

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
SEDE REGIONAL SAN CARLOS  
CAMPUS TECNOLÓGICO LOCAL SAN CARLOS**

**FACTORES DE EMISIÓN DE GASES DE EFECTO  
INVERNADERO SEGÚN EL MANEJO DEL RASTROJO EN EL  
CULTIVO DE PIÑA (*Ananas comosus*, var. *comosus*)**

**Trabajo final de graduación presentado a la Escuela de Agronomía como  
requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en  
Agronomía**

**TERESITA MELISSA FALLAS ROJAS**



**Carrera de Ingeniería en Agronomía  
Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Sede Regional San Carlos  
2005 - 2018**

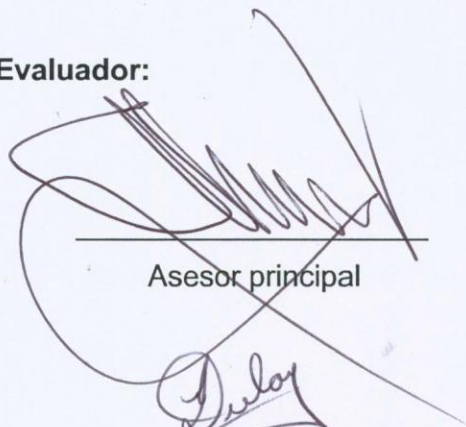


**GASES DE EFECTO INVERNADERO  
SEGÚN EL MANEJO DEL RASTROJO EN EL CULTIVO DE PIÑA  
(*Ananas comosus*, var. *comosus*)**

**TERESITA MELISSA FALLAS ROJAS**

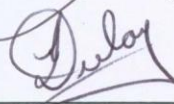
**Aprobado por los miembros del Tribunal Evaluador:**

Ing. Agr. Carlos Ramírez Vargas, Ph.D.



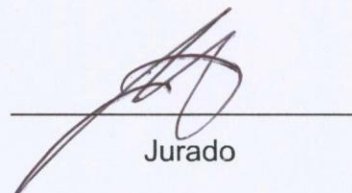
Asesor principal

Ing. Agr. Zulay Castro Jiménez, MGA.



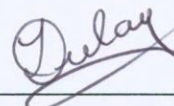
Jurado

Ing. Agr. Jorge Rodríguez Gómez, MGA.



Jurado

Ing. Agr. Zulay Castro Jiménez, MGA.



Coordinadora de Trabajos  
Finales de Graduación

Ing. Agr. Alberto Camero Rey; M.Sc.



Director Escuela de Agronomía

**2019**

## **DEDICATORIA**

A Dios Todo Poderoso, quien es mi mayor fortaleza.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco de todo corazón a mi profesor y asesor de esta investigación Carlos Ramírez Vargas, por haber creído en mí, por todo el tiempo valioso que dedicó en mi trabajo.

A mi gran amiga Zulay Castro Jiménez por toda su ayuda y apoyo incondicional en toda mi carrera profesional.

A mi madre María Teresa Rojas Alvarado y mi Padrastro Arnoldo Ángulo Campos, que han sido un gran apoyo e inspiración para continuar en momentos difíciles de mi vida.

A mi novio Josué Cruz Núñez, quien siempre estuvo ayudándome y dándome ánimos para continuar.

## TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.1. Objetivo general .....	7
1.1.1. Objetivos específicos .....	7
2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	8
2.1. Gases de efecto invernadero (GEI) y su factor de emisión. ....	8
2.2. GEI en el suelo. ....	9
2.3. Cultivo de piña y emisión de GEI. ....	10
2.4. Eliminación de la plantación de piña. ....	12
2.5. Descomposición del rastrojo de piña. ....	13
2.5.1. Rastrojo quemado con herbicida Paraquat. ....	14
2.5.2. Rastrojo de plantación de piña quemado con fuego. ....	14
2.5.3. Rastrojo en verde de plantación de piña y su incorporación física. ..	15
2.6. Problemática del rastrojo. ....	15
2.7. Emisión de GEI en otros cultivos. ....	17
3. MATERIALES Y MÉTODOS. ....	18
3.1. Ubicación y periodo del estudio. ....	18
3.2. Material experimental y su cultivo. ....	18
3.3. Descripción del área experimental. ....	18
3.4. Tratamientos. ....	19
3.4.1. Rastrojo Verde – T1. ....	19
3.4.2. Rastrojo Herbicida – T2. ....	20
3.4.3. Rastrojo Quema – T3. ....	21
3.5. Diseño experimental y modelo estadístico. ....	23
3.6. Variables de respuesta. ....	23

3.7. Procedimiento de muestreo.....	23
3.7.1. Muestreo de suelos.....	23
3.7.2. Muestreo de aire para determinación de GEI.....	24
3.7.3. Análisis de gases de efecto invernadero (GEI). ....	26
3.7.4. Determinación de la concentración de metano (CH <sub>4</sub> ). ....	26
3.7.5. Determinación de la concentración de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). ...	28
3.7.6. Determinación del flujo de emisión (F emisión) para cada GEI.....	30
3.7.7. Determinación de factores de emisión .....	31
3.8. Análisis de datos .....	31
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	32
4.1. Nitrógeno (N), materia orgánica (MO) y carbono (C) del suelo .....	32
4.2. Emisión de GEI.....	35
4.2.1. Flujo de emisión de CH <sub>4</sub> .....	35
4.2.2. Flujos de emisión de CO <sub>2</sub> .....	40
4.2.3. Relación de las emisiones de GEI determinadas con las condiciones climáticas.....	48
4.3. Factores de emisión de GEI determinados para cada tipo de manejo de rastrojo.....	51
5. CONCLUSIONES .....	53
RECOMENDACIONES.....	55
BIBLIOGRAFÍA.....	56
ANEXOS.....	64
Anexo 1. ....	64
Anexo 2 .....	64
Anexo 3. ....	65
Anexo 4 .....	66
Anexo 5 .....	80
Anexo 6. ....	83

## LISTA DE CUADROS

Cuadro	Titulo	Página
1.	Labores y observaciones realizadas a cada uno de los tipos de rastrojo en todo el período observado en finca El Tremedal, San Carlos. 2017. ....	22
2.	Contenido y cambio ( $\Delta$ ) de nitrógeno (N), materia orgánica (MO) y carbono (C) al inicio y al término del periodo de rastrojo según su manejo en un suelo dedicado al cultivo de piña. Finca el Tremedal, 2016. ....	33
3.	Emisión de CH <sub>4</sub> en mg/m <sup>2</sup> /día según manejo de rastrojo para cada momento de muestreo en plantación de piña en finca El Tremedal, San Carlos. 2018. ....	36
4.	Emisión de CH <sub>4</sub> acumulada para cada momento de muestreo en Kg/ha según manejo de rastrojo en el cultivo de piña. Finca El Tremedal, San Carlos, 2018. ....	40
5.	Emisión de CO <sub>2</sub> en mg/m <sup>2</sup> /día según manejo de rastrojo para cada momento de muestreo en el cultivo de piña. Finca El Tremedal, Venecia, San Carlos, 2018. ....	44
6.	Emisión de CO <sub>2</sub> acumulada en Kg/ha según manejo del rastrojo en el periodo de muestreo en piña. Finca El Tremedal, San Carlos, 2018. ....	45
7.	Emisión acumulada de CO <sub>2</sub> en Kg/ha según cada manejo de rastrojo en el cultivo de piña. Finca El Tremedal, San Carlos, 2018. ....	46
8.	Emisión de CO <sub>2</sub> acumulada en Kg/ha durante cada momento de muestreo en rastrojo de piña. Finca El Tremedal, San Carlos, 2018. ....	47
9.	Factores de emisión en kg/ha/año para tres tipos de manejos de rastrojo en el cultivo de piña obtenidos en las condiciones de manejo de Finca El Tremedal, San Carlos. 2019. ....	52



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
1.	Rastrojo incorporado en verde durante investigación sobre GEI según manejo de rastrojo en piña. Finca El Tremedal. San Carlos, Costa Rica, 2016. ....	20
2.	Aplicación de herbicida Paraquat durante investigación sobre GEI en piña. Finca El Tremedal, San Carlos, Costa Rica. 2016. ....	21
3.	Área de plantación de piña tratada con herbicida Paraquat 33 días pos aplicación durante investigación sobre GEI en piña. Finca El Tremedal, San Carlos, Costa Rica. 2016. ....	21
4.	Rastrojo de plantación de piña quemada con fuego 68 días de iniciado período de rastrojo durante investigación sobre GEI en piña. Finca El Tremedal, San Carlos, Costa Rica. 2016. Finca El Tremedal, San Carlos. 2016. ....	22
5.	Cámara estática para muestreo de aire durante determinación de GEI en piña. Finca El Tremedal, San Carlos. 2016. ....	24
6.	Momento de extracción de aire durante la determinación de GEI en piña. Finca El Tremedal, San Carlos, Costa Rica. 2016. ....	25
7.	Tubos de ensayo utilizados para almacenar aire durante la determinación de GEI en piña. Finca El Tremedal, San Carlos, Costa Rica. 2016. ....	25
8.	Cromatógrafo de gases para determinación de CH <sub>4</sub> , utilizado durante investigación sobre GEI en piña. Laboratorio de Análisis Ambiental, Universidad Nacional (UNA). Heredia, Costa Rica. 2017. ....	27
9.	Momento de inyección de aire en cromatógrafo para determinación de CH <sub>4</sub> durante investigación sobre GEI en piña. Laboratorio de Análisis Ambiental, Universidad Nacional (UNA). Heredia, Costa Rica. 2017. ....	28

10. Momento de inyección de aire en detector de CO <sub>2</sub> . Laboratorio de Análisis Ambiental, Universidad Nacional (UNA). Heredia, Costa Rica. 2017. ....	29
11. Detector de CO <sub>2</sub> . Laboratorio de Análisis Ambiental, Universidad Nacional (UNA). Heredia, Costa Rica. 2017.....	30
12. Emisión acumulada de CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub> en kg/ha en tres manejos de rastrojo (R.) de piña (Herbicida, Quema y Verde) en finca El Tremedal, San Carlos. 2016. ....	48
13. Emisión de CH <sub>4</sub> en mg/m <sup>2</sup> /día y condiciones climáticas presentes (temperatura, precipitación y humedad relativa) en tres manejos de rastrojo (Verde, Herbicida y Quema y) en finca El Tremedal, San Carlos 2017.....	50
14. Emisión de CO <sub>2</sub> en mg/m <sup>2</sup> /día y condiciones climáticas presentes (temperatura, precipitación y humedad relativa) en tres manejos de rastrojo (Verde, Herbicida y Quema) en finca El Tremedal, San Carlos 2017. ....	51

## RESUMEN

En Costa Rica, las plantaciones de piña son renovadas cada dos años para iniciar un nuevo ciclo de producción, actividad en la cual se genera una gran cantidad de rastrojo que emite gases que contribuyen al cambio climático (gases GEI). Con el propósito de contribuir al desarrollo de un factor nacional de emisión de GEI para rastrojo de piña se llevó a cabo esta investigación en la finca El Tremedal S.A., entre agosto y diciembre del 2016, en un área experimental de 8400 m<sup>2</sup>. Se dispuso de un diseño experimental de bloques generalizados, considerando tres tipos de manejo de rastrojo de plantas después de la segunda cosecha: 1) rastrojo incorporado en verde (RV), 2) rastrojo quemado con herbicida químico (RH) y 3) rastrojo quemado con herbicida químico más fuego (RH+Q). El flujo de emisión de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> se expresó en mg/m<sup>2</sup>/día durante siete observaciones y el acumulado en kg/ha. Los resultados obtenidos generaron un factor de emisión de ambos gases por cada tipo de manejo e indicaron que en cada uno se perdió materia orgánica, carbono y nitrógeno, a excepción del RV, que presentó una ganancia mínima de nitrógeno. Las emisiones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> por tipo de manejo de rastrojo presentaron alta variabilidad en el periodo evaluado. El factor de emisión determinado para un año correspondiente al GEI metano (CH<sub>4</sub>) en RV fue de 926 kg/ha; para RH fue de 1592,30 kg/ha y para el RH+Q fue 1297,81 kg/ha. Para el GEI dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en RV fue de 1541,76 kg/ha, para RH fue de 2455,72 kg/ha y para RH+Q fue 2175,96 kg/ha.

**Palabras clave:** GEI, rastrojo, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, factor de emisión, Flujo de emisión.

## ABSTRACT

In Costa Rica, pineapple plantations are renewed every two years to start a new production cycle, activity in which a large amount of stubble is generated that may emit gases that contribute to climate change (GHG). With the purpose to contribute in the development of a national GHG emission factor for pineapple stubble, this research was carried out in the El Tremedal S.A. farm, between August and December 2016. The experimental area involved 8400 m<sup>2</sup> of a generalized blocks design, considering three types of plant stubble management after the second harvest: 1) stubble incorporated in green (RV), 2) stubble burned with chemical herbicide (RH), and 3) stubble burned with chemical herbicide plus fire (RH+Q). The emission flow of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> was expressed in mg/m<sup>2</sup>/day for seven observations (every 15 days) and the accumulated in kg/ha. The results obtained generated an emission factor of both type gases on each type of management. Each management practice record lost of organic matter, carbon and nitrogen, except for the RV, which presented a minimum nitrogen gain. The emissions of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> by type of stubble management showed high variability in the period evaluated. The emission factor determined that a stubble year release of GHG methane (CH<sub>4</sub>) in RV was 926 kg/ha, in RH it was 1592.30 kg/ha, and in RH+Q it was 1297.81 kg/ha. For the GHG carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in RV was 1541.76 kg/ha, for RH it was 2455.72 kg/ha and for RH+Q it was 2175.96 kg/ha.

**Keywords:** GHG, stubble, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, emission factor, emission flow.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provocadas por la actividad humana están generando una elevación en la temperatura del planeta y con ello, alteraciones que pueden afectar de manera peligrosa el sistema climático, estimulando cambios en la precipitación, elevación del nivel del mar y aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos (CONARE 2015).

Para afrontar este problema, las Naciones Unidas han venido tomando una serie de acciones. En 1988 se creó el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC); una organización de científicos de todo el mundo establecida conjuntamente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) con el mandato de analizar la información científica necesaria para abordar el problema del cambio climático y evaluar sus consecuencias medioambientales y socioeconómicas (ONU 2016).

Para el año 2007, en Costa Rica, se aprobó la Estrategia Nacional de Cambio Climático, la cual tiene como objetivo general reducir los impactos sociales, ambientales y económicos del cambio climático y tomar ventaja de las oportunidades, promoviendo el desarrollo sostenible mediante el crecimiento económico, el progreso social y la protección ambiental por medio de iniciativas de mitigación y acciones de adaptación, para que Costa Rica mejore la calidad de vida de sus habitantes y de sus ecosistemas, al dirigirse hacia una economía carbono neutral competitiva para el 2021. Esta responsabilidad compartida se debe dar por medio del desarrollo de capacidades y la legitimidad para incidir tanto en la Agenda Nacional como en la Internacional. Dicha estrategia establece áreas prioritarias de trabajo, entre las cuales se puede mencionar: mitigación, adaptación, métricas, desarrollo de capacidades, sensibilización pública y educación y financiamiento (Corrales 2013).

Específicamente en materia de mitigación se señala que los sectores de intervención prioritaria en este eje son: energía, transporte, agropecuario, industrial, residuos sólidos, turismo, hídrico, cambio uso del suelo y que para cada uno de

estos se procederá identificando las fuentes de emisión y las oportunidades de reducción a través del uso de buenas prácticas, adaptación, desarrollo y transferencia de tecnología y otras iniciativas adecuadas para cada sector (CONARE 2015).

Si bien Costa Rica ha hecho esfuerzos en el ámbito de la mitigación del cambio climático, los avances en el campo de la adaptación son insuficientes. Es fundamental definir las prioridades de adaptación a nivel nacional e identificar las áreas clave del sector agrícola que requieren atención. Ello demanda, entre otras cosas, una fuerte articulación del trabajo que realizan muchos órganos y entes gubernamentales con competencias en materia ambiental (Bouroncle *et al.* 2015); como por ejemplo según CONARE (2015), a través de la promulgación del acuerdo 36-2012 “Programa País Carbono-neutralidad” y la norma INTE 12-01-06-2011, instrumentos que establecen las condiciones bajo las cuales una organización o empresa puede obtener de parte del Ministerio de Ambiente y Energía como carbono neutral. De acuerdo con este documento, la condición de carbono neutralidad se logra cuando a través de un proceso transparente de medición de las emisiones (e), donde el resultado neto de las emisiones menos las reducciones y/o remociones internas (r), menos la compensación (c), debe ser igual a cero.

Según INE (2005), citado por CONARE (2015), la evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero permiten diagnosticar, clasificar y medir cuantitativamente las fuentes que contribuyen en mayor proporción a la generación de emisiones, realizar un seguimiento de los niveles de emisión con el tiempo y revisar el cumplimiento con las normas vigentes establecidas.

Las emisiones de GEI de la agricultura continúan aumentando, aunque no tan rápido como las emisiones de otras actividades humanas (FAO 2014).

La tecnología de producción se caracteriza por generar una serie de efectos negativos en el ambiente tales como deforestación, erosión de suelos, contaminación de aguas y emisiones de GEI a causa del uso de fertilizantes, combustibles fósiles, y desechos biogénicos de la misma producción (Fallas 2012).

Debido a prácticas inadecuadas, como la agricultura convencional y la deforestación, el suelo se comporta como un emisor de gases de efecto invernadero (Llorente 2008). La agricultura convencional es responsable de una gran proporción

de las emisiones de gases con efecto invernadero (GEI). Según datos del IPCC, del total de las emisiones, al ser desglosadas por tipo de gas: el 25% de las emisiones de CO<sub>2</sub>; el 60% de las de metano (CH<sub>4</sub>); y el 80% de las emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), gas con hasta 310 veces más capacidad de efecto invernadero que el CO<sub>2</sub>. Si además tenemos en cuenta que la agricultura es la causa principal de las deforestaciones, por la roturación de nuevos suelos para uso agrícola, se podría responsabilizar a la actividad agraria de hasta el 25% al 33% de las emisiones de GEI. Esto es debido a que la agricultura, a partir de la revolución verde, se ha ido convirtiendo en una actividad cada vez más dependiente de los combustibles fósiles y de la fertilización química. Una gran parte de las emisiones de la agricultura se producen durante la fabricación de fertilizantes, por la irrigación con bombas y por el uso de maquinaria agrícola. Los suelos en los que se fuerza químicamente la producción donde se incorpora nueva materia orgánica en forma de residuos de cosecha o de estiércol, se van empobreciendo al sufrir un proceso de liberación progresiva del Carbono que almacenan (Llorente 2008).

