · m²) a lo largo de los pulsos de inundación entre los diferentes usos de suelo. Diferencias significativas indicadas con letras.

Comparando las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄ de manera general, se observó una relación inversa entre las emisiones de CO₂ y N₂O, y las de CH₄ (Figura 26); de tal manera que en los puntos donde se dan las mayores emisiones CH₄ se dan también las menores de CO₂ y N₂O, y viceversa.

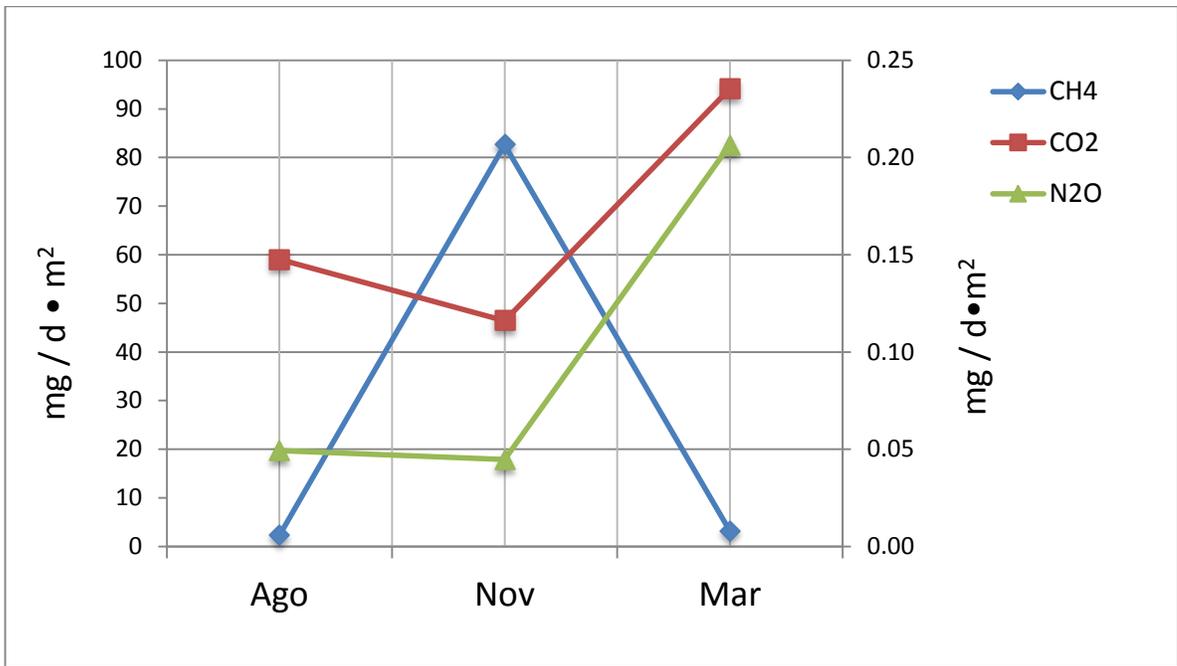


Figura 26. Comparación entre las emisiones promedio de CO₂, CH₄ y N₂O (eje secundario) a lo largo de los pulsos de inundación.

9 DISCUSION

9.1 Características físico-químicas del suelo

Según la literatura, el humedal de estudio tiene un **suelo del tipo mineral** puesto que en todos los suelos, el porcentaje de carbono orgánico y contenido orgánico no rebasan el 12 y el 20 % respectivamente (Mitsch y Gosselink, 2015).

La **textura** fina que predomina en los suelos del tipo gleysol de Emiliano Zapata (INEGI, 2008), implica en términos físicos, gran capacidad de retención de agua y con ello bajo O₂ disponible, fenómenos de filtración y lixiviación pobres, así como resistencia a la intemperización; en términos biológicos, permite una productividad alta, debido a que contienen alto contenido de materia orgánica y de bases intercambiables, todo ello esencial para el crecimiento vegetal y señal de un suelo fértil y de buena calidad (Bautista y Palma-López, 2005; Huerta, 2010).

El **porcentaje de humedad** osciló entre el 50% en las muestras de suelo por lo cual se puede entender que el humedal se encuentra bajo la influencia directa del río Usumacinta y a las abundantes precipitaciones en verano. Esto favorecido además por el suelo arcilloso y a la abundante vegetación que frena los fenómenos de erosión del suelo. La presencia de agua suficiente en el suelo es determinante para el crecimiento vegetal puesto que les permite realizar sus procesos fisiológicos, así como tomar de ella nutrimentos en solución (Thompson y Troeh, 2004).

Además, las condiciones impuestas por el **hidroperiodo** son muy importantes para el mantenimiento de la estructura y el funcionamiento de estos ecosistemas, ya que crean condiciones físico-químicas únicas que determinan características, tales como las condiciones de anaerobiosis del suelo, la acumulación de materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes, la riqueza y abundancia de especies, y la productividad primaria (Travieso-Bello, et al., 2005).

Es entonces que por la influencia del agua en el humedal, los suelos son denominados hídricos, ya que son formados bajo condiciones de saturación o inundación por un periodo suficientemente largo. De esta manera, los suelos de los humedales poseen sólo una pequeña capa aerobia de tan sólo unos cuantos milímetros en la superficie o interfase con la

columna debido a que el oxígeno en los espacios intersticiales del suelo es desplazado por el agua, y causa condiciones anaerobias. Dichas condiciones favorecen un suelo fértil por ciertos procesos biogeoquímicos que se dan, como la acumulación de materia orgánica y la reducción/translocación del hierro y otros elementos reducibles como el manganeso. Esto a su vez promueve el crecimiento de plantas macrófitas e hidrófitas (el segundo tipo de vegetación más abundante en Emiliano Zapata después de pastizal no inundable, (Cámara, et al., 2011), que constituyen la base de la cadena alimenticia en los humedales, debido a que a diferencia de los sistemas terrestres, no es consumida por herbívoros, sino que es convertida a detritus. Y tomando como apoyo la literatura (Hernández, 2010), se puede saber que en el humedal las plantas proveen hábitat estructural crítico para grupos taxonómicos como las bacterias, epifitas, perifiton (biofilm de microorganismos y detritus sujetos a zonas sumergidas), macro-invertebrados y peces. Además, la vegetación influencia fuertemente la química del agua, ya que las plantas pueden actuar como fuente o como sumideros de nutrientes y también bombean los nutrientes de la columna del agua al sedimento.

El estudio de **pH** en los humedales es útil desde el punto de vista que es un indicador de las reacciones químicas que se están llevando a cabo. Según la literatura, el pH de los suelos en los humedales naturales es ligeramente ácido, oscilando de 6 a 7 (Kadlec y Wallace, 2009). Sin embargo, en condiciones de anaerobiosis, las reacciones de reducción consumen protones (formación de NH_4^+ por ejemplo), lo cual puede incrementar el pH del suelo (Grybos, et al., 2009), además de que, en el día la comunidad vegetal de la columna del agua es altamente productiva, con una alta asimilación de CO_2 por las plantas lo que disminuya su concentración en solución (1) (Cronk y Fennessy, 2001). De esta manera se puede explicar la diferencia del promedio de pH en el pulso de inundación máxima en noviembre (pH medianamente alcalino) y mínima en marzo (pH neutro) cuando el nivel del agua en el humedal ha bajado casi al máximo; lo mismo puede aplicar para los sitios CU, CSI y CP, ya que tenían una columna de agua al menos 1 metro arriba y cuyo pH fue medianamente alcalino.



Por el contrario, los valores de pH ligeramente bajos encontrados en los suelos naturales (pH moderadamente ácido), la materia orgánica húmica disuelta puede tener mucha importancia

en el valor de pH, debido a que ésta tiene grupos carboxílicos y fenólicos que se comportan como ácidos débiles (Martínez, et al., 2008). Además, en suelos inundados, la MO se fermenta y se forman varios productos orgánicos tales como ácidos orgánicos, los cuales contribuyen a disminuir el pH del suelo (Mitsch y Gosselink, 2015) de hecho, hay estudios en donde se demuestran correlaciones contundentes ($r=0.78$) (Aguilar, 2012).

Lo anterior es poco probable que ocurra con suelos de uso agrícola, ganadero o mixto, ya que el porcentaje de materia orgánica resultó de medio a bajo; caso contrario en el suelo natural cuyo porcentaje fue alto.

Los valores de pH obtenidos, aunque son diferentes entre los diferentes suelos, son cercanos a 7, lo que favorece la actividad microbiana debido a que los principales organismos que habitan en suelos reducidos son bacterias anaerobias, las cuales funcionan mejor a pH cercano a 7. Entonces, los procesos de amonificación, desnitrificación y formación de metano son favorecidos por los cambios de pH en los suelos sumergidos. De igual manera, sólo a valores de pH por encima de 5.5 en los suelos minerales se puede producir la fijación del nitrógeno y la nitrificación (Huerta, 2010). También a valores de pH cercanos a 7, la descomposición y mineralización de la MO ocurren más fácilmente, la liberación microbiana de N y P es rápida, los suministros de Cu, Fe, Mn, Mo y Zn son adecuados; y la concentración de sustancias que interfieren con la asimilación de nutrientes tales como Al o Fe se encuentran a niveles bajos de toxicidad (Brady y Weil, 2008).

En lo que respecta a la **salinidad**, no se encontraron diferencias significativas entre los diferentes suelos más que entre los pulsos de inundación, lo cual se pueden atribuir a factores climáticos, es decir, a los pulsos de inundación. El aumento de la salinidad al momento de la subida del nivel del agua (en agosto) es consecuencia de los pulsos de inundación ya que éstos pueden ser los factores primarios a través de los cuales las sales acumuladas por las altas tasas de evaporación en la columna del agua (si es que la hubiera por mínima que sea) y los sedimentos durante la temporada de estiaje (marzo) son diluidas y posteriormente, lavadas del suelo en temporadas de lluvia (noviembre) cuando el flujo del agua aumenta (Jolly, et al., 2008).

Se tiene reportado que los posibles efectos de la condición de salinidad alta se reflejan con una disminución del crecimiento vegetal y en el desarrollo de la comunidad microbiana

(Szöcs, et al., 2012). Sin embargo, en el humedal analizado no se apreciaron diferencias significativas en la materia orgánica por muerte vegetal ni emisiones de gas diferentes (relacionadas con actividad microbiana) durante los pulsos de inundación.

9.2 Características biológicas del suelo

9.2.1 Materia Orgánica

La acumulación de MO depende de la relación entre las entradas (materia orgánica producida *in situ* y *ex situ*) y las salidas de MO. Estas últimas están influenciadas por la descomposición y por la erosión del suelo como producto de las altas precipitaciones (Kayranli, et al., 2010). En condiciones naturales del humedal, tal como se observa en los suelos *naturales* analizados, el porcentaje de MO suele ser alto, ya que los suelos inundados imponen condiciones anaerobias debido a que el oxígeno de los espacios libres es sustituido por agua. Esto combinado con la demanda respiratoria de las raíces y los microorganismos del suelo, resulta en una lenta descomposición de la materia orgánica y con ello su acumulación (Kayranli, et al., 2010). De hecho, en Whiting y Chanton (2001), indicaron que los humedales llegan a albergar en el reservorio de sus suelos a nivel global $\sim 1500 \times 10^{15}$ g C y se encuentran entre los ecosistemas con mayor densidad de carbono (Kayranli, et al., 2010), por lo que se llegan a considerar como sumideros de C, aunque las condiciones reducidas implican a su vez, la emisión de CH₄ (Hernández, 2010).

