

CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN LOS PROCESOS DE
PREPARACIÓN DE SUELO PARA UN CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR DEL
VALLE DEL CAUCA.

CLAUDIA MARCELA LUBO CETINA

UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI
2014

CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN LOS PROCESOS DE
PREPARACIÓN DE SUELO PARA UN CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR DEL
VALLE DEL CAUCA.

CLAUDIA MARCELA LUBO CETINA

Tesis de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Magister
en Ingeniería Industrial

Director

M.Sc. Andrés López Astudillo

Profesor Tiempo Completo y Director del programa de Especialización en Medio
Ambiente

UNIVERSIDAD ICESI

FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

SANTIAGO DE CALI

2014

CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE ILUSTRACIONES	5
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE GRÁFICAS.....	7
LISTA DE ECUACIONES	8
INTRODUCCIÓN	9
1. MARCO DE REFERENCIA.....	11
1.1 ANTECEDENTES	11
1.2 MARCO TEORICO.....	12
1.2.1 Emisiones del suelo	15
1.2.2 Emisiones por combustión.....	16
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	18
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
3. OBJETIVOS.....	23
3.1 OBJETIVO GENERAL	23
3.2 OBJETIVO DEL PROYECTO.....	23
3.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
4. ALCANCES Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	24
5. METODOLOGÍA.....	26
6. DESARROLLO DEL PROYECTO	31
6.1 PROCESOS OPERACIONALES	31
6.1.1 Labores de preparación de suelos para manejo de plantillas	32
6.1.2 Labores de preparación de suelos para manejo de socas.....	36
6.2 PROTOCOLO DE MUESTREO DE GASES EFECTO INVERNADERO EMITIDOS AL AIRE POR LOS TRACTORES, DURANTE LOS PROCESOS DE PREPARACIÓN DE SUELO PARA EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR	38
6.3 PROTOCOLO DE MUESTREO DE GASES EFECTO INVERNADERO EMITIDOS POR EL SUELO, DESPUÉS DE LA EJECUCIÓN DE LOS PROCESOS DE PREPARACIÓN DE SUELO PARA EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR.....	40
6.4 RECOPIACIÓN DE DATOS	43
6.4.1 Mediciones en aire.....	43

	Pág.
6.4.2 Medición de emisiones del suelo	52
7. RESULTADOS DEL PROYECTO Y DISCUSIÓN	69
7.1 FUENTES DE EMISIÓN.....	69
7.1.1 Emisiones por combustión.....	69
7.1.2 Emisiones del suelo	73
7.2 GASES EFECTO INVERNADERO IDENTIFICADOS Y PORCENTAJE DE PARTICIPACIÓN EN LA HUELLA DE CARBONO	75
7.2.1 Huella de carbono medida	75
7.2.2 Huella de carbono calculada.....	78
7.2.3 Análisis de incertidumbre.....	81
7.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA HUELLA DE CARBONO MEDIDA FRENTE A LA HUELLA DE CARBONO CALCULADA.....	84
7.4 OPORTUNIDADES DE REDUCCIÓN.....	88
8. CONCLUSIONES	92
9. RECOMENDACIONES.....	94
10. FUTURAS INVESTIGACIONES	96
11. GLOSARIO	97
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Decepada	32
Ilustración 2. Subsulado.....	33
Ilustración 3 Cincelado.....	33
Ilustración 4. Rastro-arado.....	34
Ilustración 5. Rastrillada.....	35
Ilustración 6. Surcada	35
Ilustración 7. Encalle de Residuos	36
Ilustración 8. Recorrido del Encalle de Residuos.....	36
Ilustración 9. Recorrido del Subsuelo	37
Ilustración 10. Subsuelo Convencional en Socas	37
Ilustración 11. Cultivo - Aporque	37
Ilustración 12. Recorrido del Cultivo-Aporque.....	37
Ilustración 13. Diagrama del recorrido del proceso de decepada	44
Ilustración 14. Diagrama del recorrido de la labor de Subsolada.....	45
Ilustración 15. Recorrido de la labora de cincelado	46
Ilustración 16. Recorrido de la labor de rastro-arado.....	47
Ilustración 17. Recorrido de la labor de rastrillada	48
Ilustración 18. Recorrido del proceso de surcado	49
Ilustración 19. Recorrido del proceso de encalle de residuos	50
Ilustración 20. Recorrido de la labor de cultivo aporque	51
Ilustración 21. Recorrido de la labor de aplicación de abonos.....	52
Ilustración 22. Estado inicial - Suerte 8.....	54
Ilustración 23. Técnica de la Cámara Cerrada.....	54

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Fuentes Móviles de Emisión	27
Tabla 2. Factores de emisión.....	30
Tabla 3. Potenciales de calentamiento global.....	30
Tabla 4. Labores de preparación se suelo aplicadas a cada suerte.	53
Tabla 5. Datos de toma de muestreo 1	55
Tabla 6. Gases emitidos por cámara	56
Tabla 7. Datos de Muestreo Suerte 152b	60
Tabla 8. Emisión de Gases por Cámara	61
Tabla 9. Datos de Muestreo Suerte 215	64
Tabla 10. Emisión de Gases por Cámara	65
Tabla 11. Labores por tipo de preparación	71
Tabla 12. Emisiones de CO2 por tipo de preparación de suelos	72
Tabla 13. Gases emitidos por la mineralización del suelo preparado para cada tipo de cultivo.....	74
Tabla 14. Huella de Carbono por Tipo de Cultivo	76
Tabla 15. Emisiones medidas por gas	77
Tabla 16. Cálculo de emisiones de suelos gestionados	78
Tabla 17. Emisiones de CO2eq por Labor de Preparación de Suelos.....	79
Tabla 18. Huella de Carbono Calculada por Tipo de Cultivo	80
Tabla 19. Intervalos de Confianza	83
Tabla 20. Incertidumbre Combinada de la Huella Experimental	84
Tabla 21. Huella de Carbono Calculada vs Huella de Carbono Medida	85
Tabla 22. Huella de Carbono Calculada vs Huella de Carbono Medida Detalladas por Labor	87

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Resultados de las mediciones del proceso de decepada.....	44
Gráfica 2. Resultados de las mediciones de la labor de subsolada.....	45
Gráfica 3. Resultado de las mediciones de la labor de cincelado.....	46
Gráfica 4. Resultado de las mediciones de la labor de rastro-arado.....	47
Gráfica 5. Resultado de las mediciones de la labor de rastrillada.....	48
Gráfica 6. Resultado de las mediciones del proceso de surcado.....	49
Gráfica 7. Resultado de las mediciones del proceso de encalle de residuos.....	50
Gráfica 8. Resultados de las mediciones de la labor de cultivo aporque.....	51
Gráfica 9. Resultado de las mediciones de la labor de aplicación de abonos.....	52
Gráfica 10. Gases por cámara por tiempo de muestreo.....	57
Gráfica 11. Emisiones de metano por cámara por tiempo de muestreo.....	58
Gráfica 12. Emisiones de dióxido de carbono por cámara por tiempo de muestreo.....	59
Gráfica 13. Emisiones de óxido nitroso por cámara por tiempo.....	59
Gráfica 14. Gases por cámara por tiempo de muestreo.....	62
Gráfica 15. Emisiones de metano por cámara por tiempo.....	63
Gráfica 16. Emisiones de óxido nitroso por cámara por tiempo.....	63
Gráfica 17. Dióxido de carbono por cámara por tiempo.....	64
Gráfica 18. Emisiones de CO ₂ eq por cámara por tiempo.....	66
Gráfica 19. Emisiones de metano por cámara por tiempo.....	67
Gráfica 20. Emisiones de óxido nitroso por cámara por tiempo.....	67
Gráfica 21. Emisiones de dióxido de carbono por cámara por tiempo.....	68
Gráfica 22. Emisiones de CO ₂ medidas por labor.....	70
Gráfica 23. Emisiones de CO ₂ calculadas por tipo de preparación.....	73
Gráfica 24. Emisiones de CO ₂ medidas pro tipo de preparación.....	73
Gráfica 25. Huella de Carbono de la Preparación de una Soca Comercial.....	76
Gráfica 26. Huella de Carbono de la Preparación de una Soca de Manejo Limpio.....	76
Gráfica 27. Huella de Carbono de la Preparación de una Plantilla de Manejo Limpio.....	77
Gráfica 28. Huella de Carbono Calculada para una Soca Comercial.....	80
Gráfica 29. Huella de Carbono Calculada para una Soca de Manejo Limpio.....	80
Gráfica 30. Huella de Carbono Calculada para una Plantilla de Manejo Limpio.....	81
Gráfica 31. Huella de Carbono Medida vs Huella de Carbono Calculada.....	86

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Estimación de emisiones por combustión móvil.....	28
Ecuación 2. Emisiones por aplicación de fertilizantes nitrogenados	29
Ecuación 3. Emisiones por fertilización con urea.....	29
Ecuación 4. Emisiones por lixiviación / escurrimiento.....	30
Ecuación 5. Combinación de incertidumbres	84

INTRODUCCIÓN

El cambio climático, las regulaciones nacionales e internacionales y las pérdidas económicas ocasionadas como consecuencia del mismo, han creado, en Colombia y en el mundo, la necesidad de medir la emisión de gases efecto invernadero (GEI) en los procesos productivos de las empresas y desarrollar estrategias para: reducir emisiones y mitigar las consecuencias de las que no se pueden eliminar.

La huella de carbono, es un indicador que permite determinar la cantidad total de GEI emitidos a la atmósfera, medidos en CO₂ equivalente (CO₂eq), producto de la realización de actividades como el transporte, la minería, la agricultura, la producción de bienes, etc. Su cálculo considera el total de emisiones de cada una de las etapas del ciclo productivo, desde la adquisición de materias primas, hasta la eliminación de sus desechos (Bórquez, R, 2009).

Dado que el cambio climático es una problemática global, vale la pena resaltar la posición de Tudela, F (2005) cuando asevera que es mediante la medición, el control y la eventual reducción de sus emisiones, que los agentes económicos pueden mejorar las condiciones ambientales locales y su competitividad a escala nacional y global, a la vez que contribuyen a la resolución de un grave problema global. En efecto, reducir emisiones de gases efecto invernadero también lleva aparejados beneficios en cuanto a limitación de emisiones tóxicas, mejoras a la salud, ahorros económicos por eficiencia energética o introducción de nuevos procesos, promoción de fuentes renovables de energía, identificación de oportunidades para participar en mercados de carbono, y en general el mejoramiento de la posición estratégica para el desarrollo sustentable de la propia empresa y del país.

El proyecto de investigación que se presenta a continuación, busca calcular, de forma teórica y experimental, la huella de carbono del proceso de preparación de suelo para un cultivo tipo soca de caña de azúcar de manejo comercial, un cultivo tipo soca de caña de azúcar de manejo limpio y un cultivo tipo plantilla de caña de azúcar de manejo limpio, de un ingenio del Valle del Cauca.

El cálculo de la huella de carbono se desarrollará de forma experimental y teórica. El cálculo experimental se llevará a cabo por medio de la medición de las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄ generadas por el suelo y las emisiones de CO₂ generadas por los tractores empleados en el desarrollo de cada una de las labores involucradas en dicho proceso, para una hectárea de cultivo. Para el cálculo teórico se emplearán: el factor de emisión para el diésel colombiano, desarrollado por la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME), así como

las ecuaciones y los factores de emisión genéricos, propuestos por el Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC).

El desarrollo de este proyecto de investigación, presenta la primera práctica de medición de las emisiones de GEI, generadas por el suelo de un cultivo de caña de azúcar del Valle del Cauca, y hace parte de un proyecto de investigación marco, que busca medir el flujo de las emisiones generadas por el proceso de mineralización de suelo durante un periodo de cultivo completo, caracterizando las fases de preparación de suelo, fertilización, control de maleza, riego y maduración, para generar una herramienta de medición de la huella de carbono para el sector azucarero, que permita definir estrategias de reducción y mitigación de dicha huella.

1. MARCO DE REFERENCIA

1.1 ANTECEDENTES

El cálculo de la huella de carbono ha sido aplicado en diferentes ámbitos, como una herramienta para monitorear el estado actual de las emisiones de gases efecto invernadero, y como punto de partida para crear estrategias que permitan mitigar y reducir el impacto generado por este tipo de emisiones.

Por ejemplo, en su artículo “The case for consumption- based accounting of greenhouse gas emissions to promote local climate action”, Larsen & Hertwich (2009) utilizan las compras municipales de las ciudades noruegas, y les asignan intensidades de emisión teniendo en cuenta el tipo de energía utilizada en su producción, así como si se trata de un producto o un servicio, para calcular la huella de carbono del país y así implementar políticas orientadas a reducir dichas emisiones.

En Argentina por su parte, Viglizzo et al. (2011) utilizan este indicador para evaluar el impacto que ha tenido la expansión agrícola entre los años 1960 y 2005, considerando las prácticas agrícolas como la labranza y el empleo de fertilizantes, encontrando que en la última década, los agricultores desarrollaron la capacidad de producir bajo esquemas de relativamente baja adición de compuestos y bajo impacto ambiental, mostrando así la utilidad de medir y monitorear las emisiones de gases efecto invernadero.

En Brasil, deFigueiredo, Panosso, Romão, & La Scala (2010) desarrollaron el cálculo de la huella de carbono para los procesos de siembra, cosecha y producción de azúcar obteniendo que, bajo la metodología presentada por el IPCC 2006, en ese país la producción de azúcar genera $2,41 \text{ tonCO}_2\text{eq ha}^{-1}$ de cultivo, considerando sólo los límites de la empresa.

Por su parte, en el este de Tailandia, Yuttitham, Gheewala, & Chidthaisong (2011), desarrollaron el cálculo de la huella de carbono del cultivo y procesamiento de la caña de azúcar, utilizando la metodología PAS 2050, bajo el esquema de la cuna a la puerta, y obtuvieron que la emisión total de una plantación de caña de azúcar, considerando el uso de combustible fósil y, el uso y producción de los fertilizantes, herbicidas e insecticidas, fue de $2,84 \text{ tonCO}_2\text{eq ha}^{-1}$, donde la mayor contribución a las emisiones estuvo relacionado con el uso de fertilizantes.

Considerando que el objetivo que se busca lograr con el desarrollo de este proyecto y los recursos con los que se cuenta, es medir las emisiones de GEI de un cultivo de caña de azúcar y a partir de ahí calcular su huella de carbono, resulta muy útil citar el trabajo desarrollado por Van Rikxoort (2011) en su tesis de grado “El potencial de los sistemas de producción de Café Mesoamericanos para mitigar

el cambio climático”, en el cuál utiliza el modelo de The Cool Farm Tool para cuantificar las emisiones de GEI de cuatro sistemas de producción de café con respecto al carbono almacenado y la huella de carbono, presentando un ejemplo y una guía de los aspectos clave, a tener en cuenta al momento de definir la metodología de toma de muestras, ejecutar las mediciones y manejar los datos obtenidos.

En el campo específico de la huella de carbono generada por los procesos de preparación de suelo de un cultivo de caña de azúcar, hace un par de años Rojas Ortiz & Concha Peláez (2011) desarrollaron el diseño de un experimento para el cálculo teórico de emisiones de CO₂ generadas por cuatro tipos de preparación del suelo para un cultivo de caña de azúcar. El cálculo de las emisiones generadas por dichos tipos de preparación de suelos se desarrolló con base en el consumo de combustible de los tractores empleados en la ejecución de las labores de cada tipo de preparación, teniendo en cuenta la composición del combustible colombiano y las emisiones esperadas según el porcentaje de cada elemento contenido en su composición, bajo el supuesto de que el combustible se quema completamente. Presentando así, un punto de partida para el desarrollo de este proyecto que, con mediciones en campo, busca contrastar los resultados obtenidos en el cálculo teórico, así como considerar también las emisiones generadas en el proceso de mineralización natural del suelo.

Con el experimento desarrollado, los autores encontraron que al preparar 0,5 Ha. de suelo en una hacienda, la disminución en CO₂ por la utilización de labranza reducida es de un 64.8% con respecto a la liviana 1, 61,9% con respecto a la liviana 2 y 51,08% con respecto a la liviana 3. De esta manera se pudo concluir que la utilización de labores de preparación reducida disminuye el consumo de combustible, reduciendo la emisión de los gases generados por la combustión, manteniendo o aumentando la calidad de dichas labores, y representando un beneficio económico en el costo de ejecución de las labores.

