

UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL MANEJO DE
FERTILIZACIÓN CONVENCIONAL Y ORGÁNICO DEL CULTIVO
DE PIÑA (*ANANAS COMOSUS*) SOBRE LA GENERACIÓN DE GEI,
EN ULTISOLES DE LA ZONA DE SARAPIQUÍ, HEREDIA, COSTA
RICA**

Trabajo de graduación sometido a consideración del Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Gestión Ambiental, modalidad artículo científico.

Por:
Sofía Coto Brenes

Heredia, Costa Rica

Febrero, 2021

Trabajo de graduación aprobado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Gestión Ambiental.

MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

M.Sc. Fabio Chaverri Fonseca

Representante del Decanato Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

M.Sc. Ernesto Montero Sánchez

Representación de la Dirección de EDECA

Dr. Jorge Herrera Murillo

Tutor

Dr. Wagner Peña Cordero

Lector 1

Bach. Sofía Milena Coto Brenes

Postulante

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL MANEJO DE FERTILIZACIÓN CONVENCIONAL Y ÓRGANICO DEL CULTIVO DE PIÑA (*ANANAS COMOSUS*) SOBRE LA GENERACIÓN DE GEI, EN ULTISOLES DE LA ZONA DE SARAPIQUÍ, HEREDIA, COSTA RICA

Sofía Coto¹

Palabras clave: suelo, cultivo de piña, mineralización, gases de efecto invernadero, Sarapiquí-Costa Rica

Key words: soil, pineapple plantation, mineralization, greenhouse gases, Sarapiquí-Costa Rica

RESUMEN

Introducción. El cultivo de la piña ha aumentado en el país por su alta demanda en el comercio exterior. Por consiguiente, el uso de agroquímicos ha incrementado, modificando el suelo, y ocasionando cambios físicos, químicos y biológicos en este, lo cual genera gases de efecto invernadero como: dióxido de carbono, metano y óxido nitroso. **Objetivo.** Evaluar las condiciones del suelo del cultivo de piña, por medio de la medición de gases de efecto invernadero en época seca y lluviosa para la comparación del impacto de dos tipos de manejo agrícola y bosque, como sistema línea base. **Materiales y métodos.** La selección de los sitios de muestreo se realizó por medio de una entrevista. Posteriormente, se recolectó 500 g de suelo en parcelas de (20 x 40) m para el análisis químico. Luego, se tomaron las muestras de gases por medio de dos técnicas: cámara estática y analizador de gases continuo (LGR), durante la época seca y época lluviosa (2018 y 2019), en las dos técnicas se extrajo 12 ml de aire con una jeringa en distintos tiempos (0, 10, 20, 30 y 40) min. Para el análisis de los datos se utilizó el software MINITAB STATISTICAL 19. **Resultados.** Los flujos de CO₂ medidos en el bosque tuvieron los valores más altos (456 a 735) mg/m²*d, seguido por el manejo orgánico (280 a 718) mg/m²* d y finalmente el manejo convencional (187 a 428) mg/m²* d. Los flujos de N₂O variaron entre épocas y el manejo orgánico tuvo datos superiores en la época lluviosa (11 a 161) mg/m²* d y el bosque en época seca (3 a 76) mg/m²* d. Los flujos de CH₄ fueron no detectables en esta investigación. **Conclusiones.** Los flujos de CO₂ tuvieron una correlación positiva con la materia orgánica y la concentración de carbono, la cual varió ligeramente entre las épocas. Las condiciones climáticas influyeron en la generación de N₂O, además los altos valores en el manejo orgánico, tuvieron influencia por el uso de acolchado plástico, el cual genera microclimas

y favorece la actividad microbiana.

ABSTRACT

Introduction. The pineapple cultivation has increased in the country due to the high demand of it in foreign trade. Consequently, the use of agrochemicals increases, modifying the soil, and causing physical, chemical, and biological changes in it, which generates greenhouse gases such as carbon dioxide, methane, and nitrous oxide. **Objective.** Evaluate the soil conditions of the pineapple crop, by measuring greenhouse gases in the dry and rainy season to compare the impact of two types of agricultural and forest management, as a baseline system. **Materials and methods.** The selection of the sampling sites was carried out through an interview. Subsequently, the soil sampling was made in plots of (20 x 40) m, 500 g of soil was taken for chemical analysis. Then, the gas samples were taken by two techniques: static chamber and continuous gas analyzer (LGR), during the dry season and rainy season (2018-2019), in both techniques 12 ml of air was extracted with a syringe at different times (0, 10, 20, 30 y 40) min. Finally, the data were statistically analyzed using the MINITAB STATISTICAL 19 software. **Results.** The forest got the highest values of CO₂ fluxes (456 to 735) mg/m²*d, followed by organic handling (280 to 718) mg/m²* d, and conventional handling (187 to 428) mg/m²* d. The N₂O fluxes had changed between season and organic pineapple plantation had higher peak during the rainy season (11 to 16) mg/m²* d and the forest in the dry season (3 a 76) mg/m²* d. CH₄ fluxes were not detectable in this investigation. **Conclusions.** The CO₂ fluxes were related with carbon in soil, which varied slightly between the seasons. The climatic conditions influenced the generation of N₂O, in addition the high flows of this gas in the organic pineapple plantation could have been influenced by the use of plastic mulch, which generates microclimates and stimulate microbial activity.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de la piña es de gran importancia económica para el país debido a su alta demanda a nivel internacional. Ocupa el segundo lugar en la exportación total del sector agrícola costarricense para el año 2018, con un 34.9 % del valor exportado para fruta fresca, presentando un incremento del 1.9 % con respecto al periodo anterior. Dicho crecimiento significó 60 567 millones de dólares por concepto de exportación de piña (SEPSA, 2020).

De acuerdo con la herramienta de monitoreo de cambio de uso de la tierra en paisajes productivos vinculado a su tenencia (MOCCUP), en el país existen 65 670.68 hectáreas dedicadas al cultivo de piña (Sánchez, 2019). Las principales regiones productoras del país son la Huetar Norte y la Huetar Caribe. La primera concentra un 67.3 % de la distribución regional del cultivo (44 193.75 ha). Los cantones de esta región donde existen mayores extensiones de piña son: San Carlos, Los Chiles, Sarapiquí y Río Cuarto. De estos, Sarapiquí ocupa el tercer lugar en área sembrada de piña en Costa Rica, con 6 202.50 ha de área cultivada (Vargas *et al.*, 2020). El gran impacto económico del cultivo de piña en las exportaciones, así como la gran cantidad de empleos directos e indirectos que genera, ha ocasionado un crecimiento en la producción en los últimos años. Dicho crecimiento implica, a su vez, la aplicación de sustancias químicas para proteger la fruta de plagas, para mejorar su calidad y acelerar el proceso de crecimiento con el fin de cumplir con los estándares que exige el mercado internacional (Echeverría *et al.*, 2012). Según un estudio realizado por el Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET, 2016), el cultivo de piña a nivel nacional utiliza en promedio 44 kg de agroquímicos por hectárea al año (Sánchez, 2019).