Además, la erosión del suelo es algo que no se observa en los suelos naturales debido a que no se encuentran en contacto con un flujo constante de agua y todo el humedal es un terreno de tipo llanura que por su bajo relieve impide un lavado del suelo, lo que resulta en que la MO tiende a acumularse (Martínez, et al., 2008).

Por el contrario, el bajo porcentaje de MO encontrado en los suelos de uso agrícola responde al trato que recibe el suelo puesto que, inclusive detectada la presencia de un amplia variedad de plaguicidas (dato sin publicar del proyecto global “Retos para la Sustentabilidad en la Cuenca del Rio Usumacinta en Tabasco: Ecosistemas Cambio Climático y Respuesta Social” con subproyecto: Análisis del estado del ecosistema de las Lagunas de Chaschoc (Emiliano Zapata, Tabasco) y su funcionamiento a través del estudio de los ciclos biogeoquímicos del carbono y nitrógeno, la biodiversidad microbiana, la faunística y florística,

junto con la calidad de agua y la hidrología”) y el empleo muy probable de fertilizantes, la perturbación ocurrida por la labranza podría acortar el “ciclo de vida” de los macroagregados disminuyendo la formación de nuevos microagregados y la captura de C dentro de ellos (Martínez, et al., 2008). Además la aireación que implica el laboreo potencia la oxidación de la materia orgánica, debido a un incremento de la actividad microbiana.

De igual manera que el suelo agrícola, el porcentaje de MO del suelo de tránsito urbano resultó bajo, muy probablemente debido a la erosión que sufre el suelo como resultado del paso constante de personas y ganado; además de que la zona se encuentra en contacto directo con el paso del río Usumacinta, lo cual la hace susceptible a ser lavada con las fluctuaciones del agua; como signo de lo anterior mencionado la vegetación ahí es escasa. La MO se encuentra concentrada en la superficie del suelo y dado su baja densidad, es sujeta a ser removida del suelo por efectos de la erosión causada por el lavado del agua o por la fricción física del paso urbano (Lal, 2005).

Por su parte, el porcentaje medio del suelo ganadero se puede atribuir a razones físicas del lugar, ya que la actividad ganadera es en sí un aporte de materia orgánica, representada en los excrementos de los animales equinos y bovinos que ahí se encuentran. El sitio ganadero es una zona no inundable (Figura 12d –de los niveles del agua–) y por lo tanto la mineralización de la materia orgánica ocurre de manera regular favorecida por las altas temperaturas (~30 °C; Kayranli, et al., 2010). Además la muestra de suelo sumergido se encuentra en una pendiente bastante pronunciada, lo que la hace sujeta a ser lavada por escorrentías o arrastre de agua o bien, por el viento.

El alto porcentaje de MO encontrado en los tres pulsos de inundación apunta que la cantidad de MO es tal que la entrada de MO en el suelo es probablemente mayor a su salida: en efecto, la baja relación C/N, las temperaturas cálidas (25-35°C), los valores de pH neutros se relacionan con una actividad microbiana óptima (Brady y Weil, 2008; León, 2011).

El estudio de la MO resulta importante porque es la precursora de la emisión de GEI en los humedales, donde existen gradientes de óxido – reducción que influyen fuertemente su destino y sus transformaciones. Si se encuentra en zonas aerobias, puede ser oxidada a CO₂ y H₂O utilizando el oxígeno como último aceptor de electrones. Por otro lado, si los compuestos orgánicos se encuentran en zonas anaerobias, los microorganismos utilizan la

glucosa para obtener energía química produciendo ácidos orgánicos de bajo peso molecular, los cuales serán convertidos a CO₂, utilizando aceptores de electrones como NO₃⁻, Mn⁴⁺, Fe³⁺ y SO₄²⁻. (Hernández, 2010).

9.2.2 Seguimiento del nitrógeno NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻

El estudio de la dinámica del nitrógeno inorgánico (NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻) es determinante para conocer que procesos rigen la producción de N₂O. La cantidad de N inorgánico encontrada se vio favorecida por la baja relación C/N (menor de 30/1), misma que no mostró diferencias significativas entre los diferentes suelos analizados ni a lo largo de los tres pulsos de inundación, ya que a esos valores, la transformación del nitrógeno presenta una dominancia de la mineralización sobre la inmovilización. Por lo tanto, el nitrógeno orgánico debe formarse por amonificación en contacto con el agua, de modo que es hidrolizado para formar aminoácidos que se descomponen en ion amonio, y por tanto, dan lugar a nitrógeno amoniacal. Esa forma de nitrógeno queda disponible para ser usado por plantas, en procesos microbianos, y para los procesos de nitrificación y desnitrificación según las condiciones ambientales (García, 2008; Signor y Pellegrino, 2013).

En la mineralización, los procesos de nitrificación – desnitrificación ocurren en la capa oxidada – reducida del suelo respectivamente. Aun cuando, las cantidades de nitrito y nitrato encontradas son insignificantes debido a su alta inestabilidad (Xing, et al., 2002). En los suelos inundados, la mineralización del N orgánico a inorgánico y viceversa son procesos que están altamente relacionados. La conversión del N orgánico llega hasta la formación de amonio (amonificación) tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas (Mitsch y Gosselink, 2015). El N orgánico puede provenir de la fijación de N₂ mediante bacterias, MO y fertilizantes naturales o sintéticos. El abono proveniente del ganado, como fertilizante natural, es rico en N orgánico e inorgánico: el primero proviene de las heces y el segundo de la orina como urea, donde el amonio es predominante (Price, 2006): este dato podría explicar la alta concentración de amonio en el suelo ganadero, respecto a los otros en agosto.

El amonio entonces puede ser objeto de fijación en las arcillas o inmovilización por microorganismos si es que el O₂ en el suelo es escaso, dando como resultado su

acumulación, tal como se observó en el pulso de inundación máxima de noviembre; o bien, el amonio puede ser oxidado a nitrato, con el nitrito como componente intermedio en la secuencia de la reacción (nitrificación), en caso que el suelo está expuesto a buenas condiciones de aeración como ocurrió en marzo (pulso de inundación mínima). Esto se corrobora además, con una mayor producción de N_2O en ese mismo pulso, pues la nitrificación es el precursor principal para la producción de N_2O (Adams, 1995; Mitsch y Gosselink, 2015; Xing, et al., 2002). Sin embargo, a concentraciones de MO alta, las bacterias nitrificantes compiten con las bacterias heterótrofas para el oxígeno: por lo tanto, el proceso de nitrificación se puede ver disminuido y la producción de N_2O puede no ser significativa (Galván, 2011).

Es así que el amonio como forma de N predominante en los suelos se debe muy probablemente a que es fijado por las arcillas, por medio de intercambio catiónico, (Galván, 2011) y a que difícilmente se oxida a nitrato por las condiciones reducidas impuestas por la abundante humedad del suelo, aunado al alto porcentaje de MO. Acoplado a lo anterior, la escasa cantidad de nitrato encontrado puede atribuirse a diversas razones:

- una de ellas, la que se menciona arriba, es decir el que se llega a producir es reducido nuevamente a amonio (reducción disimilatoria del nitrato), ante lo cual, es importante mencionar que la reducción disimilatoria del nitrato y nitrito a amonio tiende a dominar en ambientes ricos en carbono, tal como se encontró en el humedal (Vymazal y Kröpfelová, 2008);

- otra, cuando el suministro de O_2 se agota, las bacterias anaerobias facultativas optan por utilizar el NO_3^- como aceptor de electrones en sustitución del O_2 (Liikanen y Martikainen, 2003). Se podría considerar la desnitrificación, sólo que en Vymazal y Kröpfelová (2008) se menciona que este proceso tiende a dominar en ambientes ricos en nitratos pero pobres en carbono, lo cual es contrario a las condiciones encontradas en los suelos analizados. Por lo tanto la desnitrificación quedaría en desventaja.

9.2.3 Producción de GEI

En la comparación de las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄ a lo largo de los pulsos de inundación se observó una relación inversa entre las emisiones de CO₂ y N₂O contra las de CH₄. Esto no hace más que corroborar la distinta naturaleza de los procesos que participan en la producción de los diferentes gases. La respiración metanogénica está asociada a ambientes anaeróbicos, mientras que la nitrificación del nitrógeno amoniacal y la oxidación biológica de la MO requieren condiciones aeróbicas.

9.2.3.1 Emisión de dióxido de carbono

Las fluctuaciones en la emisión de CO₂ muestran estar relacionadas con el nivel del agua, ya que este determina el grado de aireación del suelo (Ruser, et al., 2006). Las mayores emisiones se encontraron en el pulso de inundación mínima (marzo) y las menores en el pulso de inundación máxima (noviembre). Este comportamiento responde a los procesos de mineralización de la MO en condiciones anaerobias y aerobias respectivamente. Durante el estiaje, la presencia de O₂ disuelto en el suelo permite la oxidación bioquímica de la MO, misma que libera grandes cantidades de CO₂, junto con otros compuestos como H₂O, NO₃⁻, NH₄⁺, PO₄³⁻ (Porta, et al., 2013). Aunado a esto, la respiración vegetal y faunística, así como la oxidación de metano también liberan CO₂ (Rastogi, et al., 2002; Whalen, 2005). Por otro lado, durante el anegamiento, la degradación de la MO es incompleta puesto que se ve limitado el O₂ necesario para el metabolismo microbiano en el suelo y el producto final gaseoso en estas condiciones es principalmente el CH₄ y en mucho menor medida el CO₂ también (Kayranli, et al., 2010; Knox, et al., 2014). De manera contraria a lo mencionado, los picos altos de producción de CO₂ encontrados en el suelo de tránsito urbano y agrícola durante el pulso de noviembre se pueden deber a que recibieron material orgánico contenido en los sedimentos arrastrados en el canal, al momento de subir el nivel del agua; sumado a ello, estos suelos no quedaron completamente inundados pues el nivel del agua en el suelo de tránsito urbano tenía una altura de ~50 cm que no impedía el paso de personas o ganado (aireando de esa manera el suelo), y una repetición del suelo agrícola quedaba expuesto.

El cambio de uso de suelo, las actividades agropecuarias y el drenado de los humedales produce emisiones de CO₂ considerables (Barbier, et al., 1997; Hynšt, et al., 2007; Thornton y

Herrero, 2010). No obstante, las emisiones detectadas en todos los usos de suelo no resultaron comparables con las encontradas en suelos agrícolas, ganaderos o las de un humedal drenado (Tabla 16). De hecho, son mucho menores, a excepción de las comparadas con el campo agrícola de maíz con labranza de conservación, pues en éste se implementa un *sistema de conservación* donde argumentan que gracias al conjunto de técnicas que emplean logran hacer de ese terreno un sumidero de carbono, lo cual se ha observado en distintos estudios (West y Marland, 2002; Thornton y Herrero, 2010; Knox, et al., 2014).