Ahora, con la inclusión del muestreo para determinar la emisión de gases efecto invernadero por medio de cromatografía de gases, y la medición directa de las emisiones generadas por los tractores empleados en la ejecución de las labores de preparación de suelo, se busca ampliar el espectro de las investigaciones desarrolladas hasta el momento, permitiendo la exploración en el comportamiento de los GEI y la identificación de aquellos a quienes se puede atribuir la mayor contribución a la huella de carbono generada en el desarrollo de los procesos de campo, específicamente en la preparación de suelos del Ingenio objeto de estudio.

1.2 MARCO TEORICO

Según la definición del panel intergubernamental de cambio climático, los Gases Efecto Invernadero (GEI) son gases de la atmosfera, de origen natural o antropogénico que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de

onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la tierra, la atmosfera y las nubes. Propiedad que genera el efecto invernadero.

El cambio climático, por su parte, es una consecuencia del efecto invernadero causado por la acumulación de gases en la atmósfera. Dichos gases efecto invernadero (GEI), absorben la radiación que emite la tierra y atrapan el calor, impidiendo que la energía se traslade al espacio, generando así un incremento en la temperatura de la misma (Frohmann, Herreros, Mulder, & Olmos, 2012).

La comisión Económica Para América Latina y el Caribe (CEPAL), en su guía práctica de huella de carbono y exportaciones de alimentos (Frohmann et al., 2012), define la huella de carbono como un indicador de la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) generados y emitidos por una empresa o durante el ciclo de vida de un producto a lo largo de la cadena productiva, a veces incluyendo también su consumo, recuperación al final del ciclo y su eliminación (algunos autores lo denominan de la cuna a la tumba o de la tumba a la tumba). Por lo general y a partir de los acuerdos firmados en tratados internacionales como el protocolo de Kyoto, los gases considerados en dicho indicador son: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6).

Para llevar a cabo el cálculo de la huella de carbono, existen diferentes metodologías que han sido desarrolladas para facilitar el inventario y contabilización de la huella de carbono generada por los procesos productivos de las empresas, sin embargo, todas han sido desarrolladas con base en la metodología propuesta por el panel intergubernamental de expertos en cambio climático, publicada en el documento directrices del IPCC 2006 para los inventarios nacionales de gases efecto invernadero, en cuyo primer capítulo se presenta la metodología de trabajo descrita en la el Mapa 1. De acuerdo con dicha metodología, este proyecto de investigación iniciará con la documentación de los procesos de preparación de suelo para el cultivo de caña de azúcar con el objetivo de poder identificar las fuentes de emisión de GEI. Posteriormente se seleccionará el método de recolección de los datos requeridos para la estimación de la huella de carbono, siguiendo con el muestreo exploratorio en campo, de las emisiones generadas durante la operación de los procesos en condiciones normales. A continuación se compilarán los datos y se desarrollará la estimación de la huella de carbono, para terminar con el análisis de la incertidumbre de los resultados obtenidos, así como de las fuentes críticas sobre las que se deben ejecutar acciones de reducción.

Para la recopilación de los datos, se seguirán los lineamientos para inventarios nacionales, presentados por el IPCC 2006 en el volumen 3: Energía, en la categoría de combustión móvil, así como en el volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de tierra (AFOLU) en la categoría de uso de tierra. Analizando

compactadas resultantes de la deficiente preparación de los suelos y del tráfico de la maquinaria. Las labores para la preparación de suelo son: Descepada, Subsolado, Arada, Rastrillada y Surcada (Rodríguez, C.A. y Daza, O.H., 1995), las cuales, junto con la aplicación de materia orgánica como: vinaza, compost, lodos, y el encalle de residuos, disponen el suelo para responder a las necesidades nutritivas de la caña de azúcar.

Después de la surcada, el suelo está listo para recibir la semilla. La siembra, se hace con la variedad de caña que mejor se adapta a la zona agroecológica, depositando trozos de tallo de 60 cm de largo, cada uno con dos a tres yemas sanas, que darán origen a las nuevas plantas. Se depositan de 7 a 8 ton de semilla por hectárea sembrada. Luego se tapa manual o mecánicamente con una capa de suelo de 5 centímetros de espesor y se aplica el riego de germinación bien sea por surcos o por aspersión. Los trozos de caña provienen de semilleros, a los que se les da un manejo especial, buscando variedades puras y sanas. Una vez establecido el cultivo, se hacen riegos de levante, aproximadamente cada 30 días. El manejo de las malezas en cañas convencionales se realiza químicamente dos veces, a los 30 y 60 días aproximadamente en plantillas y una vez más a los 45 días aproximadamente, en socas.

1.2.1 Emisiones del suelo

La materia orgánica del suelo depende del aporte de material orgánico que se haga al mismo, así como de la velocidad con la que dicho material se descompone. Según investigaciones citadas por (Madero Morales et al., 2010) en el capítulo de organismos del suelo, el contenido de materia orgánica del suelo depende del clima, la vegetación, el relieve, el material parental y el tiempo. Esta materia se puede clasificar en dos grupos: los restos orgánicos y las sustancias húmicas. Los restos orgánicos son aquellos provenientes de plantas, animales y microorganismos, los cuales se descomponen por efecto de la mineralización y, como consecuencia de la respiración de los microorganismos del suelo, producen CO₂. Las sustancias húmicas por su parte, son transformaciones, no mediadas por la vida, de los restos vegetales y animales generados por los restos orgánicos, la cual, a medida que avanza produce una disminución continua de la relación C/N.

El proceso microbiano por medio del cual el nitrógeno del suelo es convertido de forma orgánica a formas inorgánicas se denomina mineralización y generalmente ocurre de forma concurrente con la conversión de nitrógeno inorgánico a orgánico, proceso que se denomina inmovilización. Una alta concentración de carbono de fácil disponibilidad para los microorganismos determina una tasa de inmovilización mayor que de mineralización, lo que se traduce en una menor disponibilidad de nitrógeno para las plantas. La transformación del nitrógeno amoniacal (NH₄⁺) a nitrito (NO₂⁻) y luego a nitrato (NO₃⁻), se denomina nitrificación y en términos químicos es un proceso de oxidación, el cual es llevado a cabo, típicamente, por

bacterias aeróbicas autotróficas que utilizan el sustrato nitrogenado sobre el que actúan como fuente de energía y toman CO₂ como fuente de carbono(Madero Morales et al., 2010).

De forma paralela al proceso de nitrificación, se desarrolla también un proceso de desnitrificación, proceso microbiano por el cual el nitrógeno en forma de nitrato es reducido a formas gaseosas, principalmente óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N₂O) y eventualmente nitrógeno elemental (N₂). Este proceso remueve del suelo dos formas químicas del nitrógeno que directa o indirectamente estarían disponibles para las plantas, pasándolas a la atmósfera, por esta razón puede considerarse como uno de los principales factores determinantes de la baja eficiencia de los fertilizantes nitrogenados aplicados al suelo, pues algunos estudios estimativos señalan que, dependiendo de las prácticas de manejo, las pérdidas de nitrógeno por desnitrificación pueden llegar a representar el 70% del fertilizante nitrogenado aplicado(Madero Morales et al., 2010).

Es así como la mineralización de los suelos gestionados, es un proceso natural que juega un papel importante en el ciclo del nitrógeno dado que convierte el amoniaco a su forma más oxidada, facilitando su asimilación en la planta (Salazar-Sosa et al.), pero en esta secuencia de reacción se genera óxido nitroso, el cual se fuga de las células microbianas al suelo y posteriormente a la atmosfera(IPCC, 2006). De acuerdo al cálculo desarrollado por (Yuttitham et al., 2011) en su estudio aplicado a las fincas productoras de caña de azúcar en Tailandia, las emisiones directas relacionadas con el uso de fertilizantes son, en promedio de 426.3kgCO₂eq/ha, de las cuales el 98.31% corresponden a emisiones generadas por el uso de fertilizantes sintéticos.

1.2.2 Emisiones por combustión

En cuanto a las emisiones por combustión, los tractores utilizados en actividades agrícolas como el cultivo de caña de azúcar, cuentan con motores de 108hp a 220hp que alcanzan su máxima potencia a 1800rpm y 2250rpm con consumos de combustible diésel entre 2.5gl/h y 13gl/h, dependiendo del tipo de suelo y la actividad que se esté desarrollando. Según un estudio realizado por (Arapatsakos I & A. Gemtos, 2008) la calidad del combustible afecta fuertemente las emisiones del motor, pues de éste dependen los HC¹, CO y el material particulado emitido. En el experimento presentado por los autores, se midieron las emisiones de un tractor con motor a 4 cilindros, mientras araba un campo de maíz y se encontró que alcanzó su máxima potencia de 44.1kW (aproximadamente 60hp) a 2800rpm, durante los cuales emitió 1.188,65ppmCO/s, 68,78ppmHC/s y 139,28ppmNO_x/s. Estos resultados, nos dan una idea del nivel de emisión de GEI que corresponde al

¹ Hidrocarburos inquemados o parcialmente quemados (HC).

empleo de tractores en los procesos de labranza, sin embargo, los autores no hacen referencia a la cantidad de CO₂ emitida y son escasas las publicaciones que hacen referencia a las emisiones directas de los tractores agrícolas, durante la ejecución de las labores de preparación, por lo tanto será necesario encontrar una metodología de medición que permita caracterizar la emisiones de los tractores empleados en las labores de preparación de este ingenio, para poder desarrollar la estimación de la huella de carbono generada por esta fuente.

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según investigaciones desarrolladas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2008), el sector agrícola es responsable del 13.5% de las emisiones de GEI generadas por el hombre, pues es uno de los principales generadores de emisión indirecta, a través de la conversión de bosques en tierras para cultivo. Sin embargo, rara vez se incluye en los inventarios de emisiones de las empresas, *dado que aún no existe un sistema comprobado para la adecuada contabilidad de dichas emisiones* (Greenhouse Gas Protocol, 2012).

Los resultados reportados en dicho informe, demuestran que las concentraciones atmosféricas de CO₂ (379 ppm) y CH₄ (1774 ppmm) en 2005 exceden con mucho el intervalo natural de valores de los últimos 650.000 años. Los aumentos de la concentración mundial de CO₂ se deben principalmente a la utilización de combustible fósil y en una parte apreciable pero menor, a los cambios de uso de la tierra. Es muy probable que el aumento en la concentración de CH₄ se deba predominantemente a la agricultura y a la utilización de combustibles de origen fósil. Por su parte, el aumento en las concentraciones de N₂O procede principalmente de los fertilizantes nitrogenados empleados en la agricultura.

En lo que respecta a la producción de caña de azúcar, según un artículo publicado por (Goldemberg, 2009), las proyecciones para el futuro indican que la biomasa representará al final del siglo XXI, del 10% al 20% de toda la energía utilizada por la humanidad. Teniendo en cuenta que de todas las opciones disponibles, el etanol de caña de azúcar tiene un mejor desempeño energético, se estima que el crecimiento de la demanda de biomasa, impacte directamente la demanda de caña de azúcar.

Según el informe de aspectos generales del sector azucarero colombiano 2012-2013 (Londoño-Capurro, 2013), publicado por Asocaña, en los últimos 7 años entraron en vigencia tratados de libre comercio con Estados Unidos, Canadá y Chile, en los que se abrió mercado para 71 mil toneladas de azúcar y 25 mil toneladas de azúcar crudo, además de la liberación total para la exportación de etanol. Para el 2013 se espera que entren en vigencia 3 tratados más: con la Unión Europea, Corea del sur y Japón. Tratados frente a los que ya hay 2 proyectos de plantas adicionales para la producción de bioetanol que buscan cubrir la demanda nacional con una mezcla de 10%, la cual se proyecta que tenga un crecimiento del 2.5% anual durante los próximos 20 años.

El sector azucarero colombiano se encuentra ubicado en el valle geográfico del río Cauca, que abarca 47 municipios desde el norte del departamento del Cauca, la franja central del Valle del Cauca, hasta el sur del departamento de Risaralda. Está conformada por 13 ingenios azucareros (Ingenio del Cauca, Ingenio Mayagüez S.A, Ingenio Central Castilla, Ingenio Maria Luisa, Ingenio Central Tumaco S.A, Ingenio Manuelita S.A, Ingenio Providencia S.A, Ingenio Pichichí S.A, Ingenio San Carlos, Ingenio Carmelita S.A, Ingenio Riopaila S.A, Ingenio Risaralda S.A., Ingenio La Cabaña S.A.), 5 de los cuales desde el 2005 cuentan con destilerías anexas para la producción de alcohol carburante.

El proceso de preparación de suelo para el cultivo de caña de azúcar, varía dependiendo del ciclo de cultivo en el que se encuentra la semilla. Cuando el cultivo es nuevo y no ha recibido ningún corte, se denomina plantilla, la cual puede recibir entre 5 y 10 cortes antes de ser renovada. Cuando la plantilla recibe su primer corte, se denomina soca y recibe un tratamiento de preparación de suelo para el levante, diferente, ya que cuenta con un sistema radicular desarrollado y en completa capacidad de funcionamiento (vea Mapa 2. Labores de Preparación de Suelos).

Para el tratamiento de las plantillas, se desarrollan 6 labores agrícolas: descepada, subsolada, derrastroarado, rastro arado, rastrillado y surcado, las cuales, dependiendo del orden y la intensidad con que se apliquen, conforman 6 tipos diferentes de preparaciones de suelo, referenciadas por Rojas Ortiz & Concha Peláez (2011) en su proyecto de grado "*Diseño de experimento para el cálculo teórico de emisiones de CO2 generadas por cuatro tipos de preparación del suelo para un cultivo de caña de azúcar*" (ver Mapa 3. Tipos de Preparación de Suelo para el Tratamiento de Plantillas).

El tratamiento de las socas, por su parte, involucra actividades como encalle de residuos, subsolado, cultivo y aporque que tienen como finalidad acondicionar los campos después de soportar el tráfico intenso de la maquinaria agrícola empleada en la cosecha. De acuerdo con Porras Gutiérrez (1995), la secuencia cronológica de estas labores comprende:

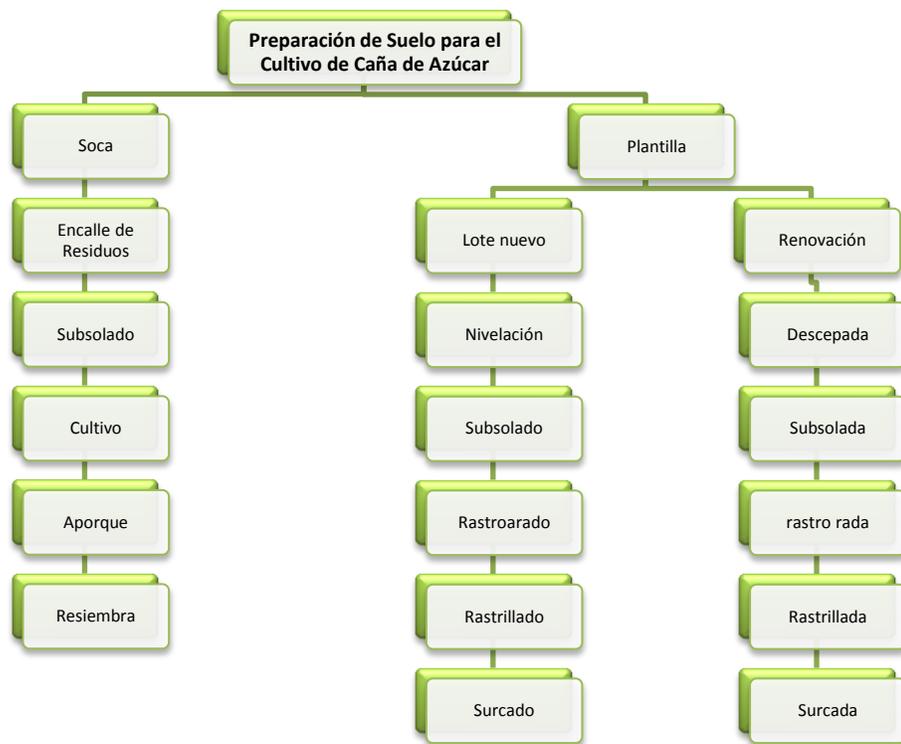
1. Quema y encalle de residuos, 2 o 3 días después de la cosecha.
2. Subsolado, según condiciones de humedad del suelo, 10 días después del corte.
3. Cultivo, se lleva a cabo inmediatamente después del subsolado.
4. Aporque, inmediatamente después del cultivo.
5. Mantenimiento de acequias.
6. Resiembra, 20 a 30 días después del corte.