Esta situación ha ocasionado conflictos tanto sociales como ambientales, por la contaminación de fuentes de agua y la exposición a plaguicidas de las comunidades cercanas (Valverde *et al.*, 2016). Además, según la FAO (2014), la expansión de hectáreas de un monocultivo provoca la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), producto tanto de las prácticas de labranza (quema, fertilización química y aplicación de fertilizantes orgánicos) como de otros factores (temperatura ambiente, las enmiendas orgánicas, textura, pH del suelo y carbono orgánico disponible). Incluso, la modificación de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo pueden provocar la emisión de estos gases.

En la agricultura, los GEI más abundantes son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) (Schaufler *et al.*, 2010). La formación de dióxido de carbono se atribuye al cambio de uso del suelo y al agotamiento de los depósitos de carbono en el suelo. El óxido nitroso, por su parte, se forma por variaciones en los procesos microbianos aerobios y anaerobios, debido a condiciones específicas del sitio (contenido de agua, aireación, contenido de nitrato y amonio, temperatura, disponibilidad de sustratos orgánicos

y valor del pH). En cuanto al metano, los suelos agrícolas con buenas condiciones de aireación pueden generar este gas durante determinados períodos, dependiendo de las concentraciones de materia orgánica y del grado de compactación (Parrado, 2015).

Ahora bien, históricamente, la piña se ha cultivado de dos maneras: convencional y orgánico. En el 2019, el valor de las exportaciones por concepto de piña certificada como “orgánica” fue de 13 697 millones de dólares mientras que el manejo convencional reportó 962 826 millones de dólares (SEPSA, 2020).

En el presente trabajo de investigación, se evaluó las condiciones del suelo del cultivo de piña mediante la medición de GEI, utilizando dos técnicas: cámara estática y analizador de flujo continuo (*in situ*) en tres fincas de Puerto Viejo de Sarapiquí, Heredia (región ubicada al noreste del país) durante la época seca y lluviosa. Para comparar el impacto de dos tipos de manejo agrícola: convencional y orgánico, además se analizó el bosque, como zona donde no se lleva a cabo actividad agrícola. Para así establecer información base para la evaluación de las prácticas de fertilización y del monocultivo sobre la influencia en la generación de emisiones en el suelo, como punto de partida para crear posibles acciones de mitigación de GEI en el sector.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de área de estudio

Sarapiquí se ubica entre las coordenadas 10°29'23" latitud norte y 83°56'15" longitud oeste. Dentro de sus actividades económicas predominantes están la agricultura (piña, café, cítricos, plátano, palma y frutas) y la ganadería, seguidas por el turismo ecológico y de aventura. Además, recientemente han aumentado las actividades comerciales y de servicios (WMO, 2009, Barrientos, 2010, Oreamuno y Quirós, 2014).

La zona de estudio elegida se caracteriza por tener un promedio anual de precipitaciones de 4000 mm. Registra una temperatura media de 26.1 °C, con una mínima de 20.7 °C y una máxima de 32.5 °C (datos de enero a diciembre del 2015) (Brenes, 2015).

Se caracteriza por la influencia de vientos alisios y por temporadas de depresiones tropicales y frentes fríos. Presenta elevaciones de entre (37 a 187) metros sobre el nivel del mar. Perteneció a la Zona de Vida de Holdridge (1967): bosque Muy Húmedo Tropical (bmh-T). El área de estudio posee una taxonomía de suelos tipo ultisol: suelos ácidos, de cristalinidad 1:1 caolinítico y de baja fertilidad con respecto a otros de la región. También presentan régimen de humedad údico y relieve casi plano (Mata *et al.*, 2013).

Selección de los manejos para estudio

La caracterización de los manejos se realizó a partir de una entrevista donde se determinó la siguiente información: tipo y dosis de agroquímicos que se utilizan en los sistemas, la frecuencia de las aplicaciones, los antecedentes de la finca, el período del cultivo, entre otros datos. Además, se recopiló información por medio de visitas de campo, para identificar elementos influyentes en el resultado de los datos, tales como las fuentes puntuales de emisiones de GEI cercanas.

La distribución geográfica de los puntos de muestreo se puede observar de manera gráfica en la figura 1.



Figura 1. Puntos de muestreo de las tres fincas en estudio, Sarapiquí, Heredia

Fuente: Herrera, 2020

El cuadro 1 describe los tres sitios de muestreo: extensión, antecedentes, variedad del cultivo o especies presentes, certificaciones, entre otros datos.

Cuadro 1. Características de los tres sitios de muestreo en Sarapiquí, Heredia

	Convencional	Orgánico	Bosque
Distrito	Puerto Viejo		
Coordenadas	10°30' 31.2" N 84°08' 38.4" O	10°28' 25.7" N 84°05' 23.3" O	10°30' 15.7" N 84°07' 27.9" O
Extensión	42 ha cultivadas	78 ha cultivadas	1039 ha de bosque secundario
Antecedentes	Ganadería	ganadería y cultivo de plantas ornamentales	explotación forestal y ganadera
Variedad de piña	híbrida MD2	híbrida MD2	ND
Certificaciones	Global GAP	Programa Orgánico Nacional de los Estados Unidos (NOP-USDA) y la certificación costarricense del Reglamento Nacional N° 29782.	Forma parte del Programa de Pago de Servicios Ambientales (PSA) de Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO)

Frecuencia de aplicación de fertilizantes	Cada 10 ó 12 días, utilizando <i>Spray Boom</i> .	Cada 15 días se aplican fertilizaciones a nivel foliar, utilizando <i>Spray Boom</i> y subsolador para el encamado.	NA
--	---	---	----

(NA: no aplica)

Los cuadros 2 y 3 detallan el estado del cultivo, el programa de fertilización aplicado y el número de días que habían pasado desde la última fertilización, durante el muestreo de las mediciones de CO₂, CH₄ y N₂O, en los dos manejos agrícolas.

Cuadro 2. Información del estado y la aplicación de fertilizantes del cultivo convencional de piña durante las campañas de medición (2018-2019)

Muestreo	Número de semanas después de ser cultivado, al momento de la medición	Días después de la fertilización	Fórmula aplicada para fertilización foliar	Dosis (kg/ha)
1	16	8	Urea	45
			Nitrato de amonio	90
2	21		Sulfato de magnesio	100
			Fosfato monoamónico	50
3	37		<i>Tricoderma harzianum</i>	1
4	43		Hierro	25
			Sulfato de zinc	5

**Fechas de muestreos: nov. 2018, dic. 2018, mar.2019 y may. 2019.

Cuadro 3. Información del estado y la aplicación de fertilizantes del cultivo orgánico de piña durante las campañas de medición (2018-2019)

Muestreo	Número de semanas después de ser cultivado, al momento de la medición	Días después de la última fertilización	Fórmula aplicada	Dosis (kg/ha)
1	19	11	<i>Bacillus thuringiensis</i>	1
			Pinolene	0.3
2	24	18	Azufre	10
			Sulfato de magnesio	50
			Potasio	10 (l/ ha)
			Multicompost	150
			Pinolene	0.3
			Extracto de ajo	0.4 (l/ha)
			Sulfato de cobre y cal hidratada	1
			Borato doble de sodio y calcio	6
			<i>Bacillus thuringiensis</i>	1
3	40	1	<i>Bacillus thuringiensis</i>	1
			Pinolene	0.3
4	46	36	Pinolene	0.3
			<i>Bacillus thuringiensis</i>	1
			Co-polimero de Polyeter y Silicona heptametiltrisiloxano	0.3
			Extracto de ajo	0.4 (l/ha)

**Fechas de muestreos: nov. 2018, dic. 2018, mar.2019 y may. 2019.

Muestreo

El periodo de muestreo se inició en octubre del 2018 en época lluviosa y finalizó en mayo del 2019, en época seca. Los muestreos de gases y de suelos se realizaron una semana después de la fertilización foliar en los dos manejos del cultivo (convencional y orgánico).