Dicho esto, se debe decir que la baja concentración de CO₂ emitida en las Lagunas de Chaschoc indican un equilibrio en el sistema, donde el humedal es capaz de remover y purificar la carga orgánica proveniente de las actividades agrícolas y ganaderas, que implican el empleo de fertilizantes, plaguicidas y el aporte de abono natural. Por lo tanto, el humedal se debe encontrar dentro de su capacidad de resiliencia. Esto mediante la retención en los sedimentos, adsorción por parte de las plantas y la descomposición microbiana (Jiang, et al., 2004). Ante esto, es importante mencionar que gracias a la resiliencia del humedal se está previniendo el desgaste del suelo en lugares degradados, y por ende previene cuantiosas emisiones de CO₂ (Tabla 16).

De acuerdo con lo anterior, las emisiones de CO₂ provenientes de un humedal natural no se encontraron ampliamente reportadas en la bibliografía debido a que generalmente son considerados sumideros de carbono (incluso en estiaje o en pulsos de inundación mínima) por dos razones esenciales: secuestran grandes cantidades de CO₂ a través de la fotosíntesis de la abundante vegetación característica de los humedales ribereños y a que son de los ecosistemas terrestres con un potencial de almacenamiento de C más altos debido a las bajas tasas de descomposición inducidas por el nivel alto del agua (Whiting y Chanton, 2001; Rastogi, et al., 2002; Kayranli, et al., 2010; Knox, et al., 2014). En otras palabras, la productividad primaria está rebasando las tasas de descomposición y por lo tanto las formas de carbono que predominaron fueron principalmente el carbono orgánico del suelo en los tres pulsos de inundación (Figura 1 Anexo 3). Martínez y colaboradores (2008) indicaron que el carbono orgánico del suelo (COS) es un componente importante del ciclo global del C, ocupando un 69.8 % del C orgánico de la biosfera.

Tabla 15. Emisión puntual de CO₂ en suelos agrícola y ganadero, y de humedal drenado.

Procedencia	Emisión cuantificada (mg CO ₂ /m ² ·d)	Referencia
Humedal drenado para cultivo de arroz (fertilizado y plaguicidas)	41.01	Knox, et al., 2014
Campo agrícola (maíz y soya)	6960	Morse, et al., 2012
Campo agrícola (maíz) con labranza de conservación y labranza convencional	37.5 ; 46.02	West y Marland, 2002
Humedal natural drenado para cultivo de maíz	761.64	Knox, et al., 2014
Campo ganadero	2,620	Hynšt, et al., 2007
Humedal natural drenado para pastoreo de ganado	934.25	Knox, et al., 2014
Humedal natural drenado para pastoreo de ganado	12.32 ± 136.98	Nieveen, et al., 2005
Humedal natural drenado	898.6 ± 558.9	Hirano, et al., 2012

9.2.3.2 Emisión de óxido nítrico

Las fluctuaciones del N₂O fueron similares a las del CO₂, lo cual es comprensible al saber que la liberación de ambos gases es abundante en condiciones aerobias, tal como se observó en los picos de inundación mínima (marzo). Para comprender la emisión en los pulsos de inundación anteriores es necesario considerar los procesos que intervienen en la producción de N₂O.

El N₂O se puede producir a través de distintos procesos. Gran parte del N₂O se produce a través de los procesos biológicos de la nitrificación – desnitrificación (Signor y Pellegrino, 2013), para los cuales debe haber suficiente O₂ para el primero y una reducida difusión de O₂ para el segundo (potencial redox de 450 mV; Hernández, 2010), sin llegar al punto de inhibir la nitrificación. Esta situación puede explicar el pico de producción de N₂O en el pulso de marzo, aunque no fue de manera significativa. Sin embargo, en condiciones de anegamiento, el consumo de oxígeno es tal que la nitrificación se ve limitada y con ello la producción de los precursores de la desnitrificación (nitrito) (Pauwels y Talbo, 2004), caso que probablemente se puede atribuir a las Lagunas de Chaschoc durante los pulsos de agosto y noviembre. Entonces se intuye que la producción de N₂O que se observó en dichos pulsos pudo ocurrir por otros procesos. Bien se puede considerar la denominada “parcial nitrificación – desnitrificación” (Figura 27), en donde, a condiciones de baja concentración de oxígeno, la

producción de nitrito es favorecida sobre la producción de nitrato, el nitrito así puede ser desnitrificado a N_2O o nitrógeno molecular (N_2) sin la necesidad de ser convertido a nitrato (Oenema, et al., 2005; Galván, 2011).

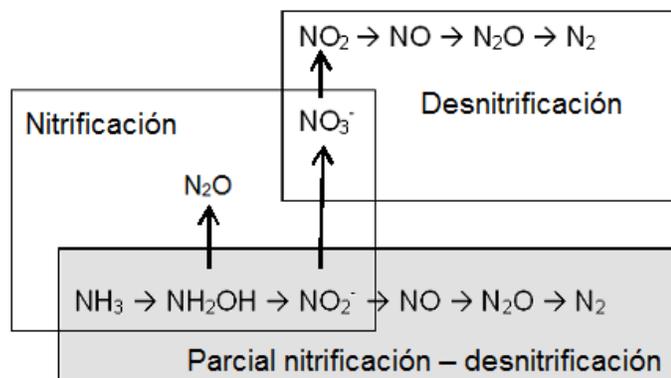


Figura 27. Transformación biológica del N que dan lugar a la formación de N_2O : parcial nitrificación – desnitrificación, es una ruta alterna de la nitrificación (Adaptado de Oenema, et al., 2005).

En relación con lo anterior, en DeSimone y colaboradores (2010) se argumenta que las bajas concentraciones tanto de NO_3^- como de N_2O pueden indicar altas tasas de desnitrificación, resultando en la producción de N_2 más que de N_2O (Signor y Pellegrino, 2013).

Según el análisis estadístico, la emisión de N_2O parece comportarse homogéneamente en los diferentes usos de suelo a lo largo de los pulsos de inundación, y tomando en cuenta que son menores a las detectadas en campos agropecuarios de otros estudios, se podría suponer una óptima capacidad depuradora del humedal. De hecho, existen varios reportes que le atribuyen a los humedales una excelente capacidad de remoción de nitrógeno proveniente de actividades agropecuarias, así como de aguas residuales a través de la adsorción y asimilación por medio de las plantas (Saunders y Kalff, 2001; Fisher y Acreman, 2004; Galván, 20011; Thiere, et al., 2011), lo cual podría ser el caso de las Lagunas al observar la alta productividad primaria que en ellas se desarrolla.

Además, existe una amplia evidencia en la literatura que indica que los suelos pueden capturar N_2O de la atmósfera. Este suceso se reportó en suelos anóxicos, ricos en materia orgánica y empobrecidos de nitrato. También se detectó en suelos aerobios pero con un porcentaje de humedad de $\sim 50\%$ (Wu, et al., 2013). El N_2O atmosférico se mueve en el suelo a través de la difusión pasiva y convección para reducirse a N_2 a través de desnitrificación, o para NH_3 a través de la asimilación de reducción del N_2O . En general, la desnitrificación

(proceso anaerobio) se considera que es el proceso principal responsable de la reducción de N₂O. Los microorganismos desnitrificadores utilizan N₂O como aceptor de electrones y lo reducen a N₂ cuando las concentraciones de nitrato del suelo son muy bajas (Alewell, et al., 2007; Wu, et al., 2013).

Comparando con otros estudios realizados en campos de arroz y campo ganadero donde reportan altas concentraciones de N₂O e incluso en maizales y otros humedales naturales (Tabla 17), la emisión analizada de este humedal resultó ser mucho menor. Lo que coincidió en todos esos estudios fue que la producción de N₂O estuvo ligada a la producción de nitrato (Tabla 18) y a eventos de lluvia sin provocar fenómenos de inundación por tiempo prolongado, mismas cuestiones que ocurrieron de manera contraria en las Lagunas Chaschoc, ya que se detectaron muy bajas o nulas concentraciones de nitrato y también el humedal experimentó al menos un mes con una columna de agua de al menos un metro hasta cinco de altura en la mayoría de los sitios.

Tabla 16. Emisión puntual de N₂O en suelos agrícolas, ganaderos y de humedales naturales.

Procedencia	Emisión cuantificada (mg N₂O/m²·d)	Referencia
Campos de arroz	0.573	Liu, et al., 2009
Campos de arroz	0.03 – 5.23 inun – no inun	Zou, et al., 2005
Campo agrícola (maíz)	0.82 – 38.08	Morse, et al., 2012
Campo agrícola (maíz)	0.6	Kachenchart, et al., 2012
Campo ganadero	4.44	Hynšt, et al., 2007
Humedal natural	3080 (estiaje); 404.9 (lluvias)	Liengaard, et al., 2012
Humedal natural	0.49	Liu, et al., 2009
Humedal natural	1.12	Liu, et al., 2009

Tabla 17. Algunos ejemplos de producción de N inorgánico en conjunto con las emisiones de N₂O citadas en la Tabla 17.

Fuente	NH ₄ (mg N/kg)	NO ₃ ⁻ (mg N/kg)	Referencia
Campo ganadero	12.4	13.4	Hynšt, et al., 2007
Campo agrícola (maíz)	0.698 ± 0.006	71.1 ± 5.07	Morse, et al., 2012
Campo agrícola (maíz)	3.9 ± 0.13	10.2 ± 0.5	Kachenchart, et al., 2012

Por ejemplo, en el estudio del humedal natural Pantanal, Liengaard y colaboradores (2012), explican que las altas concentraciones de nitrato son debidas a que los pulsos de inundación son drásticos, disminuyendo significativamente la humedad del suelo en estiaje dando paso así a una aireación adecuada que promueve la nitrificación y con ello la producción de nitrato, impulsado además por el gran aporte de MO que viene de la muerte vegetal en el recambio de vegetación acuática – terrestre; de este modo, con la llegada de las primeras lluvias, altas tasas de desnitrificación son detectadas. En el presente estudio se observó que los porcentajes de humedad no variaron en gran medida durante los tres pulsos, lo que pudo significar que la nitrificación no tuvo completa actividad.

De esta manera queda asentado que el oxígeno disuelto del suelo, relacionado con el porcentaje de humedad y la aireación, es el principal factor que limita la producción de N₂O (de Klein, et al., 2001; Liikanen y Martikainen, 2003) por lo que la producción de este gas fue mínima. No obstante Signor y Pellegrino (2013) argumentan que también la temperatura, materia orgánica, N disponible, relación C/N, textura, y manejo del suelo son factores importantes en la regulación de N₂O. En efecto, tales factores fueron los adecuados en las lagunas: temperaturas altas (~30°C), porcentaje de MO alto, rico en N disponible, baja relación C/N, suelos arcillosos y valores de pH alrededor del neutro.

Acorde con las emisiones encontradas, Reddy y DeLaune (2008) explican que las formas gaseosas del nitrógeno incluyendo amoniaco, óxido nítrico, óxido nitroso y nitrógeno molecular, los cuales son emitidos a la atmósfera, constituyen <1% del total del nitrógeno en un humedal. De igual modo, las formas de nitrógeno inorgánico almacenadas en este ecosistema, amonio, nitrito y nitrato comprenden <1% del N total. De tal modo que en nuestro estudio, la forma predominante de N fue la orgánica en los tres pulsos de inundación, tal

como se aprecia en la Figura 2 del Anexo 3, donde se ilustra la distribución de las formas de N encontradas en este estudio.