La aplicación secuencial de dichas labores, según el tipo de preparación de suelo, se desarrolla mediante el empleo de tractores que generan emisiones a partir de los proceso de combustión del diésel que los mueve. Igualmente, se cree que la

preparación, estimula en el suelo un proceso de mineralización diferente al de las tierras no preparadas.

En el mapa 2 se presenta la secuencia de labores que son aplicadas al suelo, dependiendo de la etapa en la que se encuentre el cultivo, sea soca, plantilla de renovación o plantilla en lote nuevo. Por otra parte, en el mapa 3 se presentan las secuencia de labores que hacen parte de cada uno de los 6 tipo de preparación de suelos que pueden ser aplicados al suelo, antes de la siembra de plantilla, dependiendo de sus características específicas.

Mapa 2. Labores de Preparación de Suelos



Fuente: Elaboración Propia.

Mapa 3. Tipos de Preparación de Suelo para el Tratamiento de Plantillas



Fuente: (Rojas Ortíz & Concha Peláez, 2011)

Teniendo en cuenta todo el proceso de transformación que sufre el suelo como consecuencia de dichas actividades de preparación, es posible entonces, identificar dos fuentes de emisión de GEI: la mineralización del suelo gestionado con procesos de labranza y aplicación de materia orgánica; y la combustión realizada por la maquinaria empleada en el manejo de los suelos.

Actualmente existe un cálculo teórico de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) estimadas a partir del combustible consumido durante la ejecución de las labores de preparación de suelo, involucradas en cada uno de 6 tipos de preparación para el cultivo de la caña de azúcar. Sin embargo, se desconoce la cercanía de las emisiones estimadas, a las emisiones reales, medidas durante la ejecución de las labores, así como las emisiones generadas como consecuencia del proceso de mineralización que sufre el suelo preparado para el cultivo.

Por lo tanto, con este proyecto de investigación se busca estimar y medir las emisiones generadas a partir de la ejecución de las labores de preparación de suelo, desarrolladas en el ingenio objeto de estudio; provenientes tanto de los tractores utilizados en el proceso de preparación de suelo (fuentes móviles), como de los procesos de mineralización natural del mismo, bajo el esquema normal de operación de los procesos. De esta manera, se podrá desarrollar un contraste entre las distintas formas de preparación de suelo y hacer una aproximación al

porcentaje de emisiones que corresponde a cada uno de los gases estudiados:
CO₂, CH₄ Y N₂O.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir al cálculo de la huella de carbono generada en la producción agroindustrial del Valle del Cauca

3.2 OBJETIVO DEL PROYECTO

Calcular la huella de carbono generada por la ejecución de los procesos de preparación de suelo para un cultivo de caña de azúcar e identificar cuáles son los gases efecto invernadero que más contribuyen con el crecimiento de dicha huella.

3.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las fuentes de emisión de gases efecto invernadero, en los procesos de preparación de suelo de un cultivo de caña de azúcar.
- Medir los gases efecto invernadero emitidos a partir de la ejecución de las actividades: encalle de residuos, cultivo, decepada, subsolada, rastro arado, rastrillada y surcada, desarrolladas en los procesos de preparación de suelo para un cultivo de caña de azúcar.
- Determinar el porcentaje de participación en la huella de carbono de cada uno de los tipos de gases efecto invernadero identificados en las mediciones realizadas.
- Contrastar la huella de carbono obtenida mediante la medición de las emisiones de gases efecto invernadero, generadas por los procesos de preparación de suelo para un cultivo de caña de azúcar, con el cálculo teórico de sus emisiones.
- Identificar oportunidades de reducción de las emisiones de gases efecto invernadero generadas a partir de los procesos de preparación de suelo para el cultivo de caña de azúcar.

4. ALCANCES Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Este es un proyecto de tipo exploratorio que buscará medir las emisiones provenientes de la mineralización del suelo y de las fuentes de combustión móviles, ejecutados para el desarrollo de los procesos de preparación de una (1) hectárea de suelo para un cultivo de caña de azúcar de un ingenio azucarero del Valle del Cauca.

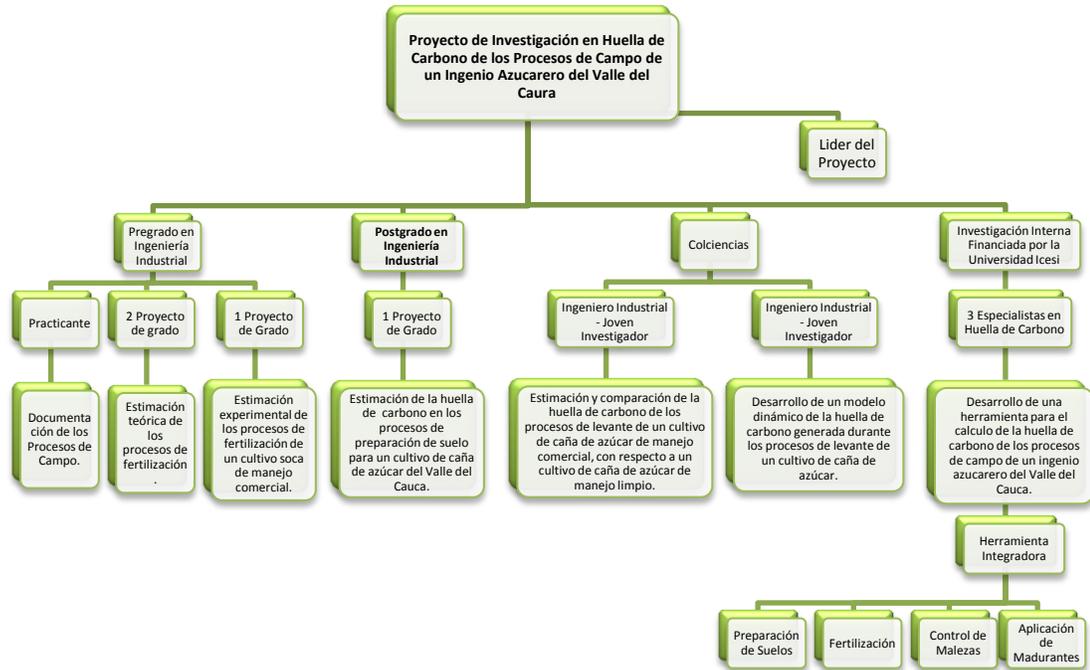
De acuerdo con el Director de Campo del Ingenio, con quien se adelantara la investigación, y la búsqueda bibliográfica realizada, actualmente no se registra documentación de mediciones realizadas a las emisiones generadas por los procesos de preparación de suelo desarrollados en el área de campo de ningún ingenio azucarero en el Valle del Cauca, por lo tanto, este proyecto de investigación presenta una nueva forma de contabilización de las emisiones producto de la mineralización del suelo y de la combustión móvil de los tractores empleados en los procesos de preparación de suelo.

Las actividades de medición estarán sujetas a la programación del ingenio y sólo involucrarán las actividades desarrolladas al interior de una (1) hectárea de suelo, específicamente. Teniendo en cuenta que dichas labores se desarrollan con contratistas, no se tendrán en cuenta las emisiones generadas como consecuencia del desplazamiento de los tractores de una suerte a otra. Así mismo, dada la disposición del ingenio objeto de estudio y la disponibilidad de los recursos requeridos para el desarrollo del proyecto, se considera viable el desarrollo de esta investigación, pero su ritmo de avance está sujeto al desarrollo de las actividades evaluadas en dicho ingenio.

Por otra parte, este proyecto de grado está enmarcado en un proyecto de investigación institucional perteneciente al grupo de investigación Icubo, que busca estimar la huella de carbono generada por los procesos de levante del cultivo de caña de azúcar. Tiene alrededor de 3 años en curso y ha sido financiado por la universidad Icesi y Colciencias. Está bajo el liderazgo del profesor Andrés López, tutor de este proyecto, cuenta con el apoyo del ingeniero Luis Eduardo Cardona, gerente de campo en el ingenio participante en el proyecto, la profesora Sory Carola Torres, profesional en bioquímica, la profesora Beatriz Sierra, profesional en biología y, Lina Marcela Rodríguez y Claudia Marcela Lubo, profesionales en ingeniería industrial y jóvenes investigadoras financiadas por Colciencias (ver el Mapa 4.). Dicho proyecto inició con un practicante del pregrado de ingeniería industrial que documentó y caracterizó todos los procesos a cargo de la gerencia de campo del ingenio, a partir de los cuales se desarrollaron tres proyectos de grado de pregrado y el presente proyecto. En el proyecto marco se integran: el proceso de preparación de suelo, analizado en este proyecto de grado de maestría, el proceso de fertilización, alimentado parcialmente por los tres proyectos de grado del pregrado de

ingeniería industrial, el proceso de control de maleza, y finalmente el de aplicación de madurantes, previo al corte de la caña.

Mapa 4. Proyecto de Investigación Integrado



Fuente: Elaboración propia

5. METODOLOGÍA

Conociendo cada uno de los procesos de preparación de suelo que son aplicados como fase inicial del proceso de levante del cultivo de caña de azúcar, se hace un análisis de las emisiones y fuentes de emisión que son empleadas en cada proceso, encontrando que con la preparación de suelos además de las emisiones generadas en el proceso de combustión que hacen los vehículos para entrar en funcionamiento, el suelo sufre un proceso de mineralización como resultado de dicho tratamiento, generando así, además del CO₂ de la combustión del diésel del tractor, emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O provenientes del suelo.

Por lo tanto, en el desarrollo metodológico del proyecto de investigación, se busca plantear la forma de medir de forma indirecta las emisiones de CO₂ que son consecuencia del uso de tractores en el proceso de preparación de suelos y, las emisiones que genera el suelo como consecuencia de su proceso de mineralización.

Para las emisiones generadas por los tractores se empleará un equipo CO₂ Meter GCH-2018 marca Luthron, que mide la presencia de CO₂ en el aire, en partes por millón (ppm) y se tendrá en cuenta la humedad y la temperatura del ambiente, para analizar el comportamiento de la concentración de CO₂ en el aire y así estimar y contrastar la huella de carbono generada por el uso de tractores en las labores de preparación.

Para la medición de las emisiones generadas por el suelo, se empleará la técnica de la cámara cerrada, utilizando una metodología desarrollada por el laboratorio de suelos del Centro de Investigación en Agricultura Tropical –CIAT, por medio de la cual se extrae una muestra de gas y se registra la temperatura y el tiempo transcurrido entre una toma y otra, para poder determinar, posteriormente el flujo de gas proveniente del suelo. Estas muestras serán analizadas por el laboratorio de suelos del CIAT, empleando cromatografía de gases y permitirán caracterizar las emisiones del suelo tras recibir un proceso de preparación, de forma que sea posible estimar la huella de carbono generada por el suelo, como consecuencia de dichos procesos.

En el proceso de mineralización de suelo, tienen incidencia factores que son difíciles de controlar y varían permanentemente, tales como: el clima, el tipo de suelo que es preparado y sus necesidades de fertilización, por lo tanto, las mediciones a desarrollar, no son extensivas a todas las hectáreas de suelo preparadas y sólo reflejan el comportamiento en un momento específico, bajo condiciones específicas, de determinado espacio de suelo.

Con las mediciones, se busca estimar la huella de carbono de los procesos de preparación de suelo y hacer una aproximación al porcentaje de emisiones que son generadas como consecuencia de la mineralización del suelo, y las del proceso de combustión móvil de los tractores empleados.

Para el cálculo de la huella de carbono, en el estudio sólo serán incluidos los siguientes GEI: el metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y dióxido de carbono (CO₂), que son los gases comúnmente generados a partir de la combustión móvil y las actividades desarrolladas en el sector de Agricultura, Silvicultura y otros usos de la Tierra (AFOLU), según las directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases efecto invernadero.

A continuación se presenta una tabla con la lista del tipo de vehículo empleado en cada tipo de preparación, su consumo promedio de combustible y las emisiones que están asociadas a la labor de preparación.

Tabla 1. Fuentes Móviles de Emisión

DIAGRAMA DE ENTRADAS Y SALIDAS					
Labor	Vehículo	Potencia	Consumo de combustible gal/h	Entradas	Emisiones
Descepada	Tractor oruga (SRX-280)-motor Cummins (2010)	280 HP	13	Combustible Diesel	~Emisiones de CO ₂ y CH ₄ directas e indirectas por combustión de maquinaria móvil. ~Emisiones de CO ₂ , CH ₄ Y N ₂ O directas del suelo, como consecuencia de la activación de sus procesos de mineralización (suelos gestionados).
Subsolado	Tractor John Deere 8420	270 HP	6	Combustible Diesel	~Emisiones de CO ₂ y CH ₄ directas e indirectas por combustión de maquinaria móvil. ~Emisiones de CO ₂ , CH ₄ Y N ₂ O directas del suelo, como consecuencia de la activación de sus procesos de mineralización (suelos gestionados).
Rastro arado	Tractor John Deere 8285	285 HP	1	Combustible Diesel	~Emisiones de CO ₂ y CH ₄ directas e indirectas por combustión de maquinaria móvil. ~Emisiones de CO ₂ , CH ₄ Y N ₂ O directas del suelo, como consecuencia de la activación de sus procesos de mineralización (suelos gestionados).
Rastrillada	Tractor John Deere 7810	175 HP	6	Combustible Diesel	~Emisiones de CO ₂ y CH ₄ directas e indirectas por combustión de maquinaria móvil. ~Emisiones de CO ₂ , CH ₄ Y N ₂ O directas del suelo, como consecuencia de la activación de sus procesos de mineralización (suelos gestionados).
Surcada	Tractor John Deere 6165	165 HP	4	Combustible Diesel	~Emisiones de CO ₂ y CH ₄ directas e indirectas por combustión de maquinaria móvil. ~Emisiones de CO ₂ , CH ₄ Y N ₂ O directas del suelo, como consecuencia de la activación de sus procesos de mineralización (suelos gestionados).
Cinzelada	Tractor John Deere 8410	235 HP	14	Combustible Diesel	~Emisiones de CO ₂ y CH ₄ directas e indirectas por combustión de maquinaria móvil. ~Emisiones de CO ₂ , CH ₄ Y N ₂ O directas del suelo, como consecuencia de la activación de sus procesos de mineralización (suelos gestionados).
Encalle de residuos	Tractor John Deere 6125	125HP	2,5	Combustible Diesel	~Emisiones de CO ₂ y CH ₄ directas e indirectas por combustión de maquinaria móvil. ~Emisiones de CO ₂ , CH ₄ Y N ₂ O directas del suelo, como consecuencia de la activación de sus procesos de mineralización (suelos gestionados).
Cultivo-Aporque	Tractor John Deere 6125	125HP	2	Combustible Diesel	~Emisiones de CO ₂ y CH ₄ directas e indirectas por combustión de maquinaria móvil. ~Emisiones de CO ₂ , CH ₄ Y N ₂ O directas del suelo, como consecuencia de la activación de sus procesos de mineralización (suelos gestionados).

Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta información, en este proyecto se plantea una metodología exploratoria de medición indirecta en campo que busca contrastar el comportamiento de las emisiones de CO₂ con relación al valor calculado de las emisiones generadas por los tractores, utilizando los factores de emisión calculados por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) para el combustible colombiano, y la metodología de cálculo planteada por el IPCC 2006 para las emisiones generadas por los procesos de combustión móvil.

Para obtener los datos de actividad del proceso de combustión de las fuentes móviles, se planteó un protocolo de medición indirecta en campo, de las emisiones generadas por los tractores durante el desarrollo de cada una de las labores de preparación de suelo, para una hectárea (1 ha) de cultivo, considerando la temperatura, la humedad relativa y dos momentos de muestreo, uno cuando el tractor está lo más cerca posible a la sonda de medición y otro cuando el tractor está en el punto más lejano de la misma, en 15 puntos específicos, durante un pase o recorrido completo de la hectárea preparada.

Para llevar a cabo el cálculo de la huella de carbono por combustión móvil, se empleó la ecuación 3.3.1 presentada en las directrices del IPCC de 2006 (ver ecuación 1.), según la cual las emisiones son iguales a la sumatoria del combustible consumido multiplicada por el factor de emisión de dicho combustible. En el caso particular de este proyecto, se contabilizó la cantidad de combustible diésel consumido por cada tractor, en el desarrollo de cada labor de preparación, y se multiplicó dicha cantidad por el factor de emisión para el diésel colombiano, definido por la UPME.