Para recolectar muestras se delimitaron los tres sitios objeto de estudio mediante dos parcelas de (20 x 40) m, subdivididas en dos subparcelas de (20 x 20) m para conformar una muestra compuesta (figura 2). En cada subparcela se tomaron muestras en tres puntos y se recolectaron submuestras de 500 g de suelo a una profundidad de 20 cm, utilizando un barreno. Además, se tomaron dos muestras por cada sitio para densidad aparente con un cilindro muestreador.

En lo que respecta al muestreo de gases, para la medición de CO₂ se usó la cámara estática, la cual estaba conformada por un tubo de cloruro de polivinilo cilíndrico opaco con un diámetro medio de 36 cm y una altura efectiva de 50 cm. Adicionalmente, se equipó con un ventilador y un pequeño puerto de muestreo lateral para la toma de muestras. El procedimiento consistió en extraer el aire acumulado en el interior de la cámara utilizando una jeringa de 12 ml en distintos tiempos (0, 10, 20, 30 y 40) min. Las muestras se colocaron en un tubo al vacío de 10 ml y se transportaron al Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, donde se analizaron.

Por otra parte, para la medición de CH₄ y N₂O se utilizó un analizador de gases de efecto invernadero marca *Los Gatos Research* (LGR), el cual utiliza la tecnología de cavidad integrada fuera del eje espectroscopía de salida (por sus siglas en inglés: *OA-ICOS*). En este equipo la bomba interna del analizador extrae el gas por el puerto de entrada, lo arrastra hasta llegar al filtro de 10 µm, antes de ingresar al controlador de presión, el cual determina la tasa de flujo. Luego, el gas viaja por la celda óptica y es expulsado por el escape interno de la bomba. Los datos son anotados *in situ* y visualizados por medio de la computadora interna con la que cuenta el equipo. Al igual que en el método con cámara estática, se anotaron los datos en (0, 10, 20, 30,40) min.

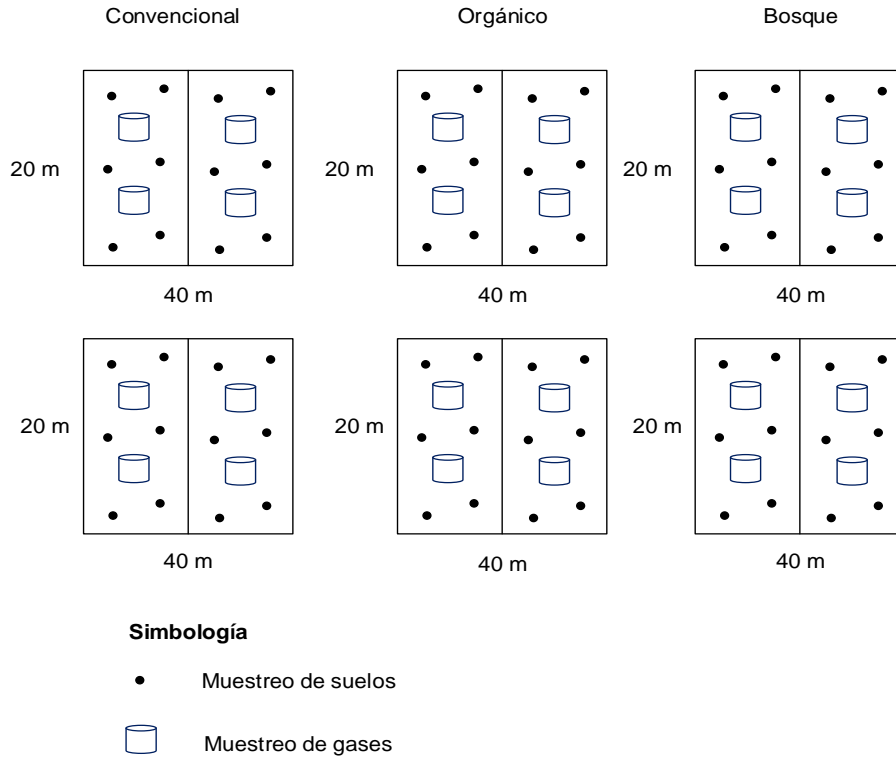


Figura 2. Diseño de muestreo

Fuente: elaboración propia

Análisis físico-químico: medición de flujos de metano, óxido nitroso y dióxido de carbono

Como se mencionó, el analizador de gases de efecto invernadero de *Los Gatos Research* (LGR) se utilizó para detectar los gases N_2O y CH_4 , Para determinar el CO_2 se utilizó el equipo *CO₂ meter Model CO250, marca EXTECH INSTRUMENTS*. Este utiliza tecnología de sensor infrarrojo no dispersivo (*NDIR*, por sus siglas en inglés), el cual es sensible a la absorción de luz infrarroja de las moléculas de CO_2 en el aire contenidas en su celda óptica (Arzoumanian *et al.*, 2019).

Luego, por medio de la siguiente fórmula se determinó el flujo de cada gas en función del área y del tiempo:

$$E = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{VM}{AV_m} \quad [1]$$

Donde:

E= flujo de gas por unidad de área y tiempo

$\frac{dx}{dt}$ = tasa de acumulación del gas en el aire dentro del cámara expresado en partes por

millón por minuto

V= volumen del gas expresado en litros

A= área de la cámara en m^2

M= masa de N por cada Mol N_2O o si es el caso de CH_4 o CO_2 , masa de C por cada mol

V_m = Volumen molecular del gas, se calcula con la ecuación de los gases ideales

Propiedades de los suelos

El cuadro 4 muestra los métodos aplicados para el análisis de suelo.