Costa Rica es el principal productor de piña fresca en el mundo, en el año 2015 según CANAPEP (2016), se exportaron 2.290.073 toneladas de piña fresca principalmente, piña congelada y jugo de piña. Costa Rica produce el 9% de la fruta fresca colocada en los mercados mundiales posicionándose en el primer lugar como país exportador de piña fresca a nivel mundial con un área estimada en 45 000 ha, la cual representa el 3% de la superficie del planeta dedicada a esta actividad y que genera alrededor de \$US990 millones en exportaciones (CANAPEP 2019).

El cultivo de la piña en Costa Rica está distribuida en cuatro regiones: Huetar Norte, Huetar Caribe, Región Brunca y Pacífico Central (Acuña 2016).

Las plantaciones de piña son renovadas cada dos años para iniciar un nuevo ciclo de producción, actividad en la cual se genera una gran cantidad de rastrojo. Se ha determinado que por hectárea de piña cultivada se generan cerca de 250 t de rastrojo (González 2012), Sin embargo,

Costa Rica no cuenta con un adecuado proceso de reutilización de estos desechos,

siendo los mismos procesados en el terreno.

Hernández *et al* (2018), describen los dos manejos de rastrojo que se utilizan actualmente en las zonas cultivadas del país: en seco, el cual requiere la aplicación de paraquat para la desecación química del material y posterior uso de fuego para incinerar el material remanente; y en verde, en el que se utilizan rastras para la trituración del material “in situ” y su incorporación al suelo. De acuerdo con estos autores, el manejo en verde es 1,6 veces más costoso, resulta en una mayor proliferación de plagas como la mosca del establo (*Stomoxys calcitrans*) y conlleva de tres a cuatro semanas más para la utilización del terreno, por lo que los productores prefieren el manejo en seco, el cual es altamente contaminante para el suelo, aguas subterráneas y aire.

Los rastrojos de piña, tanto en seco como en verde, son de lenta degradación y generan gases de efecto invernadero (GEI), principalmente CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>.

Los datos respecto a la generación de desechos en la producción de piña son alarmantes y preocupan a las autoridades nacionales y otros organismos que buscan evitar el deterioro ambiental nacional e internacional. A raíz de esta situación se hace necesario buscar soluciones y uso a tanta biomasa y agroquímicos, que si no se trata adecuadamente eventualmente llegarán a contaminar suelos, ríos y ambiente en general (Alpízar 2007).

En la Finca El Tremedal S.A. en Venecia de San Carlos utilizan la práctica de “mínima labranza”, que disminuye aproximadamente el 90% la demanda de maquinaria, ya que, no se vuelve a preparar el suelo y se procede únicamente a aplicar un herbicida desecante al rastrojo (derriba) y estos con el tiempo se incorporan al suelo mediante una chapea manual con cuchillo y aplicación de microorganismos descomponedores, luego se procede a limpiar los drenajes, reformar parte de las camas manualmente con pala y reparar los caminos, quedando de esta manera listos para la siembra (CANAPEP 2018).

Esta investigación tiene como propósito contribuir a un proyecto Fondo Especial para la Educación Superior Pública (FEES) llamado “Fortalecimiento del sistema de métricas asociado a las acciones de mitigación contempladas en la Estrategia Nacional de Cambio Climático” ya que en Costa Rica existe poca información y estudios de esta índole específicamente en el área agrícola donde se centra la presente investigación, dónde por medio de una metodología planteada se



pretende llegar a obtener gases del rastrojo de piña que generan el cambio climático.

### **1.1. Objetivo general**

Contribuir al desarrollo de un factor nacional de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) para rastrojo de piña (*Ananas comosus*).

#### **1.1.1. Objetivos específicos**

- Determinar el cambio en el contenido de nitrógeno total, materia orgánica, carbono total y la Relación Carbono/Nitrógeno del suelo durante el periodo de rastrojo según manejo del mismo en el cultivo de piña (*Ananas comosus*).
- Determinar la emisión de CH<sub>4</sub> generada por tres tipos de manejo de rastrojo de plantación de piña MD-2 a través del tiempo.
- Determinar la emisión de CO<sub>2</sub> generada por tres tipos de manejo de rastrojo de plantación de piña MD-2 a través del tiempo.
- Generar un factor de emisión de CH<sub>4</sub> para tres tipos de manejo de rastrojo de plantación de piña MD-2.
- Generar un factor de emisión de CO<sub>2</sub> para tres tipos de manejo de rastrojo de plantación de piña MD-2.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Gases de efecto invernadero (GEI) y su factor de emisión.

Aunque el CO<sub>2</sub> es el GEI más conocido, éste es sólo uno de los diversos GEI que existen. Algunos de estos gases son producidos por la acción humana y otros tienen un origen natural; en conjunto contribuyen a la formación del efecto invernadero. Los GEI de origen natural son: metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), vapor de agua (H<sub>2</sub>O), los cuales, según Longoria *et al.* (2005), son identificados con el progresivo aumento de la temperatura promedio de la atmósfera de la Tierra, además de ozono (O<sub>3</sub>), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) (Colque y Sánchez 2007).

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC 2001) ha informado de un aumento de las concentraciones en N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub> desde tiempos industriales, una preocupación, ya que ambos gases, aunque presentes en concentraciones más bajas que la del CO<sub>2</sub>, tienen 310 (N<sub>2</sub>O) y 21 (CH<sub>4</sub>) veces el potencial de calentamiento global del CO<sub>2</sub> durante un período de 100 años (IPCC 2001).

La incineración abierta de desechos es, como otros tipos de combustión, fuente de emisiones de gases de efecto invernadero. Los gases pertinentes emitidos incluyen el CO<sub>2</sub>, el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Normalmente, las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de la incineración de desechos son más significativas que las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O (IPCC 2006).

La industrialización agrícola de las últimas décadas tiene importantes implicaciones para el clima. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) estima que la agricultura es responsable de cerca del 14% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), un volumen similar al originado por el sector del transporte. Este 14%, sin embargo, no incluye las denominadas emisiones indirectas de la agricultura, como la energía gastada en la fabricación de fertilizantes, ni en la producción y utilización de maquinaria agrícola, ni en el transporte (de insumos y cosechas), que se incluyen en los apartados de industria, energía y transporte, que incluyéndolos este dato podría superar un 30% de las totales (Bermejo 2010).

Siempre que sea posible, deberán utilizarse factores de emisión específicos, a fin de reflejar las condiciones particulares de cada país. Esos factores de emisión nacionales deberán estar basados en mediciones realizadas con la suficiente frecuencia, y durante un período suficientemente prolongado, como para reflejar la variabilidad de los procesos biogeoquímicos subyacentes, según la técnica de medición que se seleccione, y estar documentados en publicaciones que tengan un aval científico (IPCC 1996).

Según Castro y Amador (2006) para el caso particular de Costa Rica, recientemente no existían estimaciones o determinaciones sobre los factores de emisión; debido a esto, el método correcto era recurrir a los preestablecidos por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático según categorías. Hoy día se cuenta con los factores de emisión de Gases de Efecto Invernadero facilitados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN 2011).

## **2.2. GEI en el suelo.**

La agricultura desempeña un importante papel en lo que respecta al cuidado de los suelos y su contenido en carbono. La erosión y degradación de los suelos provocada por una agricultura intensiva y por la falta de aportes de materia orgánica (sustituida por fertilizantes químicos) ha empobrecido de forma preocupante buena parte de la superficie agrícola del mundo (Bermejo 2010).

La producción de gases de efecto invernadero de los suelos se debe principalmente a procesos microbiológicos. Tales actividades generan flujos de gases que están relacionados con las propiedades del suelo, incluidas las concentraciones de carbono total, nitrógeno total e inorgánico, densidad aparente, salinidad y potencial redox (Eh) (Chen *et al.*, 2010).

Cuando el carbono orgánico sostiene el crecimiento microbiano la población microbiana aumenta, su metabolismo puede dar lugar a la mineralización que es la conversión de un compuesto orgánico de carbono para obtener compuestos inorgánicos como el CO<sub>2</sub> y la liberación de otros nutrientes inorgánicos como el NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, el PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> y el SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> que los compuestos de carbono orgánico contienen. La señal más evidente de la mineralización en el suelo es la respiración o emisión de CO<sub>2</sub> (Coyne 2000).

La respiración hace referencia al consumo de  $O_2$  y a la producción de  $CO_2$  por organismos aerobios, a medida que el  $O_2$  se reduce, se produce  $H_2O$ , y para determinar la respiración del suelo los microbiólogos del suelo miden el nivel en el que el  $CO_2$  se desarrolla a partir de suelo intacto o una muestra de suelo (Coyne 2000).

El suelo representa uno de los grandes almacenes de Carbono de los ecosistemas terrestres contiene más del doble de C que la atmósfera y unas tres veces la cantidad que almacenan los organismos vivos (Llorente 2008).

Las plantas a través de la fotosíntesis, captan el  $CO_2$  atmosférico y lo transforma en C orgánico, que en forma de materia orgánica muerta se va incorporando al suelo. Un suelo rico en materia orgánica es no sólo un buen almacén de C sino también un suelo fértil y estable, con buena capacidad de infiltración y conservación de agua, poco vulnerable a la erosión y con capacidad para amortiguar posibles contaminantes. Sin embargo, si hay un cambio de uso del suelo hacia un sistema más degradado, por ejemplo, al deforestar un terreno para darle uso agrícola, o si el manejo del suelo es inadecuado, como sucede en la agricultura convencional, el suelo puede comportarse como un emisor de  $CO_2$  hacia la atmósfera al sufrir una pérdida progresiva de la materia orgánica que mantenía almacenada (Llorente 2008).

Debido al manejo que la agricultura convencional hace del suelo, a la continua deforestación de tierras para uso agrícola y al asfaltado y sellado de terrenos fértiles bajo la cubierta urbana, el suelo se ha convertido en un gran emisor de gases de efecto invernadero, responsable de un 18% de las emisiones de  $CO_2$  totales (Llorente 2008).

### **2.3. Cultivo de piña y emisión de GEI.**

En el cultivo de esta *Bromeliaceae* se pueden realizar una secuencia generalmente de dos ciclos de producción comercial hasta 23 meses de edad, ya que a mayor edad, se presenta una reducción en el tamaño del fruto y su uniformidad, se cosechan dos piñas por planta; la primera a los trece meses y la segunda, diez meses después; pasado este ciclo se debe establecer una nueva plantación, lo cual se puede hacer con los mismos brotes laterales de la cosecha anterior o con otras partes vegetativas tales como la corona de la fruta; una vez

transcurrido este período debe eliminarse la biomasa de la planta, que es muy voluminosa, para iniciar un nuevo ciclo de producción, este desecho disperso en el campo recibe el nombre de rastrojo (Bartholomew *et al.* 2003, y MINAET, MAG y PROAGROIN 2009).

La piña como cultivo, en Costa Rica ha adquirido un carácter expansivo en las últimas décadas incrementando rápidamente las áreas cultivadas en detrimento de otras actividades agrícolas y de ecosistemas naturales, y su cultivo convencional abarca grandes extensiones de tierra y requiere de la aplicación de gran cantidad de agroquímicos, principalmente plaguicidas y sustancias que aceleran la maduración de la fruta, así como enmiendas carbonatadas y fertilizantes nitrogenados.

En el caso de los carbonatos su uso puede incrementar las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub> y por reacción en suelos ácidos (Hanle y Maldonado 2006, Andrades y Martinez 2014). Las aplicaciones de fertilizante químico nitrogenados son los responsables de grandes cantidades del Oxido di nitroso emitido del suelo, esa adición extra de nitrógeno al suelo en cualquier forma química, aumenta su disponibilidad para los procesos de nitrificación y desnitrificación, aumentando la tasa de emisión de Oxido di nitroso del suelo (Castro y Amador 2006). Según Veldkamp 1997, Davidson 1997, Duxbury 1995; citados por Castro y Amador (2006), el ciclo del nitrógeno es más rápido en los sistemas agrícolas de los trópicos donde la alta temperatura y humedad de suelo aumentan la velocidad de los procesos microbianos en el suelo, responsables del reciclaje de nitrógeno.

La producción de piña convencional contribuye con las emisiones de GEI que generan calentamiento global y por ende elevado costo ambiental y social, estos costos se pretenden atenuar fortaleciendo acciones de mitigación en la actividad piñera, que la conduzcan a la neutralización progresiva de las emisiones de CO<sub>2</sub> (Castro y Amador 2006).

El papel de la producción piñera en el desarrollo económico y social de Costa Rica, paulatinamente ha generado un crecimiento, no solo en la producción sino también en la cantidad de desechos orgánicos que se generan y como resultado de un manejo incorrecto de estos desechos también llamados rastrojos, se han generado focos de propagación de la mosca del establo (*Stomoxys calcitrans*) en

zonas donde se cultiva la fruta, además de emisiones de gases de efecto invernadero por el consumo de hidrocarburos, abonos nitrogenados y carbonatados principalmente (CANAPEP 2016).

La huella de carbono es una forma de estimar la totalidad de GEI, MMA (sf) afirma que “la huella de carbono nace como una medida de cuantificar y generar un indicador del impacto que una actividad o proceso tiene sobre el cambio climático, más allá de los grandes emisores”.

La huella de carbono se define como el conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero producidas, directa o indirectamente, por personas, organizaciones, productos, eventos o regiones geográficas, en términos de CO<sub>2</sub> equivalentes (CO<sub>2</sub>e), y sirve como una útil herramienta de gestión para conocer las conductas o acciones que están contribuyendo a aumentar nuestras emisiones, cómo podemos mejorarlas y realizar un uso más eficiente de los recursos (MMA, sf).

Según Fallas (2012), el levantamiento del inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del proceso de producción y empaque del cultivo de piña de la empresa Agrícola Agromonte en el año 2010, indicó un total de 2 856,26 toneladas de CO<sub>2</sub>e, las cuales corresponden a 1 811,83 toneladas de CO<sub>2</sub>e (63,42%) debidas a emisiones directas; 138,45 toneladas de CO<sub>2</sub>e (4,85%) por las emisiones indirectas, y las otras emisiones indirectas generaron 906,29 toneladas de CO<sub>2</sub>e (31,73%). La huella de carbono determinada durante el año 2010 generada por los procesos de producción y empaque de piña de Agrícola Agromonte S.A correspondió, según cada unidad asignada a 6,34 t/CO<sub>2</sub>e por ha cultivada; 4,20 t/CO<sub>2</sub>e por hectárea cosechada y 796,38 g/CO<sub>2</sub>e por caja producida y empacada, lo que es equivalente a 111 g/CO<sub>2</sub>e por fruta producida y empacada.

#### **2.4. Eliminación de la plantación de piña.**

Al finalizar el ciclo productivo de la plantación, se procede a la erradicación de las plantas, pueden seguirse distintos procedimientos según el medio en donde se encuentre la plantación y las exigencias o limitantes de las leyes existentes, por ejemplo cuando se deja la plantación desecar naturalmente, o se aplica algún herbicida quemante como el Paraquat (Bipiridilo: 1,1' -dimethyl-4,4'-bipyridinium ion), para desecar el área foliar, y hasta quemar con fuego quince días después, lo que provoca que se reduzca significativamente el material vegetal dejando los

troncos y cenizas minerales que luego se incorporarán al suelo; estas acciones se conocen como manejo de rastrojos, los tallos también son desmenuzados con el paso de maquinaria trituradora de los residuos de la planta, este proceso se llama derriba de la plantación, que no es más que la eliminación de la plantación al final de su ciclo productivo; se considera que un buen resultado es cuando se ha quemado y eliminado alrededor de un 80% del rastrojo de piña (Garita 2014).

Otra forma es la trituración del rastrojo seguida de la aplicación de microorganismos descomponedores para la posterior incorporación al suelo que permite aumentar la tasa de mineralización del terreno, evita la generación de problemas ambientales y reduce la proliferación de moscas (Salas 2018).

## **2.5. Descomposición del rastrojo de piña.**

El rastrojo se puede definir como los residuos orgánicos que quedan en el área cultivada de piña una vez descartada como fuente de fruta y semilla (Castro 2019)<sup>1</sup>.

El componente principal de las paredes celulares vegetales de las plantas de piña es la lignocelulosa, ésta consiste principalmente de celulosa que está conformada de un 30% a 60% de la planta (Balat 2010), por lo que las hojas se secan en el campo muy lentamente, y los retoños producidos por los tallos de las plantas vivas incorporados al suelo se deben “trozar” para acelerar su desecación y descomposición, aún así es lenta y genera problemas ambientales (Quesada *et al.* 2005 y Cordoba 2011).

Alrededor de 1,5 millones de toneladas métricas de rastrojo de piña se transforma en desecho anualmente en el país, y representa más de la mitad de la biomasa implicada, llegando a duplicar el valor del producto mismo (Alpízar 2007), una hectárea de piña con 60 000 plantas produce alrededor 210 000 kg de rastrojo, 13 500 kg de corona y 51 083 kg de cáscara y pulpa, para un total de 274 583 kg de remanentes (Peña 2018). Su incorporación incrementa la pérdida de peso del material, mejora su tasa de descomposición y provoca un aumento en la actividad de los microorganismos en el suelo, principalmente hongos, actinomicetes, bacterias, protozoarios y algas, aumentando su población y disponibilidad de nutrientes, en

---

<sup>1</sup> Información personal. Castro, Z. 2016, profesora de la Escuela de Agronomía del ITCR.

<sup>2</sup> Información personal. Castro, Z. 2016, profesora de la Escuela de Agronomía del ITCR.

comparación con la quema de los desechos o el abandono de los rastrojos (Acuña 2018 citado por Salas 2018).

Debido a la problemática de descomposición de los rastrojos es que el productor recurre al uso de herbicidas para desecar y posteriormente quemar el rastrojo, en algunos casos (Quesada 2003); u otras formas tales como el rastrojo quemado con herbicida Paraquat, quemado con fuego y rastrojo en verde incorporado.

### **2.5.1. Rastrojo quemado con herbicida Paraquat.**

Este manejo es el más convencional para la eliminación del rastrojo de piña, consiste en la aplicación de herbicida como desecante de la planta y después la corta e incorporación al suelo; práctica que no resulta muy conveniente desde el punto de vista ambiental, puesto que la aplicación de plaguicidas tarde o temprano se verá reflejada en la afectación al ambiente (MINAET, MAG y PROAGROIN 2009).

El Dicloruro de dimetil-4,4-bipiridilo por su nombre químico o Paraquat más comúnmente conocido por su nombre comercial, es un herbicida tóxico utilizado para la eliminación del rastrojo de la piña (Viquez 2008). El uso del Paraquat afecta el medio ambiente y su toxicidad es acumulativa, contamina enormemente los suelos, amenazando su uso futuro (Quesada 2003).

### **2.5.2. Rastrojo de plantación de piña quemado con fuego.**

Esta práctica consiste en la utilización de fuego para quemar las plantas de piña con un período de secamiento causado por herbicidas que normalmente les permita perder humedad para que puedan alcanzar la completa descomposición con el fuego (Castro 2016)<sup>2</sup>.