Ecuación 1. Estimación de emisiones por combustión móvil

<p style="text-align: center;">ECUACIÓN 3.3.1 ESTIMACIÓN DE EMISIONES DEL NIVEL 1</p> $Emisiones = \sum_j (Combustible_j \cdot EF_j)$

Fuente: Directrices del IPCC de 2006, volumen 3, pág. 3.33

Para estimar las emisiones por mineralización de suelos gestionados, se empleó la ecuación 11.3 de las directrices del IPCC de 2006, definida para la estimación de la emisión de nitrógeno a partir de la aplicación de fertilizantes nitrogenados orgánicos o minerales. Para aplicar dicha ecuación (ver ecuación 2), se determinó la cantidad de nitrógeno contenido en cada fertilizante aplicado y se multiplicó por el factor de emisión definido para tal fin, por el IPCC.

Ecuación 2. Emisiones por aplicación de fertilizantes nitrogenados

<p>ECUACIÓN 11.3 N DE AGREGADOS DE N ORGÁNICO APLICADOS A LOS SUELOS (NIVEL 1)</p> $F_{ON} = F_{AM} + F_{SEW} + F_{COMP} + F_{OOA}$

Donde:

F_{ON} = cantidad total de fertilizante de N orgánico aplicado al suelo. Kg N año⁻¹

F_{AM} = cantidad total de N de estiércol animal aplicada al suelo. Kg N año⁻¹

F_{SEW} = cantidad total de N de barros cloacales aplicados al suelo. Kg N año⁻¹

F_{COMP} = cantidad total de N de compost aplicada al suelo. Kg N año⁻¹

Fuente: Directrices del IPCC de 2006, volumen 4, pág. 11.13

Dado que las emisiones generadas por la urea son diferentes a las de los fertilizantes nitrogenados, para estimar las emisiones por fertilización con urea, el IPCC presenta la ecuación 11.13 (ver ecuación 3.), en la cual se presenta que las emisiones totales de CO₂, generadas por la aplicación de urea, son iguales a la multiplicación de la cantidad de urea aplicada por el factor de emisión. Dado que no se cuenta con un factor de emisión propio, en este cálculo se empleó el factor de emisión propuesto por el IPCC.

Ecuación 3. Emisiones por fertilización con urea.

<p>ECUACIÓN 11.13 EMISIONES ANUALES DE CO₂ POR APLICACIÓN DE UREA</p> $CO_2-C \text{ Emisión} = M \bullet EF$
--

Donde:

M= cantidad de fertilización con urea. Ton urea año⁻¹

FE= factor de emisión. Ton C(ton de urea)⁻¹

Fuente: Directrices del IPCC de 2006, volumen 4, pág. 11.34

Finalmente, teniendo en cuenta que la utilización de fertilizantes nitrogenados también genera emisiones por lixiviación y volatilización, de acuerdo con las directrices del IPCC, se estimó una fracción de volatilización del 10% y una fracción de lixiviación del 30% de los fertilizantes nitrogenados aplicados. Para el cálculo estas emisiones se utilizó la ecuación 11.10 (ver ecuación 4), según la cual, se debe multiplicar la fracción de fertilizante que es lixiviado o volatilizado por el factor de emisión por volatilización. Dado que no se cuenta con un factor de emisión local para dichas emisiones, el cálculo se desarrolló utilizando el factor de emisión propuesto por el IPCC.

Ecuación 4. Emisiones por lixiviación / escurrimiento

<p>ECUACIÓN 11.10 EMISIONES DE N₂O POR LIXIVIACIÓN/ESCURRIMIENTO DE N DE SUELOS GESTIONADOS EN REGIONES DONDE SE PRODUCEN ESTOS FENÓMENOS (NIVEL 1)</p> $N_2O_{(L)}-N = (F_{SN} + F_{ON} + F_{PRP} + F_{CR} + F_{SOM}) \cdot \text{Frac}_{\text{LIXIVIACIÓN-(H)}} \cdot EF_5$

Donde:

$N_2O_{(L)}-N$ = cantidad de N₂O-N producida por lixiviación y escurrimiento de agregados de N a suelos gestionados. Kg N₂O-N año⁻¹

F_{SN} = cantidad de N de fertilizantes sintéticos aplicada al suelo. Kg N año⁻¹

F_{ON} = cantidad de N de la orina y el estiércol depositada por los animales en pastoreo. Kg N año⁻¹

F_{PRP} = cantidad de N de la orina y el estiércol depositada por los animales en pastoreo. Kg N año⁻¹

F_{CR} = cantidad de N en los residuos agrícolas, incluyendo cultivos fijadores de N y de la renovación de forraje/pastura, devuelta a los suelos. Kg N año⁻¹

F_{SOM} = cantidad de N mineralizado en suelos minerales relacionada con la pérdida de C del suelo, como resultado de cambios en el uso o la gestión de la tierra. Kg N año⁻¹

Fuente: Directrices del IPCC de 2006, volumen 4, pág. 11.23

En la tabla 2 se presenta la lista de factores de emisión que fueron utilizados en el cálculo teórico de la huella de carbono y en la tabla 3 se presenta el potencial de calentamiento global de cada uno de los gases, a un horizonte de 100 años, publicados por el IPCC (2007).

Tabla 2. Factores de emisión

FACTORES DE EMISIÓN	
Aportes de N ₂ O por uso de fertilizantes minerales	0,01 kg N ₂ O-N/ha/año
Aportes de CO ₂ por utilización de Urea	0,2 kg C/kg Urea/año
Volatilización y re deposición de nitrógeno	0,01 kg N ₂ O-N/ha/año
Lixiviación o escurrimiento de nitrógeno	0,0075 kg N ₂ O-N/ha/año
Aporte de CO ₂ por combustión de Diésel Colombiano	300539 CO ₂ mg/m ³

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Potenciales de calentamiento global

POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (horizonte de 100 años)	
CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	298

Fuente: IPCC 2007. Consultado el 11 de abril de 2014 en:

http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html

6. DESARROLLO DEL PROYECTO

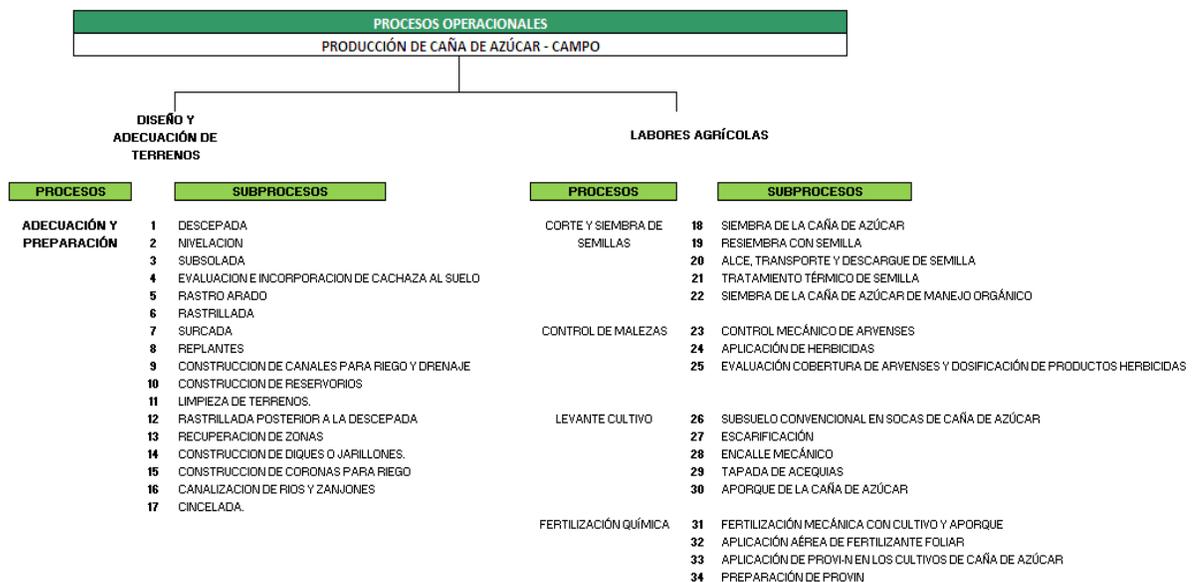
6.1 PROCESOS OPERACIONALES

La estructura operativa del ingenio azucarero se encuentra dividida en cinco áreas: Campo, Cosecha, Fábrica, Destilería y Cogeneración. Las labores de preparación de suelo están agrupadas dentro del proceso operacional de diseño y adecuación del terreno, el cual está a cargo del área de campo.

La adecuación del suelo se inicia con un levantamiento topográfico con un equipo de alta precisión denominado estación total, que facilita el diseño y el cálculo de los movimientos de tierra. Cuando el terreno es nuevo para el cultivo de caña, se inicia con la limpieza y luego se nivela usando normalmente tractores de oruga. Posteriormente se prepara el suelo.

En el mapa 5. Procesos operacionales, se enumeran cada una de las labores o subprocesos que hacen parte de las actividades de diseño y adecuación de terrenos, y las labores agrícolas, a cargo del área de campo.

Mapa 5. Procesos Operacionales



Fuente: (Lopez Bryan, 2012)²

² Informe interno de estimación de la huella de carbono para el área de campo en la producción de caña.

Teniendo en cuenta que se busca calcular la huella de carbono de los procesos que se desarrollan de forma repetitiva o cíclica en el proceso de cultivo de caña de azúcar y no todos los procesos de diseño y adecuación de terreno se repiten cada que se va a hacer el levante de un nuevo cultivo, sólo se analizará el impacto de las actividades de preparación de suelos, tales como: descepada, subsolada, rastro arado, rastrillada, surcada, cincelada, encalle de residuos, cultivo y aporque, las cuales se aplican al suelo, después de la cosecha, ya sea para la siembra de plantillas o el levante de socas, dependiendo de las necesidades específicas de cada tipo de cultivo.

6.1.1 Labores de preparación de suelos para manejo de plantillas

A continuación se describen cada una de las labores de preparación de suelo, con el fin de identificar las fuentes de emisión de GEI y los puntos clave a tener en cuenta durante la contabilización y cálculo de las emisiones generadas por la implementación de estas actividades.

Proceso de Descepada

Es la primera de las labores de preparación de suelo y consiste en la destrucción e incorporación al suelo de los residuos de cultivos anteriores. En esta labor, se utilizan normalmente rastro-arados con un número variable de entre 10 y 28 discos, con diámetros entre las 28 y 32 pulgadas. Para su desarrollo, se ejecuta un pase en dirección de los surcos existentes, seguido de otro pase en dirección perpendicular al primero. De la calidad de esta labor, además de la germinación del cultivo, depende el rendimiento en la ejecución de otras labores posteriores. En esta labor es común el empleo de tractores oruga de 140 a 165 HP y enllantados de 225 a 450 HP.

Ilustración 1. Descepada



Fuente: (Ballesteros & Sotelo, 2013)

Proceso de subsolado

Esta labor se ejecuta después de la nivelación y consiste en fracturar el suelo hasta una profundidad de 50 a 60cm, con el objetivo de destruir capas compactadas y mejorar el flujo del aire y el agua a través del suelo, para el buen desarrollo radical del cultivo. La calidad del subsuelo se mide por el grado de fracturación y depende del contenido de humedad y la textura del suelo, la velocidad de operación, el equipo utilizado y el patrón que se siga en el campo. Los suelos de textura liviana, superficiales o con estratos de arena o grava, o requieren subsolado.

Para esta labor se emplean subsoladores rectos o curvos con 3 o 5 vástagos subsoladores de 60 cm de longitud, separados 0,75m a 1,5m. La potencia demandada para esta labor varía entre 140 y 150 HP para tractores de oruga y entre 200 y 375 HP con tractores enllantados.

El patrón más utilizado para los tipos de suelo del Valle del Cauca es el de implementar el primer pase en la dirección del surco propuesta y el segundo cruzado con un ángulo de 15° con relación al primero.

Ilustración 2. Subsolado



Fuente:(Ballesteros & Sotelo, 2013)

Proceso de Cincelado

Este proceso se suele hacer en tipos de terreno liviano. Teniendo en cuenta los estudios de suelos para su correcto manejo, se rompe el suelo a una profundidad de 50cm a 55cm, eliminando su compactación y facilitando el drenaje de las labores subsiguientes, además de un buen desarrollo radicular de la plantación. Se hace con subsoladores parabólicos o rectos que tengan diferentes números de brazos.

Ilustración 3 Cincelado.



Fuente: Los Autores

Proceso de rastro-arado

Es la labor que generalmente se implementa después del segundo pase de subsolado y tiene como objetivo fracturar y voltear el suelo hasta una profundidad de entre 30 y 40cm, con el objetivo de mejorar la distribución de los agregados. Su calidad está asociada con el grado de destrucción de los terrones de suelo, relacionados con el volteo e impacto del mismo, asociado con la herramienta que gira a velocidades relativamente altas. El recorrido del tractor empleado, la mayoría de las veces es perpendicular a la dirección del surco propuesta.

Ilustración 4. Rastro-arado



Fuente:(Ballesteros & Sotelo, 2013)

Proceso de rastrillada

La finalidad de este proceso es destruir los terrones grandes resultantes en las labores de rastro-arado, descepado y subsolado, para garantizar el buen contacto entre la semilla y el suelo. La calidad de esta labor depende de la herramienta utilizada y su velocidad de rotación.

Su patrón de operación incluye generalmente dos pases: el primero en dirección del surco y el segundo paralelo a éste. En esta labor normalmente se utilizan rastrillos de tiro con un número de entre 20 y 92 discos, de un diámetro entre 24 y 26 pulgadas.

Ilustración 5. Rastrillada



Fuente: Los autores

Proceso de Surcado

Consiste en hacer surcos o camas donde se coloca la semilla, en una dirección y a una distancia previamente definida. Se ejecuta con un surcador provisto de 3 vertederas y pautas dispuestas en la barra porta-herramientas, como guías para asegurar la continuidad y paralelismo entre los surcos. Su dirección y distancia depende de la topografía del sitio, en el Valle del Cauca la distancia más común entre surcos es de 1,5m a 1,8m y su profundidad varía entre 25cm y 30cm. Esta labor se ejecuta con tractores enllantados de 120 a 150 HP y doble tracción. Ocasionalmente, cuando el suelo es arcilloso, se utilizan tractores de oruga.

Ilustración 6. Surcada



Fuente: Los Autores

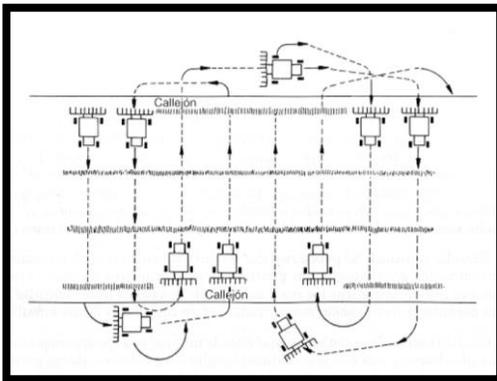
6.1.2 Labores de preparación de suelos para manejo de socas

Proceso de Encalle Mecánico de Residuos

El encalle de residuos se lleva a cabo con tractores livianos de 70HP a 80HP, con enganche hidráulico por el sistema de tres puntos, durante periodos secos. Empleando equipos que permiten hacer el encalle en forma diagonal a las líneas de los surcos. Con este sistema, los residuos pueden acomodarse a un costado de las hileras, dejando dos calles libres para obtener un encalle al 2x1.

El propósito de esta labor, es despejar los surcos y las calles, de los desechos que quedan después del corte y alce, facilitando el rebrote de la cepa y la posterior ejecución de las otras labores mecánicas de cultivo de la caña.

Ilustración 8. Recorrido del Encalle de Residuos



Fuente: (Porrás Gutiérrez, 1995)

Ilustración 7. Encalle de Residuos



Fuente: Los autores

Proceso de subsolado convencional en Socas

Esta labor se ejecuta con el fin de disminuir la compactación del suelo, consecuencia de las labores de cosecha, favoreciendo la aireación y drenaje del suelo, estimulando el crecimiento de raíces nuevas en la soca. Para esto, se fractura el suelo hasta una profundidad de 45 a 55cm, empleando un tractor con potencia entre 200 y 250 HP, con enganche hidráulico por el sistema de 3 puntos.