9.2.3.3 *Emisión de metano*

Mientras que el anegamiento es un medio eficaz para secuestrar C, también tiene efectos secundarios sobre la emisión de GEI a través de una mayor producción de CH₄. La emisión de CH₄ se presentó de manera significativa sólo durante el pulso de inundación de noviembre. Esto se explica por la subida del nivel del agua, ya que es el factor principal, junto con la temperatura (>20°C; Christensen et al., 2003), que ejerce influencia en los aspectos biológicos de la respiración metanogénica o metanogénesis (Kayranli, et al., 2010): promueve un ambiente de anaerobiosis (potencial redox de -224 mV; Hernández, 2010), junto a bajas concentraciones de sulfato y nitrato, ideal para las arqueas metanógenas. Es entonces de esta manera, que se completa el proceso anaerobio de la mineralización de la materia orgánica.

En los pulsos de agosto y marzo, la emisión de CH₄ determinada fue mínima, ya que posiblemente el bajo nivel del agua permitió una adecuada aireación del suelo favoreciendo más los procesos de oxidación aerobia que de respiración metanogénica. Pues los organismos metanógenos son sensibles a la presencia de O₂, lo cual inhibe su actividad (Whalen, 2005). La producción de CH₄ bajo estas condiciones ambientales ocurre gracias a que en el suelo se forman horizontes verticales subterráneos anaerobios y superficiales aerobios. La producción de metano se lleva a cabo en la primera y se libera a través del tejido vascular de las plantas, librando así la capa aerobia, donde es oxidado (Whalen 2005; Hernández, 2010).

La oxidación del CH₄ (metanotrofia) puede ocurrir por dos vías: oxidación biológica aerobia y anaerobia. La actividad de las bacterias metanotrofas depende de la disponibilidad y concentración de CH₄ y O₂, ya que utilizan el CH₄ como única fuente de carbón y energía. Las tasas más altas de consumo se han detectado en las interfaces óxicas/anóxicas localizadas en las capas superiores de los sedimentos de los humedales; en la oxiclina (zona donde la concentración de metano es alta y la de oxígeno baja) de la columna del agua; en la

rizósfera aerobia de las plantas que presentan aerénquima; y dentro de las raíces. Una gran porción de CH₄ que se difunde desde las zonas anóxicas se oxidan en la superficie oxidada de los sedimentos (66-95%) y 45-100% en la columna del agua (Le Mer y Roger, 2001; Borrel, et al., 2011). La oxidación anaerobia del metano, por su parte, es un proceso que aún se encuentra en estudio, pero se sabe que ocurre en acoplamiento con el sulfato y con el nitrato/nitrito ya que éstos actúan como aceptores de electrones (Borrel, et al., 2011). Este proceso no parece ocurrir de manera dominante en las Lagunas pues los nitrato/nitrito fueron escasos y el sulfato es un compuesto que se encuentra en concentraciones relativamente bajas en estos humedales (Pester, et al., 2012), pero sería interesante analizarlas en estudios posteriores si fuera el caso y ver cómo influye en la emisión del CH₄.

El suelo ganadero presentó una mayor producción de CH₄, lo cual se puede entender por la presencia de arqueas metanógenas halladas en el estiércol de ganado bovino. Sin embargo no fue significativamente diferente a las emisiones encontradas en los otros usos de suelo. Comparando con otros estudios relacionados con la producción de CH₄ (Tabla 19) como los campos de arroz (Kayranli, et al., 2010), en algunos casos resultó mayor y en otros menor, donde los factores que intervenían era el periodo de inundamiento y las temperaturas ambientales principalmente. La producción de CH₄ aquí encontrada fue mayor que la reportada en campos agrícolas, pero se puede entender porque éstos no se saturaron de agua por periodos prolongados (Tabla 19: Liu, et al., 2009; Morse, et al., 2012; Knox, et al., 2014). En relación con otros humedales las emisiones detectadas en las Lagunas no varían en gran medida, aunque se podría decir que son ligeramente menores. En Whalen (2005), se expone que la vegetación puede atenuar la emisión de metano al facilitar su oxidación a través del transporte y liberación de O₂ de las raíces localizadas en la capa de suelo anóxico; y en Hernández (2010), se reporta que los humedales de zonas tropicales, que son intermitentemente inundados, reportan emisiones menores respecto a los que se encuentran en zonas templadas y se encuentran inundados por largos periodos.

De esta manera, queda al descubierto que las actividades agropecuarias no ejercen una presión significativa sobre las Lagunas permitiéndole al humedal depurar la carga orgánica a través de su almacenamiento.

Tabla 18. Emisión puntual de CH₄ en suelos agrícolas, ganaderos y de humedales naturales.

Procedencia	Emisión cuantificada (mg CH ₄ /m ² ·d)	Referencia
Campos de arroz drenado	25.98	Liu, et al., 2009
Campos de arroz	272.4 ± 297.8	Chen, et al., 2013
Campos de arroz	437.52 ± 28.32	Chen, et al., 2013
Campos de arroz	25.5 – 116.9 abono	Zou, et al., 2005
Humedal drenado para cultivo de arroz (fertilizado y plaguicidas)	15	Knox, et al., 2014
Campo agrícola (maíz y soya)	-0.18 – 7.67	Morse, et al., 2012
Humedal natural drenado para pastoreo de ganado	16 – 31.23	Knox, et al., 2014
Humedal natural drenado para pastoreo de ganado	76.16 ± 4.7	Nieveen, et al., 2005
Humedal natural	224.65	Nahlik y Mitsch, 2010
Humedal natural	233.04 – 137.7	Chen, et al., 2013
Humedal natural	142 ± 314	Maraní y Alvalá, 2007
Humedal natural	150.95	Liu, et al., 2009
Humedal natural	7.92 – 2,056.8	Sha, et al., 2011
Humedal natural restaurado	106.85 – 145.21	Knox, et al., 2014

9.3 Servicios ecosistémicos de las Lagunas de Chaschoc (en términos de los ciclos biogeoquímicos)

9.3.1 Apoyo o soporte

En las Lagunas como humedal se observó una gran productividad primaria reflejada en la biomasa vegetal y animal, mismas favorecidas por la biomasa microbiana. La comparación de la emisión de GEI aquí detectada menor o igual a otros estudios en zonas naturales permitió saber que el reciclaje de nutrientes, a través de los ciclos biogeoquímicos, se esté

llevando a cabo de manera apropiada. En cuanto al suelo que soporta al humedal, se puede percibir un sustrato en el que se retienen y exportan sedimentos y nutrientes.

9.3.2 Regulación

Las Lagunas Chaschoc funcionan como reguladores del ciclo hidrológico que ocurre a lo largo de la temporada de lluvias y estiaje. Promueven el control de inundaciones, ya que funcionan como un almacén natural de agua, lo que permite distribuir el exceso de agua en un área mayor y a su vez, reducir la profundidad y velocidad a la que se transporta el agua excedente del río Usumacinta y escurrimientos durante la temporada de lluvias. Con ello, además retienen sedimentos que de no ser así, llegarán al río, azolvándolo y favoreciendo que se desborde. Por el otro lado, evitan sequías severas durante estiaje. Purifican el agua que llegara a contener exceso de nutrientes y recargan los mantos acuíferos.

Otro punto es la retención de carbono que las lagunas representan. Bajo ciertas condiciones fisicoquímicas como acidez y falta de oxígeno principalmente, la materia orgánica del humedal se descompone solo parcialmente y se acumula en el suelo. De esta forma una gran cantidad de carbono se encuentra retenida, lo que tiene un efecto importante en relación al calentamiento global a través de la regulación de la emisión de GEI, aunque de igual manera hay que poner atención a las emisiones de metano y óxido nitroso que emiten.

Las Lagunas son también un importante sitio de reproducción de peces, y otros animales como las aves. Regulan también enfermedades al fungir como una gran cortina arbórea que retiene todo lo que es arrastrado por el viento evitando propagación de virus y bacterias causantes de infecciones.

9.3.3 Aprovechamiento

El humedal provee de nichos para la vida silvestre y entre ella, fauna nativa (mono aullador). Además, el humedal provee de recursos para que se desarrolle en él actividades como la pesca, tierra fértil para el desarrollo de la agricultura y ganadería, que proveen a su vez alimento. Provee también materiales de construcción como madera y hojas para techar; materiales de uso doméstico como leña, sal, plantas medicinales, fibras para textiles y recursos terciarios para actividad turística y transporte.

10 CONCLUSIONES

Dentro de todos los parámetros analizados, sólo se encontraron diferencias significativas asociadas a los distintos usos de suelo en el porcentaje de MO. En relación a los pulsos de inundación, sólo se encontraron diferencias significativas en el pH, salinidad y emisión de metano. Dado que las emisiones de GEI no fueron diferentes significativamente entre los usos de suelo se puede asumir, desde este estudio, que la resiliencia de este ecosistema aun le permite absorber las alteraciones antropogénicas sin perder ni su estructura básica o sus modos de funcionamiento.

La producción de GEI se encuentra parcialmente regulada por los procesos microbianos, los cuales se vieron influenciados principalmente por el nivel del agua, el porcentaje de humedad en el suelo y la porosidad, mismos que se encuentran relacionados con el O₂ disponible en el suelo. Por esta razón, sería conveniente medir en estudios posteriores la porosidad y el potencial redox del suelo, y así establecer relaciones entre el O₂ disponible y los procesos que intervienen en la producción y emisión de GEI.

En cuanto a la evaluación de la emisión de GEI entre los diferentes usos de suelo a lo largo de los pulsos de inundación, no se detectaron claramente diferencias significativas que nos permitieran identificar claramente el grado de la presión antropogénica sobre humedal. Lo cual se puede atribuir principalmente a la capacidad de resiliencia de éste. Además, para corroborar la eficiencia de la emisión de GEI como indicador, sería interesante poder comparar con un sitio que esté dañado y degradado.

No obstante lo anterior, dado que las emisiones de gas en los suelos de uso agropecuario y de tránsito urbano respecto a los naturales son semejantes o menores a las encontradas en las referencias citadas de zonas naturales, se puede considerar que dichas actividades antropogénicas no ejercen, aún, una presión de manera significativa sobre el humedal, y que la calidad del suelo de las Lagunas es buena. Esto no significa que las actividades antropogénicas se estén realizando con mesura o sean sostenibles (habría que investigarlo localmente), sino que es la resiliencia del ecosistema la que está actuando y aún no se ha sobrepasado el umbral.

De esta manera, se concluye que a partir de la evaluación de la emisión de GEI, el humedal está desempeñando adecuadamente sus funciones en términos de los ciclos biogeoquímicos, por lo que se podría decir que hasta el momento, el humedal está cumpliendo apropiadamente con los servicios de apoyo, regulación y aprovisionamiento propios de este ecosistema. Pero es importante no sobrestimar su capacidad de amortiguamiento ya que este humedal se encuentra con la influencia directa tanto del río Usumacinta, que podría arrastrar cualquier tipo de residuos, como del asentamiento urbano Emiliano Zapata, lo que significaría una amenaza de perturbación latente. Esto en términos de contaminación y explotación principalmente, mismos que se traducen en contaminación por descarga de aguas residuales, arrojamiento de residuos sólidos, hidrocarburos provenientes del uso de lanchas, pesca y apertura de campos para pastoreo de ganado. De igual manera, queda claro el gran reservorio de C que representan las Lagunas de Chaschoc, por lo que un eventual drenado del humedal estimularía en gran medida la oxidación de la materia orgánica y con ello una importante fuente de CO₂ y, al llegar las lluvias, de N₂O. Es por esto que la conservación de humedales es crítico en la regulación del ciclo del C y N en la Tierra.