Cuadro 4. Métodos aplicados para el análisis de las propiedades de los suelos

Propiedad	Método
Textura	Método de Bouyoucos (Andrades <i>et al.</i> , 2015)
Densidad aparente	Metodología del cilindro de volumen conocido
pH	pH-metro en agua 1:25
K, Fe, Cu, Zn, P y Mn	Extracción con Olsen modificado
Acidez, Ca y Mg	Extracción de cloruro de potasio (KCl) 1 M
Porcentaje de materia orgánica, carbono orgánico y nitrógeno	Método de Dumas digestión seca (Gregorio <i>et al.</i> , 2016).
Respiración microbiana del suelo	Sensor Vernier de CO_2

Para determinar los procesos de mineralización, se relacionaron los valores de carbono total (MOS) y del C- CO_2 emitidos por la actividad microbiana. Lo anterior se estableció relativamente (%) utilizando la siguiente relación:

$$\left(\frac{(\%)C-CO_2 \text{ microbiano}}{C_{total}} \right) * 100 \quad [2]$$

Análisis estadístico

La normalidad de los datos de flujos de CO₂, N₂O y CH₄ se analizó mediante la aplicación de la prueba de normalidad Anderson-Darling. Además, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar la variación temporal de los flujos entre campañas de muestreo, y entre los diferentes tratamientos agrícolas. Finalmente, se identificaron las posibles correlaciones entre las variables medidas por medio de correlaciones de *Pearson* (Martínez *et al.*, 2009). Para el análisis estadístico se utilizó el software *MINITAB STATISTICAL 19*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Medición de flujos de metano, óxido nitroso y dióxido de carbono

En el cuadro 5, se observan los promedios de los flujos obtenidos durante las campañas de muestreo, con su respectiva desviación estándar.

Cuadro 5. Flujos de CO₂, N₂O y CH₄ durante las campañas de muestreo para los tres sistemas de medición

CO ₂ (mg/m ² * d)			
Manejos	Convencional	Orgánico	Bosque
Nov. 2018	187 (80)	718 (13)	735 (495)
Dic. 2018	165 (28)	281 (165)	737 (356)
Mar. 2019	251 (189)	369 (307)	851 (647)
May. 2019	428 (272)	280 (144)	456 (237)
N ₂ O (mg/m ² * d)			
Nov. 2018	24 (19)	161 (99)	76 (79)
Dic. 2018	5 (8)	137 (89)	38 (25)
Mar. 2019	0.3 (5)	11 (4)	3 (3)
May. 2019	27 (32)	23 (34)	59 (44)
CH ₄ (mg/m ² * d)			
Nov. 2018	ND	ND	ND
Dic. 2018	ND	9 (11)	ND
Mar. 2019	ND	1 (0)	ND
May. 2019	18 (2)	ND	ND

**El valor entre paréntesis corresponde a la desviación estándar.

ND: no detectable.

Al analizar los datos, por medio de la prueba Anderson-Darling (cuadro 6), se infiere que los datos de flujos de dióxido de carbono y óxido nitroso siguen una distribución normal,

con un nivel de significancia de 5% para todas las campañas de muestreo en los distintos manejos agrícolas y de bosque. En el caso del metano, no se realizó la prueba, dado que la mayoría de datos se encuentran por debajo del límite de detección (4 mg/m²*d). La dispersión de los datos puede ser atribuida a las variaciones de los parámetros meteorológicos y las propiedades del suelo durante el ciclo de siembra, además de la variabilidad propia del sistema de medición.

Además, la variabilidad en la concentración de los gases en el suelo se puede explicar debido a los cambios que sufren los principales promotores de la generación de GEI, los cuales son: el contenido de agua, la aireación del suelo, temperatura en el suelo, la disponibilidad de sustratos que mineraliza carbono y nitrógeno y la materia orgánica, estos varían tanto espacial como temporalmente, es decir el tipo de suelo y sus propiedades puede variar significativamente conforme cambia la ubicación de cada punto de muestreo, así como la temporalidad en las condiciones del clima como temperatura, precipitaciones, presión atmosférica, humedad, entre otros (Fóti et al., 2018). También se ha identificado que los suelos se caracterizan por tener una variabilidad espacial alta, tanto física como biológica inclusive a corta distancia de diferencia. Por ejemplo, en un punto de muestreo puede tener una alta actividad metabólica y esto puede contribuir al alza en la tasa de los gases GEI, contrario a otro punto de muestreo (incluso cercano) que se caracteriza por tener poca actividad metabólica, por ende, influye de manera contraria en la generación de emisiones (Petrakis et al. 2018).

Cuadro 6. Resultado de la prueba de normalidad de Anderson- Darling para los flujos de CO₂ y N₂O en las cuatro giras de muestreo

Muestreo	CO ₂		N ₂ O	
	AD	Valor de p	AD	Valor de p
1	0.644	0.068	0.904	0.054
2	0.445	0.229	0.616	0.080
3	0.702	0.060	0.239	0.694
4	0.326	0.461	0.443	0.226

AD: Anderson-Darling.

Los valores obtenidos para los flujos de CO₂ resultaron ser inferiores a los reportados por Choo y Ahmed (2014) en la investigación realizada en Saratok, Malasia. Los cuales en los suelos desnudos de turba obtuvieron la mayor concentración con 59 945 mg/m²*d mientras que los suelos de turba cultivados con piña llegaron a 49 205 mg/m²*d.

Por otro lado, los flujos de N₂O fueron muy superiores a los registrados por Choo y Ahmed (2017) donde la mayor concentración la obtuvo el suelo de turba cultivado de piña con 4301 mg/m²*d, seguido por el suelo de turba sin cultivar con 2795 mg/m²*d. En cambio, las tasas de flujos de este estudio fueron superiores a las reportadas por Parrado (2015), en un rango de (3.5 a 16.7) mg/m²*d de N₂O, proveniente de suelos de sistemas agrícolas comerciales de rosas de corte en Bogotá, Colombia.

No obstante, como se mencionó, la generación de GEI es influenciada por múltiples factores, por lo que es complejo comparar estudios, principalmente por la diferencia en el tipo de suelo y la composición de este, pues las propiedades físicas, químicas y biológicas influyen en el comportamiento de los flujos de GEI en los suelos. Además, se tomó como referencia este tipo de suelo (turboso), ante la escasez de investigaciones de GEI en suelos tropicales con cultivo de piña. Del mismo modo, las concentraciones reportadas en las investigaciones mencionadas anteriormente, son altas comparadas con las obtenidas en el presente estudio, debido a que esos suelos se caracterizan por tener altas concentraciones de materia orgánica, lo cual favorece la mineralización del C y N, que genera flujos de CO₂ y N₂O. Así, en los estudios, los suelos turbosos reportaron 39.8 % de carbono orgánico y 1.18 % de nitrógeno, contrario a lo obtenido en esta investigación: en carbono orgánico, 2.5 % en manejo convencional, 3.8 % en manejo orgánico y 4.1 % en bosque; mientras que, de nitrógeno, 0.2 % en manejo convencional, 0.3 % en manejo orgánico y 0.3 % en bosque.

Es importante mencionar que los flujos de CO₂ medidos en el bosque durante las campañas de muestreo registraron los valores más altos, en comparación con los dos manejos agrícolas: estuvieron en un rango de (456 a 735) mg/m²*d, seguido por el manejo orgánico, con valores comprendidos entre (280 a 718) mg/m²* d, y en último lugar, el manejo convencional con datos entre (187 a 428) mg/m²* d.

Por su parte, los flujos de N_2O en el manejo orgánico arrojaron valores más altos, con un rango de (11 a 161) $mg/m^{2*} d$, mientras que el bosque fue de entre (3 a 76) $mg/m^{2*} d$ y en el manejo convencional, de (0.3 a 27) $mg/m^{2*} d$.