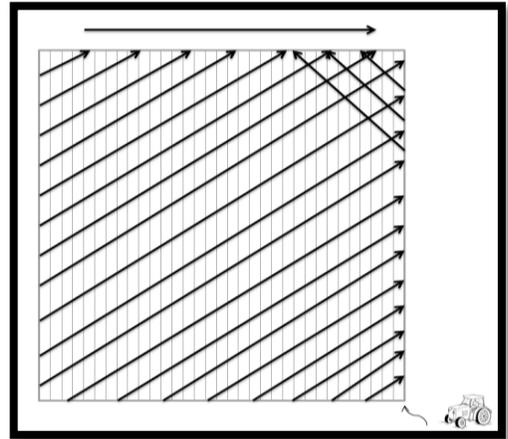
El rendimiento de esta labor, depende directamente del encalle realizado, si el encalle se encuentra al 2x1 el subsuelo abarca el 33% del área, mientras que si se realiza al 4x1 se abarca el 80% del área.

Ilustración 10. Subsuelo Convencional en Socas



Fuente:(Ballesteros & Sotelo, 2013)

Ilustración 9. Recorrido del Subsuelo



Fuente:(Ballesteros & Sotelo, 2013)

Proceso de Cultivo – Aporque

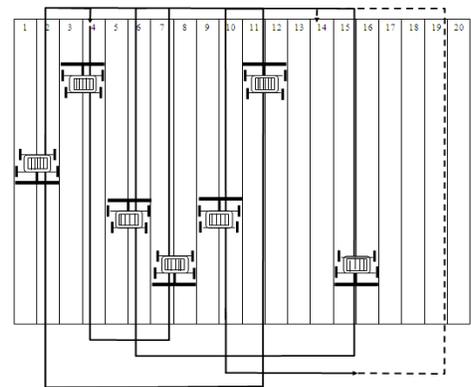
El cultivo aporque se ejecuta con un implemento de dos o tres brazos que alcanzan una profundidad entre 20cm y 25cm por calles separadas 30cm de la línea de siembra. Esta labor permite romper las capas duras superficiales, reducir la invasión de malezas y remover el suelo para mejorar la infiltración de agua y aire a la zona de raíces.

Ilustración 11. Cultivo - Aporque



Fuente: Los Autores

Ilustración 12. Recorrido del Cultivo-Aporque



Fuente: (López Bryan, 2012) 3

³Informe interno de estimación de la huella de carbono para el área de campo en la producción de caña.

6.2 PROTOCOLO DE MUESTREO DE GASES EFECTO INVERNADERO EMITIDOS AL AIRE POR LOS TRACTORES, DURANTE LOS PROCESOS DE PREPARACIÓN DE SUELO PARA EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR

Con el fin de hacer una aproximación a la cantidad de dióxido de carbono emitida bajo condiciones de campo en un cultivo comercial de caña de azúcar, ubicado en el municipio de Cerrito, departamento del Valle del Cauca, se medirá la concentración ambiental de CO₂, en partes por millón (ppm), de una hectárea de tierra, durante la ejecución de sus procesos de descepada, subsolada, rastro arado, rastrillado, cincelado, y surcado. Tomando 15 mediciones de la concentración de CO₂ durante la ejecución de cada proceso sobre una hectárea de suelo (ha), además de la temperatura y la humedad al momento de iniciar las labores.

- 1. Medición inicial de terreno a muestrear:** Una vez se conoce el sentido en el que se desarrollará el proceso a muestrear, se realiza la medición de una hectárea de terreno, teniendo en cuenta que ese es el alcance planteado para el proyecto. Cuando es posible, se mide un área de forma cuadrada de 100 m de ancho por 100 m de largo. Sin embargo, dependiendo del tipo de terreno, el área podría ser rectangular o tomar otra forma, siempre y cuando mida 10.000m².
- 2. Alistamiento de instrumento de medición:** Antes de que se inicien las labores de campo, se enciende el medidor de CO₂ conectado a la sonda para medición de la humedad, se esperan aproximadamente 2 minutos a que se estabilice la medición y se registra la medida del porcentaje de humedad en el ambiente. Posteriormente, se apaga el medidor y se conecta a la sonda de medición de CO₂ y Temperatura. Una vez conectado, se enciende nuevamente, se espera aproximadamente 2 minutos a que se estabilice la medición, se registra la temperatura y, simultáneamente al inicio de las labores de preparación de suelo, se presiona el botón REC del equipo, para que este registre la concentración de CO₂ más alta y la más baja, durante el periodo de muestreo.
- 3. Información de inicio de muestreo:** Antes de iniciar las labores, se debe registrar el tipo de vehículo, el valor inicial del odómetro del vehículo con el que se llevará a cabo la labor, su velocidad promedio, su consumo promedio de combustible y la hora de inicio de ejecución de la labor.

- 4. Toma de muestras:** Para realizar las mediciones, es necesario ubicarse en el punto más cercano posible al tractor que está desarrollando la labor. Teniendo en cuenta que no se puede permanecer siempre al lado del tractor, dado su velocidad de trabajo, la persona que está desarrollando el muestreo, deberá ubicarse a un costado de la hectárea y registrar las mediciones del momento en el que el tractor está más cerca y del momento en el que está más lejos del punto de medición, momento en el que el tractor reduce su velocidad para cruzar y regresar, hasta completar las 15 mediciones de la hectárea correspondiente al muestreo. Durante las mediciones que se han realizado, se ha observado que cuando el tractor está más cerca del equipo, la concentración en ppm es menor que cuando está más lejos del punto de medición. Debe tenerse en cuenta que las mediciones que realizan en campo abierto y el viento tiene una alta incidencia en la concentración medida de CO₂.
- 5. Información de finalización de muestreo:** Al finalizar las labores de preparación de suelo, se registra nuevamente la marcación del odómetro y la hora de finalización de las labores.

6.3 PROTOCOLO DE MUESTREO DE GASES EFECTO INVERNADERO EMITIDOS POR EL SUELO, DESPUÉS DE LA EJECUCIÓN DE LOS PROCESOS DE PREPARACIÓN DE SUELO PARA EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR

Con base en el protocolo para muestreo de gases de efecto invernadero mediante la técnica de cámara cerrada, desarrollado por el CIAT en el marco del proyecto “Análisis integral de sistemas productivos en Colombia para la adaptación al cambio climático”⁴, se estableció el siguiente protocolo de muestreo de GEI emitidos por el suelo, con el cual se llevó a cabo el muestreo de tres hectáreas de suelo, en 3 suertes diferentes, ubicadas en el Valle del Cauca, después de haber recibido la ejecución de las labores de preparación de suelo.

- 1. Medición inicial del terreno a muestrear:** Una vez se conoce el terreno a evaluar, se mide y se demarca un área cuadrada o rectangular de 10.000m², sobre la que, en dirección diagonal, se ubicarán las cámaras de muestreo. Teniendo en cuenta el tamaño de cada lado y utilizando el teorema de Pitágoras ($h^2=c^2+c^2$) se calcula la distancia diagonal que atraviesa el área a muestrear. Dado que la primera y la última cámara deben tener al menos 5m de distancia entre el límite del área y la cámara, al valor de la diagonal se le restan 14m y se divide entre 5, operación que indicará la distancia a la que debe ser ubicada cada cámara para cubrir de manera uniforme, el terreno a evaluar.
- 2. Instalación de las cámaras de muestreo:** La cámara de muestreo consiste en 2 anillos de PVC, una base, una tapa de aproximadamente 25cm de diámetro y 10cm de altura, con dos tapones en la parte superior, y una banda de caucho.
La base del primer anillo se ubica a 5m de distancia de ambas partes laterales de la hectárea medida, sobre el surco de siembra, donde se entierra a 5cm de profundidad, cuidando que quede lo más horizontal posible. Posteriormente y a partir de ahí, se mide la distancia calculada a la que será ubicada la siguiente cámara, siempre en dirección diagonal, y se ubican las otras 5 cámaras, siguiendo esta metodología. Antes de instalarse la última cámara, debe revisarse que haya una distancia de al

⁴ Protocolo desarrollado por el CIAT en el marco de un proyecto de investigación respaldado por el ministerio de agricultura y Fenalce.

menos 5 m desde cada costado del área medida hasta el punto donde será ubicada la cámara.

Los anillos base se entierran en el suelo y se dejan de forma permanente durante el periodo en el que se tomarán muestras del flujo de gases del suelo, de forma que, cada que se vaya a realizar un muestreo, se conserve el lugar donde se tomó la primera muestra.

El anillo tapa cuenta con una banda para sellar herméticamente la cámara y 2 tapones de caucho, uno para instalar el termómetro y otro para sacar las muestras de gas; este anillo sólo se ubica sobre la base, al momento de iniciar el proceso de muestreo y se lleva al lugar de muestreo, cada que se van a extraer muestras. Los cauchos deben ser cambiados, preferiblemente cada que se vayan a extraer muestras, de forma que se conserve lo más herméticamente posible el interior de la cámara.

- 3. Alistamiento de implementos a utilizar:** Una vez instaladas todas las cámaras, se deja en cada una de ellas, una tapa con el termómetro instalado, un cronómetro y 4 viales con vacío.
- 4. Toma de muestras:** La toma de muestras se hace con una jeringa de 20ml en la que se instala una válvula de paso y una aguja pequeña. Para iniciar el muestreo, la jeringa debe estar vacía, con el embolo completamente adentro, y la mariposa de la válvula de paso debe estar abierta (paralela a la jeringa). La periodicidad de la toma de la muestra depende de la ubicación de las cámaras y la facilidad del desplazamiento entre una y otra. Teniendo en cuenta que el desplazamiento al interior del terreno tiene cierto grado de dificultad, las muestras serán tomadas con intervalos de tiempo de 20 minutos, tiempo requerido para muestrear las 6 cámaras y llegar nuevamente a la primera cámara. A continuación se describe la secuencia de ejecución del muestreo:
 - a.** Se revisa que al interior de la cámara haya la menor cantidad de maleza posible, de forma que la muestra no se vea afectada. En caso de que haya maleza u otro elemento extraño, este debe ser cortada u extraído, procurando mover lo menos posible el suelo.
 - b.** Se programa el cronómetro con el tiempo del intervalo de muestreo, el cual, para este caso fue de 20 minutos.
 - c.** Se ubica la tapa sobre la cámara base, sellando perfectamente con la banda de caucho y cuidando que la punta del termómetro no tenga contacto con la superficie del suelo.

- d. Se inserta completamente la aguja en el tapón, se toman 20 ml de aire, se expulsan dentro de la cámara y se repite este procedimiento 2 veces más, con el fin de homogeneizar los gases dentro de la cámara.
- e. Después de los 3 bombeos, se toman 20ml de aire, se cierra la válvula de forma que la mariposa quede horizontal y se retira la aguja, sosteniendo el tapón para evitar el escape de los gases acumulados.
- f. Se abre la válvula, se retiran 5ml de aire, se cierra nuevamente y los otros 15ml que quedan en la jeringa, son depositados en el vial con vacío. Para poder introducir estos gases en el vial, se debe retirar la tapa de aluminio e insertar la aguja en el vial, posteriormente se abre la válvula y se verifica que el vial tenga vacío, dejando que el vacío del vial extraiga el aire que está al interior de la jeringa. Si el aire no es extraído por el vial, significa que el vial no tiene vacío y debe ser reemplazado por otro.
- g. Una vez extraída y almacenada la muestra se activa el cronometro.
- h. Se marca el vial con el número de cámara, fecha de muestreo, tiempo transcurrido desde el inicio del muestreo y temperatura.
- i. Posteriormente se continúa con el muestreo de las siguientes 5 cámaras, asegurándose de tener tiempo para regresar a la primera cámara, a tomar la segunda muestra de esa cámara, antes de que hayan pasado los 20 minutos.

5. Análisis de muestras: al finalizar el muestreo, se destapan las cámaras, se guardan los termómetros, se guardan los cronómetros y se empaacan las muestras para ser entregadas, en el menor tiempo posible, al laboratorio que hace el análisis por medio de cromatografía de gases.

6. Registro de información: Durante el periodo de muestreo, es importante registrar los cambios en el clima, las condiciones alrededor de cada cámara, los incidentes ocurridos durante el muestreo y cualquier eventualidad que pueda afectar los resultados de las muestras.

6.4 RECOPIACIÓN DE DATOS

6.4.1 Mediciones en aire

6.4.1.1 Proceso de Descepada:

El proceso de descepada fue realizado con un tractor oruga SRX-280, motor cummis modelo 2010.

El recorrido de una hectárea le tomó al tractorista un tiempo de 60 minutos por pase, tiempo en el cual tuvo un consumo promedio de 13gl/h. El muestreo fue realizado a una temperatura de 36.6°C en un día soleado sobre un suelo de tipo limoso arcilloso, el cuál es de consistencia húmeda y pesada.

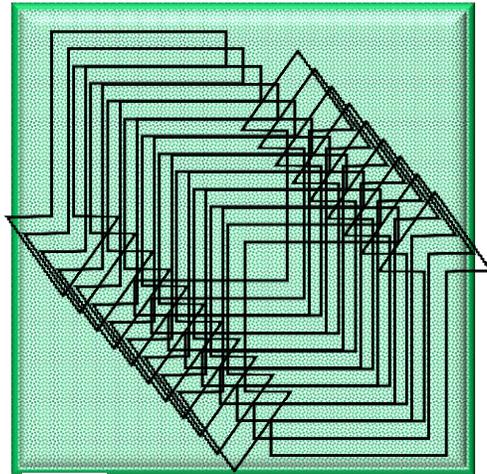


Al finalizar las mediciones se obtuvo que el nivel promedio de la concentración de CO₂ en el ambiente fue de 321ppm/ha, equivalentes a 4,87x10⁻⁷tonCO₂-eq, con una desviación estándar de 19ppm/ha.

Al graficar los datos (ver gráfica 1), se puede observar que el nivel de concentración del CO₂ está entre 290ppm y 360ppm, con un crecimiento constante hasta la décima medición, cuando empieza a descender hasta un nivel de 310ppm/ha, esta variación podría ser una consecuencia de un cambio en el clima, pues, dado el método de medición, el nivel y la dirección del viento puede tener incidencia significativa en el valor de la concentración de CO₂ en el ambiente.

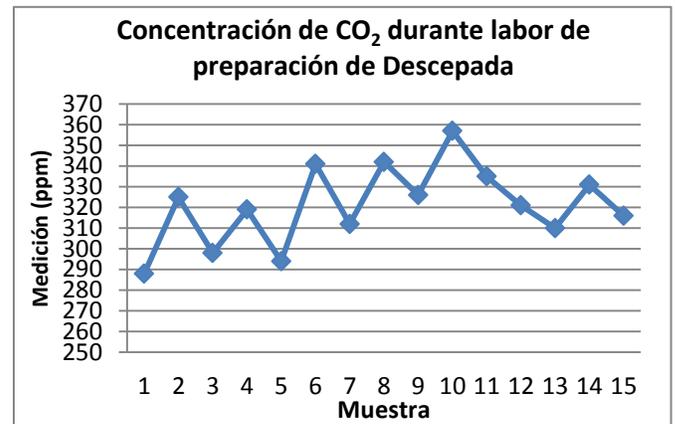
En la ilustración 13 se presenta el recorrido seguido por el tractor, el punto de partida del tractor y una representación de la forma como se toman las mediciones durante la ejecución de la labor.

Ilustración 13. Diagrama del recorrido del proceso de decepada



Fuente: Los Autores

Gráfica 1. Resultados de las mediciones del proceso de decepada



Fuente: Elaboración propia

6.4.1.2 Proceso de Subsulado:

El proceso de subsulado se llevó a cabo empleando un tractor Jhon Deere 8420 que consume aproximadamente 6gl/h de combustible diésel y se tomó 1,7h en cubrir completamente la hectárea, de un suelo tipo limoso arcilloso, con el recorrido establecido para esta labor.