Según Jiménez (1999), la práctica de quema de rastrojo se realiza donde se desea hacer una rápida preparación entre ciclos, ya que seis semanas después del derribo se continúa preparando y se siembra de inmediato, sin embargo, puede haber problemas por daños o contaminación.

Cuando se realice la práctica cultural de quema con fuego se debe contar con el respectivo permiso de quema otorgado por la correspondiente Agencia de

---

<sup>2</sup> Información personal. Castro, Z. 2016, profesora de la Escuela de Agronomía del ITCR.



Servicios Agropecuarios del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG,) según decreto Ejecutivo N° 35368 MAG-S-MINAET (González 2012).

Según Acuña (2018) citado por Salas (2018), se ha comprobado que esta práctica, aunque sea de bajo costo, no incrementa el rendimiento del ciclo del cultivo subsecuente, por el contrario, ésta suma a la contaminación ambiental; de ahí que esté prohibida en muchos países y hasta se penalice con multas por parte de las autoridades.

Varios estudios consultados por Acuña 2018 indican que las poblaciones de hongos y bacterias son menos numerosas en los suelos en los que se queman los desechos, si se comparan con terrenos en donde más bien se incorporan, “esta actividad provoca un detrimento en la población microbiológica del suelo, por lo que es mejor evitarla”.

### **2.5.3. Rastrojo en verde de plantación de piña y su incorporación física.**

Consiste en la derriba de las plantas de piña cosechadas sin la adición de productos que aceleren su descomposición. Para esta práctica se utiliza maquinaria agrícola para la incorporación al suelo, en este caso, algo positivo es que se incorpora mayor cantidad de materia orgánica al suelo, mejorando su fertilidad y su capacidad de retención de humedad, entre otros aspectos (González 2012).

La incorporación de materia en verde regresa el material orgánico al suelo para mejorar la condición de este, la fertilidad y la capacidad de retención de humedad del suelo (MINAET, MAG y PROAGROIN 2009). Al aplicar esta práctica, debido a la morfología de las hojas las plantas de piña se secan muy lentamente y los renuevos producidos por los tallos de las plantas vivas incorporados al suelo pueden proliferar en los campos; por ello es común cortarlas para acelerar su desecación y descomposición cuando se incorporan en verde (Viquez 2008).

### **2.6. Problemática del rastrojo.**

Proporcional al incremento en área cultivada de piña, se da una mayor producción de rastrojos al finalizar cada periodo de cosecha, material que incrementa los costos de producción del nuevo ciclo y se convierte en sustrato para el desarrollo de la Mosca paletera conocida también como Mosca del establo (*Stomoxys calcitrans*).

Cuando es incorporado como abono al suelo, durante el proceso de descomposición de las partes fibrosas de la hoja y del tallo se liberan malos olores, se genera calor y alta humedad, condiciones que permiten la reproducción de dicha mosca. La presencia de la mosca se asocia a daños de la piel en el ganado y provocan problemas en el consumo de materia seca, lo que se refleja en la disminución de la producción de leche y en la ganancia diaria de peso de los animales (Rojas *et al.* 2003).

El manejo para la eliminación del rastrojo de la piña en ocasiones representa un problema debido a su gran volumen y a la característica de lenta degradación. Debido a esta problemática el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) ha estudiado la posibilidad de aprovecharlas para producir energía. En una hectárea de piña hay alrededor de 73.000 plantas, las cuales, al momento de ser removidas, tienen un peso promedio de 5,8 kilogramos, lo que equivale a 423,4 toneladas por hectárea. Esta es una alternativa para la generación de electricidad mediante plantas a vapor, considerando una eficiencia del 30% y una utilización de 330 días al año. Sin embargo, el alto contenido de humedad representa aún una limitación para aprovechar este recurso (Fernández 2011).

La trituración del rastrojo seguida de la aplicación de microorganismos descomponedores para la posterior incorporación al suelo permite aumentar la tasa de mineralización del terreno, evita la generación de problemas ambientales y la proliferación de moscas (Salas 2018).

Según el diario Hoy (2017) las quemadas generalizadas de rastrojos están provocando el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, cuando lo conveniente, siempre que no haya riesgo sanitario para los cultivos, es conservar los rastrojos y luego incorporarlos al suelo para mejorar su fertilidad. Las alternativas de manejo de rastrojo están ligadas principalmente a la conciencia ambiental de los productores y equipo técnico de la finca o a las certificaciones que deben cumplir las empresas ya que existen técnicas de manejo de los residuos más ó menos favorables con el medio ambiente.

## **2.7. Emisión de GEI en otros cultivos**

En la producción de paja de cereales en Chile se realizó una estimación de la emisión de gases de efecto invernadero emitidos por la quema anual de rastrojos; en 6,3 t/ha de rastrojo de trigo harinero se genera 0,0003 t/ha de N<sub>2</sub>O y 0,0130 t/ha de CH<sub>4</sub>; en 13,9 t/ha de rastrojo de maíz para consumo se genera 0,0007 t/ha de N<sub>2</sub>O y 0,0287 t/ha de CH<sub>4</sub>; y en 6,8 t/ha de rastrojos de cebada se emite 0,0004 t/ha de N<sub>2</sub>O y 0,0140 de CH<sub>4</sub> (Ruíz 2015).

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS.**

#### **3.1. Ubicación y periodo del estudio.**

El presente estudio se realizó en plantaciones de la finca el Tremedal S.A., ubicada en Venecia de San Carlos, Alajuela, Costa Rica, sus coordenadas geográficas son 10°26´ latitud Norte y 84°15 longitud Este. Se encuentra a una altura aproximada de 320 m.s.n.m. Se reporta una humedad relativa promedio de 80% y una precipitación entre 3,500 mm/año a 4,000 mm/año, la temperatura presenta un rango de 22 °C a 32 °C (León 2007). El trabajo de campo se realizó entre los meses de agosto y diciembre del 2016.

#### **3.2. Material experimental y su cultivo.**

El estudio fue efectuado en el área de una plantación del cultivo de piña (*Ananas comusus*) del híbrido MD-2, en clima tropical húmedo bajo técnicas de manejo de mínima labranza, con una densidad de siembra de 65.000 plantas/hectárea. Se sembró en camas conformadas por dos hileras con un diseño espacial de “tres bolillo” con un distanciamiento entre hileras de 70 cm, 27 cm entre plantas y 110 cm de centro a centro de cama. Además, se sembró material vegetativo de desarrollo uniforme (350 g-400 g). El área comprendió el material vegetativo correspondiente a dos ciclos de producción, por lo que habían transcurrido al menos 29 meses después del establecimiento de la plantación.

El rastrojo de las plantas fue incorporado de tres maneras, plantas derribadas en verde, plantas derribadas después del efecto de un herbicida químico y plantas derribadas después del efecto de un herbicida químico más fuego. La presente se fundamenta en la etapa de rastrojo de plantación de de piña de segunda cosecha.

#### **3.3. Descripción del área experimental.**

El área experimental midió en total de 8400 m<sup>2</sup>, estuvo conformada por tres parcelas de 2800 m<sup>2</sup> cada una aproximadamente (Anexo 3); cada parcela correspondió a un tratamiento con área en periodo de rastrojo, el área de plantas derribadas en verde contempló 19.542 plantas de piña, el área de plantas derribadas después del efecto de un herbicida químico contempló 22.233 plantas de piña y el

área de plantas derribadas después del de un herbicida químico más fuego contempló 19.286 plantas de piña.

### **3.4. Tratamientos.**

Los tratamientos correspondieron a tres tipos de manejo de rastrojo del cultivo de la piña; el rastrojo comprendió período de cuatro meses luego de finalizado su ciclo productivo. Cada tipo de manejo comprendido en la investigación (Rastrojo en verde, Rastrojo herbicida y Rastrojo herbicida mas quema con fuego) se describen a continuación.

#### **3.4.1. Rastrojo Verde – T1.**

Se refiere a una plantación que había superado dos ciclos de producción de fruta en un período de 29 meses, la cual fue incorporada manualmente al suelo en verde sin la adición de productos que aceleren su descomposición, bajo la práctica cultural de labranza mínima; este tratamiento comprendió la ejecución de dos cortes en forma manual (chapias) dirigidos a la base de las plantas; el primer corte se realizó al final del ciclo productivo ejecutado un día antes del primer muestreo de aire, de siete en total; el segundo corte fue necesario debido a la germinación posterior de rebrotes y se realizó trascurridos 45 días después del primer corte, esto con el objetivo de acelerar la descomposición del material vegetal.



**Figura 1.** Rastrojo incorporado en verde durante investigación sobre GEI según manejo de rastrojo en piña. Finca El Tremedal. San Carlos, Costa Rica, 2016.

#### **3.4.2. Rastrojo Herbicida – T2.**

Una vez finalizado el ciclo productivo de la plantación de piña, se trató con herbicida quemante Paraquat, en dosis de 9,0 litros por hectárea de producto comercial, fue aplicado el 25/08/2016 (Figura 2), correspondiente a seis días antes de la ejecución del primer muestreo de aire (01/09/2016).



**Figura 2.** Aplicación de herbicida Paraquat durante investigación sobre GEI en piña. Finca El Tremedal, San Carlos, Costa Rica. 2016.

El área experimental se fue desecando con el transcurso de los días, se observó durante 105 días (Figura 3).



**Figura 3.** Área de plantación de piña tratada con herbicida Paraquat 33 días pos aplicación durante investigación sobre GEI en piña. Finca El Tremedal, San Carlos, Costa Rica. 2016.

### **3.4.3. Rastrojo Quema – T3.**

Cuando el ciclo productivo de la plantación de piña finalizó se trató con herbicida quemante Paraquat (dosis: 9,0 l/ha de PC en 3740 l de agua/ha) con el mismo manejo que el tratamiento Rastrojo herbicida. La diferencia de este manejo

se dio cuando el área se quemó con fuego 74 días después de la aplicación del herbicida quemante.



**Figura 4.** Rastrojo de plantación de piña quemada con fuego 68 días de iniciado período de rastrojo durante investigación sobre GEI en piña. Finca El Tremedal, San Carlos, Costa Rica. 2016. Finca El Tremedal, San Carlos. 2016.

En el Cuadro 1 se presenta el detalle de labores y observaciones en cada tipo de manejo de rastrojo del área experimental.

**Cuadro 1.** Labores y observaciones realizadas a cada uno de los tipos de rastrojo en todo el período observado en finca El Tremedal, San Carlos. 2017.

Días de muestreo	Rastrojo Verde	Rastrojo Herbicida	Rastrojo Quema
-5	-	Aplicación de herbicida (9l/ha)	Aplicación de herbicida (9l/ha)
0	Chapia manual	-	-
1	Muestreo 1	Muestreo 1	Muestreo 1
15	Muestreo 2	Muestreo 2	Muestreo 2
30	Muestreo 3	Muestreo 3	Muestreo 3
45	Muestreo 4 y chapia manual	Muestreo 4	Muestreo 4
60	Muestreo 5	Muestreo 5	Muestreo 5
68	-	-	Quema con fuego
75	Muestreo 6	Muestreo 6	Muestreo 6



### 3.5. Diseño experimental y modelo estadístico.

Se utilizó un diseño experimental de Bloques Generalizados, el modelo estadístico fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + M_j (R_i * M_j) + \varepsilon_{ijk}$$

Dónde:

$Y_i$ : Variable de respuesta (GEI)

$\mu$ : Media general.

$R$ : Rastrojo

$M$ : momentos de muestreos

$\varepsilon$ : Error experimental

$$Y = \mu + 2 + 6 + (12) + 147 = 167 \text{ registros}$$

### 3.6. Variables de respuesta.

Las variables de respuesta para cada uno de los gases determinados, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, correspondieron a los datos de Flujo de emisión, los cuales son expresados en miligramos por metro cuadrado por día (mg/m<sup>2</sup>/día) y a partir de estos datos se sacaron los datos acumulados en Kg/ha, unidad de medida que se obtuvo multiplicando los días en período de rastrojo entre un muestreo a otro (para eliminar día) y se paso de mg a Kg y de m<sup>2</sup> a ha.

### 3.7. Procedimiento de muestreo.

#### 3.7.1. Muestreo de suelos.

En el área asignada a cada tratamiento experimental (cada tipo de manejo de rastrojo), se tomaron dos muestras de suelo (seis en total), las primeras tres antes del primer muestreo de aire en cada área de rastrojo en fecha 29/08/2016 y las muestras restantes al final de la etapa de rastrojo, cuatro meses después en fecha 03/01/2017. Se siguió el procedimiento de toma de muestras de suelo de Ramírez, F. 2005. Las muestras de suelo fueron enviadas al Laboratorio Agroanálisis de Costa Rica para su análisis y determinación del contenido de Nitrógeno total, Carbono total y materia orgánica.

### 3.7.2. Muestreo de aire para determinación de GEI.

En el área de cada tratamiento experimental (tres en total) se tomaron muestras de aire en ocho puntos distintos, en cada punto se extrajeron ocho muestras de aire. Las muestras se tomaron utilizando una cámara de muestreo que consistió de un recipiente plástico cilíndrico cerrado, con un diámetro de 36 cm y una altura de 50 cm; cada cámara estuvo equipada con un pequeño puerto de muestreo lateral que correspondió a un cepo de hule, y fue por donde se tomaron las muestras de aire mediante una jeringa (Figura 5).



**Figura 5.** Cámara estática para muestreo de aire durante determinación de GEI en piña. Finca El Tremedal, San Carlos. 2016.

La extracción del aire del interior de la cámara para cada muestreo, se hizo por medio de la introducción de la aguja de una jeringa de 12 ml de capacidad y una vez succionado el aire, el cual fue depositado de manera inmediata en un tubo de ensayo herméticamente sellado y al vacío, se tomaron dos muestras para cada tiempo, cuatro en total, a los 0 min., 10 min., 20 min. y 30 min.; en total se llenaron ocho tubos por punto de muestreo, después de puesta la cámara en el campo (Figura 6).



**Figura 6.** Momento de extracción de aire durante la determinación de GEI en piña. Finca El Tremedal, San Carlos, Costa Rica. 2016.

Cada tubo de ensayo cargado de aire y debidamente identificado (Figura 7) se mantuvo en refrigeración y fue enviado al Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional en un periodo no mayor a 24 horas, para el respectivo análisis de los gases dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ).



**Figura 7.** Tubos de ensayo utilizados para almacenar aire durante la determinación de GEI en piña. Finca El Tremedal, San Carlos, Costa Rica. 2016.

La frecuencia de muestreos de aire fue cada dos semanas, iniciando a las 7:00 am, ejecutados durante un período de cuatro meses, tiempo promedio de duración del rastrojo en fincas de piña en época de invierno para la zona de estudio.

Los puntos de muestreo en cada tipo de rastrojo se identificaron por medio de un GPS, se utilizó una estaca para dejar el punto marcado durante todo el período de observación y se procuró siempre colocar la cámara de aire en el mismo lugar del punto de muestreo.

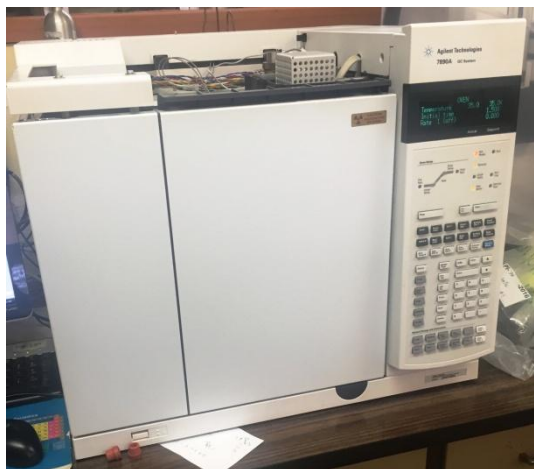
### **3.7.3. Análisis de gases de efecto invernadero (GEI).**

La determinación de la concentración de los GEI en los tubos de ensayo de cada muestreo, se realizó en el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, este laboratorio se encuentra acreditado por la Norma 17025:2005, la cual brinda calidad en sus análisis para garantía de veracidad de los datos. Para el procedimiento de Método de Análisis del gas metano ( $\text{CH}_4$ ) se utilizó el PMA-050 R-01 (datos empleados en la determinación de flujos de emisión de metano y óxido nitroso en aire), también acreditado.

Esta actividad estuvo a cargo del equipo profesional del Laboratorio Ambiental de la Universidad Nacional, sin embargo, fue necesaria la intervención directa de la tesimal para el proceso de las muestras.

### **3.7.4. Determinación de la concentración de metano ( $\text{CH}_4$ ).**

La determinación del gas  $\text{CH}_4$  se realizó mediante un cromatógrafo de gases provisto de detectores de captura de electrones (ECD) y de ionización de llama (FID) (Figura 8), con reactivos de grado analítico tales como cilindros de gas tipo patrón: metano ( $\text{CH}_4$ ): 15  $\mu\text{mol/mol}$ , balance aire, este resultado se expresó en partes por millón (ppm).



**Figura 8.** Cromatógrafo de gases para determinación de  $\text{CH}_4$ , utilizado durante investigación sobre GEI en piña. Laboratorio de Análisis Ambiental, Universidad Nacional (UNA). Heredia, Costa Rica. 2017.

El gas se extrajo por medio de una jeringa de inyección (Figura 9) para gases 3 microlitros ( $\mu\text{l}$ ) en cada uno de los tubos de ensayo, cuatro en total por cada punto de muestreo quincenal en correspondencia con los cuatro tiempos de muestreo; se procesaron 32 muestras de gas por muestreo y el total fueron 224 muestras de gas analizados.



**Figura 9.** Momento de inyección de aire en cromatógrafo para determinación de  $\text{CH}_4$  durante investigación sobre GEI en piña. Laboratorio de Análisis Ambiental, Universidad Nacional (UNA). Heredia, Costa Rica. 2017.

### **3.7.5. Determinación de la concentración de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).**

Para determinar el gas dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) se extrajo 10 ml de aire de cada uno de los tubos de ensayo, cuatro en total por medio de una jeringa, acción ejecutada por cada punto de muestreo quincenal que correspondió a los cuatro tiempos muestreados, y se inyectó a una manguera conectada directamente al detector de  $\text{CO}_2$  (Figura 10); se procesaron 32 muestras de gas por muestreo; en total 224 muestras de gas.



**Figura 10.** Momento de inyección de aire en detector de CO<sub>2</sub>. Laboratorio de Análisis Ambiental, Universidad Nacional (UNA). Heredia, Costa Rica. 2017.

Las muestras fueron analizadas por celda abierta por medio de un lector infrarrojo (IR). El CO<sub>2</sub> está compuesto por dos átomos diferentes que absorben la radiación infrarroja (IR) de una forma única y característica; es posible detectar dicho gas mediante el uso de técnicas de IR.