Ahora bien, los resultados obtenidos en las parcelas del bosque son esperables. Según Arellano (2017), el flujo de CO_2 en pastizales, desiertos, humedales y zonas de cultivo es menor al de los bosques. Además, la variación en los flujos de CO_2 en el suelo de los bosques tropicales se debe a la diferencia en el tamaño de los árboles, la biomasa microbiana y radical, la cantidad de mantillo, el tipo de suelo, la cantidad de materia orgánica, la concentración de carbono, nitrógeno, fósforo y las condiciones de temperatura y humedad en el suelo (Arellano, 2017). Esto coincide con lo obtenido en los análisis de suelos del bosque de la presente investigación: se presentó la mayor concentración de fósforo ($5.5 mg \cdot l^{-1}$), carbono (4.1 %), nitrógeno (0.3 %) y el mayor porcentaje de humedad (68.8 %), como se muestra en el cuadro 7.

Lo anterior también explica por qué el manejo orgánico obtuvo el segundo lugar en los flujos de CO_2 , el cual supera al manejo convencional en la concentración de fósforo ($2.0 mg \cdot l^{-1}$), carbono (3.8 %), nitrógeno (0.3 %) y en porcentaje de humedad (49.7 %). Una razón para este comportamiento es el uso de abonos con alto contenido de materia orgánica, pues los flujos de CO_2 hacia la atmósfera se generan por la descomposición de esta materia, a través de la respiración metabólica de la comunidad de microorganismos. Dicho de otra forma, la respiración heterotrófica contribuye a la descomposición, junto con otros procesos como la humificación y la fragmentación del detritus (Guerrero-Ortiz *et al.*, 2012).

Otro dato importante es que las medias de los flujos de CO_2 obtenidas para cada una de las campañas de muestreo no resultaron ser significativamente diferentes entre sí ($p > 0.05$). Esto se explica porque el C es el factor más influyente en el comportamiento de los flujos de CO_2 y durante la investigación las concentraciones de C mostraron una tendencia muy similar en la época seca y la época lluviosa (Fig. 5): en época seca, el manejo convencional tuvo un porcentaje de carbono de 2.61 %; el manejo orgánico, 3.26 %; y el bosque, 3.55 %; mientras que en la época lluviosa el manejo convencional fue de 2.39 %; el manejo orgánico, 4.31 %; y el bosque, 4.13 %.

Por su parte, los flujos de N_2O presentaron diferencias entre las medias para cada campaña. En esta investigación, el N_2O resultó ser más sensible a los cambios en la temperatura y a las condiciones climáticas (nivel de precipitaciones). Lo anterior se explica porque la producción de N_2O depende de la nitrificación y desnitrificación, y este último proceso ocurren bajo condiciones anaerobias. Por lo general, durante la época lluviosa, los poros de los suelos se llenan y saturan, provocando esas condiciones. Además, según Signor y Cerri (2013), la temperatura y la humedad son variables que determinan la actividad de los microorganismos responsables de la generación de este gas.

Específicamente en cuanto a los flujos de N_2O en el manejo orgánico, se observa que durante la época lluviosa se produjo un crecimiento diferenciador. El acolchado plástico (que se utiliza para disminuir el crecimiento de maleza y, por ende, evitar el uso de herbicidas) puede haber influido en este proceso. Muchas investigaciones han evidenciado que el uso de una cobertura de plástico incrementa la temperatura y mejora la dinámica del agua en el suelo. Lo anterior, en conjunto con un alto contenido de nitrógeno inorgánico, materia orgánica y baja concentración de oxígeno en el suelo, puede facilitar la producción de N_2O en algunos suelos cubiertos (Berger *et al.*, 2013). Además, según Uriza (2011), el acolchado plástico fomenta la formación de nitratos, cuyo proceso está asociado a la emisión de N_2O a la atmósfera.

Unido a lo anterior, según Berger *et al.* (2013), los flujos de N_2O provenientes de suelos cultivados pueden aumentar tanto por la aplicación de fertilizantes como por fuertes lluvias. Esto explica los altos valores de N_2O durante la época lluviosa, sumado a los ya mencionados (manejo orgánico y acolchado plástico).

En síntesis, el manejo orgánico obtuvo los datos más altos de flujos de N_2O . A la vez, los flujos de los tres manejos fueron significativamente diferentes entre la época lluviosa y la época seca. El manejo orgánico alcanzó los flujos de N_2O más altos durante la época lluviosa, mientras que el bosque obtuvo la concentración más alta de N_2O durante la época seca. Este aumento de N_2O en el manejo orgánico se relaciona con la aplicación de fertilizantes orgánicos en ese período (ver cuadro 3).

3.2. Análisis de suelos

En el cuadro 7, se presentan las características físicas, químicas y biológicas de los suelos para los tres manejos en estudio:

Cuadro 7. Características generales de los suelos

Parámetro	Unidades	Manejo de los sistemas			**Niveles críticos medios del contenido de nutrimentos
		Convencional	Orgánico	Bosque	
Número de muestras	--	16	16	16	--
Textura	--	A	FA, A	A	--
Densidad Aparente	g/cm ³	1.2 (0.3)	1.2 (0.3)	1.0 (0.2)	--
Humedad	%	51.3 (12.4)	49.7 (11.9)	68.8 (9.4)	--
pH	--	4.4 (0.1)	4.4 (0.3)	4.1 (0.2)	6.0-7.0
K	cmol(+)/l	0.2 (0.0)	0.3 (0.2)	0.2 (0.0)	0.5-0.8
Ca	cmol(+)/l	0.5 (0.5)	0.1 (0.5)	0.3 (0.2)	6.0-15.0
Mg	cmol(+)/l	0.1 (0.1)	0.2 (0.1)	0.2 (0.4)	3.0-6.0
Acidez	cmol(+)/l	1.9 (0.6)	2.2 (0.9)	3.6 (0.4)	<0.3
Saturación Acidez	%	67.4 (10.4)	57.7 (14.1)	83.3 (4.4)	<10.0
P	mg·l ⁻¹	1.5 (0.6)	2.0 (1.4)	5.5 (1.7)	20.0-50.0
Fe	mg·l ⁻¹	84.5 (36.3)	102.0 (35.0)	26.3 (2.6)	10.0-50.0
Cu	mg·l ⁻¹	13.0 (1.6)	15.8 (1.6)	15.8 (7.3)	1.0-20.0
Zn	mg·l ⁻¹	3.0 (1.0)	3.1 (1.0)	2.4 (0.7)	3.0-10.0
Mn	mg·l ⁻¹	10.7 (26.7)	28.6 (28.0)	7.9 (2.2)	10.0-50.0
MO	%	3.4 (1.9)	5.4 (1.1)	5.9 (1.7)	5.0-10.0
C	%	2.5 (1.2)	3.8 (0.7)	4.1 (0.8)	1-3
N	%	0.2 (0.1)	0.3 (0.0)	0.3 (0.1)	0.5-0.8
C/N	--	12.0 (1.8)	11.9 (1.3)	12.5 (1.3)	10-12
CICE	cmol(+)/l	2.8 (0.8)	3.6 (0.9)	4.3 (1.7)	5-12
Ca/Mg	--	3.5 (0.3)	5.4 (0.6)	1.7 (0.1)	2.0-5.0
Ca/K	--	2.2 (0.2)	3.4 (0.5)	1.5 (0.1)	50.0-25.0
Mg/K	--	0.6 (0.1)	0.6 (0.1)	0.9 (0.0)	2.5-15.0
Ca+Mg//K	--	1.1 (0.2)	1.6 (0.4)	1.2 (0.1)	10.0-40.0

** Referencia de los niveles críticos medios del contenido de nutrimentos para fertilización (Bertsch,

1995 y Peña., 2017).