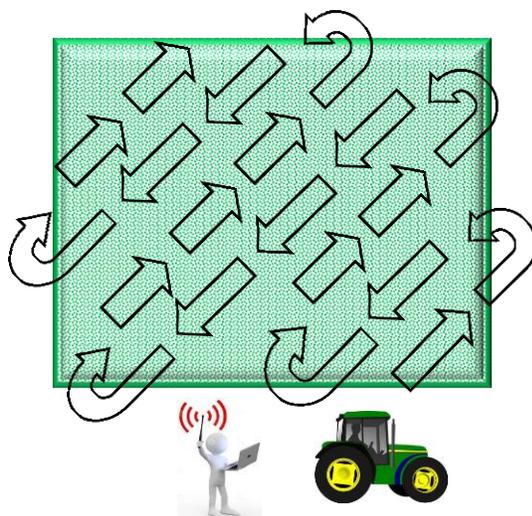
El nivel promedio de la concentración de CO₂ en el ambiente fue de 336ppm/ha, equivalentes a $5,1 \times 10^{-7}$ tonCO₂.eq, a una temperatura promedio de 34,9°C, con una desviación estándar de 53,98ppm.



Analizando los resultados de este muestreo en aire (ver gráfica 2), se puede observar una alta variabilidad en el nivel de emisiones de CO₂ en el ambiente, el

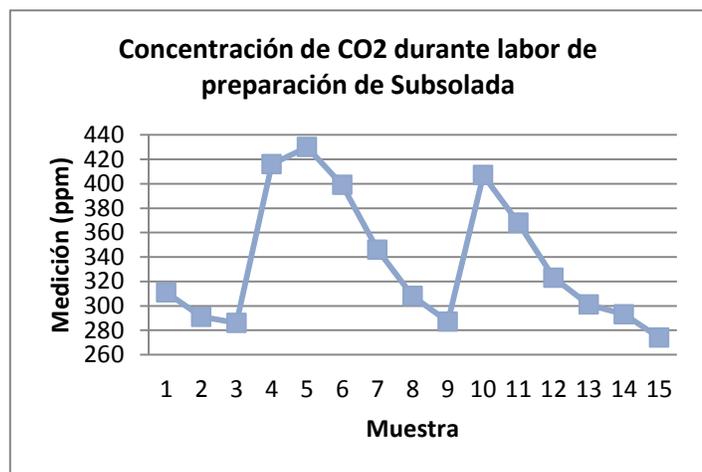
cuál en la quinta y la décima medición muestra picos de concentración, siendo la quinta medida, la más alta de todas, con una concentración de CO₂ de 430ppm/ha. Esta variabilidad en las medidas, podría estar relacionada con las condiciones del suelo al momento de ser efectuada la labor, así como el recorrido y los cambios de potencia que debió hacer el tractorista al extremo de cada tramo, cuando reduce su velocidad a cero para dar la vuelta y continuar con el desarrollo de la actividad. Igualmente, estos picos podrían estar relacionados con la distancia existente entre el tractor, la antena de medición y la dirección del viento al momento de la medición.

Ilustración 14. Diagrama del recorrido de la labor de Subsollada



Fuente: Los Autores

Gráfica 2. Resultados de las mediciones de la labor de subsollada



Fuente: Elaboración propia

6.4.1.3 Proceso de Cincelado:

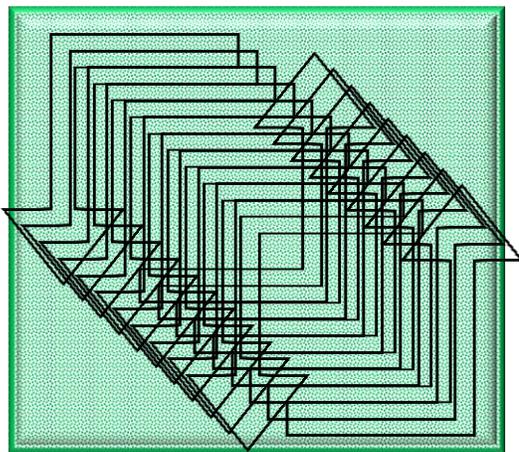
El muestreo en aire del proceso de cincelado se hizo a una temperatura promedio de 31°C y una humedad relativa de 61,20% en un terreno franco arcilloso, con un tractor Jhon Deere 8410, el cual consume un promedio de 7gl/h de combustible diésel.

El tiempo que se tomó el tractorista en cubrir la hectárea de suelo desarrollando la labor de cincelado, fue de 30 minutos, tiempo durante el cual se registró un nivel promedio de CO₂ de 283 ppm/ha, equivalentes a $4,29 \times 10^{-7}$ ton CO₂-eq, con una desviación estandar de 19,8ppm/ha.



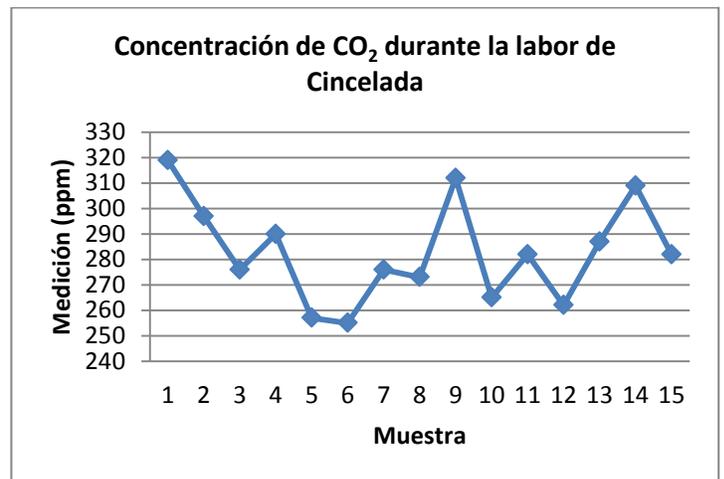
De acuerdo con los resultados del muestreo, se puede observar (ver gráfica 3) que el nivel de la concentración de CO₂ en el ambiente no tiene un patrón determinado, se mantiene constante alrededor de las 283ppm. Inicia con su máximo valor de concentración en 320ppm y alcanza a bajar hasta un nivel de 255ppm. El comportamiento de la concentración de CO₂ podría estar explicado por el nivel y la dirección del viento, así como la variación en las velocidades del tractor. Sin embargo, no se cuenta con información que permita evidenciar la forma como estos factores inciden sobre los resultados obtenidos.

Ilustración 15. Recorrido de la labora de cincelado



Fuente: Los Autores

Gráfica 3. Resultado de las mediciones de la labor de cincelado



Fuente: Elaboración propia

6.4.1.4 Proceso de Rastro-arado:

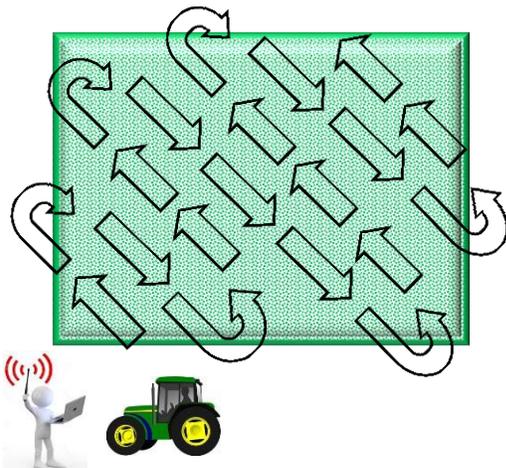
El proceso de rastro arado, se llevó a cabo sobre un terreno franco arcilloso, empleando un tractor Jhon deere 8285, que tardó 27 minutos en cubrir completamente la hectárea con la labor planeada, teniendo un consumo promedio de 1 gl/h de combustible diésel, a una temperatura promedio de 32,4°C y una humedad relativa de 61,2%.



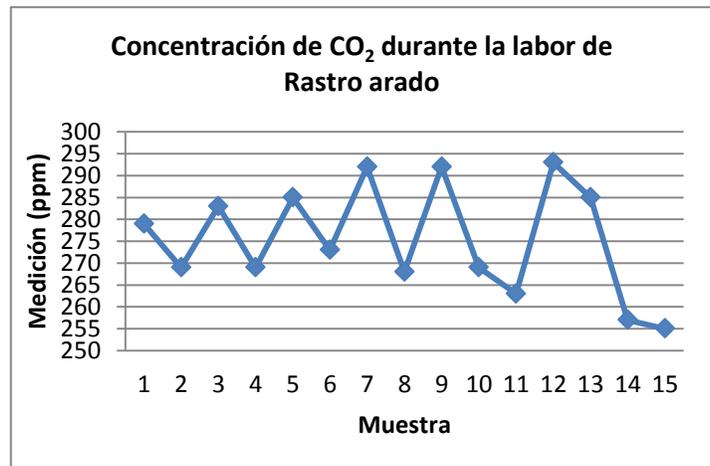
El nivel promedio de la concentración de CO₂ durante la ejecución de la labor fue de 275ppm/ha, equivalentes a $4,18 \times 10^{-7}$ tonCO₂-eq, con una desviación estándar de 12,56ppm/ha.

Analizando los niveles de concentración de CO₂ registrados durante los 27 minutos de muestreo, se puede observar (ver gráfica 4) que a medida que pasaba el proceso de rastro arado, el nivel de variación de los datos se fue incrementando presentándose un cambio en el nivel de CO₂ de 293ppm en la toma número 13, a un nivel de 255ppm en la toma número 15, cuando se registró el nivel más bajo de CO₂. Este comportamiento podría estar relacionado principalmente con la dirección y la cantidad de viento presentada al final del muestreo.

Ilustración 16. Recorrido de la labor de rastro-arado



Gráfica 4. Resultado de las mediciones de la labor de rastro-arado



Fuente: Elaboración propia

Fuente: Los Autores

6.4.1.5 Proceso de Rastrillado:

La labor de rastrillado se llevó a cabo utilizando un tractor John Deere 7810, con una potencia de 175hp que consume 6 gal/h de combustible diésel.

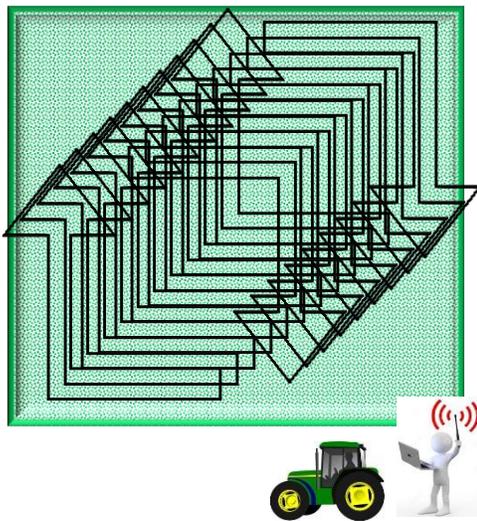
El desarrollo de un pase completo de rastrillo sobre la hectárea de suelo le tomó al tractorista 45 minutos, durante los cuales el nivel promedio de emisiones fue de 292ppm/ha, equivalentes a $4,44 \times 10^{-7}$ tonCO₂-eq, a una temperatura promedio de 30,15°C y una humedad relativa de 60.10%.



Analizando los datos (ver gráfica 5), se encontró que la desviación estándar del muestreo fue de 10,58ppm, valor que, teniendo en cuenta las condiciones de

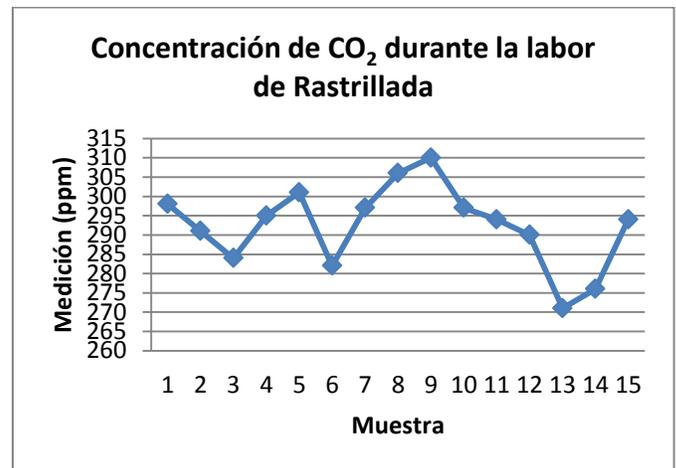
muestreo, es relativamente pequeño. En cuanto a su comportamiento, se pueden identificar dos picos de concentración, uno en la novena medición, cuando alcanzó el valor máximo concentración de CO₂ en el muestreo, a 310ppm y otra en la decimotercer medición cuando alcanzó el punto mínimo con 270ppm. Teniendo en cuenta que el nivel de remoción de tierra durante el desarrollo de esta labor, con respecto a otras como el cincelado y la decepada es relativamente bajo, podría inferirse que la oscilación presentada en el nivel de concentración de CO₂ en el ambiente, está siendo principalmente afectado por la dirección y la cantidad de viento presente durante el proceso de medición.

Ilustración 17. Recorrido de la labor de rastrillada



Fuente: Los Autores

Gráfica 5. Resultado de las mediciones de la labor de rastrillada



Fuente: Elaboración propia

6.4.1.6 Proceso de Surcado:

El proceso de surcado tomó 25 minutos en completar una hectárea de suelo y se llevó a cabo empleando un tractor John Deere 6165, con una potencia de 165hp y un consumo de combustible diésel de 4gl/h.

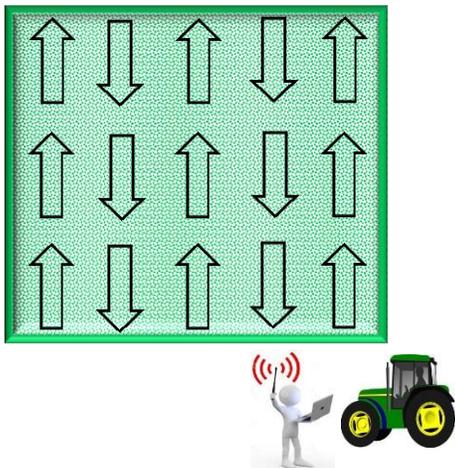
Al momento del muestreo, la temperatura ambiente promedio fue de 31.4°C, con una humedad relativa de 60.10%.

El nivel promedio de la concentración de CO₂ en el ambiente fue de 288ppm/ha, equivalentes a 4.37×10^{-7} tonCO₂-eq.



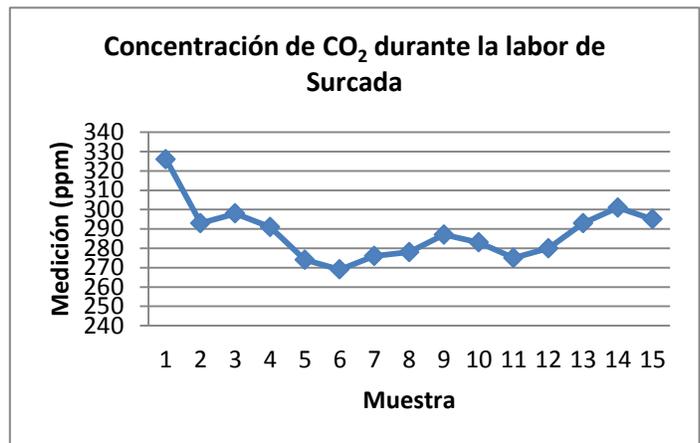
La desviación estándar de los datos fue de 14.35ppm/ha y su comportamiento fue relativamente constante (ver gráfica 6), obteniendo el valor más alto de concentración de CO₂ en la primera muestra con un valor de 325ppm/ha y el más bajo en la sexta medición, cuando alcanzó un valor de 270ppm/ha. Teniendo en cuenta el recorrido del tractor, podría atribuirse el nivel de variación a la dirección e intensidad del viento y los cambios en velocidad que realiza el tractorista para dar la vuelta y regresar con el vehículo.

Ilustración 18. Recorrido del proceso de surcado



Fuente: Los Autores

Gráfica 6. Resultado de las mediciones del proceso de surcado



Fuente: Elaboración propia

6.4.1.7 Proceso de Encalle de Residuos:

El proceso de encalle de residuos para 1 hectárea de suelo tomó un tiempo aproximado de 30 minutos y se llevó a cabo con un tractor John Deere 6125D modelo 2013, con una potencia de 270HP, empleando una herramienta de 4 discos giratorios. La velocidad promedio del tractor fue de 18km/h, con un consumo promedio de 2,5gl/h.

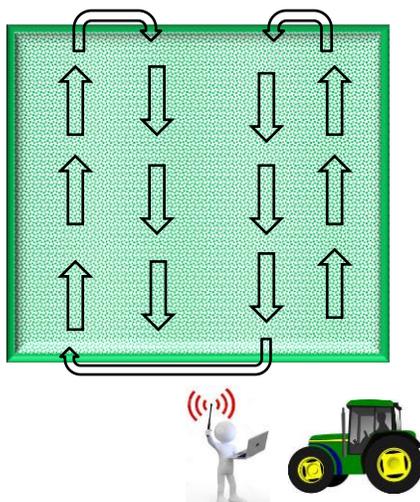


Al inicio de la toma de muestras la humedad relativa fue de 57%, a una temperatura de 29,8°C con presencia moderada de viento.