Finalmente, la evaluación de la emisión de GEI comparada con otros estudios, permitió conocer y entender parte de la funcionalidad ecosistémica, en términos de los servicios que aporta, misma que servirá para prevenir el deterioro que pudiera existir. Razón por la cual las Lagunas de Chaschoc podrían ser sujetas a protección bajo el marco normativo de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, para que se vigile que el aprovechamiento de los recursos dentro de la zona se realice de manera sustentable.

11 BIBLIOGRAFIA

- Abril, G., y Borges, A. V. (2005). Carbon dioxide and methane emissions from estuaries. In *Greenhouse gas emissions—fluxes and processes* (pp. 187-207). Springer Berlin Heidelberg.
- Acevedo, E. (Ed.). (2006). *Agroenergía: un desafío para Chile*. Universidad de Chile.
- Adams, M. (1995). *Fundamentos de química de suelos*. CDCH UCV.
- Aguilar, A. (2012). *Evaluación de variables de fertilidad del suelo y de la concentración de nutrimentos foliares en huertas de mango del municipio la Unión, Guerrero*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Alewell, C., Seth, B., Conen, F., y Vieten, B. (2008). The fate of N₂O consumed in soils. *Biogeosciences*, 5(1), 129-132.
- Baethgen, W., y Martino, D. (2000). Cambio climático, gases de efecto invernadero e implicancias en los sectores agropecuario y forestal del Uruguay. *Resúmenes del Taller sobre el Protocolo de Kyoto*. Ministerio de Vivienda, ordenamiento territorial y Medio Ambiente. Dirección Nacional de Medio Ambiente. Uruguay.
- Barbier, E. B., Acreman, M., Knowler, D., y Valdovinos, J. C. (1997). *Valoración económica de los humedales: Guía para decisores y planificadores*. Oficina de la Convención de Ramsar.
- Bautista, F. y D. Palma-López. (Eds.). (2005). *Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales*. Universidad Autónoma de Campeche, México.
- Berlanga, M. (2001). Ronald M. Atlas, Richard Bartha: Ecología Microbiana y Microbiología Ambiental (Spanish version of the 4th edn). *International Microbiology*, 4(4), 239-240.
- Borrel, G., Jézéquel, D., Biderre-Petit, C., Morel-Desrosiers, N., Morel, J. P., Peyret, P., y Lehours, A. C. (2011). Production and consumption of methane in freshwater lake ecosystems. *Research in Microbiology*, 162(9), 832-847.
- Bouwman, A. F. (1996). Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 46(1), 53-70.
- Bouwman, A. F., Boumans, L. J. M., y Batjes, N. H. (2002). Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4), 28-1.
- Brady, N. C. y Weil, R. R. (2008). *The Nature and Properties of Soils*. (14 ed). Pearson-Prentice Hall, New Jersey.
- Cámara, L., Hernández, H., Castillo, O., Galindo, A., Morales, A., Zequeira, C., Rullán, C., Jesús, M., Gama, L., Cappello, S. y Guadarrama, M. (2011). *Estudio Regional Forestal de la UMAFOR de los ríos*. División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Cantú, M. P., Becker, A., Bedano, J. C., y Schiavo, H. F. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del suelo*, 25(2), 173-178.

- Casas, R. (2011). *El suelo de cultivo y las condiciones climáticas*. Ediciones Paraninfo, España.
- Chhabra, A., Manjunath, K. R., Panigrahy, S., y Parihar, J. S. (2013). Greenhouse gas emissions from Indian livestock. *Climatic Change*, 117, 329–344.
- Chen, H., Zhu, Q. A., Peng, C., Wu, N., Wang, Y., Fang, X. y Yu, G. (2013). Methane emissions from rice paddies natural wetlands, lakes in China: synthesis new estimate. *Global change biology*, 19(1), 19-32.
- Christensen, T. R., Ekberg, A., Ström, L., Mastepanov, M., Panikov, N., Öquist, M., y Oskarsson, H. (2003). Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands. *Geophysical Research Letters*, 30(7).
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J., Fichet, T., Friedlingstein, P. ... y Wehner, M. (2013). Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, and New York.
- Cruz, A. B., Barra, J. E., del Castillo, R. F., y Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista Ecosistemas*, 13(2).
- CONABIO, 2012. Río, cuerpos de agua y humedales. Prioridades de conservación en México. *Comunicado de Prensa CONABIO*, 106.
- CONANP. (s. f.). *Áreas Naturales protegidas*. Recuperado el 30 de septiembre de 2014, de <http://regiongolfodemexico.conanp.gob.mx>
- CONANP, 2007. *Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 29 de septiembre de 2014, de http://www.conanp.gob.mx/quienes_somos/pdf/programa_07012.pdf
- Cornejo, J. y Jamet, P. (2000). *Pesticide/soil Interactions: Some Current Research Methods*. Editions Quae.
- Cronk, J. K., y Fennessy, M. S. (2001). *Wetland plants: biology and ecology*. CRC press.
- DeMendiburu, F. (2014). *Agricolae: Statistical procedures for agricultural research. R package version, 1*, 1-6.
- DeKlein, C. A., Sherlock, R. R., Cameron, K. C., y van der Weerden, T. J. (2001). Nitrous oxide emissions from agricultural soils in New Zealand—a review of current knowledge and directions for future research. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, 31(3), 543-574.
- DeLas Heras, J., Fabeiro, C. y Meco, R. (2003). *Fundamentos de agricultura ecológica: realidad actual y perspectivas*. Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha. España.
- Denman, K. L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P. M., Dickinson, R. E., y Zhang, X. (2007). Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. *Climate change*, 2007, 541-584.

- DeSimone, J., Macrae, M. L. y Bourbonniere, R. A. (2010). Spatial variability in surface N₂O fluxes across a riparian zone and relationships with soil environmental conditions and nutrient supply. *Agriculture, ecosystems & environment*, 138(1), 1-9.
- Ding, W., Caia, Z. y Wang, D. (2004). Preliminary budget of methane emissions from natural wetlands in China. *Atmospheric Environment*, 38, 751-759.
- EPA, (2010). *Methane and Nitrous Oxide Emissions From Natural Sources*. Office of Atmospheric Programs, EPA 430-R-10-001. Washington, DC.
- Esty, D. C., Levy, M. A., Kim, C. H., Mara, V., de Sherbinin, A. y Srebotnjak, T. (2008). Environmental performance index. New Haven: Yale Center for Environmental Law and Policy.
- FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. (4ed). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.
- FAO. (2014). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Portal de suelos de la FAO. Recuperado el 11 de septiembre de 2014, de, <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/propiedades-del-suelo/propiedades-quimicas/es/>
- Fernández, L., Rojas, G., Roldán, T., Ramírez, M., Zegarra, H., Uribe, R.,... y Arce, J. (2006). Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. *Semarnat. Mexico*, 111-112.
- Fisher, J. y Acreman, M.C. (2004). Wetland nutrient removal: a review of the evidence. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(4), 673-685.
- Flores, L. y Alcalá, J. (2013). *Manual de Procedimientos analíticos*. Departamento de Edafología, Instituto de Geología, UNAM. México.
- Galván, V. (2011). *Remoción de nitrógeno amoniacal del lixiviado de basura por medio de un humedal artificial de flujo horizontal sub-superficial*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, Á. (2008). *La materia orgánica (MOS) y su papel en lucha contra la degradación del suelo*. In *Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*. Quito, Ecuador, Memorias.
- García, Á. (2006). *Valoración económica de servicios ambientales en los humedales del área natural protegida "Ciénegas del Lerma", Estado de México*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gerrard, J. (2006). *Fundamentals of soils*. Routledge, USA.1-11.
- Grybos, M., Davranche, M., Gruau, G., Petitjean, P., y Pédrot, M. (2009). Increasing pH drives organic matter solubilization from wetland soils under reducing conditions. *Geoderma* 154, 13–19.
- Guerra, J. (2009). *Evaluación de la degradación de los suelos naturales de la isla de Tenerife: Secuencias edáficas evolutivas y regresivas*. Tesis doctoral. Universidad de La Laguna.
- Guerra-Martínez, V., y Ochoa-Gaona, S. (2008). Evaluación del programa de manejo de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla en Tabasco, México. *Universidad y ciencia*, 24(2), 135-146.