Los principales componentes de un detector de CO<sub>2</sub> de IR (Figura 11) son la fuente de luz, la cámara de medición, el filtro de interferencia y el detector de IR. La radiación de IR se traslada desde la fuente de luz a través del gas medido hasta el detector. Un filtro ubicado en la parte de adelante del detector impide que otras longitudes de onda que no sean las específicas del gas medido, pasen a través del detector. Así, se detecta la intensidad de la luz y se convierte en un valor de concentración de gas en ppm.



**Figura 11.** Detector de CO<sub>2</sub>. Laboratorio de Análisis Ambiental, Universidad Nacional (UNA). Heredia, Costa Rica. 2017.

### 3.7.6. Determinación del flujo de emisión (F emisión) para cada GEI.

Para el cálculo de Flujo de emisión de los GEI por muestreo según tratamiento de rastrojo se utilizó el resultado en ppm para cada gas; este se interpoló directamente en la curva de calibración ajustada linealmente por mínimos cuadrados simples de cálculo, para ello se utilizó una hoja de cálculo de computadora diseñada para este método de análisis; se aplicaron factores de dilución cuando fue necesario; se construyó una gráfica de dispersión de concentración del gas en ppm vs tiempo en minutos (0,10, 20 y 30 minutos) según los tiempos en que se muestreó cada una de las repeticiones, después se aplicó una regresión lineal a los puntos y se obtuvo la pendiente. El F emisión en mg/m<sup>2</sup>/día, se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$F \text{ emisión} = \left( \frac{\left( m * \frac{P * M}{R * T} \right) * V_{\text{cámara}}}{A_{\text{cámara}}} \right) * 1,44$$



$F_{\text{emisión}}$  = Flujo de emisión de área de la fuente ( $\text{mg}/(\text{m}^2 \times \text{día})$ ).

$m$  = pendiente de la regresión lineal ( $\mu\text{mol}/\text{mol}/\text{min}$ ).

$P$  = presión ambiente (Pa).

$M$  = Masa Molar del gas.  $M_{\text{CH}_4} = 16,04246 \text{g}/\text{mol}$ .  $M_{\text{CO}_2} = 44,01 \text{g}/\text{mol}$

$R$  = constante de los gases ideales, 8,314.

$T$  = Temperatura ambiente (K)

$V_{\text{Cámara}}$  = Volumen de la cámara ( $\text{m}^3$ )

$A_{\text{Cámara}}$  = Área superficial de la cámara ( $\text{m}^2$ )

1,44 = constante para conversión de unidades.

(UNA 2017).

### 3.7.7. Determinación de factores de emisión

Se determinó un factor de GEI para cada uno de los tipos de manejo rastrojo de plantación de piña correspondientes a: incorporado en verde (Rastrojo Verde), rastrojo quemado con herbicida químico (Rastrojo Herbicida) y rastrojo quemado con herbicida químico y fuego (Rastrojo Quema). El factor obtenido es válido para un año de plantación y la unidades utilizadas son  $\text{kg}/\text{ha}$ , el cual correspondió valor acumulado de emisión de cada uno de los tipos de manejo de rastrojo.

### 3.8. Análisis de datos

Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa Infostat. Se determinó a partir del análisis de varianza (ANOVA) a través de la técnica Modelos Lineales Generales Mixtos (MLGM) con la corrección de heterocedasticidad.

El flujo de emisión de cada gas se analizó según tratamiento y según momento de muestreo; además se determinó el área bajo la curva para el acumulado de ambos gases y la interacción momento de muestreo\*tipo de rastrojo fue analizada para emisiones de metano ( $\text{CH}_4$ ).

Las emisiones de  $\text{CO}_2$  fueron analizadas por tratamiento y por momento de muestreo.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Nitrógeno (N), materia orgánica (MO) y carbono (C) del suelo

Se analizó el contenido de nitrógeno (N), de materia orgánica (M.O) y de carbono (C) y se determinó la relación carbono/nitrógeno (C/N). El interés de conocer dichos componentes del suelo fue debido a que los gases de efecto invernadero (GEI) de interés en esta investigación poseen dichos componentes, los cuales, a la vez, son producidos en el suelo por algunos procesos como por ejemplo la respiración del suelo. Raich y Schlesinger (1992) mencionan que el CO<sub>2</sub> de los suelos es producido principalmente por la respiración de las raíces vivas y los organismos heterótrofos; la gran mayoría de éste CO<sub>2</sub> es emitido a la atmósfera en el proceso conocido como respiración del suelo, flujo de CO<sub>2</sub> o evolución del CO<sub>2</sub> en el suelo.

Por otro lado, en el componente suelo existen diferentes procesos que liberan o retienen GEI, ya que según la revista EEA (2015), el suelo es un elemento importante del sistema climático y es el segundo depósito o sumidero de carbono después de los océanos.

Costa Rica posee clima tropical húmedo y específicamente en la Región Huetar Norte la temperatura es relativamente alta; datos de la estación meteorológica de la finca El Tremedal reportaron que la temperatura durante el período donde se realizó la presente investigación presentó en promedio de 24,5 °C y humedad relativa promedio fue de 88,5% (Anexo 1); esto coincide con lo que cita la EEA (2015), donde menciona que las altas temperaturas pueden incrementar la descomposición y mineralización de la materia orgánica del suelo, reduciendo el contenido de carbono orgánico; por lo que el cambio climático no es el único factor que puede hacer que el suelo pase de ser un sumidero de carbono a una fuente de emisiones. La forma en que utilizamos el suelo también influye en la cantidad de carbono que éste puede retener.

En el Cuadro 1 se presentan los resultados del análisis de suelo al inicio y al término del período de estudio para cada uno de los tratamientos, correspondientes según el tipo de manejo de rastrojo; se observa que el Rastrojo Verde perdió un 9,10% m/m de MO y 5,30% m/m de C; el Rastrojo Herbicida perdió 8,72% m/m de

MO y 5,08% m/m de C y el Rastrojo Quema perdió 8,85% m/m de MO y 5,15% m/m de C durante el periodo o etapa de rastrojo.

**Cuadro 2.** Contenido y cambio ( $\Delta$ ) de nitrógeno (N), materia orgánica (MO) y carbono (C) al inicio y al término del periodo de rastrojo según su manejo en un suelo dedicado al cultivo de piña. Finca el Tremedal, 2016.

Tipo de manejo	Etapa de muestreo	% m/m			
		N	M.O	C	C/N
Rastrojo Verde	Inicio	0,32	13,4	7,80	24,30
	Término	0,33	4,30	2,50	7,69
	$\Delta$	+0,1	-9,10	-5,30	-16,61
Rastrojo Herbicida	Inicio	0,32	13,4	7,80	24,30
	Término	0,32	4,68	2,72	8,58
	$\Delta$	0	-8,72	-5,08	-15,72
Rastrojo Quema	Inicio	0,35	13,4	7,80	22,00
	Término	0,33	4,55	2,65	8,14
	$\Delta$	-0,2	-8,85	-5,15	-13,86

Se puede argumentar que la pérdida de materia orgánica y carbono puede deberse a procesos de descomposición y mineralización de la materia orgánica, ya que, según Acuña citado por Salas (2018) se requieren aproximadamente trece meses para la descomposición de los residuos de piña sobre el campo; mientras que en la finca donde se realizó esta investigación se asignan cuatro meses para este proceso y es considerado como tiempo insuficiente para que las plantas derribadas en ese período se descompongan. Por lo tanto, la pérdida de materia orgánica y carbono determinada en esta etapa de estudio ha de ser atribuida a rastrojos de cosechas anteriores que existieron en el área experimental de la presente investigación.

Según se aprecia en el Cuadro 1, con respecto al inicio del periodo el contenido de N fue muy similar al inicio en los tres tratamientos; las áreas asignadas a Rastrojo Verde y Rastrojo Herbicida presentaron el mismo porcentaje de N (0,32%), el área asignada a tratamiento Rastrojo Quema presentó mayor contenido de N (0,35%). En el muestreo al término del periodo de rastrojo, transcurridos cuatro meses del mismo, el contenido de nitrógeno varió muy poco con respecto al inicial; en el Rastrojo Verde aumentó el N en 0,1%, en el Rastrojo Herbicida se mantuvo igual

que al inicio del período y en el Rastrojo Quema disminuyó en 0,2%. La adición extra de nitrógeno al suelo en cualquier forma química aumenta su disponibilidad para los procesos de nitrificación, aumentando la tasa de emisión de Óxido dinitroso ( $N_2O$ ) (Castro y Amador 2006).

Con respecto a la materia orgánica (MO) en el suelo, según los análisis en el muestreo inicial, las tres áreas previo a la etapa de rastrojo presentaron el mismo contenido, el cual correspondió a 13,4%. Para el término de la etapa de rastrojo la cantidad de MO disminuyó drásticamente en las tres áreas y los valores fueron muy similares para los tres manejos; el Rastrojo Verde presentó un 4,30%, correspondiente al valor más bajo, lo que significó una pérdida de 9,10% (la más alta) durante el periodo de rastrojo; el Rastrojo Herbicida presentó 4,68%, lo que significó una pérdida de 8,72% durante la etapa de rastrojo, y en el Rastrojo Quema se observó 4,55% de MO indicador de una pérdida de 8,85% durante la etapa de rastrojo. Se puede observar que la pérdida de materia orgánica fue paralela a la pérdida de carbono en el suelo, conforme ésta disminuyó el carbono también disminuyó.

Como se puede demostrar, en el muestreo inicial, previo a la etapa de manejo rastrojo, el porcentaje de carbono (7,80%) fue el mismo en los tres tratamientos, al finalizar la etapa de rastrojo, el carbono disminuyó también en gran medida con respecto al primer muestreo y los valores fueron similares en los tres tratamientos. Las pérdidas de C que se presentaron durante toda la etapa de rastrojo, para el Rastrojo Verde fue de 5,30% m/m (el más alto), el Rastrojo Herbicida perdió 5,08% m/m, y el Rastrojo Quema perdió 5,15% m/m de C. Este comportamiento fue asociado a la pérdida de fertilidad del suelo, ya que según Llorente (2008), un suelo rico en materia orgánica no sólo es un buen almacén de carbono sino también un suelo fértil y estable, con buena capacidad de infiltración y conservación de agua, poco vulnerable a la erosión y con capacidad para amortiguar posibles contaminantes.

La relación C/N se redujo notablemente en los tres tipos de manejo de rastrojo durante el periodo, los valores iniciales, considerados como una alta relación fueron reducidos en 16,61 puntos en el manejo de rastrojo verde, 15,72 puntos en el Rastrojo Herbicida y 13,86 puntos en el Rastrojo Quema. Valores altos implican que

la materia orgánica se descompone lentamente ya que los microorganismos inmovilizan el nitrógeno, por lo que no puede ser utilizado por los vegetales; en cambio, valores entre 10 y 14 corresponden a una mineralización y ruptura de tejidos rápida ya que la actividad microbiana se estimula (Gamarra *et al.* 2016).

Al final del periodo de rastrojo la condición nutricional de las diferentes áreas de rastrojo (7,69 en Rastrojo verde, 8,58 en Rastrojo Herbicida y 8,14 en Rastrojo Quema) indicó alta mineralización con consecuente aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

De manera general se observó que durante el proceso de rastrojo de plantación de piña el suelo sufrió pérdida de los diferentes componentes (N, MO y C) en diferente grado a excepción de un muy leve incremento de nitrógeno en el rastrojo verde y sucedieron procesos de mineralización conducentes al aumento de las emisiones de dióxido de Carbono.

## **4.2. Emisión de GEI**

El factor de variación relacionado con el momento de medición fue significativo para los dos gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>),

El factor correspondiente al tipo de manejo de rastrojo, referido a los tres tratamientos planteados en esta investigación, presentó efecto de tratamiento respecto al gas CH<sub>4</sub> emitido y no se presentó efecto de tratamiento respecto al gas CO<sub>2</sub> emitido.

La interacción del manejo de rastrojo \* momento de medición (R\*M) del gas fue no significativo para los dos gases, respecto a los flujos de emisión.

### **4.2.1. Flujo de emisión de CH<sub>4</sub>**

En el Cuadro 3 se presenta el valor de las emisiones de CH<sub>4</sub> para cada uno de los momentos de muestreo (realizados quincenalmente en tres tipos de rastrojo).

**Cuadro 3.** Emisión de CH<sub>4</sub> en mg/m<sup>2</sup>/día según manejo de rastrojo para cada momento de muestreo en plantación de piña en finca El Tremedal, San Carlos. 2018.

Día de muestreo	Media de tratamientos			p - valor
	Rastrojo Verde	Rastrojo Herbicida	Rastrojo Quema	
1	64,5 ±15 A	457,25 ±450 A	18,75 ±9 B	0,0371
15	1441,5 ±345 A	2308,75 ±426 A	526,38 ±126 B	0,0008
30	1310,0 ±543 A	1092,5 ±382 A	1135,5 ±351 A	0,9461
45	820,0 ±221 A	1063,88 ±496 A	829,88 ±213 A	0,8998
60	849,75 ±93 B	1806,63 ±420 A	678,38 ±95 B	0,0383
75	684,75 ±172 B	2110,38 ±366 A	673,88 ±148 B	0,0047
105	727,38 ±153 B	1428,38 ±227 A	2608,5 ±820 A	0,0138

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes según DGC a  $p > 0,05$ . Letras se leen horizontalmente.*

Durante el primer día se observó diferencias significativas respecto a emisiones de metano (CH<sub>4</sub>), el Rastrojo Quema presentó la media más baja (18,75 mg/m<sup>2</sup>/día), en el Rastrojo Verde y el Rastrojo Herbicida las emisiones se comportaron estadísticamente igual, correspondientes a 64,5 mg/m<sup>2</sup>/día y 457,25 mg/m<sup>2</sup>/día, respectivamente. Llama la atención la relativa menor emisión de CH<sub>4</sub> del rastrojo verde, a pesar de que en campo un día antes de tomar la muestra se hizo una práctica específica correspondiente a una chapia con el objetivo de acelerar el proceso de descomposición de las plantas, por lo que podría esperarse una mayor emisión.

Transcurridos quince días de iniciado el periodo de rastrojo, se observó efecto de tratamiento respecto a emisiones de CH<sub>4</sub>; la emisión de Rastrojo Verde fue estadísticamente igual a la del Rastrojo Herbicida las cuáles fueron significativamente diferentes a la del Rastrojo Quema el cual emitió menos CH<sub>4</sub> (526,38 mg/m<sup>2</sup>/día), presentando la misma tendencia que en el muestreo inicial.

El Rastrojo Herbicida presentó una media de emisión de CH<sub>4</sub> de 2308,75 mg/m<sup>2</sup>/día, que fue cinco veces más alta que en el primer muestreo, y las emisiones de CH<sub>4</sub> del Rastrojo Verde fueron 22 veces más altas que la presentada durante el primer muestreo, condición que se observó únicamente en dicho muestreo.

Al tercer muestreo, realizado 30 días después de haber iniciado el período de rastrojo la emisión de CH<sub>4</sub> se mostró diferente a los dos muestreos anteriores; no hubo efecto de tratamiento. Los tres tipos de manejo de rastrojo presentaron emisiones relativamente similares y estadísticamente iguales, el Rastrojo Verde emitió 1310 mg/m<sup>2</sup>/día de CH<sub>4</sub>, el rastrojo herbicida emitió 1092,5 mg/m<sup>2</sup>/día y el rastrojo quema emitió 1135,5 mg/m<sup>2</sup>/día.

Transcurridos 45 días después de iniciado el período de rastrojo no hubo efecto de tratamiento respecto a la emisión de CH<sub>4</sub>; las diferencias fueron no significativas entre los tres tipos de manejo del rastrojo, correspondientes a emisiones de 1063,88 mg/m<sup>2</sup>/día de CH<sub>4</sub>.

Transcurridos 60 días se observó efecto de tratamiento, el Rastrojo Herbicida fue estadísticamente diferente respecto a los otros dos al presentar la mayor emisión de CH<sub>4</sub>, (1806,63 mg/m<sup>2</sup>/día); el Rastrojo Quema presentó las emisiones más bajas del periodo correspondientes a 678,38 mg/m<sup>2</sup>/día y este tratamiento tendió a disminuir las emisiones con respecto al muestreo anterior. El Rastrojo Verde presentó un comportamiento ascendente en las emisiones de CH<sub>4</sub> con respecto al muestreo anterior (45 días) las cuales pasaron de 820 mg/m<sup>2</sup>/día a 849,75 mg/m<sup>2</sup>/día. Los datos no siguen un patrón de emisión lineal en el tiempo.

Transcurridos 75 días del periodo de rastrojo, se observó efecto de tratamiento con respecto a las emisiones de CH<sub>4</sub>, se mantuvo el mismo comportamiento en el Rastrojo Herbicida, el cual fue estadísticamente significativo con respecto a los otros tipos de manejo de rastrojo. El Rastrojo Herbicida presentó la mayor emisión en cinco muestreos y a 75 días emitió 2110,38 mg/m<sup>2</sup>/días. La emisión de CH<sub>4</sub> del Rastrojo Quema fue similar a la observada en el muestreo anterior (60 días) con las emisiones más bajas y en disminución respecto a la medición anterior. A pesar de que cinco días antes de este muestreo se realizó la quema con fuego en el Rastrojo Quema las emisiones prácticamente se mantuvieron con respecto a la anterior observación (673,88 mg/m<sup>2</sup>/día vs 678,38 mg/m<sup>2</sup>/día). Las emisiones de CH<sub>4</sub> del Rastrojo Verde (684,75 mg/m<sup>2</sup>/día) tendieron a disminuir con respecto a cuatro muestreos anteriores, además fueron estadísticamente igual a las del Rastrojo Quema.

Al final del periodo de rastrojo, 105 días después de iniciada dicha etapa se observó efecto de tratamiento en la emisión de CH<sub>4</sub>, la emisión del Rastrojo Verde fue estadísticamente diferente a la emisión de los otros dos tipos de manejo de rastrojo, correspondió a la más baja con valores de 727,38 mg/m<sup>2</sup>/día.

El Rastrojo Quema se comportó estadísticamente igual al Rastrojo Herbicida. El Rastrojo Quema aumentó las emisiones de CH<sub>4</sub> casi cuatro veces con respecto al muestreo anterior, dicha emisión fue de 2608.5 mg/m<sup>2</sup>/día de CH<sub>4</sub>, la más alta de todo el período; el diario Hoy (2017) afirma que las quemas generalizadas de rastrojo están provocando el aumento de emisiones de GEI, traduciendo esto en números, Bermejo (2010) y Worldwatch Institute (2004) coinciden en que la quema de rastrojos emite 700 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e por año de los gases CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O lo que representa el 11% de un 30% responsable de las emisiones causadas por la agricultura. El Rastrojo Herbicida presentó una emisión de 1428.38 mg/m<sup>2</sup>/día de CH<sub>4</sub>, emisión menor a la observada 30 días antes; para este momento las plantas se encontraban casi completamente secas, lo que pudo haber provocado el descenso de las emisiones.