El nivel promedio de concentración de CO₂ durante la medición fue de 303,6ppm/ha, equivalentes a 4,61 x10⁻⁷ tonCO₂-eq, con una desviación estándar de 15,74.

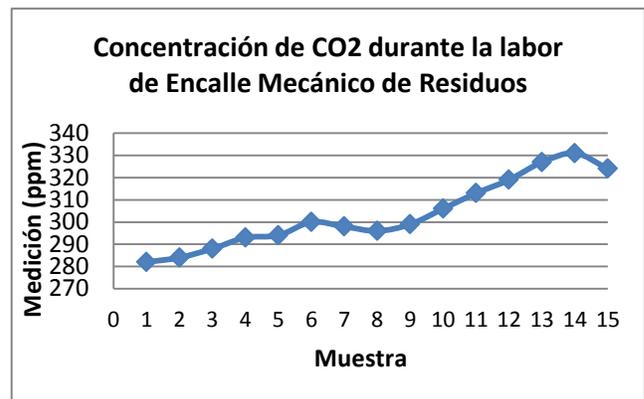
El comportamiento de las concentraciones (ver gráfica 7) muestra un incremento sostenido durante el periodo de medición, con pocas fluctuaciones, y con un valor mínimo de 280ppm y máximo de 330ppm. Este comportamiento podría estar relacionado con las condiciones del terreno, así como con la cantidad de residuos que deben ser movilizados en cada vuelta del tractor a través del surco.

Ilustración 19. Recorrido del proceso de encalle de residuos



Fuente: Los Autores

Gráfica 7. Resultado de las mediciones del proceso de encalle de residuos



Fuente: Elaboración propia

6.4.1.8 Proceso de Cultivo-Aporque:

El proceso de cultivo aporque se llevó a cabo empleando un tractor John Deere 6125D modelo 2013, con una relación de 10km/h y un consumo promedio de 2gl/h. El tiempo empleado para recorrer la hectárea completa fue de 40 minutos. La temperatura al inicio de la toma de muestras fue de 33.8°C, con una humedad relativa de 53% y bastante presencia de viento.

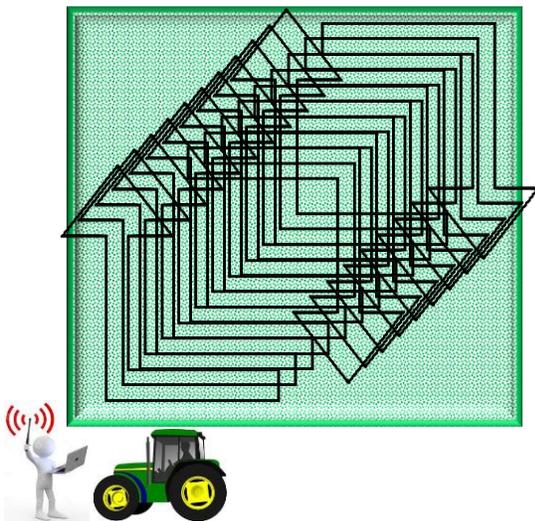
El nivel promedio de la concentración del CO₂ al



equivalentes a $4,94 \times 10^{-7}$ tonCO₂-eq, con una desviación estándar de 11,7.

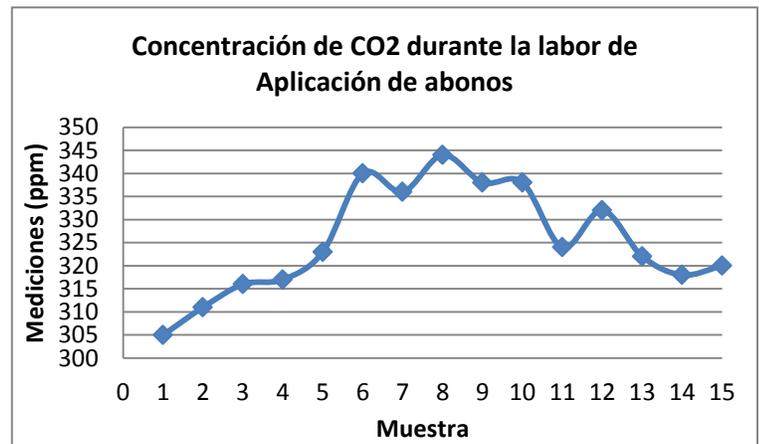
Al graficar los datos (ver gráfica 9) de la concentración de CO₂ en cada uno de los puntos de muestreo, es posible observar una tendencia creciente de las emisiones, pero sobre todo, fluctuaciones en el intermedio de la labor, las cuales pueden estar relacionadas con el trayecto del tractor y la variación en las condiciones del terreno a medida que este avanza al interior de la hectárea, como se puede observar en las mediciones 6, 8, 9 y 10 cuando la concentración de CO₂ es más alta y varía entre 344ppm y 338ppm.

Ilustración 21. Recorrido de la labor de aplicación de abonos



Fuente: Los Autores

Gráfica 9. Resultado de las mediciones de la labor de aplicación de abonos



Fuente: Elaboración propia

6.4.2 Medición de emisiones del suelo

Para llevar a cabo el muestreo de las emisiones del suelo, se seleccionaron 3 suertes donde se estuvieran realizando procesos de preparación de suelos, de forma que fuera posible medir las emisiones de gases del suelo de forma posterior a la finalización de dichas actividades. La selección de las suertes estuvo sujeta a la disponibilidad del ingenio y el presupuesto del proyecto, por ese motivo sólo se caracterizaron las emisiones de 2 socas, una de manejo comercial y una de manejo limpio, y 1 plantilla de manejo limpio.

En cada una de las suertes se midió una hectárea de suelo y se ubicaron 6 anillos de muestreo, en forma diagonal atravesando la hectárea, para extraer las muestras requeridas. En la siguiente tabla se presentan las características de cada suerte y el tratamiento que recibió de forma previa al momento de muestreo:

Tabla 4. Labores de preparación se suelo aplicadas a cada suerte.

LABOR	SOCA DE MANEJO COMERCIAL (Suerte 8 – Hacienda Unión Molina)	SOCA DE MANEJO LIMPIO (Suerte 152B – Hacienda Samaria)	PLANTILLA DE MANEJO LIMPIO (Suerte 215 – Hacienda Alizal)
Variedad	CC8592	CC-01-1228	CC-97-7170
Preparación convencional 1			X
Encalle mecánico de residuos	X	X	
Subsolada	X	X	
Cultivo Aporque		X	
Aplicación mecánica de Vinaza	X		
Aplicación mecánica de Lodos	X		
Aplicación mecánica de Compost	X		

Fuente: Elaboración propia

6.4.2.1 Cultivo de caña de azúcar tipo soca de manejo comercial

El cultivo de caña de azúcar de manejo comercial seleccionado para el muestreo de emisiones es de tipo soca y tuvo su primer corte el 29 de noviembre de 2013, fecha en la cual recibió encalle mecánico de residuos al dos por uno⁵. Tres días después, el 1 de diciembre de 2013, esta suerte, sembrada con caña de la variedad CC8592, ubicada sobre la vía Cali-Rozo en el departamento del Valle del Cauca-Colombia, recibió una aplicación de 9.000 lt/ha de vinaza, 100 kg/ha de urea y 10 ton/ha de compost. Posteriormente, el 4 de diciembre de 2013, recibió 12 ton/ha de lodos.

En la ilustración 7, se puede observar el estado inicial de la suerte, al momento de medición y delimitación de la hectárea, después de haber recibido el encalle de residuos y la aplicación de lodos, vinaza y compost. En ella se presenta la forma en la que son ubicadas las cámaras empleadas para el muestreo de los gases emitidos por el suelo, sobre la hectárea seleccionada para el análisis experimental.

⁵ Redistribución de los residuos de caña, dejando una calle con residuos y dos calles libres.

Ilustración 22. Estado inicial - Suerte 8



El 5 de diciembre de 2013, se hizo el primer muestreo de esta suerte, siguiendo el procedimiento descrito en el protocolo de muestreo de emisión de gases efecto invernadero emitidos por el suelo. De esta forma, se midió una hectárea de suelo, se delimitó y se ubicaron 6 cámaras en diagonal, las cuales fueron enterradas a 5cm de profundidad y 30m de distancia entre una y otra, como se muestra en la ilustración 30.

En la ilustración 31 se puede observar una cámara cerrada de las que fueron empleadas para la medición de los gases del suelo. La cámara cuenta con 2 anillos de 20cm cada uno, los cuales se ubican uno sobre otro y se sellan empleando una banda de caucho como la de los neumáticos de las llantas. En la parte superior de la tapa, la cámara cuenta con dos orificios sobre los que se dispusieron 2 tapones, uno para instalar el termómetro y el otro para extraer la muestra, empleando una aguja delgada y una jeringa de 10 ml. Dicha muestra es almacenada en un recipiente de vidrio (el cual en adelante se denominará vial) que ha sido previamente liofilizado para generar vacío.

Ilustración 23. Técnica de la Cámara Cerrada



En el primer muestreo, sólo las cámaras 1, 3 y 5 contaban con un termómetro para medir la temperatura al interior de la cámara. Se tomaron 4 muestras de gas por cada cámara y la secuencia de muestreo fue de 20 minutos entre cada uno. En la tabla 5. se presentan la hora y la temperatura a la que fue tomada cada muestra.

Tabla 5. Datos de toma de muestreo 1

CÁMARA	TOMA 1: 0 min		TOMA 2: 20 min		TOMA3: 40 min		TOMA 4: 60 min	
	Hora	Temperatura	Hora	Temperatura	Hora	Temperatura	Hora	Temperatura
Primera	9:24am	28,8°C	9:45am	33,3°C	10:05am	33,6°C	10:25am	33,1°C
Segunda	9:27am		9:47am		10:07am		10:27am	
Tercera	9:29am	31,1°C	9:49am	33,9°C	10:10am	33,8°C	10:31am	33,8°C
Cuarta	9:31am		9:52am		10:13am		10:35am	
Quinta	9:33am	31,8°C	9:54am	34°C	10:15am	33,4°C	10:36am	33,7°C
Sexta	9:36am		9:57am		10:17am		10:37am	

Fuente Elaboración propia

En la tabla 6 se presentan los resultados del análisis de muestras, realizado por medio de cromatografía de gases. Los resultados son presentados en partes por millón (ppm) para identificar la emisión de cada gas y en toneladas de carbono equivalentes (tonCO₂-eq) para totalizar los gases emitidos por cada cámara, en cada uno de los tiempos de muestreo, teniendo en cuenta su potencial de calentamiento global. Para las cámaras que no contaban con termómetro, la temperatura se tomó como el promedio de la temperatura de las cámaras ubicadas a cada lado de dicha cámara, excepto para la cámara 6, la cual por estar en un extremo se tomó con una temperatura igual a la de la cámara 5.

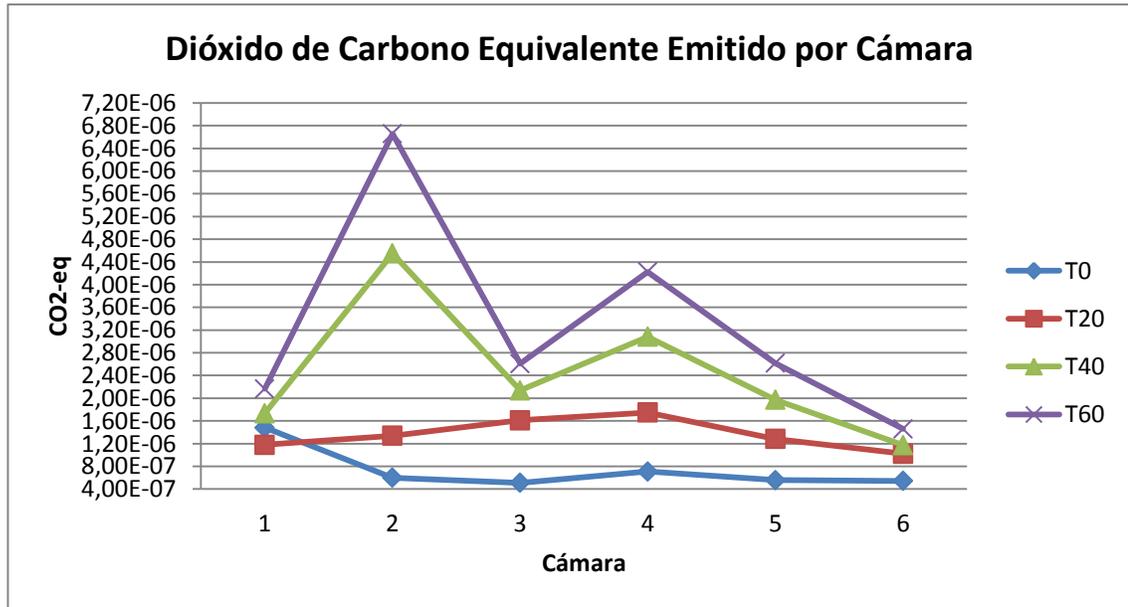
De acuerdo con el total de gases emitidos por las 6 cámaras ubicadas en la suerte ocho, se estimó que por mineralización del suelo, se emiten aproximadamente $4,7 \times 10^{-5}$ tonCO₂-eq cada hora, de los cuales el 88% corresponde a emisiones de dióxido de carbono (CO₂), el 11% a óxido nitroso (N₂O) y el 1% a metano (CH₄).

Tabla 6. Gases emitidos por cámara

Cámara	Temperatura (°C)	Concentraciones (ppm)		Concentraciones (TonCO2eq)			Total tonCO2 eq
		CH4	N2O	CH4	N2O	CO2	
C1-T0	28,8	1,130	0,218	1,56E-08	9,88E-08	1,37E-06	1,48E-06
C1-T1	33,3	1,162	0,354	1,61E-08	1,60E-07	1,00E-06	1,18E-06
C1-T2	33,6	1,105	0,608	1,53E-08	2,75E-07	1,44E-06	1,73E-06
C1-T3	33,1	1,093	0,921	1,51E-08	4,16E-07	1,73E-06	2,17E-06
C2-T0	30,0	1,096	0,242	1,52E-08	1,10E-07	4,74E-07	5,99E-07
C2-T1	33,6	1,095	0,378	1,51E-08	1,71E-07	1,15E-06	1,34E-06
C2-T2	33,7	1,110	0,630	1,53E-08	2,85E-07	4,25E-06	4,55E-06
C2-T3	33,5	1,115	0,752	1,54E-08	3,40E-07	6,30E-06	6,66E-06
C3-T0	31,1	1,055	0,245	1,46E-08	1,11E-07	3,85E-07	5,11E-07
C3-T1	33,9	1,086	0,321	1,50E-08	1,45E-07	1,45E-06	1,61E-06
C3-T2	33,8	1,105	0,461	1,53E-08	2,09E-07	1,91E-06	2,14E-06
C3-T3	33,8	1,075	0,500	1,49E-08	2,26E-07	2,37E-06	2,61E-06
C4-T0	31,5	1,081	0,322	1,49E-08	1,46E-07	5,48E-07	7,08E-07
C4-T1	34,0	1,084	0,348	1,50E-08	1,58E-07	1,58E-06	1,75E-06
C4-T2	33,6	1,104	0,699	1,53E-08	3,16E-07	2,75E-06	3,08E-06
C4-T3	33,8	1,061	0,960	1,47E-08	4,34E-07	3,78E-06	4,23E-06
C5-T0	31,8	1,066	0,264	1,47E-08	1,19E-07	4,24E-07	5,58E-07
C5-T1	34,0	1,081	0,464	1,49E-08	2,10E-07	1,06E-06	1,28E-06
C5-T2	33,4	1,105	0,588	1,53E-08	2,66E-07	1,69E-06	1,97E-06
C5-T3	33,7	1,174	0,746	1,62E-08	3,37E-07	2,26E-06	2,62E-06
C6-T0	31,8	1,085	0,319	1,50E-08	1,44E-07	3,82E-07	5,42E-07
C6-T1	34,0	1,092	0,324	1,51E-08	1,47E-07	8,62E-07	1,02E-06
C6-T2	33,4	1,067	0,342	1,47E-08	1,55E-07	1,00E-06	1,17E-06
C6-T3	33,7	1,040	0,460	1,44E-08	2,08E-07	1,24E-06	1,46E-06
Maximo	34,0	1,2	1,0	1,62E-08	4,34E-07	6,30E-06	6,66E-06
Minimo	28,8	1,0	0,2	1,44E-08	9,88E-08	3,82E-07	5,11E-07
Fuente: Elaboración propia		Mineralización		3,63E-07	5,19E-06	4,14E-05	4,70E-05
				1%	11%	88%	100%

Para analizar el comportamiento de los gases a medida que transcurre el tiempo de muestreo, se graficó el total de toneladas de CO₂ equivalente emitidas a los 0 (T0), 20 (T20), 40 (T40) y 60 (T60) minutos de haberse iniciado el muestreo, obteniéndose la gráfica que se presenta a continuación:

Gráfica 10. Gases por cámara por tiempo de muestreo



En la gráfica 10, se puede observar que la franja azul que representa el muestreo inmediatamente después de cerrar la cámara, se encuentra ubicada más abajo que las otras, mientras que la franja morada, que representa el contenido de gases de cada cámara pasados 60 minutos de haber sido cerradas, tiene mayor cantidad de CO₂-eq. Este comportamiento es similar en todas las cámaras, sin embargo, en la cámara 1 puede observarse que el contenido inicial de gases, es mayor al contenido transcurridos 20 minutos.