A: arcillosa, F: franca., CICE: capacidad de intercambio catiónico efectivo; el valor entre paréntesis corresponde a la desviación estándar.

Como se observa, la textura del suelo es muy similar en los tres manejos en estudio, debido a la cercanía entre los sitios y a que son suelos pertenecientes a un mismo orden. En cuanto a densidad aparente, el bosque presenta los menores niveles y, por ende, un mayor porcentaje de retención de humedad. En general, los valores obtenidos de pH son bajos en los tres manejos; por lo tanto, son suelos muy ácidos. Además, los niveles de calcio y magnesio están por debajo de los valores óptimos, es decir, que existe un desbalance evidente en los tres manejos.

En este punto es importante considerar también el tipo de suelo que se está analizando, ya que los tres manejos son altamente meteorizados. Los ultisoles se caracterizan por ser suelos viejos; se encuentran en lugares muy húmedos, lo que provoca que se laven las bases (sodio, potasio, calcio y magnesio). Tienen alto contenido de aluminio extraíble y son bajos en calcio; de ahí su nivel de acidez. Además, son suelos de texturas finas a muy finas y su alto contenido de arcillas facilita una buena estructura y un drenaje interno óptimo (INTA, 2014).

Asimismo, la saturación de acidez suele superar el 50 %, lo que limita el aprovechamiento de elementos esenciales, como N, P K, y mejora la disponibilidad de microelementos o metales pesados, como Cu y Fe. Por tanto, el contenido de materia orgánica es muy bajo, y un aumento de esta posiblemente provoque acumulación y una degradación del medio, por la poca capacidad de mineralización del sustrato orgánico; es decir, la actividad microbiana se ve afectada y, por consiguiente, el sustrato dependerá del manejo y la cobertura.

Además, el estudio muestra las relaciones catiónicas en valores de desbalance entre cationes, con excepción de Ca/Mg. La relación C/N se califica como media, es decir, hay un suministro normal de nutrimentos al suelo por la descomposición de la materia orgánica.

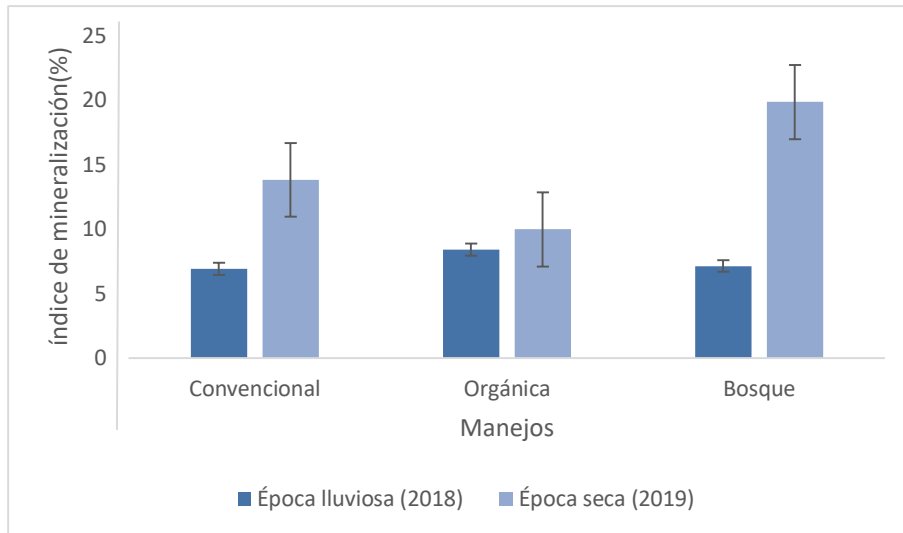


Fig. 3. Índice de mineralización de los suelos

Fuente: elaboración propia

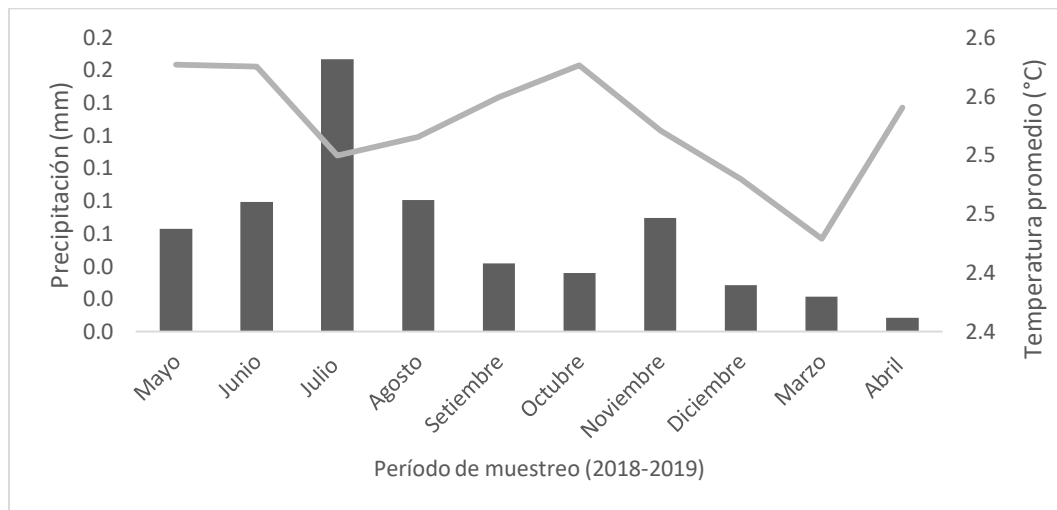


Fig. 4. Datos climáticos del periodo de muestreo (2018-2019)

Fuente: elaboración propia

Otro dato relevante del estudio es que, en época lluviosa, se observa un alto equilibrio metabólico en los manejos más equilibrados (orgánico y bosque). Pero durante la época seca, es notoria una mayor mineralización en bosque con respecto a los otros sistemas de manejo, posiblemente debido a la mayor retención de humedad y al ciclaje de nutrientes que se presentan en este ecosistema. En el sistema convencional es ligeramente superior la mineralización en época seca que, en el orgánico, pero esto se debe

al estrés microbiano, que genera mayor cantidad de CO₂ por unidad de área.