- Heimpel, G. E., Yang, Y., Hill, J. D., y Ragsdale, D. W. (2013). Environmental Consequences of Invasive Species: Greenhouse gas emissions of insecticide use and the role of biological control in reducing emissions. *PLoS ONE* 8: e72293.
- Hernández, M. (2010). Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Tierra Latinoamericana*, 28: 139-147.
- Hirano, T., Segah, H., Kusin, K., Limin, S., Takahashi, H., y Osaki, M. (2012). Effects of disturbances on the carbon balance of tropical peat swamp forests. *Global Change Biology*, 18(11), 3410-3422.
- Huerta, H. (2010). *Determinación de propiedades físicas y químicas de suelos con mercurio en la región de San Joaquín, Qro., y su relación con el crecimiento bacteriano*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Houghton, J. T. (1996). *Climate change 1995: The science of climate change: contribution of working group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 2). Cambridge University Press.
- Hynšt, J., Šimek, M., Brůček, P., y Petersen, S. O. (2007). High fluxes but different patterns of nitrous oxide and carbon dioxide emissions from soil in a cattle overwintering area. *Agriculture, ecosystems & environment*, 120(2), 269-279.
- INEGI. (2008). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Emiliano Zapata, Tabasco*. Clave geoestadística 27007.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). (s. f.). *Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993 que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente*. México. Diario Oficial de la Federación el 22 de octubre de 1993.
- IPCC. (1996). *Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change*; J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, y K. Maskell, eds.; Cambridge University Press. Cambridge, U.K.
- IPCC. (2007). *Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambio climático 2007. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- ISRIC. (2014). *International Soil Reference and Information Centre-World Soil Information*. Recuperado el 9 de septiembre de 2014, de, <http://www.isric.org/about-soils/functions-soil>.
- Jallow, B. P. (1995). Emissions of greenhouse gases from agriculture, land-use change, and forestry in the Gambia. *Environ Monit Assess*, 38(2-3), 301-12.
- Jiang, C. L., Cui, G. B., Fan, X. Q., y Zhang, Y. B. (2004). Purification capacity of ditch wetland to agricultural non-point pollutants. *Huan jing ke xue= Huanjing kexue/[bian ji, Zhongguo ke xue yuan huan jing ke xue wei yuan hui" Huan jing ke xue" bian ji wei yuan hui.]*, 25(2), 125-128.
- Jiménez, L. V. (2012). *Dinámica del nitrógeno en suelos salinos de Cuatro Ciénegas Coahuila*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Jolly I. D., McEwan, K. L. y Holland, K.L. (2008). A review of groundwater–surface water interactions in arid/semi-arid wetlands and the consequences of salinity for wetland ecology. *Ecohydrology*, 1, 43–58.
- Kachenchart, B., Jones, D. L., Gajaseneni, N., Edwards-Jones, G., y Limsakul, A. (2012). Seasonal nitrous oxide emissions from different land uses and their controlling factors in a tropical riparian ecosystem. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 158, 15-30.
- Kadlec, R. y Wallace, S. (2009). *Treatment Wetlands*. Second Edition. CRC Press.
- Kanekar, P. P., Bhadbhade, B. J., Deshpande, N. M., y Sarnaik, S. S. (2004). Biodegradation of organophosphorus pesticides. *Proceedings-Indian National Science Academy Part B*, 70(1), 57-70.
- Kayranli, B., Scholz, M., Mustafa, A., y Hedmark, A. (2010). Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: a critical review. *Wetlands*, 30(1), 111-124.
- Keddy, P. A. (2010). *Wetland Ecology: Principles and Conservation*. (2nd ed). Cambridge University Press. New York.
- Kibblewhite, M. G., Ritz, K. y Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 363, 685–701.
- Knox, S. H., Sturtevant, C., Matthes, J. H., Koteen, L., Verfaillie, J., y Baldocchi, D. (2014). *Agricultural peatland restoration: effects of land-use change on greenhouse gas (CO₂ and CH₄) fluxes in the Sacramento-San Joaquin Delta*. Global change biology.
- Laanbroek, H. J. (2010). Methane emission from natural wetlands: interplay between emergent macrophytes and soil microbial processes. *A mini-review. Annals of Botany*, 105, 141–153.
- Lal, R. (2005). Soil erosion and carbon dynamics. *Soil and Tillage Research*, 81(2), 137-142.
- Landgrave, R. y Moreno-Casasola, P. (2012). Evaluación cuantitativa de la pérdida de humedales en México. *Investigación ambiental*, 4, 19-35.
- Le Mer, J., y Roger, P. (2001). Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *European Journal of Soil Biology*, 37(1), 25-50.
- León, J. (2011). *Distribución espacial de las propiedades fisico-químicas del suelo, y su relación con diferentes variables ambientales en los bosques de Pinus hartwegii y Abies religiosa, en la cuenca del río Magdalena, D. F.* Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lienggaard, L., Nielsen, L. P., Revsbech, N. P., Priemé, A., Elberling, B., Enrich-Prast, A., y Köhl, M. (2012). Extreme emission of N₂O from tropical wetland soil (Pantanal, South America). *Frontiers in microbiology*, 3.
- Liikanen, A., y Martikainen, P. J. (2003). Effect of ammonium and oxygen on methane and nitrous oxide fluxes across sediment–water interface in a eutrophic lake. *Chemosphere*, 52(8), 1287-1293.
- Liu, X., Lu, X., Jiang, M., y Wang, X. (2009). Value estimation of greenhouse gases exchange in wetland ecosystem of Sanjiang Plain, China. *Chinese Geographical Science*, 19(1), 55-61.

- Macías, E. B., Cruz, F. V., Rendón, M. Á. P., y Rendón, M. J. P. (2014). Revisión de la problemática socioambiental de la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla, Tabasco. *NÚMERO ESPECIAL MONOGRÁFICO: ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS*, 50.
- Marani, L. y Alvalá, P. C. (2007). Methane emissions from lakes and floodplains in Pantanal, Brazil. *Atmospheric Environment*, 41, 1627–1633.
- Márquez, S. E. (2009). *Efecto del metil paratión en la producción de óxido nitroso en suelos de chinampas de Xochimilco*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martínez, E., Fuentes, J. P. y Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.
- Meleiro, A., Zelayarán, G., Consiglio, M. y Nitschke, M. (2011). *Biodegradation of Pesticides. En M. Stoytcheva, Pesticides in the Modern World – Pesticides Use and Management*. Croacia: InTech.
- Miralles, I. (2006). *Calidad de suelos en ambientes calizos mediterráneos: Parque Natural de Sierra María-Los Vélez*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- Mitsch, W. J. y Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands*. (5a ed). John Wiley & Sons Inc., New York.
- Morse, J. L., Ardón, M. y Bernhardt, E. S. (2012). Greenhouse gas fluxes in southeastern US coastal plain wetlands under contrasting land uses. *Ecological Applications*, 22(1), 264-280.
- Mosier, A.R. y Freney, J.R. (s. f.). Nitrous Oxide Emission Reduction and Agriculture.
- Municipios de Tabasco (s. f.). Recuperado el 26 de Julio de 2014, de, <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM27tabasco/municipios/27007a.html>
- Nahlik, A. M., y Mitsch, W. J. (2010). Methane emissions from created riverine wetlands. *Wetlands*, 30(4), 783-793.
- Navarrete, A., Vela, G., López, J. y Rodríguez, M. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *Contacto S*, 80, 29–37.
- Navarro G. y Navarro, S. (2000). *Química agrícola. Química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas*. International Potash Institute.
- Nieveen, J. P., Campbell, D. I., Schipper, L. A., y Blair, I. J. (2005). Carbon exchange of grazed pasture on a drained peat soil.. *Global Change Biology*, 11(4), 607-618.
- Odukkathil, G., y Vasudevan, N. (2015). Biodegradation of endosulfan isomers and its metabolite endosulfate by two biosurfactant producing bacterial strains of *Bordetella petrii*. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 50(2), 81-89.
- Oenema, O., Wrage, N., Velthof, G. L., van Groenigen, J. W., Dolfing, J., y Kuikman, P. J.. (2005). Trends in global nitrous oxide emissions from animal production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 72(1), 51–65.
- Oren, A. (Julio 2008). *Biogeochemical Cycles*. Encyclopedia of Life Sciences (ELS). John Wiley & Sons.

- Ortiz-Cornejo, N. L., Luna-Guido, M., Rivera-Espinoza, Y., Vásquez-Murrieta, M. S., Ruíz-Valdiviezo, V. M., & Dendooven, L. (2015). Greenhouse gas emissions from a chinampa soil or floating gardens in Mexico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31(4), 343-350.
- Pauwels, H., y Talbo, H. (2004). Nitrate concentration in wetlands: assessing the contribution of deeper groundwater from anions. *Water research*, 38(4), 1019-1025.
- Pedersen, A. R., Petersen, S. O., y Schelde, K. (2010). A comprehensive approach to soil-atmosphere trace-gas flux estimation with static chambers. *European Journal of Soil Science*, 61(6), 888-902.
- Pester, M., Knorr, K. H., Friedrich, M. W., Wagner, M., y Loy, A. (2012). Sulfate-reducing microorganisms in wetlands—fameless actors in carbon cycling and climate change. *Frontiers in microbiology*, 3.
- Política Nacional de Humedales. (s. f.). Recuperado el 7 de septiembre de 2014, de http://ramsar.conanp.gob.mx/politica_nacional_de_humedales.php
- Porta, J., López-Acevedo, M. y Poch, R. M. (2013). *Edafología. Uso y protección de suelos*. Mundi-Prensa.
- Porta-Casanellas, J., López-Acevedo M. y De Laburu, R. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*, (Tercera edición); España, Ediciones Mundi-prensa.
- Price, G. H. (2006). *Australian soil fertility manual*. CSIRO PUBLISHING.
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA). (s. f.). Recuperado el 7 de septiembre de 2014, de http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/766/1/mx/glosario.html?contentid=766&num_letra=0&num_letra_siguiente=1&querypage=3
- ¿Qué es un humedal? (s. f.). Recuperado el 19 de octubre de 2014, de <http://ramsar.conanp.gob.mx/lsr.php>
- Rastogi, M., Singh, S., y Pathak, H. (2002). Emission of carbon dioxide from soil. *Current Science*, 82(5), 510-517.
- Reddy, K. R., y DeLaune, R. D. (2008). *Biogeochemistry of wetlands: science and applications*. CRC press
- Roberson, E. (1996). *Impacts of livestock grazing on soils and recommendations for management*. California: California Native Plant Society.
- Ruser, R., Flessa, H., Russow, R., Schmidt, G., Buegger, F., y Munch, J. C. (2006). Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(2), 263-274.
- Saunders, D. L., y Kalf, J. (2001). Nitrogen retention in wetlands, lakes and rivers. *Hydrobiologia*, 443(1-3), 205-212.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales). (2000) *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*. México. Diario Oficial de la Federación el 31 de diciembre de 2002.

- SERNAPAM (Secretaría de Energía, Recursos Naturales y Protección Ambiental). (s. f). *Conmemoración del decreto de Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla*. Recuperado el 14 de Marzo de 2015, de, <http://sernapam.tabasco.gob.mx/content/conmemoraci%C3%B3n-del-decreto-de-reserva-de-la-biosfera-pantanos-de-centla>.
- Sha, C., Mitsch, W. J., Mander, Ü. Lu, J., Batson, J., Zhang, L., y He, W. (2011). Methane emissions from freshwater riverine wetlands. *Ecological Engineering*, 37(1), 16-24.
- Signor, D., y Pellegrino, C.E. (2013). Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. *Pesq. Agropec. Trop., Goiânia*, 43(3), 322-338.
- Sjögersten S., Black, C.R., Evers S., Hoyos-Santillan J., Wright, E.L. y Turner, B. L. (2014). Tropical wetlands: A missing link in the global carbon cycle? *Global Biogeochem. Cycles*, 28, 1371–1386.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P. ... y Smith, J. (2008). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Series B*, 363, 789–813.
- sobre los Humedales, C. (2004). Manual de la Convención de Ramsar: guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971). *En Manual de la Convención de Ramsar: guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971)*. Convención de Ramsar.
- Solís, L., y López, J. (2003). *Principios básicos de contaminación ambiental*. Universidad Autónoma del Estado de México. México
- St. Louis, V. L., Kelly, C. A., Duchemin, E., Rudd, J. W. M., y Rosenberg, D. M. (2000). Reservoir Surfaces as Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: A Global Estimate. *BioScience*, 50 (9), 766-775.
- Strömberg, K. (1998). *Greenhouse gas emission from small wetlands in the göteborg area, sw Sweden*. Department of Physical Geography, Göteborg University.
- Szöcs, E., Kefford, B. J., y Schäfer, R. B. (2012). Is there an interaction of the effects of salinity and pesticides on the community structure of macroinvertebrates? *Science of the Total Environment*, 437, 121-126.
- Tan, Kim. (2009). *Environmental Soil Science*. (Third edition) CRC Press, New York.
- Team, R. C. (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2012.
- Thiere, G., Stadmark, J., y Weisner, S. E. (2011). Nitrogen retention versus methane emission: environmental benefits and risks of large-scale wetland creation. *Ecological Engineering*, 37(1), 6-15.
- Thompson, L. y Troeh, F. (2004). *Los Suelos y su fertilidad*. McGraw-Hill Book Company, New York, USA.
- Thornton, P. y Herrero, M. (2010). The potential for reduced methane and carbon dioxide emissions from livestock and pasture management in the tropics. *PNAS*, 107, 19667–19672.