Con respecto a las medias obtenidas de los valores de emisión de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> se observó desuniformidad en los datos, existencia de alta variabilidad en los mismos, no se evidenció una tendencia clara ya que ésta no fue creciente ni decreciente; los datos presentaron error estándar (EE) bastante alto; el EE cuantifica las oscilaciones de la media muestral alrededor de la media poblacional (verdadero valor de la media) y en los datos se puede observar lo lejos que se encuentran. Por ejemplo, en el Día 1 de muestreo el CH<sub>4</sub> en el Rastrojo Herbicida presentó un EE de 450 y la media 457,25, lo que significa que el EE fue casi de un 100%, y en los otros datos en general el EE fue más o menos una tercera parte de la media (Cuadros 3 y 4).

En general, las emisiones de CH<sub>4</sub> a nivel de cada tipo de rastrojo presentaron mucha irregularidad en cuando a la cantidad por cada momento de observación; sin poner de manifiesto tendencia alguna a nivel de tipo de manejo de rastrojo o conforme transcurrió el tiempo en el periodo de rastrojo.



#### 4.2.1.1 Emisión acumulada de CH<sub>4</sub>

Al analizar los datos de emisión acumulada de metano (CH<sub>4</sub>) se indicó efecto de la interacción Tratamiento\*Tiempo; por lo que dicha interacción fue utilizada para la interpretación de los resultados en correspondencia a lo indicado en el análisis estadístico ( $p < 0,0001$ ), (Anexo 5): En el Cuadro 4 se muestran las medias de emisión de metano acumulado durante todo el período de rastrojo, se puede observar que el Rastrojo Herbicida acumuló la mayor emisión de CH<sub>4</sub> durante 105 días del periodo de rastrojo, correspondiente a 1592,30 kg/ha, emisión que fue estadísticamente diferente a las emisiones de los demás tratamientos.

El Rastrojo Verde y el Rastrojo Quema al final del periodo de rastrojo (105 días) se comportaron estadísticamente igual al Rastrojo Herbicida a los 75 y 60 días del periodo de rastrojo y fueron iguales entre sí.

El rastrojo Verde transcurridos 45 días, 60 días y 75 días se comportó estadísticamente igual respecto a emisiones de CH<sub>4</sub> al Rastrojo Herbicida a 30 días y a 45 días del periodo e igual al Rastrojo Quema a 60 días y 75 días del periodo y diferente respecto a las emisiones de todos los demás tiempos.

La emisión de CH<sub>4</sub> del Rastrojo Quema a los 30 y 45 días se comportó estadísticamente igual que la del Rastrojo Verde transcurridos 15 días y 30 días e igual a la del Rastrojo herbicida a los 15 días y diferente respecto a las emisiones de todos los demás tiempos.

El Rastrojo Quema a los 15 días del periodo de rastrojo se comportó estadísticamente diferente con respecto a todos los demás tratamientos con una emisión acumulada de metano de 73,88 kg/ha.

La emisión de metano del primer día de muestreo del período de rastrojo, fue estadísticamente igual, y las más bajas de todo el período de evaluación.

Siguiendo con el Cuadro 4, se observó que Rastrojo Herbicida acumuló mayor emisión de CH<sub>4</sub> en cada muestreo; seguido del Rastrojo Verde que fue superado a los 105 días por el Rastrojo Quema, en el cual se presentó la emisión de metano acumulada más baja hasta los 75 días del período de rastrojo (538,35 kg de CH<sub>4</sub>/ha); después de haber ocurrido la quema con fuego, éste aumentó las emisiones de metano a más del doble; mientras que el Rastrojo Verde acumuló menos emisiones durante el período de rastrojo correspondientes a 926,42 kg de

CH<sub>4</sub>/ha; esto coincide por lo descrito por Keppler (2016), citado por Salomone (2016), quien afirma que las plantas también emiten gas metano a la atmósfera, demuestra que lo hacen muchas especies vivas y también una vez muertas; prueban que la emisión varía en función de la luz solar y la temperatura: cada 10 grados más de temperatura las emisiones se duplican.

El metano (CH<sub>4</sub>) emitido durante el periodo (105 días) correspondiente al Rastrojo Verde en piña fue de 926,42 kg/ha, el emitido por el Rastrojo Herbicida fue de 1592,30 kg/ha y el de Rastrojo Quema fue de 1294,81kg, ha durante 105 días.

**Cuadro 4.** Emisión de CH<sub>4</sub> acumulada para cada momento de muestreo en Kg/ha según manejo de rastrojo en el cultivo de piña. Finca El Tremedal, San Carlos, 2018.

<b>Medias de CH<sub>4</sub> (<math>p= &lt;0,0001</math>)</b>			
<b>Día de muestreo</b>	<b>Rastrojo Verde</b>	<b>Rastrojo Herbicida</b>	<b>Rastrojo Quema</b>
<b>1</b>	0,64 ± 0,15 F	4,57 ± 4,50 F	0,19 ± 0,09 F
<b>15</b>	202,45 ± 48 D	327,80 ± 61 D	73,88 ± 18 E
<b>30</b>	385,85 ± 69 D	480,75 ± 96 C	232,85 ± 54 D
<b>45</b>	500,66 ± 89 C	629,69 ± 129 C	349,03 ± 65 D
<b>60</b>	619,62 ± 87 C	882,62 ± 126 B	444,01 ± 69 C
<b>75</b>	715,49 ± 98 C	1178,07 ± 99 B	538,35 ± 63 C
<b>105</b>	926,42 ± 113 B	1592,30 ± 99 A	1294,81 ± 286 B

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes según DGC ( $p > 0,05$ )*

#### **4.4.2 Flujos de emisión de CO<sub>2</sub>**

En el Cuadro 5 se observa el detalle de las emisiones del gas de efecto invernadero CO<sub>2</sub>, determinados durante siete muestreos realizados quincenalmente.

En el Día 1, al inicio de la etapa de rastrojo, no hubo efecto de tratamiento ( $p=0,5748$ ), se logró observar que las emisiones de CO<sub>2</sub> de los tres tipos de manejo de rastrojo fueron las más altas de todos los muestreos; lo contrario sucedió con el gas metano (CH<sub>4</sub>) (Cuadro 4), el cual correspondió al primer día, con las emisiones más bajas de todos los muestreos. El Rastrojo Verde presentó una emisión de CH<sub>4</sub> correspondiente a 8516 mg/m<sup>2</sup>/día y aunque no fue estadísticamente diferente con

respecto a los otros dos tipos manejo de rastrojo, presentó la mayor emisión, por lo que es importante destacar que en este manejo se realizó una chapia un día antes de iniciar la medición, lo anterior coincide con lo que cita Público (2010), afirma que la poda y el segado añaden un consumo energético que acrecienta las emisiones de CO<sub>2</sub>; también resulta importante mencionar que durante la ejecución del muestreo de gas en el campo hubo alta precipitación, lo que se supone, provocó que las emisiones fueran más altas en los tres tipos de rastrojo, ya que según Navarro, Casermeiro y Schimel (2012), "un incremento en la cantidad de carbono producido por la rotura de los agregados al recibir la lluvia explicaría el aumento de la producción de CO<sub>2</sub>, ya que no se produjo un incremento en la cantidad de microorganismos tras su rotura". Este resultado sugiere que los procesos físicos son los más importantes en la emisión del CO<sub>2</sub> según suceden sucesivas lluvias, y que la asociación física de organismos, sustratos y partículas de minerales son fundamentales para controlar el funcionamiento de la diversidad microbiana. Sumado a lo anterior Blasco (1970) afirma que la actividad microbiana, y por consiguiente la producción de CO<sub>2</sub>, aumenta más rápidamente con los primeros incrementos de los niveles de humedad que cuando el punto de saturación se aproxima, pero la producción total de CO<sub>2</sub> es mayor en el rango de pF (fuerza con la que el agua esta retenida por las partículas del suelo) 2,7 a 0; este efecto es debido a la habilidad de los microorganismos aerobios y anaerobios facultativos para actuar a niveles de alta humedad, mientras que a niveles bajos sólo actúan los aerobios.

El cultivo de piña en la mayoría de las fincas se caracteriza por presentar un buen sistema de drenajes con el objetivo de reducir las condiciones de anegamiento en condiciones lluviosas ya que la alta humedad permite la reproducción de enfermedades fungosas.

A los quince días de iniciada la etapa de rastrojo, se realizó el segundo muestreo de aire (Cuadro 5), y el análisis indicó efecto de tratamiento con respecto a emisiones de CO<sub>2</sub>. La emisión de CO<sub>2</sub> del Rastrojo Quema fue significativamente diferente a la emisión del Rastrojo Verde y al Rastrojo Herbicida, los cuales se comportaron estadísticamente igual; el Rastrojo Quema emitió 1362 mg/m<sup>2</sup>/día, y fue el valor más bajo presentado; el Rastrojo Herbicida emitió 3642 mg/m<sup>2</sup>/día de CO<sub>2</sub>, este mismo comportamiento se observó con el gas CH<sub>4</sub> (Cuadro 3) para este día de

muestreo; se puede asociar la acción del herbicida Paraquat en el aumento de emisiones ya que las plantas al estar desecándose no capturan CO<sub>2</sub> como normalmente lo harían si no que contrariamente lo emiten por un proceso de necrosamiento.

Para el muestreo N°3 (a los 30 días) los datos de emisión de CO<sub>2</sub> no mostraron efecto de tratamiento, estadísticamente los tres tipos de manejo de rastrojo se comportaron igual con emisiones correspondientes a 1099 mg/m<sup>2</sup>/día de CO<sub>2</sub> del Rastrojo Herbicida, 2956,13 mg/m<sup>2</sup>/día del Rastrojo Verde y 2181,63 del Rastrojo Quema. Comparando con el comportamiento del metano (CH<sub>4</sub>) en este mismo muestreo (Cuadro 3), ambos gases siguen el mismo patrón de emisión, resultando el tratamiento Rastrojo Verde con las más altas emisiones para ambos gases con 2956.13 mg/m<sup>2</sup>/día de CO<sub>2</sub> (Cuadro 5), y 1310 mg/m<sup>2</sup>/día de CH<sub>4</sub>. (Cuadro 3).

A los 45 días de haber iniciado el período de rastrojo, como parte del manejo se realizó una segunda chapia en el Rastrojo Verde para acelerar el proceso natural de descomposición y eliminar nuevos retoños, posteriormente se realizó el muestreo de aire. No hubo efecto de tratamiento ( $p=0,2217$ ) (Cuadro 5). El Rastrojo Verde presentó 1410.5 mg/m<sup>2</sup>/día de CO<sub>2</sub>, mientras que el Rastrojo Herbicida emitió 2430.63 mg/m<sup>2</sup>/día y el Rastrojo Quema emitió 2638.13 mg/m<sup>2</sup>/día, comportamiento esperado en vista de que ambos fueron tratados de igual manera.

Las emisiones correspondientes al muestreo realizado 60 días post período de rastrojo mostraron efecto de tratamiento; el Rastrojo Verde siguió el mismo comportamiento que en el muestreo anterior con un descenso en las emisiones y mantuvo dicho comportamiento en los siguientes dos muestreos (75 y 105 días de período de rastrojo), el valor de la emisión de CO<sub>2</sub> fue estadísticamente diferente por presentar una baja emisión de CO<sub>2</sub> (852.63 mg/m<sup>2</sup>/día), respecto a las emisiones del Rastrojo Herbicida y del Rastrojo Quema, las cuales correspondieron a 2337 mg/m<sup>2</sup>/día y 1886 mg/m<sup>2</sup>/día, respectivamente.

El análisis de datos correspondiente al muestreo realizado 75 días después de iniciada la etapa de rastrojo no indicó efecto de tratamiento para las emisiones de CO<sub>2</sub> ( $p=0,1706$ ); el Rastrojo Quema fue tratado con fuego seis días antes a este muestreo, o sea a los 69 días después de iniciado el periodo de rastrojo, y en este muestreo presentó una emisión de 3375 mg/m<sup>2</sup>/día a de CO<sub>2</sub>; según la IPCC (2006)

normalmente, las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de la incineración de desechos son más significativas que las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O. El Rastrojo Verde emitió 1628.5 mg/m<sup>2</sup>/día, aunque su emisión fue menos de la mitad de lo que emitió el Rastrojo Quema las diferencias entre estos y con el Rastrojo Herbicida (2830.75 mg/m<sup>2</sup>/día) fueron no significativas. Estos datos muestran que el uso de herbicidas y posterior quema aumentan la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>.

El último muestreo se realizó 105 días después de iniciado el período de rastrojo, para entonces hubo efecto de tratamiento ( $p=0,0002$ ) /Cuadro 5); Rastrojo Verde presentó la emisión de CO<sub>2</sub> más baja de todos los muestreos en el (547.5 mg/m<sup>2</sup>/día) significativamente diferente a la emisión del Rastrojo Quema y del Rastrojo Herbicida (1804, mg/m<sup>2</sup>/día y 2068,13 mg/m<sup>2</sup>/día respectivamente).

Es importante mencionar que en el Rastrojo Verde al inicio se presentó la emisión más alta de los dos gases y de todos los muestreos (8516.88 mg/m<sup>2</sup>/día) sin embargo, llegó a ser la más baja en el último día muestreado.

La emisión de CO<sub>2</sub> en el cultivo de piña muestra que existe actividad metabólica y que ésta aumenta cuando se presentan precipitaciones, ya que, según Blasco (1970) una actividad metabólica alta se caracteriza por un alto consumo de oxígeno y una elevada producción de CO<sub>2</sub>. La medida del CO<sub>2</sub> evolucionado a partir de una cantidad determinada de suelo, es un buen índice de la actividad microbiana del suelo, ya que en todos los suelos la producción de CO<sub>2</sub> aumenta a medida que el pF disminuye a 0 (100% máxima capacidad de retención de agua). Por otra parte, de acuerdo con Blasco (1970), cuando los suelos tienen humedad próxima a la capacidad de campo los coloides orgánicos son más fáciles de atacar por los microorganismos, lo anterior se relaciona con las emisiones presentes en el cultivo de piña, ya que en San Carlos existen las condiciones idóneas de humedad en el suelo y en el ambiente que permiten la sobrevivencia de altas poblaciones de microorganismos que emiten CO<sub>2</sub>.

**Cuadro 5.** Emisión de CO<sub>2</sub> en mg/m<sup>2</sup>/día según manejo de rastrojo para cada momento de muestreo en el cultivo de piña. Finca El Tremedal, Venecia, San Carlos, 2018.

Día de muestreo	Media de CO <sub>2</sub>			p-valor
	Rastrojo Verde	Rastrojo Herbicida	Rastrojo Quema	
1	8516,88 ±3858 A	4142,29 ±1498 A	5074,25 ±2182 A	0,5748
15	2422,38 ±386 A	3642,63 ±869 A	1362 ±133 B	0,0066
30	2956,13 ±1762 A	1099 ±184 A	2181,63 ±861 A	0,2994
45	1410,5 ±372 A	2430,63 ±572 A	2638,13 ±866 A	0,2217
60	852,63 ±229 B	2337 ±571 A	1886,5 ±372 A	0,0186
75	1628,5 ±531 A	2830,75 ±1232 A	3375 ±746 A	0,1706
105	547,5 ±123 B	2068,13 ±356 A	1804 ±321 A	0,0002

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes según DGC a p=0,05. Letras se leen horizontalmente.*

#### 4.2.2.1 Emisión acumulada de CO<sub>2</sub>

En el Cuadro 6 se puede observar el dato conforme el CO<sub>2</sub> se fue acumulando a través del tiempo; en la etapa final del período de rastrojo, a los 105 días, se muestra la cantidad de kg/ha que llegaron acumularse; el Rastrojo Verde acumuló 1541kg/ha de emisiones de CO<sub>2</sub>. El acumulado de emisión en el periodo correspondiente a los tratamientos Rastrojo Herbicida y Rastrojo Quema resultó bastante similar, 2455,72 kg/ha y 2175 kg/ha respectivamente; evidenciando que el Rastrojo Herbicida acumuló relativamente más CO<sub>2</sub> entre los tres tipos de manejo de rastrojo.

**Cuadro 6.** Emisión de CO<sub>2</sub> acumulada en Kg/ha según manejo del rastrojo en el periodo de muestreo en piña. Finca El Tremedal, San Carlos, 2018.

Día de muestreo	Emisión acumulada de CO <sub>2</sub> de los tratamientos		
	Rastrojo Verde	Rastrojo Herbicida	Rastrojo Quema
<b>1</b>	47,56 ± 10	128,36 ± 88	50,74 ± 22
<b>15</b>	424,30 ± 60	638,33 ± 149	241,42 ± 32
<b>30</b>	571,41 ± 84	792,19 ± 153	546,85 ± 100
<b>45</b>	1035,63 ± 301	1132,48 ± 211	916,19 ± 103
<b>60</b>	1155,00 ± 320	1459,66 ± 255	1180,30 ± 103
<b>75</b>	1382,99 ± 297	1855,96 ± 304	1652,80 ± 144
<b>105</b>	1541,76 ± 301	2455,72 ± 321	2175,96 ± 170

Los datos de emisión acumulada de CO<sub>2</sub> se analizaron por separado; por tratamiento (Cuadro 7) y por tiempo (Cuadro 8) debido a que el análisis de varianza indicó la no existencia de efecto de interacción entre estos dos factores (Anexo 6).

En el Cuadro 7 se observan las medias de emisión acumulada de CO<sub>2</sub> para cada tipo de manejo de rastrojo, la cual mostró efecto de tratamiento ( $p=0,0165$ ). El Rastrojo Herbicida se diferenció estadísticamente del Rastrojo Quema y del Rastrojo Verde al presentar la mayor emisión de CO<sub>2</sub> entre ellos, la cual fue de 1208,96 kg/ha.

Aunque estadísticamente el Rastrojo Quema y el Rastrojo Verde se comportaron estadísticamente igual respecto a emisiones de CO<sub>2</sub>, es importante destacar que el Rastrojo Verde presentó las emisiones de CO<sub>2</sub> más bajas cuya media fue de 879,81 kg/ha, comportamiento esperado ya que el manejo que recibió fue completamente natural sin la adición de químicos y de prácticas perjudiciales al suelo y al ambiente.

**Cuadro 7.** Emisión acumulada de CO<sub>2</sub> en Kg/ha según cada manejo de rastrojo en el cultivo de piña. Finca El Tremedal, San Carlos, 2018.

Tipo de manejo	Media de CO <sub>2</sub> (kg/ha) <i>p</i> -valor:0,0165
Rastrojo Verde	879,81 ±88 B
Rastrojo Quema	966,32 ±41 B
Rastrojo Herbicida	1208,96 ±85 A

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes según DGC ( $p > 0,05$ )*

En el Cuadro 8 se observan las medias de emisión acumulada de CO<sub>2</sub> para cada momento de muestreo, que se refiere a los días en período de rastrojo. Se puede observar que las emisiones acumuladas de CO<sub>2</sub> del Día 1, Día 15 y Día 30 del período de rastrojo fueron significativamente diferentes entre ellas, debido a que para estos tres momentos de muestreo la emisión acumulada tuvo intervalos más grandes entre ellas y las hace ser bastante diferentes comparadas con las de los otros momentos de muestreo.