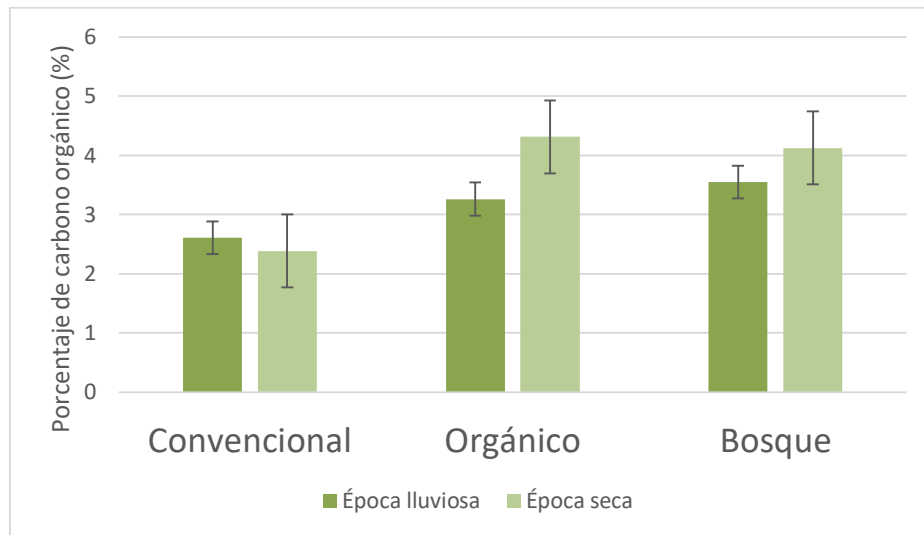


Fig. 5. Carbono orgánico de los suelos

Fuente: elaboración propia

Finalmente, los datos de la figura 5 muestran que el porcentaje de carbono orgánico en los dos manejos agrícolas fue muy similar durante la época lluviosa y seca. Este comportamiento se explica, como se mencionó, por la aplicación de abonos y materia orgánica. El bosque no es comparable, por ser un sistema equilibrado.

3.3. Correlación entre variables

En los cuadros 8 y 9, se muestran las correlaciones de Pearson entre las principales variables que influyen en la formación de GEI:

Cuadro 8. Correlaciones de Pearson entre las propiedades del suelo y los flujos de CO₂

Variable	Flujos de CO ₂
	Correlación
pH	-0.352 (0.091)
Densidad aparente	0.175 (0.413)
Acidez	0.369 (0.076)
Humedad	0.349 (0.094)
Materia orgánica	0.558 (0.005)
Carbono orgánico	0.197 (0.357)
Fósforo	0.214 (0.316)

**El valor entre paréntesis corresponde al valor de p.

Al realizar el análisis de Pearson, se puede observar que la materia orgánica tuvo una correlación positiva significativa con los flujos de CO₂ (cuadro 8). La relación entre los flujos de este gas y la materia orgánica obedece a los procesos de descomposición de dicha materia, a través de la respiración metabólica de la comunidad de microorganismos, así como el aumento en la concentración de C, tal y como fue el comportamiento de los flujos durante los muestreos (ver figura 5).

Cuadro 9. Correlaciones de Pearson entre las propiedades del suelo y los flujos de N₂O

Variables	Flujos de N ₂ O		
	Convencional	Orgánico	Bosque
pH	-0.156 (0.713)	-0.419 (0.301)	0.024 (0.954)
Densidad aparente	-0.275 (0.509)	0.476 (0.233)	-0.667 (0.071)
Acidez	-0.024 (0.955)	0.167 (0.693)	-0.524 (0.183)
Humedad	0.115 (0.787)	0.444 (0.271)	-0.323 (0.435)
Materia orgánica	-0.108 (0.799)	-0.071 (0.867)	-0.357 (0.385)
Carbono orgánico	0.314 (0.449)	-0.074 (0.861)	-0.206 (0.624)
Fósforo	-0.038 (0.928)	0.036 (0.933)	0.549 (0.159)

**El valor entre paréntesis corresponde al valor de p.

Según el cuadro anterior, la densidad aparente tuvo una correlación significativa negativa entre los flujos de N₂O. Es decir, cuando la densidad aparente es baja, los flujos

de N₂O aumentan. Ante esta relación, Klefoth *et al.* (2014), mencionó que una baja densidad aparente implica suelos porosos y buena aireación, lo que favorece la difusión de los gases y la retención de agua en los poros del suelo.

Por otro lado, el contenido de P tuvo una correlación positiva entre los flujos de N₂O en el bosque, es decir al aumentar P, incrementan los flujos de N₂O. Lo que coincide con lo reportado por Mori *et al.* (2017) y Mori *et al.* (2013), ya que la adición de P aumentó las emisiones de N₂O, sugiriendo que P estimuló el ciclo de N, activó las bacterias nitrificantes y/o desnitrificantes y estimuló el consumo de O₂ por actividades heterotróficas, ocasionando una condición más reductiva adecuada para el proceso de desnitrificación.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación contó con el apoyo económico de FOCAES-Investigación 2018 de la Universidad Nacional. Extiendo también un agradecimiento al Laboratorio de Análisis Ambiental, al Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR), Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) y al Programa de Ingeniería Agronómica de la Universidad Estatal a Distancia (UNED), por la colaboración en los análisis, así como a su apoyo técnico y académico.

LITERATURA CITADA

Arellano-Martín, F. 2017. Flujo de CO₂ del suelo en una selva mediana subcaducifolia de Yucatán, México. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica de Yucatán, CICY. Yucatán, México. 6 p.

Andrades, M., Moliner, A. y Masaguer, A. 2015. Prácticas de Edafología: métodos didácticos para análisis de suelos. España, Universidad de la Rioja. 25 p.

Arzoumanian, E., Vogel, F. R., Bastos, A., Gaynullin, B., Laurent, O., Ramonet, M., y Ciais, P. 2019. Characterization of a commercial lower-cost medium-precision non-dispersive infrared sensor for atmospheric CO₂ monitoring in urban areas. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12 (5), 2665-2677.

Barrientos, O. 2010. Sector Agropecuario Cadena Productiva de Piña Políticas y Acciones. Ministerio de Agricultura y Ganadería. (en línea) Costa Rica. Consultado el 10 agosto 2020. Disponible en https://www.centralamericadata.com/es/search?q1=content_es_le:%22C%C3%A1mara+Nacional+de+Productores+y+Exportadores+de+Pi%C3%B1a+%28Costa+Rica%29%22

Berger, S., Kim, Y., Kettering, J., y Gebauer, G. 2013. Plastic mulching in agriculture—Friend or foe of N₂O emissions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 167, 43-51.

Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, C.R. 157 p.

Brenes, L. 2015. Composición florística y estructura horizontal de dos fragmentos de bosque tropical con características distintas en el Refugio de Vida Silvestre Lapa Verde, Puerto Viejo, Sarapiquí (Licenciatura en Manejo de Recursos Naturales). Universidad Estatal a Distancia. 23 p.

Butterbach-Bahl, K.; Sander, B.; Pelster, D. y Díaz-Pinés, E. Quantifying Greenhouse Gas emissions from managed and natural soils. En T. S. Rosenstock, M. C. Rufino, K. Butterbach-Bahl, L. Wollenberg, & M. Richards (Eds.), *Methods for Measuring Greenhouse Gas Balances and Evaluating Mitigation Options in Smallholder Agriculture* 4, 71-96 p. Springer International Publishing.

Choo, L. N. L. K., y Ahmed, O. 2017. Nitrous Oxide Emission of a Tropical Peat Soil Grown with Pineapple at Saratok, Malaysia. *Sustainable Agriculture Research*, 6 (3), 75 p.