- Travieso-Bello, A., Moreno-Casasola, P. y Campos, A. (2005). Efecto de diferentes manejos pecuarios sobre el suelo y la vegetación en humedales transformados a pastizales. *INCI*, 30(1), 12-18.
- UACJ, (2013). *Introducción en áreas naturales protegidas. Hoja técnica de divulgación científica*. Hoja Técnica no. 4. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Jos T. A.
- Uribeondo, M. P. B., y Cañas, C. M. (2014). *Evaluación ambiental*. Universidad Nacional de Educación a Distancia, UNED.
- USDA-NRSC-SQI. United States Department of Agriculture. (2001). *Natural Resources Conservation Service*. Soil Quality Institute. Guidelines for Soil Quality Assessment in Conservation Planning.
- Verhoeven, J. T. A. y Setter, T. L. (2010). Agricultural use of wetlands: opportunities and limitations. *Annals of Botany*, 105, 155–163.
- Vymazal, J. y Kröpfelová L. (2008). *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow*. (Vol. 14). Springer Science & Business Media.
- West, T. O., y Marland, G. (2002). A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 91(1), 217-232.
- Whalen, S. C. (2005). Biogeochemistry of methane exchange between natural wetlands and the atmosphere. *Environmental Engineering Science*, 22(1), 73-94.
- Whiting, G. J., y Chanton J. P. (2001). Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration. *Tellus B*, 53(5), 521-528.
- Wu, D., Dong, W., Oenema, O., Wang, Y., Trebs, I., y Hu, C. (2013). N₂O consumption by low-nitrogen soil and its regulation by water and oxygen. *Soil Biology and Biochemistry*, 60, 165–172.
- Xing, G. X., Cao, Y. C., Shi, S. L., Sun, G. Q., Du, L. J., y Zhu, J. G. (2002). Denitrification in underground saturated soil in a rice paddy region. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(11), 1593-1598.
- Yang, J., Liu, J., Hu, X., Li, X., Wang, Y., & Li, H. (2013). Effect of water table level on CO₂, CH₄ and N₂O emissions in a freshwater marsh of Northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, 61, 52-60.
- Zou, J., Huang, Y., Jiang, J., Zheng, X., y Sass, R. L. (2005). A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(2).

12 ANEXOS

12.1 ANEXO 1

12.1.1 DETERMINACION DE HUMEDAD

El método utilizado para esta medición es el gravimétrico, para determinar únicamente la cantidad de agua de los suelos. Fundamento: La humedad del suelo se calcula por la diferencia de peso entre una misma muestra húmeda, y después de haberse secado en la estufa hasta obtener un peso constante.

$\% \text{ Humedad del suelo} = (\text{Peso suelo húmedo} - \text{Peso suelo seco}) / \text{Peso suelo húmedo} * 100$

12.1.2 COMPUESTOS NITROGENADOS: NITRATO, NITRITO Y AMONIO

Analizador automático SAN plus SYSTEM, Sampler Analyzer, marca Skalar.

Donde el amonio es analizado mediante la reacción de Berthelot modificada. Ya que el amonio es clorado a monocloramina, la cual reacciona con el salicilato para formar 5-aminosalicilato, después de una oxidación y acoplamiento oxidativo se forma un complejo de color verde, el cual es medido a una longitud de 660 nm. El nitrito se cuantifica por medio de los compuestos de diazonio formados por la diazotización de la sulfanilamida por nitrito en agua. Bajo condiciones ácidas, se acoplan con el diclorhidrato de alfa-naftiletildiamina para producir un color púrpura rojizo, que se mide a 540 nm. El nitrato se reduce a nitrito por una columna de cadmio y después se sigue exactamente el mismo procedimiento que el nitrito.

12.1.3 EXTRACCIÓN DE FORMAS DE NITRÓGENO

Solución de K_2SO_4 0.5M

Se adiciona en proporción de 1 g de suelo por 5 ml de solución (1:5).

Se pone en agitación durante 60 minutos a 180 rpm.

Transcurrido este tiempo se filtran con papel Whatman N°40.

12.1.4 CARBONO TOTAL, CARBONO ORGÁNICO Y NITRÓGENO TOTAL

Se determinaron en un Determinador elemental de CNSH, Perkin Elmer 2400 Serie II, en las siguientes condiciones:

Gas acarreador: Helio

Temperatura de combustión: 980° C

Temperatura de reducción: 640° C

Detector: Conductividad térmica

Compuesto de calibración: Acetanilida

Material de referencia: LECO soil calibration sample for CNS part 502-309

12.1.5 CROMATOGRAFÍA DE GASES

Cromatógrafo Agilent Technology 4890D con Detector de Ionización de Llama (FID) para CH₄

Columna PORAPAK Q 80/100 12' × 1/8" × 0.085"

Temperaturas inyector, horno y detector a 100, 32 y 310 °C respectivamente

Gas acarreador He (25 ml min⁻¹)

Cromatógrafo Agilent Technology 4890D con Detector de Captura de Electrones (ECD) para CO₂ y N₂O

Columna de A GS Q 30 m

Temperaturas inyector, horno y detector a 100, 35 y 225 °C respectivamente

Gas acarreador N₂ (6 ml min⁻¹).

12.2 ANEXO 2

12.2.1 DATOS CRUDOS PARA LA CARACTERIZACION DEL SUELO

Es importante mencionar que los sitios no determinados se señalan con un guión corto “-“, debido al nivel del agua y/o las condiciones topográficas del sitio.

Tabla 19. Porcentaje de humedad.

	Ago			Nov			Mar		
	P	A	L	P	A	L	P	A	L
Natural	49.12	48.00	-	58.39	-	-	36.13	40.10	48.10
Ganadero	39.03	-	-	38.59	-	-	23.40	27.70	-
Agrícola	38.35	54.15	-	39.79	50.16	-	25.93	27.33	31.13
Mixto	48.26	-	-	36.68	-	-	28.20	30.70	-
Tr. Urbano	45.94	-	-	34.17	-	-	28.20	27.60	-

Tabla 20. pH

	Ago			Nov			Mar		
	P	A	L	P	A	L	P	A	L
Natural	6.30	6.00	-	6.81	-	-	6.57	6.73	6.85
Ganadero	7.8	-	-	8.1	-	-	7.4	7.1	-
Agrícola	7.55	8.10	-	7.78	7.20	-	6.95	7.25	7.20
Mixto	7.9	-	-	8.0	-	-	7.4	7.1	-
Tr. Urbano	8.0	-	-	7.6	-	-	7.6	7.8	-

Tabla 21. Conductividad eléctrica (dS/m 25°C)

	Ago			Nov			Mar		
	P	A	L	P	A	L	P	A	L
Natural	27.20	8.50	-	0.60	-	-	1.42	1.77	1.72
Ganadero	19.80	-	-	2.47	-	-	0.82	1.36	-
Agrícola	13.80	3.90	-	1.24	12.50	-	1.05	2.08	2.07
Mixto	38.20	-	-	1.58	-	-	1.69	0.71	-
Tr. Urbano	32.50	-	-	1.62	-	-	1.00	0.77	-

Tabla 22. Porcentaje de materia orgánica.

	Ago			Nov			Mar		
	P	A	L	P	A	L	P	A	L
Natural	6.02	9.84	-	-	-	-	7.57	8.03	5.30
Ganadero	3.92	-	-	6.43	-	-	1.57	1.53	-
Agrícola	2.87	4.05	-	2.29	3.75	-	2.98	2.05	2.73
Mixto	0.72	-	-	*	-	-	2.39	2.39	-
Tr. Urbano	1.30	-	-	0.61	-	-	1.09	1.02	-

*No alcanzó muestra de suelo para realizarse la prueba.

Tabla 23. Compuestos nitrogenados: nitrato, nitrito y amonio (mg NO₃⁻; NO₂⁻; NH₄⁺/kg⁻¹ · SS)

		Ago			Nov			Mar		
		P	A	L	P	A	L	P	A	L
Natural	NO₃⁻	0	-	-	0	-	-	0	0	0
	NO₂⁻	0	-	-	0.48	-	-	0	0	0
	NH₄⁺	20.97	45.96	-	37.5	-	-	13.06	24.87	32.66
Ganadero	NO₃⁻	0	-	-	0	-	-	0	0	-
	NO₂⁻	0	-	-	0.73	-	-	0	0	-
	NH₄	53.11	-	-	37.87	-	-	6.27	0	-
Agrícola	NO₃⁻	8.97	-	-	0	0	-	0	0	0
	NO₂⁻	5.30	-	-	0.17	0.26	-	0	0	0
	NH₄⁺	8.815	-	-	34.39	45.99	-	4.17	0	0
Mixto	NO₃⁻	0	-	-	0	-	-	0	0	-
	NO₂⁻	0.29	-	-	0.71	-	-	0	0	-
	NH₄	23.74	-	-	64.06	-	-	0	0	-
Tr. Urbano	NO₃⁻	5.55	-	-	0	-	-	0	0	-
	NO₂⁻	0	-	-	0.68	-	-	0	0	-
	NH₄⁺	7.77	-	-	42.38	-	-	0	0	-

Tabla 24. Porcentaje de carbono orgánico total y nitrógeno total.

		Ago			Nov		
		P	A	L	P	A	L
Natural	C	3.07	7.03	-	5.65	-	-
	N	0.29	0.59	-	0.62	-	-
Ganadero	C	3.64	-	-	3.27	-	-
	N	0.2	-	-	0.23	-	-
Mixto	C	3.7	-	-	4.52	-	-
	N	0.16	-	-	0.32	-	-
Agrícola	C	2.66	3.91	-	3.14	3.24	-
	N	0.17	0.28	-	0.25	0.20	-
Tr. Urb	C	2.43	-	-	2.16	-	-
	N	0.08	-	-	0.1	-	-

Tabla 25. Relación carbono nitrógeno.

Uso de suelo	Ago			Nov		
	P	A	L	P	A	L
Natural	11:1	12:1	-	9:1	-	-
Ganadero	18:1	-	-	14:1	-	-
Agrícola	16:1	14:1	-	13:1	16:1	-
Mixto	23:1	-	-	14:1	-	-
Tr. Urbano	30:1	-	-	21:1	-	-

Tabla 26. Análisis de los valores promedios y desviación estándar de la producción de a) CO₂, b) CH₄ y c) N₂O (mg/d • m²) a lo largo de los pulsos de inundación (diferencias significativas indicadas con letras).