En el Día 1 la media fue de 75,55 kg de CO<sub>2</sub>/ha, y a los quince días fue de 434,68 kg de CO<sub>2</sub>/ha, lo que significó que fue 5,8 veces más alta que en el día uno; a los 30 días del período de rastrojo la emisión de CO<sub>2</sub> acumulado fue de 636,82 kg/ha; 202 kg/ha más grande que a los quince días. Lo anterior indica que al momento de muestreo el CO<sub>2</sub> se acumuló en cantidades muy diferentes en comparación con los muestreos de los días 45 días y 60 días que presentaron emisiones similares entre ellos (1028 kg/ha y 1264kg/ha respectivamente) y no presentaron diferencias significativas; lo mismo ocurrió con las emisiones acumuladas de CO<sub>2</sub> según el momento de muestreo a 75 días y a 105 días, la cual fue de 1630,58 kg/ha y 2057,81kg/ha respectivamente, y que se comportaron estadísticamente igual en el tiempo.



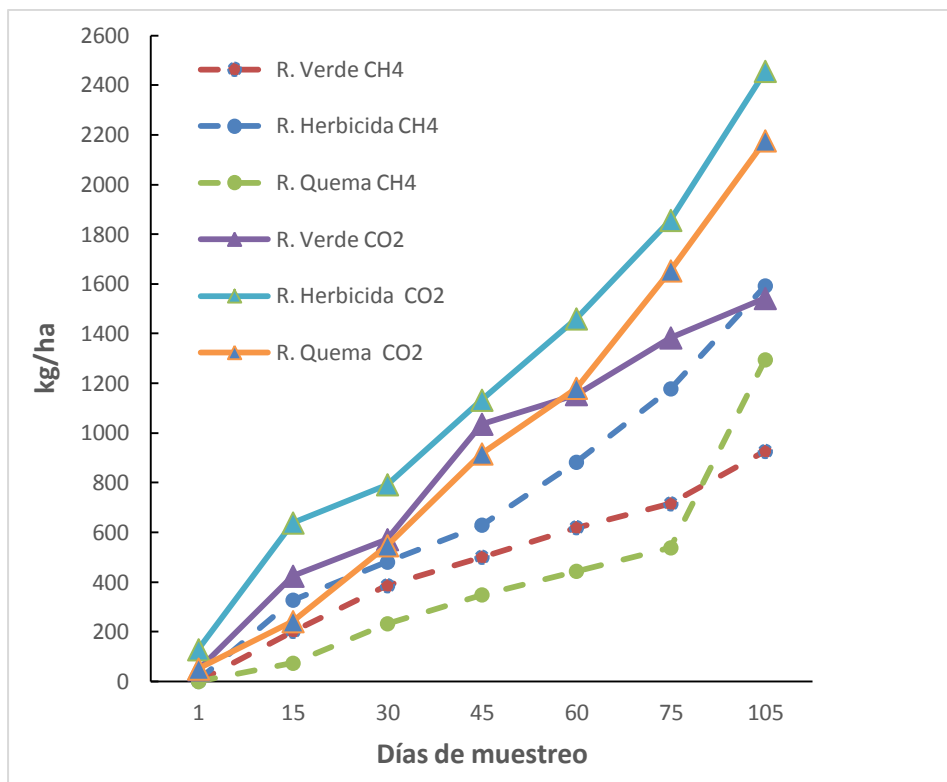
**Cuadro 8.** Emisión de CO<sub>2</sub> acumulada en Kg/ha durante cada momento de muestreo en rastrojo de piña. Finca El Tremedal, San Carlos, 2018.

<b>Momento de muestreo (días)</b>	<b>Medias de CO<sub>2</sub> (kg/ha)</b> p-valor:<0,0001		
<b>1</b>	75,55	±30	A
<b>15</b>	434,68	±54	B
<b>30</b>	636,82	±67	C
<b>45</b>	1028,10	±127	D
<b>60</b>	1264,98	±141	D
<b>75</b>	1630,58	±149	E
<b>105</b>	2057,81	±157	E

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes según DGC (p > 0,05)*

En la Figura 12 se puede observar el comportamiento comparativo del valor acumulado de emisión de CH<sub>4</sub> y acumulativo de emisión de CO<sub>2</sub> durante el período de rastrojo en los tres tipos de manejo de rastrojo.

El acumulado de emisión de CO<sub>2</sub> fue el más alto si se compara con el acumulado de CH<sub>4</sub>, aunque no es correcto comparar directamente estos dos gases, ya que el gas CH<sub>4</sub> según la IPCC (2006) posee un Potencial de Calentamiento Global (PCG) de 21, esto quiere decir que este gas contribuye al calentamiento global 21 veces más que el CO<sub>2</sub>; la unidad de medida utilizada para indicar el PCG de los gases de efecto invernadero se denomina CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e); por lo que se determinó que se emitió más gas metano que CO<sub>2</sub> durante el período de rastrojo.



**Figura 12.** Emisión acumulada de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> en kg/ha en tres manejos de rastrojo (R.) de piña (Herbicida, Quema y Verde) en finca El Tremedal, San Carlos. 2016.

#### 4.2.3 Relación de las emisiones de GEI determinadas con las condiciones climáticas

Las condiciones climáticas fueron consideradas debido a que las emisiones de gases de efecto invernadero están relacionadas con las mismas, ya que el efecto de acumulación de GEI ha generado cambios importantes en las condiciones climáticas.

En la Figura 13 y la Figura 14 se presenta la relación de la temperatura, la precipitación y la humedad relativa a nivel de cada manejo de rastrojo durante cada momento de muestreo (días) respecto a la emisión de CH<sub>4</sub> y de CO<sub>2</sub>.

Con respecto a la temperatura, ésta se mantuvo constante en el periodo, en promedio fue de 24,5 °C, el valor más alto fue 25,2°C y se presentó 30 días después de iniciada la etapa de rastrojo y la temperatura más baja fue de 23,2 °C que correspondió con el último muestreo realizado a los 105 días de haber iniciado el período de rastrojo, el cual coincidió con la última semana de diciembre.

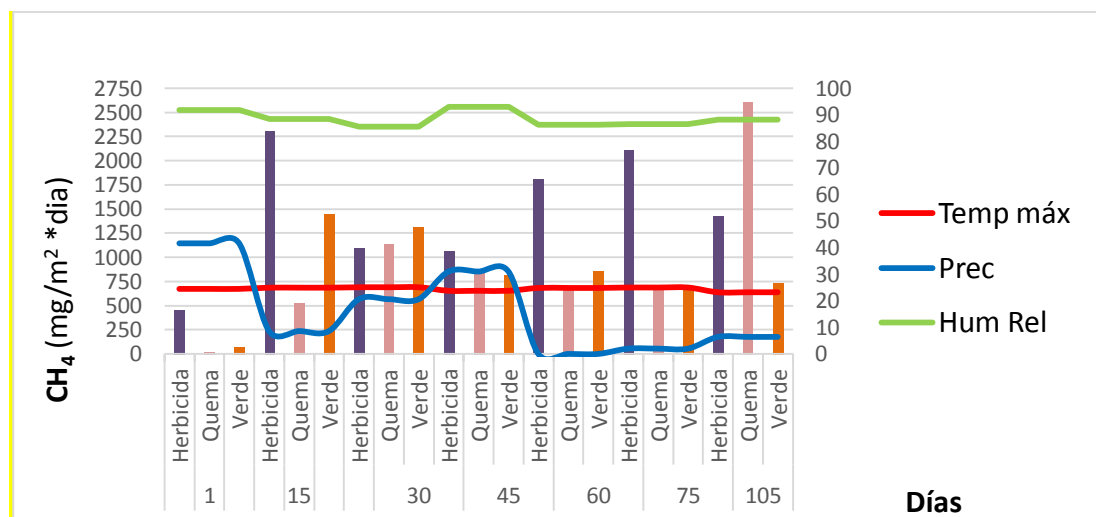
La humedad relativa se mantuvo alta durante el período de rastrojo; es normal un alto porcentaje de humedad relativa para la zona donde se realizó la investigación (zona norte), el promedio durante el período de rastrojo fue de 88,6 %, y los valores de HR en cada uno de los días de muestreo fueron similares (Anexo 2).

Otra condición climática importante en la emisión de GEI obtenidos fue la precipitación, durante el primer muestreo, hubo lluvia durante el momento de la toma de datos, la cual fue la más alta de los días de muestreo (41,6mm) según reportó la estación meteorológica de la finca El Tremedal (Anexo 2).

En la Figura 13 se grafica la relación entre las emisiones de CH<sub>4</sub> y los factores climáticos correspondientes al periodo de muestreos de aire. Aunque se aprecia que existe una relación inversa entre las emisiones de CH<sub>4</sub> y la precipitación, no existe sustento teórico que fortalezca dicha aseveración; por el contrario, según criterio de experto (Castro 2019<sup>3</sup>) tanto el CO<sub>2</sub> como el Metano presentan un comportamiento similar en sus emisiones ante el factor precipitación. La temperatura y la precipitación no sugirieron ninguna tendencia a nivel de emisiones de GEI por los tipos de manejo de rastrojo estudiados.

---

<sup>3</sup> Información personal. Castro, E. 2019, Director de la Unidad de Carbono Neutro de la Universidad EARTH.

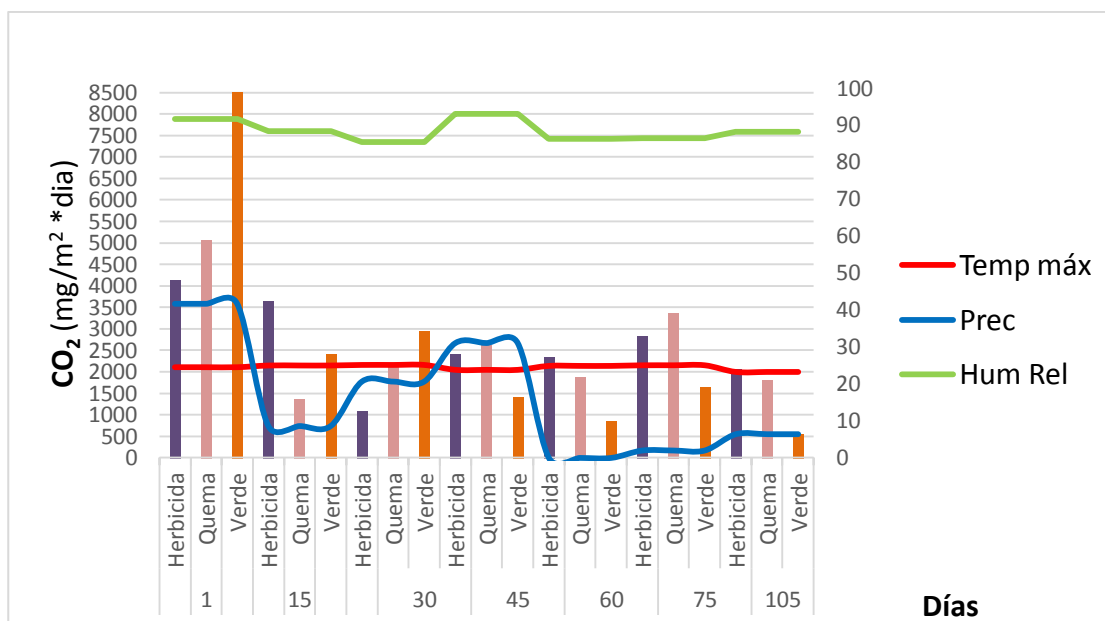


**Figura 13.** Emisión de CH<sub>4</sub> en mg/m<sup>2</sup>/día y condiciones climáticas presentes (temperatura, precipitación y humedad relativa) en tres manejos de rastrojo (Verde, Herbicida y Quema) en finca El Tremedal, San Carlos 2017.

En la Figura 14 se puede observar la relación entre la emisión de CO<sub>2</sub> el primer día de muestreo; para ese momento se presentaron las mayores emisiones de dicho gas, lo que permitió considerar que la ejecución de muestreo de gases con presencia de precipitación contribuyó al aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> por los diferentes tipos de manejo de rastrojo.

Según Castro 2019<sup>4</sup>, en la presencia de lluvias, la adición de hidrógeno y oxígeno a la materia orgánica provoca reacción con el carbono aumentando las emisiones de CO<sub>2</sub>; además mencionó que a mayor temperatura mayor es la velocidad de la reacción, entonces la combinación perfecta para promover las emisiones de CO<sub>2</sub> es temperatura, agua y materia orgánica.

<sup>4</sup> Información personal. Castro, E. 2019, Director de la Unidad de Carbono Neutro de la universidad EARTH.



**Figura 14.** Emisión de CO<sub>2</sub> en mg/m<sup>2</sup>/día y condiciones climáticas presentes (temperatura, precipitación y humedad relativa) en tres manejos de rastrojo (Verde, Herbicida y Quema) en finca El Tremedal, San Carlos 2017.

#### 4.3. Factores de emisión de GEI determinados para cada tipo de manejo de rastrojo.

Los factores de emisión de GEI, tanto para CH<sub>4</sub> como para CO<sub>2</sub> determinados para plantación de piña cuyas prácticas de manejo del rastrojo comprendan las aplicadas a Rastrojo Verde (rastrojo incorporado en verde), rastrojo quemado con herbicida químico (Rastrojo Herbicida) y rastrojo quemado con herbicida químico y fuego (Rastrojo Quema) pueden ser utilizados en los inventarios de GEI.

En el Cuadro 9 se presentan los factores determinados para metano (CH<sub>4</sub>) y para Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); en el caso de Rastrojo verde correspondió a 926,42 kg/ha/año y 1541,76 kg/ha/año, respectivamente. Para el manejo de Rastrojo Herbicida correspondió a 1592,30 kg/ha/año y 2455,72 kg/ha/año, respectivamente y para el manejo de Rastrojo Quema a 1294,81 kg/ha/año y 2175,96 kg/ha/año.

**Cuadro 9.** Factores de emisión en kg/ha/año para tres tipos de manejos de rastrojo en el cultivo de piña obtenidos en las condiciones de manejo de Finca El Tremedal, San Carlos. 2019.

<b>Gas</b>	<b>Factor de emisión (kg/ha/año)</b>		
	<b>Rastrojo Verde</b>	<b>Rastrojo Herbicida</b>	<b>Rastrojo Quema</b>
<b>CH<sub>4</sub></b>	926,42	1592,30	1294,81
<b>CO<sub>2</sub></b>	1541,76	2455,72	2175,96

Para el caso del gas CH<sub>4</sub> el valor indicado debe ser multiplicado por PCG (21) si se desea obtener el resultado en CO<sub>2</sub>e.

## 5. CONCLUSIONES

El contenido de N en el Rastrojo Verde presentó una ganancia de 0,1% m/m, en la M.O tuvo una pérdida de 9,10% m/m y en el C tuvo una pérdida de 5,30% m/m en la etapa de rastrojo de finca El Tremedal en el año 2016.

El contenido de N en el Rastrojo Herbicida no presentó cambios, en la M.O tuvo una pérdida de 8,72% m/m y en el C tuvo una pérdida de 5,08% m/m en la etapa de rastrojo de finca El Tremedal en el año 2016.

El contenido de N en el Rastrojo Quema presentó una pérdida de 0,2% m/m, en la M.O tuvo una pérdida de 8,72% m/m y en el C tuvo una pérdida de 5,08% m/m en la etapa de rastrojo de finca El Tremedal en el año 2016.

En general, las emisiones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> a nivel de cada tipo de rastrojo presentaron mucha irregularidad y alta variabilidad en cuando a la cantidad emitida por cada momento de observación; sin poner de manifiesto una tendencia clara a nivel de tipo de manejo de rastrojo o conforme transcurrió el tiempo en el periodo de rastrojo.

El rastrojo quemado con herbicida químico generó mayor cantidad de emisiones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> (1592,30 kg/ha y 2455,72 respectivamente) que el rastrojo de piña incorporado en verde y el rastrojo quemado con herbicida químico y fuego durante el periodo de rastrojo de la plantación.

Para el GEI metano (CH<sub>4</sub>) el factor de emisión determinado para un año en rastrojo de plantación de piña incorporado en verde fue 926 kg/ha; para rastrojo quemado con herbicida químico fue de 1592,30 kg/ha y para rastrojo quemado con herbicida químico y fuego fue 1297,81 kg/ha.

Para el GEI dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) el factor de emisión determinado para un año en rastrojo de plantación de piña incorporado en verde fue 1541,76 kg/ha; para rastrojo quemado con herbicida químico fue de 2455,72 kg/ha y para rastrojo quemado con herbicida químico y fuego fue de 2175,96 kg/ha.



## RECOMENDACIONES

- Incluir el gas de efecto invernadero  $N_2O$  debido a que en la agricultura está presente y es un gas mucho más potente que el dióxido de carbono y el metano.
- Realizar análisis de suelo en cada momento de muestreo de GEI para observar un comportamiento mas exacto de los componentes del suelo.
- Tomar pesos de las plantas de piña al inicio y al término de la etapa de rastrojo para conocer la pérdida en materia orgánica.

## BIBLIOGRAFÍA

Alpizar, J. 2007. Utilización de la biomasa residual del cultivo de piña (*Ananas comosus*) para la desproteínización enzimática de los desechos de la actividad camaronera. Tesis, Universidad Nacional. Costa Rica. 15-20p.

Acuña, G. 2016. 5580 hectáreas de bosque sucumbieron por cultivo de piña. Crhoy.com. (en línea) Consultado el día: 05/05/2017. Disponible en: <https://www.crhoy.com/ambiente/5-500-hectareas-de-bosque-sucumbieron-a-cultivos-de-pina/>

Andrades, M; Martínez, M. 2014. Fertilidad del suelo y parámetros que la definen. (en línea) Consultado el día: 29/10/2017. Disponible en: [https://www.Dialnet-FertilidadDelSueloYParametrosQueLaDefinen-267902%20\(1\).pdf](https://www.Dialnet-FertilidadDelSueloYParametrosQueLaDefinen-267902%20(1).pdf)

Balat, M. 2010. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. Energy Conversion and Management. (en línea). Consultado el día: 17/02/2017. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890410003791>.

Bartholomew, D; Paull, R; Rohrbach K. 2003. The pineapple: botany, production and uses. CABI Publishing. New York, USA. 301p.

Bermejo, I. 2010. Agricultura y cambio climático. Revista El Ecologista nº 67. (en línea). Consultado el día: 17/09/2017. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/article19945.html>.

Bouroncle, C. *et al.* 2015. La agricultura de Costa Rica y el cambio climático: ¿dónde están las prioridades para la adaptación? Copenhague: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security. 431p.