Choo, L. N.L.K, y Ahmed, O. H. 2014. Partitioning Carbon Dioxide Emission and Assessing Dissolved Organic Carbon Leaching of a Drained Peatland Cultivated with Pineapple at Saratok, Malaysia. *The Scientific World Journal*; Hindawi.

Echeverría, S.; Mena, F.; Pinnock, M; Ruepert, C.; Solano, K.; De la Cruz, E.; Campos, B.; Sánchez, J.; Lacorte, S. y Barata, C. 2012. Environmental hazards of pesticides from

pineapple crop production in the Río Jiménez watershed. *Science of the total environmental*. 440: 106-114.

FAO. 2014. Anuario Estadístico de la FAO. Santiago, Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 140 p.

Fóti. S., Balogh, J., Papp, M., Koncz, P., Hidy, D., Csintalan, Z., Kertész, P., Bartha, S., Zimmermann, Z., Biró, M., Hováth, L., Molnár, E., Szaniszló, A., Kristóf, K., Kampfl, G. y Nagy, Z. 2018. Temporal variability of CO₂ and N₂O flux spatial patterns at a mowed and a grazed grassland. *Ecosystems*. 21: 112-124.

Guerrero-Ortiz, P., Quintero-Lizaola, R., Espinoza-Hernández, V., Benedicto-Valdés, G. y Sánchez-Colín, M. 2012. Respiración de CO₂ como indicador de la actividad microbiana de abonos orgánicos de Luínus. *Terra Latinoamericana*. 30 (4): 355–362.

Gregorio, J., Lanza, P., Churión, C., y Gómez, N. 2016. Comparación entre el método Kjeldahl tradicional y el método Dumas automatizado (N cube) para la determinación de 33 proteínas en distintas clases de alimentos. *Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, 28 (2): 245-249.

Herrera, D. 2020. Mapa de los puntos de muestreo de las tres fincas en estudio, Sarapiquí, Heredia [mapa].

INTA. 2014. Boletín Técnico 1 Suelos de Costa Rica: Orden Ultisol. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. Plataforma de Tecnología, Información y Comunicación Agropecuaria y Rural. (en línea) Costa Rica. Consultado el 3 marzo 2020. Disponible en <http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/07/00517-boletin-suelos-de-cr.pdf>

IJET. 2016. Highly Hazardous Pesticides phase out and alternatives in Costa Rica. Universidad Nacional. (en línea) Costa Rica. Consultado el 3 marzo 2020. Disponible en <https://www.pan-uk.org/site/wp-content/uploads/HHP-Phase-Out-and-Alternatives-in->

[Costa-Rica-Project-Intro.pdf](#)

Klefoth, R., Clough, T., Oenema, O., y Van Groenigen, J. W. 2014. Soil Bulk Density and Moisture Content Influence Relative Gas Diffusivity and the Reduction of Nitrogen-15 Nitrous Oxide. *Vadose Zone Journal*, 13 (11).

Martínez, R., Pendás, L., C, L., Martínez, M., Pérez, A., y Cánovas, A. 2009. El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8 (2).

Mata, R.; Rosales, A.; Vasquez, A. y DAngelo, S. 2013. Mapa de suelos de Costa Rica según Soil Taxonomy USDA (en línea) Costa Rica. Consultado el 3 marzo 2020. Disponible en <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/av-1630.pdf>

Mori, T., Ohta, S., Ishizuka, S., Konda, R., Wicaksono, A., Heriyanto, J., Hamotani, Y., Gobara, Y., Kawabata, C., Kuwashima, K., Nakayama, Y., y Hardjono, A. 2013. Soil greenhouse gas fluxes and C stocks as affected by phosphorus addition in a newly established *Acacia mangium* plantation in Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 310, 643-651.

Mori, T., Wachrinrat, C., Staporn, D., Meunpong, P., Suebsai, W., Matsubara, K., Boonsri, K., Lumban, W., Kuawong, M., Phukdee, T., Srifai, J., y Boonman, K. 2017. Effects of phosphorus addition on nitrogen cycle and fluxes of N₂O and CH₄ in tropical tree plantation soils in Thailand. *Agriculture and Natural Resources*, 51(2), 91-95.

Oreamuno, R. y Quirós, G. 2014. Proyecto Piloto sobre Sistemas de Alerta Temprana (SAT) para Amenazas Hidrometeorológicas en Costa Rica. (en línea) Costa Rica. Consultado el 3 marzo 2020. Disponible en https://www.wmo.int/pages/prog/drr/projects/CostaRica/Documents/informe_final_esp.pdf

Parrado, C. 2015. Flujos de gases efecto invernadero y lixiviación de nutrientes en agroecosistemas de rosas de corte en la Sabana de Bogotá. Tesis Doc. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 1 p.

- Peña, W. 2017. Edafología del trópico. San José, Costa Rica: EUNED. 25 p.
- Petrakis, S., Barba, J. y Bond-Lamberty, B. 2018. Using greenhouse gas fluxes to define soil functional types. *Plant Soil*. 423: 285- 294.
- Sánchez, B. 2019. Deuda piñera: Costa Rica continúa sin medir impacto en la salud de las comunidades contaminadas (en línea). Consultado el 3 marzo 2020. Disponible en: <https://delfino.cr/2019/11/deuda-pinera-costa-rica-continua-sin-medir-impacto-en-la-salud-de-las-comunidades-contaminadas>
- Schaufler, G., Kitzler, B. Schindlbacher, A. Skiba, U., Sutton, M. y Zechmeister-Boltenstern, S. 2010. Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature. *European Journal of Soil Science*. 61 (5): 683-696.
- Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria [SEPSA]. 2020. Informe Comercio Exterior del Sector Agropecuario 2017-2018 (en línea). Consultado el 3 marzo 2020. Disponible en http://www.sepsa.go.cr/docs/2019-004Comercio_Exterior_Sector_Agropecuario_2017-2018.pdf
- Signor, D., y Cerri, C. E. 2013. Nitrous oxide emissions in agricultural soils: A review. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*, 43: 322-338.
- Uriza, D. 2011. Paquete tecnológico piña MD2. Centro de Investigación Regional Golfo Centro. Campo Experimental Cotaxtla. Veracruz, México.
- Valverde, K., Porras, M. y Jiménez, A. 2016. Nuevos estudios sobre el impacto ambiental de la actividad piñera. Contribución especial realizada para el Vigésimo segundo Informe Estado de la Nación. San José, Costa Rica. Estado de la Nación. 238 p.
- Vargas, C., Miller, C. y Arguedas, C. 2020 Informe: monitoreo del estado de la piña en Costa Rica para el año 2018. Informe técnico presentado al PNUD dentro del marco del MOCUPP. (en línea) Consultado el 3 marzo 2020. Disponible en <http://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/7892>

World Meteorological Organization (WMO). 2009. Construcción de Comunidades Resilientes a las Inundaciones en la Región de Sarapiquí. Costa Rica. (en línea) Consultado el 3 marzo 2020. Disponible en https://www.wmo.int/pages/prog/drr/projects/CostaRica/Documents/CostaRicaProject_esp.pdf