CO ₂ mg/día•m ²		Pasto		Sumergido		Limite	
Uso de suelo	Pulso de inundación	Media	StD	Media	StD	Media	StD
Mixto	Ago	26.18 ^a	25.15	-	-	-	-
	Nov	10.81 ^a	20.00	-	-	-	-
	Mar	29.86 ^a	42.69	19.52 ^a	18.86	-	-
Agrícola	Ago	52.12 ^a	69.23	13.63 ^b	27.27	-	-
	Nov	45.80 ^a	35.94	54.83 ^a	32.51	-	-
	Mar	29.81 ^a	40.39	31.86 ^{ab}	55.22	21.74 ^a	38.16
Ganadero	Ago	22.83 ^b	31.77	-	-	-	-
	Nov	0.00 ^b	0.00	-	-	-	-
	Mar	76.57 ^a	25.22	52.85 ^a	64.15	-	-
Tránsito urbano	Ago	24.98 ^{ab}	30.54	-	-	-	-
	Nov	64.34 ^a	18.68	-	-	-	-
	Mar	21.00 ^b	25.35	9.20 ^a	11.85	-	-
Natural	Ago	37.34 ^a	42.60	27.12 ^a	39.86	-	-
	Nov	29.82 ^a	31.92	-	-	-	-
	Mar	9.34 ^b	28.22	37.52 ^a	52.95	17.58 ^a	19.80

CH ₄ mg/día·m ²		Pasto		Sumergido		Limite	
Uso de suelo	Pulso de inundación	Media	StD	Media	StD	Media	StD
Mixto	Ago	0.03 ^b	0.04	-	-	-	-
	Nov	5.76 ^a	6.24	-	-	-	-
	Mar	0.17 ^b	0.15	0.29 ^a	0.32	-	-
Agrícola	Ago	0.07 ^b	0.11	0.08 ^b	0.16	-	-
	Nov	38.47 ^a	95.52	16.01 ^a	16.07	-	-
	Mar	0.12 ^b	0.17	0.01 ^b	0.04	0.19 ^a	0.28
Ganadero	Ago	0.03 ^a	0.05	-	-	-	-
	Nov	74.34 ^a	148.27	-	-	-	-
	Mar	0.36 ^a	0.51	0.10 ^a	0.19	-	-
Tránsito urbano	Ago	0.16 ^{ab}	0.12	-	-	-	-
	Nov	6.37 ^a	11.15	-	-	-	-
	Mar	0.11 ^b	0.15	0.01 ^a	0.02	-	-
Natural	Ago	0.05 ^b	0.09	0.19 ^a	0.38	-	-
	Nov	4.14 ^a	5.71	-	-	-	-
	Mar	0.12 ^b	0.19	1.39 ^a	2.86	2.10 ^a	2.53

N ₂ O mg/día·m ²		Pasto		Sumergido		Limite	
Uso de suelo	Pulso de inundación	Media	StD	Media	StD	Media	StD
Mixto	Ago	0.017 ^a	0.012	-	-	-	-
	Nov	0.002 ^a	0.005	-	-	-	-
	Mar	0.021 ^a	0.014	0.005 ^a	0.011	-	-
Agrícola	Ago	0.016 ^a	0.014	0.009 ^{ab}	0.013	-	-
	Nov	0.014 ^a	0.020	0.000 ^b	0.000	-	-
	Mar	0.052 ^a	0.055	0.034 ^a	0.037	0.079 ^a	0.108
Ganadero	Ago	0.038 ^a	0.036	-	-	-	-
	Nov	0.234 ^a	0.384	-	-	-	-
	Mar	0.002 ^a	0.003	0.075 ^a	0.039	-	-
Tránsito urbano	Ago	0.008 ^a	0.005	-	-	-	-
	Nov	0.007 ^a	0.008	-	-	-	-
	Mar	0.023 ^a	0.044	0.019 ^a	0.037	-	-
Natural	Ago	0.011 ^a	0.016	0.011 ^a	0.023	-	-
	Nov	0.011 ^a	0.012	-	-	-	-
	Mar	0.863 ^a	1.245	0.019 ^a	0.030	0.020 ^a	0.029

Tabla 27. Análisis de los valores promedios y desviación estándar de la producción de a) CO₂, b) CH₄ y c) N₂O (mg/d • m²) en los diferentes usos de suelo (diferencias significativas indicadas con letras).

CO ₂ mg/d • m ²		Pasto		Sumergido		Limite	
Pulso de inundación	Uso de suelo	Media	StD	Media	StD	Media	StD
Ago	Mixto	26.18 ^a	25.15	-	-	-	-
	Agrícola	52.12 ^a	69.23	13.63 ^a	27.27	-	-
	Ganadero	22.83 ^a	31.77	-	-	-	-
	Tr. Urbano	24.98 ^a	30.54	-	-	-	-
	Natural	37.34 ^a	42.60	27.12 ^a	39.86	-	-
Nov	Mixto	10.81 ^{de}	20.00	-	-	-	-
	Agrícola	45.80 ^{bc}	35.94	54.83 ^{abc}	32.51	-	-
	Ganadero	0 ^e	0	-	-	-	-
	Tr. Urbano	64.34 ^{ab}	18.68	-	-	-	-
	Natural	29.82 ^{cd}	31.92	-	-	-	-
Mar	Mixto	29.86 ^{bc}	42.69	19.52 ^{bc}	18.86	-	-
	Agrícola	29.81 ^{bc}	40.39	31.86 ^{bc}	55.22	21.74 ^{bc}	38.16
	Ganadero	76.57 ^a	25.22	52.85 ^{abc}	64.15	-	-
	Tr. Urbano	21.00 ^{bc}	25.35	9.20 ^{bc}	11.85	-	-
	Natural	9.34 ^c	28.22	37.52 ^{abc}	52.95	17.58 ^{bc}	19.80

CH ₄ mg/d • m ²		Pasto		Sumergido		Limite	
Pulso de inundación	Uso de suelo	Media	StD	Media	StD	Media	StD
Ago	Mixto	0.03 ^b	0.04	-	-	-	-
	Agrícola	0.07 ^b	0.11	0.08 ^b	0.16	-	-
	Ganadero	0.03 ^{ab}	0.05	-	-	-	-
	Tr. Urbano	0.16 ^{ab}	0.12	-	-	-	-
	Natural	0.05 ^b	0.09	0.19 ^{ab}	0.38	-	-
Nov	Mixto	5.76 ^{ab}	6.24	-	-	-	-
	Agrícola	38.47 ^{ab}	95.52	16.01 ^a	16.07	-	-
	Ganadero	74.34 ^b	148.27	-	-	-	-
	Tr. Urbano	6.37 ^{ab}	11.15	-	-	-	-
	Natural	4.14 ^b	5.71	-	-	-	-
Mar	Mixto	0.17 ^{abcd}	0.15	0.29 ^{abc}	0.32	-	-
	Agrícola	0.12 ^{bcd}	0.17	0.01 ^d	0.04	0.19 ^{bcd}	0.28
	Ganadero	0.36 ^{abc}	0.51	0.10 ^{bcd}	0.19	-	-
	Tr. Urbano	0.11 ^{abcd}	0.15	0.01 ^{cd}	0.02	-	-
	Natural	0.12 ^{bcd}	0.19	1.39 ^{abcd}	2.86	2.10 ^a	2.53

N ₂ O mg/d • m ²		Pasto		Sumergido		Limite	
Pulso de inundación	Uso de suelo	Media	StD	Media	StD	Media	StD
Ago	Mixto	0.02 ^a	0.01	-	-	-	-
	Agrícola	0.02 ^a	0.01	0.01 ^a	0.01	-	-
	Ganadero	0.04 ^a	0.04	-	-	-	-
	Tr. Urbano	0.01 ^a	0.00	-	-	-	-
	Natural	0.01 ^a	0.02	0.01 ^a	0.02	-	-
Nov	Mixto	0 ^{bc}	0	-	-	-	-
	Agrícola	0.01 ^{ab}	0.02	0 ^c	0	-	-
	Ganadero	0.23 ^a	0.38	-	-	-	-
	Tr. Urbano	0.01 ^{abc}	0.01	-	-	-	-
	Natural	0.01 ^{ab}	0.01	-	-	-	-
Mar	Mixto	0.02 ^{abcd}	0.01	0.01 ^{cd}	0.01	-	-
	Agrícola	0.05 ^{abc}	0.06	0.03 ^{abcd}	0.04	0.08 ^{ab}	0.11
	Ganadero	0 ^d	0	0.08 ^a	0.04	-	-
	Tr. Urbano	0.02 ^{bcd}	0.04	0.02 ^{cd}	0.04	-	-
	Natural	0.86 ^{ab}	1.25	0.02 ^{bcd}	0.03	0.02 ^{bcd}	0.03

12.3 ANEXO 3

12.3.1 Formas orgánicas e inorgánicas de C y N

Distribución de las formas orgánicas e inorgánicas de C y N encontradas en todos los usos de suelo a lo largo de los pulsos de inundación.

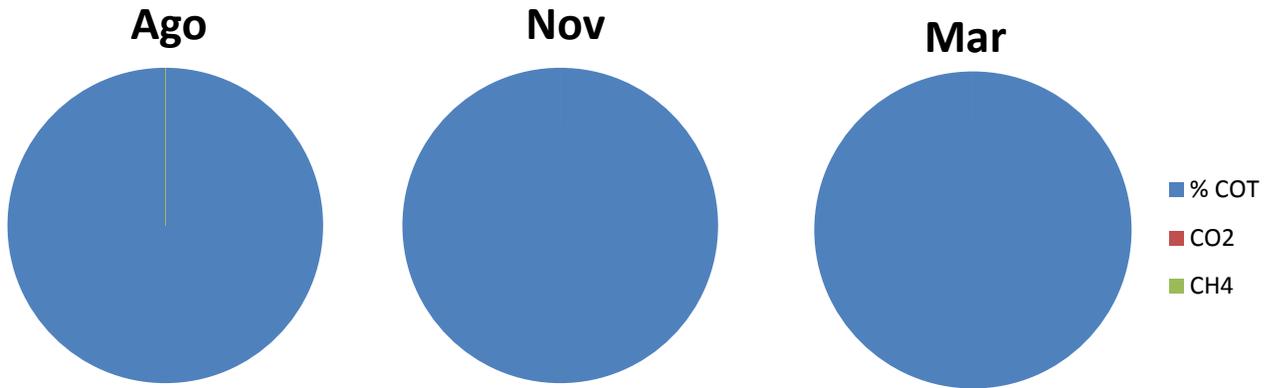


Figura 28. Distribución del C orgánico e inorgánico (mg/m²) en las Lagunas de Chaschoc a lo largo de los pulsos de inundación.

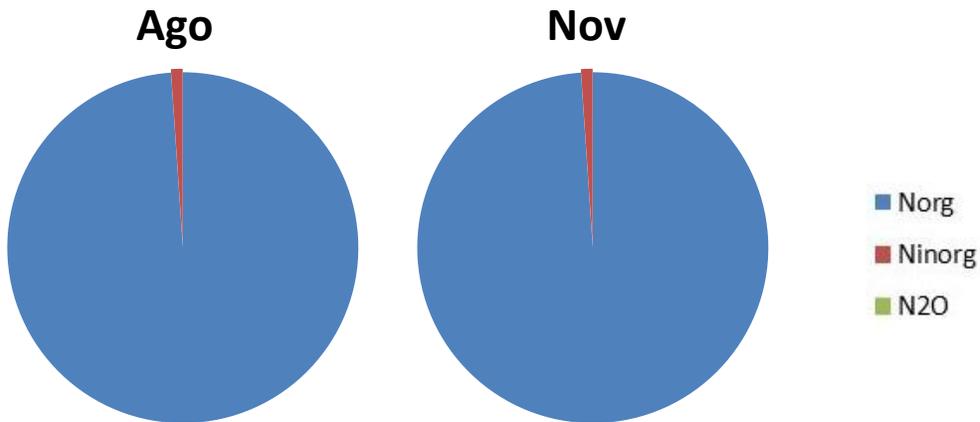


Figura 29. Distribución del N orgánico e inorgánico (mg/m²) en las Lagunas de Chaschoc a lo largo de los pulsos de inundación. En marzo no se determinó el Ntot, por lo tanto no se pudo determinar el N orgánico.