Blasco, M. 1970. Curso de Microbiología de Suelos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Centro de Enseñanza e Investigación, Departamento de Fitotecnia y Suelos. Turrialba, Costa Rica. 27p.

Corrales, L. 2013. Vigésimo informe Estado de la Nación en desarrollo humano sostenible. (en línea). Consultado el día: 11/06/2016. Disponible en: [http://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca\\_virtual/020/ambiente/Corrales\\_%20cambio%20climatico.pdf](http://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/020/ambiente/Corrales_%20cambio%20climatico.pdf)

Coyne, M. 2000. Microbiología del suelo: un enfoque exploratorio. Editorial Paraninfo, España. 416p.

CANAPEP (Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña), 2017. Piña de Costa Rica. Revista N° 3, edición 26. San José, Costa Rica. 10p.

CANAPEP (Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña), 2010. Piña de Costa Rica. Revista N° 4. San José, Costa Rica. 51p.

CANAPEP (Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña), 2016. Exportaciones de piña fresca (en línea). Consultado el día: 18/07/2016. Disponible en: <http://canapep.com/estadisticas/>

CANAPEP (Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña), “Exportaciones de piña fresca”, 2019. (en línea). Consultado: 27/02/ 2019. Disponible en: <https://canapep.com/estadisticas/>.

Casas, R. 2011. El suelo del cultivo y las condiciones climáticas. España. Editorial Paraninfo. 235p.

CONARE (Consejo Nacional de Rectores), 2015. Emisiones de Gases Efecto Invernadero: mejoramiento de métricas en acciones de mitigación y adaptación al

cambio climático. Formulario para la formulación de proyectos con recursos del fondo del sistema. Costa Rica. 24p.

Colque, M y Sánchez, V, 2007. Los Gases de Efecto Invernadero: ¿Por qué se produce el Calentamiento Global. (en línea). Consultado el día: 11/07/2016. Disponible en: ue.

Castro, J. y Amador, M. 2006. Emisión de Gases de Efecto Invernadero y Agricultura Orgánica. (en línea). Consultado el: 15/07/2016. Disponible en: <http://www.cedeco.or.cr/documentos/Enfoque%20metodologico.pdf>

Domínguez, D. 2013. Potencial del cultivo de piña MD-2 *Ananas comosus* en el municipio de Juan Rodríguez Clara Veracruz. Tesis Lic. Ingeniero Agrónomo. Veracruz, México. Universidad Veracruzana. 59 pág.

El Intransigente. 2015. El impacto de los fertilizantes en el cambio climático. (en línea). Consultado el: 06/07/2017. Disponible en: <https://www.elintransigente.com/mundo/internacionales/2015/9/30/impacto-fertilizantes-cambio-climatico-345288.html>

Espinosa, J; Molina, E. 1999. Acidez y encalado de los suelos. S.I. 1 ed. IPNI (International Plant Nutrition Institute). 42 p.

European Environment Agency (EEA). 2015. El suelo y el cambio climático. Consultado el: 24/03/2018. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2015/articulos/el-suelo-y-el-cambio-climatico>

Foyle, T., Jennings, L; Mulcahy, P. 2007. Compositional analysis of lignocellulosic materials: Evaluation of methods used for sugar analysis of waste paper and straw. *Bioresource Technology*. 3036p.

Fallas, T. 2012. Emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de producción de piña (*Ananas comosus var. comosus*) de la empresa Agrícola Agromonte S.A. San Carlos, Costa Rica. Periodo 2010-2011. Práctica de especialidad, Ingeniera Agrónomo. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 84p.

Fernández, A. 2011 Biocombustible de piña para ahorrar petróleo. Periódico electrónico: El financiero cr.com. (en línea). Consultado el: 06/06/ 2016. Disponible en: [http://www.elfinancierocr.com/ef\\_archivo/2010/julio/11/economia2427505.html](http://www.elfinancierocr.com/ef_archivo/2010/julio/11/economia2427505.html)

Gamarro, C. *et al.* 2016. Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. (en línea). Consultado el día: 31-03-2019. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v9n46/2007-1132-remcf-9-46-4.pdf>

Garita, R. 2014. La Piña. Editorial TEC. Cartago, Costa Rica. 101p.

González, L. 2012. Manual Técnico para el manejo de rastrojos en el cultivo de piña. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Costa Rica. 28p.

Gírio, F., Fonseca, C., Carvalheiro, F., Duarte, L., Marques, S., y Bogel-Lukasik, R. 2010. Hemicelluloses for fuel ethanol: A review. *Bioresource Technology*. (en línea). Consultado el día: 09-02-2017. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852410001744>.

Hendricks, A., Zeeman, G. 2009. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. (en línea). Consultado el día: 09-02-2017. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852408004574>

Hanle y Maldonado 2006. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. (en línea). Consultado el día: 09-03-2018. Disponible en: <https://www.ipcc->

nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/3\_Volume3/V3\_2\_Ch2\_Mineral\_Industry.pdf

HOY.es. 2017. Cinco Efectos Nocivos de la Quema Masiva de Rastrojos. (en línea). Consultado el día: 11/06/2018. Disponible en: <https://www.hoy.es/agro/cinco-efectos-nocivos-20171116232831-nt.html>

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos), 1996. Libro de trabajo para el inventario de Gases de Efecto Invernadero. (en línea). Consultado el día: 09-07-2016. Disponible en: <http://www2.ine.gob.mx/sistemas/peacc/descargas/intro.pdf>

Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2011. Factores de emisión de gases de efecto invernadero. Energía, Procesos industriales, Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, Desechos. 9p.

Jiménez, J. 1999. Manual práctico para: El cultivo de piña de exportación. 1 edición. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 220p.

Kumar, P., Barret, D. M., Delwiche, M. J. y Stroeve, P. 2009. Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. 3729p.

Llorente, M. 2008. Agricultura, suelo y cambio climático. Revista N°56 Ecologistas en acción. (en línea). Consultado el día: 06-01-2018. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/?p=17869>.

León, D. 2007. Diagnóstico y dinámica poblacional de nematodos en el cultivo de piña (*Ananas comosus*) (L.) Merr. Finca el Tremedal S.A. San Carlos. Tesis Bach. En Ing. Agrónomo. Alajuela, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 76 p.

Longoria, R., López, M., Lagunas, E, 2005. Inventario Nacional de Gases De Efecto Invernadero 2002. México. (en línea). Consultado el día: 09-07-2016. Disponible en: [http://www.ine.gov.mx/descargas/cclimatico/inegei\\_2002\\_pis.pdf](http://www.ine.gov.mx/descargas/cclimatico/inegei_2002_pis.pdf).

Lozanoff, J., Heinichen, S., Marchi, G., y Risso, E. 2007. Bioenergía: Revisión de tecnologías emergentes. Buenos Aires: Observatorio de Políticas Públicas. (en línea). Consultado el día: 06/02/2017. Disponible en: [www.cd4cdm.org/latin%20america/ecuador/.../docs/.../lu\\_5\\_tipolenergiapower.pps](http://www.cd4cdm.org/latin%20america/ecuador/.../docs/.../lu_5_tipolenergiapower.pps)

MINAET (Ministerio del Ambiente, Energía y Tecnología), MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería) y PROAGROIN (Programa Agroindustrial de la zona Norte) 2009. Evaluación del impacto ambiental generado por la eliminación del rastrojo de piña a través de su incorporación al suelo. (en línea). Consultado el día: 06/06/2017. Disponible en: <http://cep.unep.org/repcar/proyectos-demostrativos/costa-rica-1/publicaciones-proagroin/protocolo-rastrojo.pdf>

Montero, M y Cerdas, M. 2005. Guías técnicas del manejo poscosecha para el mercado fresco Piña (*Ananas comosus*). Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).Costa Rica. Pág. 5- 15.

Ministerio del Medio Ambiente (MMA), *sf*. Huella de Carbono. (en línea). Consultado el día: 03/03/2019. Disponible en: <http://portal.mma.gob.cl/cambio-climatico/cc-02-7-huella-de-carbono/>

Navarro, F; Casermeiro, M y Schimel, J. 2012. When structure means conservation: Effect of aggregate structure in controlling microbial responses to rewetting events. *Soil Biology and Biochemistry*. Volume 44, Issue 1. Pág 1-8 . (en línea). Consultado el día 27/02/2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003807171100352X>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2014. Emisiones de gases de efecto invernadero de la agricultura, silvicultura

y otros usos de la tierra America Latina y el Caribe. (en línea). Consultado el 15/09/2016. Disponible en: <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/238841/>

Organización Naciones Unidas (ONU). 2016. Cambio Climático. (en línea). Consultado el 16/01/2017. Disponible en: <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>

Público. 2010. El césped produce más emisiones de las que captura. (en línea). Consultado el 24/02/2019. Disponible en: <https://www.publico.es/ciencias/cesped-produce-mas-emisiones-captura.html>

Ponce, M; Gambaudo, S. *sf*. Carbonatos. (en línea). Consultado el 18/07/2017. Disponible en: <https://intranetua.uantof.cl/salares/parte4-Carbonatos.pdf>

Peña, M. 2018. Ensilaje de rastrojo de piña: una opción viable para productores agropecuarios. Universidad de Costa Rica. (en línea). Consultado el 01/07/2018. Disponible en: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/06/21/ensilaje-de-rastrojo-de-pina-una-opcion-viable-para-productores-agropecuarios.html>

Quesada, K. 2003. Utilización del rastrojo de piña (*Ananas comosus*) como refuerzo de una resina poliéster comercial. Tesis, Universidad Nacional. Costa Rica. Págs. 1-4.

Quesada, K., Alvarado, P., Sibaja, R., y Vega, J. (2005). Utilización de las fibras del rastrojo de piña (*Ananas comosus*, variedad champaka) como material de refuerzo en resinas de poliéster. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 6 (2), 158-179.

Rojas, L. y Camacho, G. 2004. Piña (*Ananas comosus* L. Merr) sembrada en labranza mínima y labranza convencional en San Carlos, Costa Rica (en línea). *Agronomía Mesoamericana* 15(2): 161-172. Consultado el día: 20/07/2016. Disponible en: [http://www.mag.go.cr/rev\\_meso/v15n02\\_161.pdf](http://www.mag.go.cr/rev_meso/v15n02_161.pdf)



R. A. Hernández-Chaverri, Prado, L. A. 2018. "Impacto y oportunidades de biorrefinería de los desechos agrícolas del cultivo de piña (*Ananas comosus*) en Costa Rica", Cuadernos de Investigación UNED, vol. 10, no. 2, pp. 455-468.

Rojas T., Calvo B., Porras S., Chavarría A. 2003. Problemática de la mosca del establo, *Stomoxys calcitrans*, originada por los desechos del cultivo de la piña (*Ananas comosus*) en la región Huetar Atlántica de Costa Rica. I Parte. Boletín de Parasitología 4(3):1-3. Universidad Nacional. Costa Rica.

Ruiz, C. 2015. Rastrojos de Cultivos y Residuos Forestales. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N°308. Chile. (en línea). Consultado el día: 02/04/2019. Disponible en: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR40196.pdf>

Salomone, M. 2006. Descubren que las plantas también emiten gas metano a la atmósfera. Diario El País. (en línea). Consultado el día: 01/02/2019. Disponible en: [https://elpais.com/diario/2006/01/25/futuro/1138143603\\_850215.html](https://elpais.com/diario/2006/01/25/futuro/1138143603_850215.html)

Salas, O. 2018. Desechos de la piña: un dolor de cabeza. Universidad de Costa Rica. (en línea). Consultado el día: 12/09/2018. Disponible en: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/06/21/desechos-de-la-pina-un-dolor-de-cabeza-para-productores.html>

Universidad Nacional (UNA), 2016. Escuela de Ciencias Ambientales, Laboratorio de Análisis Ambiental. Procedimiento de método de análisis. PMA-050 Determinación de flujos de emisión de metano y óxido nitroso en aire. Fecha de implementación: 20/04/2016, ejemplar 02, versión 006. Heredia, Costa Rica. 11 pág.

## ANEXOS

Los grados de libertad de este modelo fueron descompuestos como se detalla en el Anexo 1.

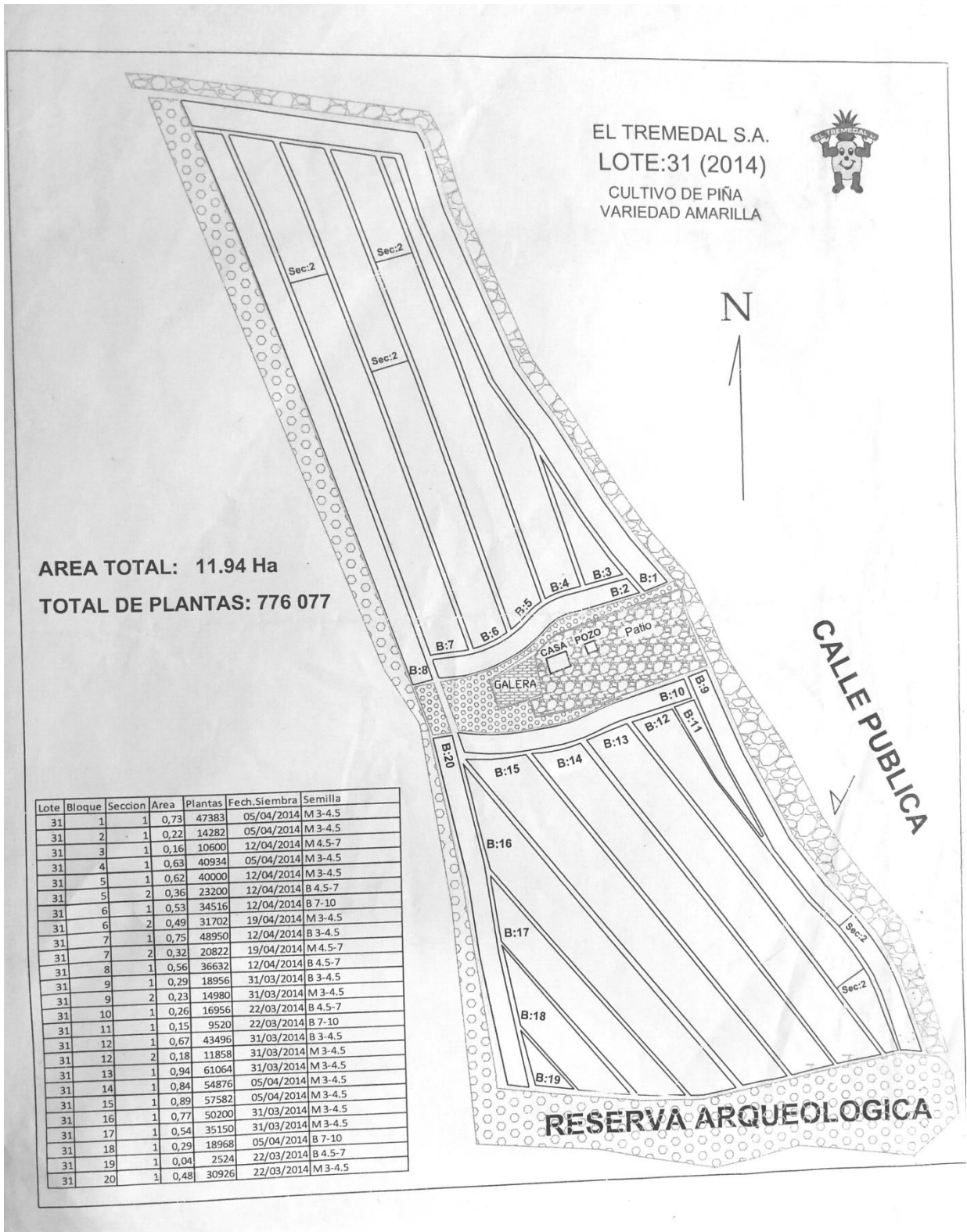
**Anexo 1.** Descomposición de los grados de libertad según diseño experimental en investigación sobre GEI según manejo del rastrojo en piña. San Carlos, Costa Rica. 2016.

<b>Factor</b>	<b>Grados de libertad</b>
R	2
M	6
R * M	12
Error	148
Total	167

**Anexo 2.** Condiciones ambientales presentes durante investigación sobre GEI según manejo del rastrojo en piña, finca El Tremedal San Carlos, Costa Rica. 2016.

<b>Días de rastrojo</b>	<b>Temp. Prom. (°C)</b>	<b>Humedad Relativa Prom. (%)</b>	<b>Acumulo de Precipitación (mm)</b>
1	24.5	91.7	41.6
15	25.0	88.3	8.6
30	25.2	85.4	20.6
45	23.8	93.0	31.0
60	24.9	86.3	0.0
75	25.1	86.5	2.0
105	23.2	88.3	6.4
<b>Promedio</b>	<b>24.5</b>	<b>88.5</b>	-

**Anexo 3.** Croquis del área utilizada (B:13) en Investigación sobre GEI según manejo del rastrojo en piña, finca El Tremedal San Carlos, Costa Rica. 2016.



#### Anexo 4. Análisis estadísticos de los flujos de emisión en Rastrojo Verde, Rastrojo Herbicida y Rastrojo Quema en cada momento de medición (1, 15, 30, 45, 60, 75 y a los 105 días)

##### Modelos lineales generales y mixtos

DIAS = 1

##### Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.002_CH4_REML<-glS (CH4~1+Trata  
,weights=varComb (varIdent (form=~1|Trata))  
,method=\"REML\"  
,na.action=na.omit  
,data=mlm.modeloR.dataC1)
```

##### Resultados para el modelo: mlm.modelo.002\_CH4\_REML

Variable dependiente: CH4

##### Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
24	276,09	282,36	-132,05	1271,49	0,08	

AIC y BIC menores implica mejor

##### Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	16,44	0,0006
Trata	2	3,87	0,0371

##### Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Trata	2	21	3,87	0,0371

##### CH4 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Medias	E.E.	
Herbicida	457,25	449,54	A
Verde	64,50	14,72	A
Quema	18,75	9,44	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

##### Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent  
Formula: ~ 1 | Trata

### Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Herbicida	1,00
Quema	0,02
Verde	0,03

**DIAS = 1**

### Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.003_CO2_REML<-glS(CO2~1+Trata  
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trata))  
,method="REML"  
,na.action=na.omit  
,data=mlm.modeloR.dataC1)
```

### Resultados para el modelo: **mlm.modelo.003\_CO2\_REML**

Variable dependiente: CO2

### Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
23	426,57	432,55	-207,29	3944,17	0,06	

AIC y BIC menores implica mejor

### Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	16,87	0,0005
Trata	2	0,57	0,5748

### Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Trata	2	20	0,57	0,5748

### CO2 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Medias	E.E.	
Verde	8516,88	3857,75	A
Quema	5074,25	2181,76	B
Herbicida	4142,29	1490,75	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

## Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: `varIdent`  
Formula: `~ 1 | Trata`

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Herbicida	1,00
Quema	1,56
Verde	2,77

**DIAS = 2**

## Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.004_CH4_REML<-glS(CH4~1+Trata  
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trata))  
,method="REML")  
,na.action=na.omit  
,data=mlm.modeloR.dataC2)
```

**Resultados para el modelo: mlm.modelo.004\_CH4\_REML**  
Variable dependiente: CH4

## Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
24	355,75	362,02	-171,88	1204,30	0,42	

AIC y BIC menores implica mejor

## Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	43,78	<0,0001
Trata	2	10,29	0,0008

## Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Trata	2	21	10,29	0,0008

## CH4 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Medias	E.E.	
Herbicida	2308,75	425,78	A
Verde	1441,50	345,03	A
Quema	526,38	125,81	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: *varIdent*  
Formula: ~ 1 | Trata

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Herbicida	1,00
Quema	0,30
Verde	0,81

**DIAS = 2**

### Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.005_CO2_REML<-glS(CO2~1+Trata  
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trata))  
,method="REML")  
,na.action=na.omit  
,data=mlm.modeloR.dataC2)
```

### Resultados para el modelo: *mlm.modelo.005\_CO2\_REML*

Variable dependiente: CO2

### Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
24	368,06	374,33	-178,03	2457,00	0,29	

AIC y BIC menores implica mejor

### Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	149,32	<0,0001
Trata	2	6,43	0,0066

### Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Trata	2	21	6,43	0,0066

### CO2 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Medias	E.E.	
Herbicida	3642,62	868,68	A
Verde	2422,38	385,78	A

Quema 1362,00 132,81 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula:  $\sim 1 \mid \text{Trata}$

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Herbicida	1,00
Quema	0,15
Verde	0,44

**DIAS = 3**

### Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.006_CH4_REML<-gls(CH4~1+Trata  
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trata))  
,method="REML")  
,na.action=na.omit  
,data=mlm.modeloR.dataC3)
```

### Resultados para el modelo: mlm.modelo.006\_CH4\_REML

Variable dependiente: CH4

### Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2
24	374,96	381,23	-181,48	1535,67	0,01

AIC y BIC menores implica mejor

### Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	24,34	0,0001
Trata	2	0,06	0,9461

### Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Trata	2	21	0,06	0,9461

### CH4 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Medias	E.E.
-------	--------	------



Verde	1310,00	542,94	A
Quema	1135,50	350,92	B
Herbicida	1092,50	382,45	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula: ~ 1 | Trata

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Verde	1,00
Quema	0,65
Herbicida	0,70

DIAS = 3

### Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.007_CO2_REML<-glS (CO2~1+Trata
,weights=varComb (varIdent (form=~1|Trata))
,method=\"REML\"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.dataC3)
```

### Resultados para el modelo: mlm.modelo.007\_CO2\_REML

Variable dependiente: CO2

### Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
24	393,79	400,06	-190,90	4984,65	0,06	

AIC y BIC menores implica mejor

### Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	42,21	<0,0001
Trata	2	1,28	0,2994

### Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Trata	2	21	1,28	0,2994

### CO2 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Medias	E.E.	
Verde	2956,13	1762,34	A
Quema	2181,63	860,76	A
Herbicida	1099,00	184,37	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent  
 Formula: ~ 1 | Trata

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Verde	1,00
Quema	0,49
Herbicida	0,10

**DIAS = 4**

### Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.008_CH4_REML<-gls(CH4~1+Trata
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trata))
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.dataC4)
```

**Resultados para el modelo: mlm.modelo.008\_CH4\_REML**

Variable dependiente: CH4

### Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
24	359,09	365,36	-173,55	604,08	0,02	

AIC y BIC menores implica mejor

### Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	33,22	<0,0001
Trata	2	0,11	0,8998

### Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Trata	2	21	0,11	0,8998

**CH4 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata**

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Medias	E.E.	
Herbicida	1063,88	496,39	A
Quema	829,88	213,57	B
Verde	820,00	221,25	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula: ~ 1 | Trata

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Quema	1,00
Verde	1,04
Herbicida	2,32

**DIAS = 4**

### Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.009_CO2_REML<-glS(CO2~1+Trata  
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trata))  
,method="REML")  
,na.action=na.omit  
,data=mlm.modeloR.dataC4)
```

**Resultados para el modelo: mlm.modelo.009\_CO2\_REML**

Variable dependiente: CO2

### Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
24	387,98	394,24	-187,99	2450,79	0,09	

AIC y BIC menores implica mejor

### Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38,42	<0,0001
Trata	2	1,62	0,2217

### Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Trata	2	21	1,62	0,2217

## CO2 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Medias	E.E.	
Quema	2638,13	866,48	A
Herbicida	2430,63	572,19	A
Verde	1410,50	372,38	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

## Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula: ~ 1 | Trata

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Quema	1,00
Verde	0,43
Herbicida	0,66

**DIAS = 5**

## Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.010_CH4_REML<-glS(CH4~1+Trata  
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trata))  
,method="REML")  
,na.action=na.omit  
,data=mlm.modeloR.dataC5)
```

**Resultados para el modelo: mlm.modelo.010\_CH4\_REML**

Variable dependiente: CH4

## Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
24	333,36	339,63	-160,68	269,27	0,35	

AIC y BIC menores implica mejor

## Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	144,33	<0,0001
Trata	2	3,83	0,0383

## Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
--------	-------	-------	---------	---------

Trata	2	21	3,83	0,0383
-------	---	----	------	--------

#### CH4 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Medias	E.E.	
Herbicida	1806,63	419,63	A
Verde	849,75	93,46	B
Quema	678,38	95,20	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

#### Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula: ~ 1 | Trata

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Quema	1,00
Herbicida	4,41
Verde	0,98

**DIAS = 5**

#### Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.011_CO2_REML<-gls(CO2~1+Trata
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trata))
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.dataC5)
```

**Resultados para el modelo: mlm.modelo.011\_CO2\_REML**

Variable dependiente: CO2

#### Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
24	369,01	375,28	-178,51	1053,47	0,24	

AIC y BIC menores implica mejor

#### Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	47,20	<0,0001
Trata	2	4,84	0,0186

#### Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Trata	2	21	4,84	0,0186

### CO2 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Medias	E.E.	
Herbicida	2337,00	571,16	A
Quema	1886,50	372,46	A
Verde	852,63	223,98	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula: ~ 1 | Trata

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Quema	1,00
Herbicida	1,53
Verde	0,60

**DIAS = 6**

### Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.012_CH4_REML<-gls(CH4~1+Trata
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trata))
,method="REML")
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.dataC6)
```

### Resultados para el modelo: mlm.modelo.012\_CH4\_REML

Variable dependiente: CH4

### Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
24	346,17	352,43	-167,08	486,48	0,51	

AIC y BIC menores implica mejor

### Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	55,83	<0,0001
Trata	2	6,99	0,0047

## Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Trata	2	21	6,99	0,0047

## CH4 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Medias	E.E.	
Herbicida	2110,38	366,24	A
Verde	684,75	172,00	B
Quema	673,88	147,93	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

## Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula: ~ 1 | Trata

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Verde	1,00
Herbicida	2,13
Quema	0,86

**DIAS = 6**

## Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.013_CO2_REML<-glS(CO2~1+Trata
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trata))
,method="REML")
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.dataC6)
```

## Resultados para el modelo: mlm.modelo.013\_CO2\_REML

Variable dependiente: CO2

## Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2
24	401,61	407,87	-194,80	1503,09	0,09

AIC y BIC menores implica mejor

## Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	31,24	<0,0001

Trata	2	1,93	0,1706
-------	---	------	--------

**Pruebas de hipótesis marginales**

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Trata	2	21	1,93	0,1706

**CO2 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata**

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Medias	E.E.
Quema	3375,00	746,83 A
Herbicida	2830,75	1231,66 A
Verde	1628,50	531,42 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Estructura de varianzas**

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula: ~ 1 | Trata

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Verde	1,00
Herbicida	2,32
Quema	1,41

**DIAS = 7**

**Especificación del modelo en R**

```
mlm.modelo.014_CH4_REML<-gls(CH4~1+Trata
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trata))
,method="REML")
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.dataC8)
```

**Resultados para el modelo: mlm.modelo.014\_CH4\_REML**

Variable dependiente: CH4

**Medidas de ajuste del modelo**

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2
24	361,80	368,07	-174,90	2320,11	0,26

AIC y BIC menores implica mejor

**Pruebas de hipótesis secuenciales**



	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	61,79	<0,0001
Trata	2	5,29	0,0138

### Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Trata	2	21	5,29	0,0138

### CH4 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Medias	E.E.	
Quema	2608,50	820,28	A
Herbicida	1428,38	226,88	A
Verde	727,38	152,96	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula: ~ 1 | Trata

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Quema	1,00
Verde	0,19
Herbicida	0,28

DIAS = 7

### Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.015_CO2_REML<-gls(CO2~1+Trata
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trata))
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.dataC8)
```

### Resultados para el modelo: mlm.modelo.015\_CO2\_REML

Variable dependiente: CO2

### Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
24	351,97	358,24	-169,99	907,46	0,43	

AIC y BIC menores implica mejor

### Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	58,47	<0,0001
Trata	2	13,27	0,0002

### Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Trata	2	21	13,27	0,0002

### CO2 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Medias	E.E.	
Herbicida	2068,13	356,15	A
Quema	1804,00	320,84	A
Verde	547,50	123,47	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula: ~ 1 | Trata

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Quema	1,00
Verde	0,38
Herbicida	1,11

## Anexo 5. Análisis estadístico para emisiones de CH<sub>4</sub> acumulado en tres tipos de manejo de rastrojo en cada momento de muestreo

### Modelos lineales generales y mixtos

#### Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.009_CH4_REML<-gls(CH4~1+Trata+Tiempo+Trata:Tiempo
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trata)
,varIdent(form=~1|Trata*Tiempo))
,method="REML")
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data09)
```

#### Resultados para el modelo: mlm.modelo.009\_CH4\_REML

Variable dependiente: CH4

#### Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
168	1921,95	2053,53	-916,98	0,27	0,72	

*AIC y BIC menores implica mejor*

**Pruebas de hipótesis secuenciales**

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	17,50	<0,0001
Trata	2	8,74	0,0003
Tiempo	6	146,63	<0,0001
Trata:Tiempo	12	7,34	<0,0001

**Pruebas de hipótesis marginales**

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Trata	2	147	18,93	<0,0001
Tiempo	6	147	120,20	<0,0001
Trata:Tiempo	12	147	7,34	<0,0001

**Efectos fijos**

	Estim	E.E.	T	p-valor
(Intercept)	4,57	4,50	1,02	0,3108
TrataQuema	-4,39	4,50	-0,98	0,3311
TrataVerde	-3,93	4,50	-0,87	0,3840
Tiempo105	1587,73	98,66	16,09	<0,0001
Tiempo15	323,22	61,23	5,28	<0,0001
Tiempo30	476,17	96,62	4,93	<0,0001
Tiempo45	625,12	129,26	4,84	<0,0001
Tiempo60	878,05	125,83	6,98	<0,0001
Tiempo75	1173,50	99,47	11,80	<0,0001
TrataQuema:Tiempo105	-293,10	302,90	-0,97	0,3348
TrataVerde:Tiempo105	-661,95	150,32	-4,40	<0,0001
TrataQuema:Tiempo15	-249,53	63,71	-3,92	0,0001
TrataVerde:Tiempo15	-121,42	78,00	-1,56	0,1217
TrataQuema:Tiempo30	-243,51	110,53	-2,20	0,0291
TrataVerde:Tiempo30	-90,97	118,71	-0,77	0,4448
TrataQuema:Tiempo45	-276,27	144,61	-1,91	0,0580
TrataVerde:Tiempo45	-125,11	157,09	-0,80	0,4271
TrataQuema:Tiempo60	-434,23	143,76	-3,02	0,0030
TrataVerde:Tiempo60	-259,07	153,01	-1,69	0,0925
TrataQuema:Tiempo75	-635,34	117,70	-5,40	<0,0001
TrataVerde:Tiempo75	-458,66	139,89	-3,28	0,0013

**CH4 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata**

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Medias	E.E.	
Herbicida	727,97	36,46	A
Verde	478,73	30,36	B
Quema	419,02	44,77	B

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)*

**CH4 - Medias ajustadas y errores estándares para Tiempo**

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Tiempo	Medias	E.E.			
105	1271,18	107,80	A		
75	810,63	51,11	B		
60	648,75	56,00	C		
45	493,13	56,63	D		
30	366,48	43,40	D		
15	201,38	26,61	E		
1	1,80	1,50	F		

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**CH4 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata\*Tiempo**

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Tiempo	Medias	E.E.		
Herbicida	105	1592,30	98,55	A	
Quema	105	1294,81	286,39	B	
Herbicida	75	1178,07	99,37	B	
Verde	105	926,42	113,41	B	
Herbicida	60	882,62	125,75	B	
Verde	75	715,49	98,36	C	
Herbicida	45	629,69	129,19	C	
Verde	60	619,62	87,06	C	
Quema	75	538,35	62,93	C	
Verde	45	500,66	89,27	C	
Herbicida	30	480,75	96,51	C	
Quema	60	444,01	69,53	C	
Verde	30	385,85	68,98	D	
Quema	45	349,03	64,84	D	
Herbicida	15	327,80	61,07	D	
Quema	30	232,85	53,68	D	
Verde	15	202,45	48,32	D	
Quema	15	73,88	17,58	E	
Herbicida	1	4,57	4,50	F	
Verde	1	0,64	0,15	F	
Quema	1	0,19	0,09	F	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Estructura de varianzas**

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula: ~ 1 | Trata

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Quema	1,00
Herbicida	298,56
Verde	168,14

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent  
 Formula: ~ 1 | Trata \* Tiempo

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Quema*1	1,00
Herbicida*1	0,16
Verde*1	0,01
Quema*15	186,25
Verde*15	3,04
Herbicida*15	2,17
Verde*30	4,35
Quema*30	568,65
Quema*45	686,89
Verde*45	5,62
Herbicida*30	3,42
Quema*60	736,59
Herbicida*45	4,58
Verde*60	5,49
Quema*75	666,69
Verde*75	6,20
Verde*105	7,15
Herbicida*60	4,46
Quema*105	3034,03
Herbicida*75	3,53
Herbicida*105	3,50

## Anexo 6. Análisis estadístico para CO<sub>2</sub> acumulado para cada manejo de rastrojo y para cada momento de muestreo

### Modelos lineales generales y mixtos

#### Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.002_CO2_REML<-gls(CO2~1+Trata+Tiempo+Trata:Tiempo
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Trata)
,varIdent(form=~1|Trata*Tiempo))
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data00)
```

#### Resultados para el modelo: mlm.modelo.002\_CO2\_REML

Variable dependiente: CO2

#### Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
166	2244,74	2375,72	-1078,37	26,19	0,62	

AIC y BIC menores implica mejor

### Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	192,47	<0,0001
Trata	2	64,70	<0,0001
Tiempo	6	109,91	<0,0001
Trata:Tiempo	12	1,19	0,2928

### Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Trata	2	145	4,22	0,0165
Tiempo	6	145	60,72	<0,0001
Trata:Tiempo	12	145	1,19	0,2928

### Efectos fijos

	Estim	E.E.	T	p-valor
(Intercept)	128,36	87,89	1,46	0,1463
TrataQuema	-77,62	90,56	-0,86	0,3928
TrataVerde	-80,81	88,45	-0,91	0,3624
Tiempo105	2327,36	333,17	6,99	<0,0001
Tiempo15	509,97	172,64	2,95	0,0037
Tiempo30	663,83	176,19	3,77	0,0002
Tiempo45	1004,12	228,25	4,40	<0,0001
Tiempo60	1331,30	269,80	4,93	<0,0001
Tiempo75	1727,60	316,18	5,46	<0,0001
TrataQuema:Tiempo105	-202,14	374,85	-0,54	0,5905
TrataVerde:Tiempo105	-833,15	448,97	-1,86	0,0655
TrataQuema:Tiempo15	-319,29	176,87	-1,81	0,0731
TrataVerde:Tiempo15	-133,22	183,00	-0,73	0,4678
TrataQuema:Tiempo30	-167,72	203,61	-0,82	0,4114
TrataVerde:Tiempo30	-139,98	195,67	-0,72	0,4755
TrataQuema:Tiempo45	-138,67	251,28	-0,55	0,5819
TrataVerde:Tiempo45	-16,04	378,27	-0,04	0,9662
TrataQuema:Tiempo60	-201,74	289,59	-0,70	0,4871
TrataVerde:Tiempo60	-223,85	418,44	-0,53	0,5935
TrataQuema:Tiempo75	-125,54	348,25	-0,36	0,7190
TrataVerde:Tiempo75	-392,17	433,78	-0,90	0,3675

### CO2 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Medias	E.E.	
Herbicida	1208,96	85,49	A
Quema	966,32	41,02	B
Verde	879,81	88,35	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### CO2 - Medias ajustadas y errores estándares para Tiempo

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Tiempo	Medias	E.E.	
105	2057,81	157,33	A
75	1630,58	149,51	A
60	1264,98	140,58	B
45	1028,10	127,29	B
30	636,82	67,00	C
15	434,68	54,43	D
1	75,55	30,37	E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### CO2 - Medias ajustadas y errores estándares para Trata\*Tiempo

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Trata	Tiempo	Medias	E.E.	
Herbicida	105	2455,72	321,37	A
Quema	105	2175,96	170,39	A
Herbicida	75	1855,96	303,72	B
Quema	75	1652,80	144,33	B
Verde	105	1541,76	300,78	B
Herbicida	60	1459,66	255,08	B
Verde	75	1382,99	296,82	B
Quema	60	1180,30	102,93	B
Verde	60	1155,00	319,69	B
Herbicida	45	1132,48	210,65	B
Verde	45	1035,63	301,49	B
Quema	45	916,19	102,80	B
Herbicida	30	792,19	152,71	B
Herbicida	15	638,33	148,59	C
Verde	30	571,41	84,53	C
Quema	30	546,85	99,68	C
Verde	15	424,30	59,87	C
Quema	15	241,42	31,63	D
Herbicida	1	128,36	87,89	E
Quema	1	50,74	21,82	E
Verde	1	47,56	9,90	E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula: ~ 1 | Trata

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
Verde	1,00
Quema	6,47
Herbicida	14,34

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula: ~ 1 | Trata \* Tiempo

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
-------	-------

Verde*1	1,00
Quema*1	0,36
Herbicida*1	0,66
Verde*15	6,47
Quema*15	0,53
Herbicida*15	1,12
Verde*30	8,54
Quema*30	1,66
Herbicida*30	1,15
Verde*45	32,56
Quema*45	1,72
Herbicida*45	1,59
Verde*60	34,53
Quema*60	1,72
Herbicida*60	1,92
Verde*75	32,06
Quema*75	2,41
Herbicida*75	2,29
Verde*105	32,49
Quema*105	2,85
<u>Herbicida*105</u>	<u>2,42</u>