Cuando se hace un análisis completo de los flujos del suelo durante todo el periodo de cultivo, el comportamiento anteriormente descrito, suele relacionarse con la acción del suelo como sumidero, sin embargo, teniendo en cuenta que los datos obtenidos solo representan el comportamiento del suelo en un momento puntual, no se puede determinar el flujo de gases, ni la capacidad de absorción del suelo.

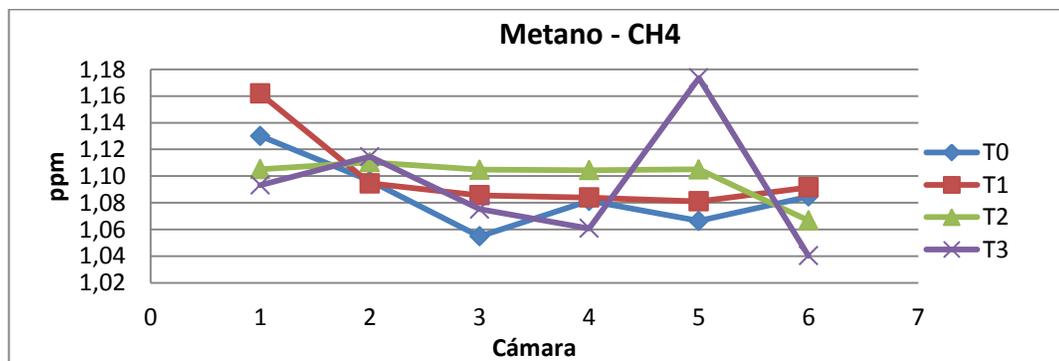
En cuanto a las muestras tomadas, se puede observar que la emisión más alta de gases fue registrada en la cámara 2 al finalizar el muestreo, cuando se alcanza una emisión de $6,66 \times 10^{-6}$ tonCO₂-eq y la más baja fue de $5,11 \times 10^{-7}$ tonCO₂-eq, registrada en la cámara 3 al inicio del muestreo. Estas diferencias en las emisiones de gases, muestran la variación en la actividad microbiana a través del área de muestreo y podrían relacionarse con la homogeneidad en la aplicación de los abonos y las condiciones específicas de humedad y porosidad del suelo en

cada uno de los puntos donde se tomaron las muestras(Madero Morales et al., 2010).

A continuación se presentan las gráficas del nivel de emisión de metano, dióxido de carbono y óxido nítrico, por cámara en cada momento de muestreo. Las series T0, T1, T2, T3 hacen referencia al tiempo transcurrido desde el momento en el que se inició el muestreo y representa el muestreo a los 0, 20, 40 y 60 minutos de iniciado el muestreo, respectivamente.

A diferencia de lo que sucede con la cantidad total de gases al interior de cada cámara, analizados en la gráfica anterior, la mayor concentración de metano no se registra transcurridos los 60 minutos de muestreo sino que varía al interior de cada cámara, de hecho, tan solo en la cámara 5 se puede observar una acumulación de metano al interior de la cámara (ver gráfica 11). En las otras cámaras se puede observar que la concentración de metano a los 20 y 40 minutos de iniciado el muestreo, fue superior a la concentración registrada transcurridos los 60 minutos. En términos generales, el comportamiento de este gas es relativamente estable, sólo representa el 1% de los gases emitidos y el rango de sus concentraciones está entre 1,174ppm y 1,040ppm.

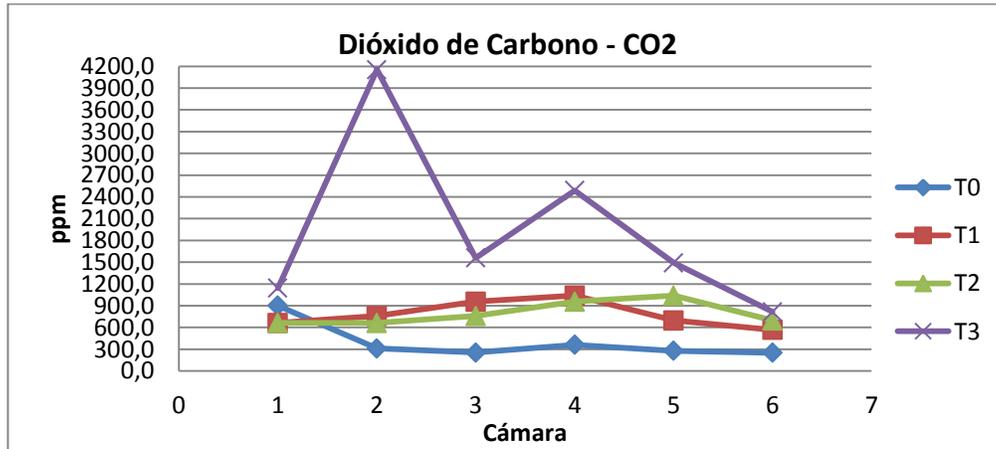
Gráfica 11. Emisiones de metano por cámara por tiempo de muestreo



En cuanto a la concentración de CO₂, en la gráfica 12 se puede observar que en todas las cámaras hay un incremento en las emisiones de este gas, pues al finalizar los 60 minutos de muestreo la concentración del gas fue mayor a la de las mediciones anteriores, siendo la cámara 2, el punto donde el suelo refleja un nivel superior de emisiones de CO₂, con una concentración un 78% superior a la de la cámara 6 que registró el valor mínimo de emisión para el tiempo de muestreo 3. En general, se puede observar que el comportamiento de las emisiones de este gas se asemeja más al comportamiento del total de los gases en toneladas de

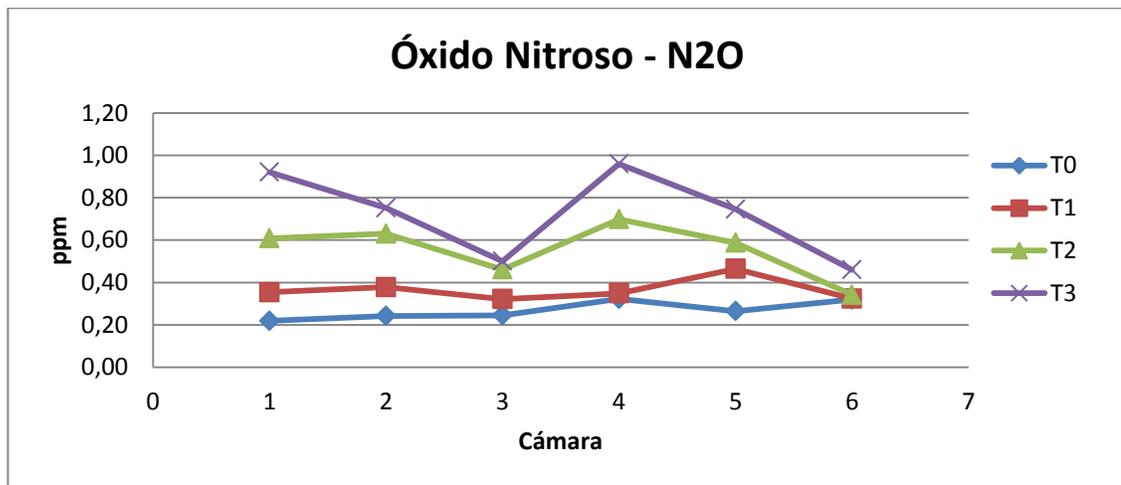
carbono equivalente dado que el 88% del total de las emisiones del suelo, corresponden a dióxido de carbono.

Gráfica 12. Emisiones de dióxido de carbono por cámara por tiempo de muestreo



El comportamiento del óxido nitroso (ver gráfica 13) es relativamente constante y conserva la secuencia de los valores mínimos al iniciar el muestreo, y máximos a los 60 minutos de haber cerrado la cámara, en todos los lugares donde fueron ubicadas las cámaras. El rango de variación de la concentración de óxido nitroso varía entre 0,218ppm y 0,960ppm, un rango más amplio que el del metano, pero menor que el del dióxido de carbono. Con respecto al total de gases emitidos por el suelo, el óxido nitroso representa el 11% de las emisiones del mismo.

Gráfica 13. Emisiones de óxido nitroso por cámara por tiempo



6.4.2.2 Cultivo de caña de azúcar tipo soca de manejo limpio

El segundo cultivo de caña de azúcar seleccionado para el muestreo fue un cultivo tipo soca de manejo limpio, el cual tuvo su tercer corte el 2 de febrero de 2014 y recibió encalle mecánico de residuos al dos por uno el 5 de febrero de 2014. Al día siguiente se hizo el muestreo ubicando cada cámara a 23m de distancia diagonal entre una y otra, teniendo en cuenta la forma del terreno. Al finalizar el muestreo, se identificó un hormiguero en la cámara 6. El muestreo se llevó a cabo con intervalos de tiempo de 15 minutos y todas las cámaras contaban con termómetro. En la tabla 7 se presentan los datos registrados al momento de extraer cada muestra.

Tabla 7. Datos de Muestreo Suerte 152b

CÁMARA	TOMA 1:		TOMA 2:		TOMA3:		TOMA 4:	
	Hora	Temperatura	Hora	Temperatura	Hora	Temperatura	Hora	Temperatura
Primera	9:19 a. m.	23.7°C	9:35 a. m.	25.8°C	9:51 a. m.	27.1°C	10:06 a. m.	28.9°C
Segunda	9:22 a. m.	23.0°C	9:38 a. m.	25.3°C	9:53 a. m.	27.5°C	10:08 a. m.	29.2°C
Tercera	9:24 a. m.	22.6°C	9:40 a. m.	24.5°C	9:55 a. m.	27.0°C	10:10 a. m.	28.7°C
Cuarta	9:26 a. m.	23.6°C	9:42 a. m.	26.0°C	9:58 a. m.	28.5°C	10:13 a. m.	29.9°C
Quinta	9:28 a. m.	23.9°C	9:44 a. m.	26.3°C	10:01 a. m.	28.7°C	10:15 a. m.	29.0°C
Sexta	9:30 a. m.	22.8°C	9:47 a. m.	26.9°C	10:03 a. m.	29.4°C	10:17 a. m.	29.6°C

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 8 se presentan los resultados del análisis por cromatografía de gases de las muestras extraídas. Los resultados son presentados en partes por millón (ppm) para identificar la emisión de cada gas y en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tonCO₂-eq) para totalizar los gases emitidos por cada cámara, en cada uno de los tiempos de muestreo, teniendo en cuenta el potencial de calentamiento global de cada gas.

De acuerdo con el total de gases emitidos por las 6 cámaras ubicadas en la suerte 152b con cultivo de manejo limpio, el cual ha estado en transición y sin aplicación de fertilizantes químicos durante 1 año, se estimó que por mineralización del suelo, se emiten aproximadamente $3,31 \times 10^{-5}$ tonCO₂-eq cada 45 minutos, de los cuales el 90% corresponde a emisiones de dióxido de carbono (CO₂), el 8% a óxido nitroso (N₂O) y el 2% a metano (CH₄). Presentando así un nivel total de emisiones menor al registrado por el cultivo de manejo comercial, con un mayor porcentaje de dióxido de carbono y metano, y un menor porcentaje de emisión de óxidos nitrosos.

Tabla 8. Emisión de Gases por Cámara

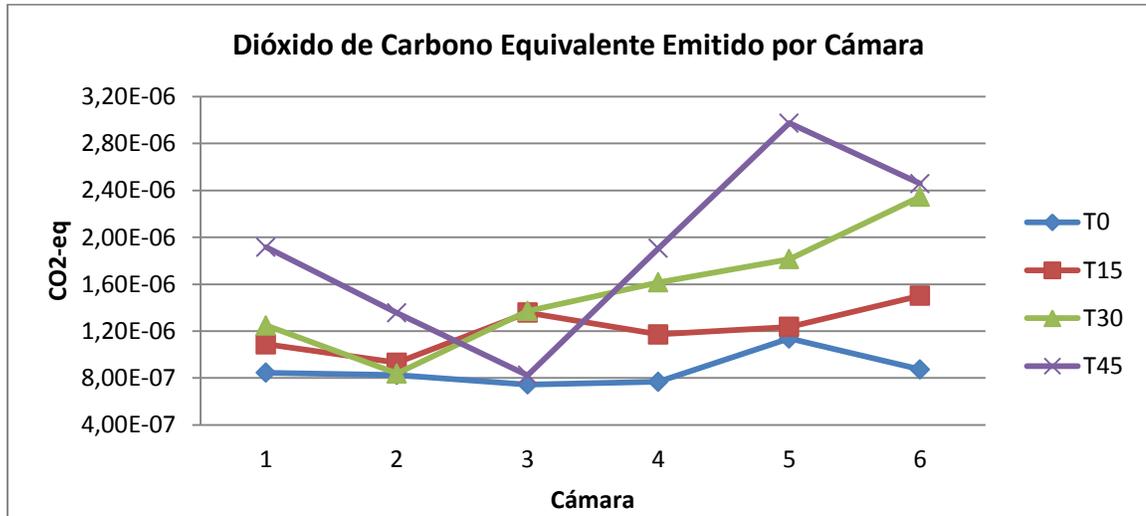
Identificación de la muestra	Temperatura	Concentraciones (ppm)			Concentraciones (TonCO2eq)			Total tonCO2 eq
		CH4	N2O	CO2	CH4	N2O	CO2	
C1-T0.gcd	23,7	2,16	0,25	462,63	2,99E-08	1,13E-07	7,02E-07	8,45E-07
C1-T1.gcd	25,8	1,72	0,27	621,52	2,37E-08	1,21E-07	9,43E-07	1,09E-06
C1-T2.gcd	27,1	1,73	0,20	746,24	2,39E-08	9,17E-08	1,13E-06	1,25E-06
C1-T3.gcd	28,9	1,77	0,29	1159,67	2,44E-08	1,31E-07	1,76E-06	1,92E-06
C2-T0.gcd	23	1,69	0,25	456,15	2,34E-08	1,11E-07	6,92E-07	8,27E-07
C2-T1.gcd	25,3	1,68	0,25	523,11	2,32E-08	1,14E-07	7,94E-07	9,30E-07
C2-T2.gcd	27,5	1,66	0,18	482,22	2,30E-08	8,34E-08	7,32E-07	8,38E-07
C2-T3.gcd	29,2	1,66	0,19	820,35	2,29E-08	8,78E-08	1,24E-06	1,36E-06
C3-T0.gcd	22,6	1,68	0,20	414,66	2,32E-08	9,21E-08	6,29E-07	7,44E-07
C3-T1.gcd	24,5	1,67	0,23	811,23	2,31E-08	1,04E-07	1,23E-06	1,36E-06
C3-T2.gcd	27	1,68	0,21	827,58	2,32E-08	9,29E-08	1,26E-06	1,37E-06
C3-T3.gcd	28,7	1,73	0,20	467,90	2,39E-08	8,92E-08	7,10E-07	8,23E-07
C4-T0.gcd	23,6	1,68	0,18	436,48	2,32E-08	8,18E-08	6,62E-07	7,67E-07
C4-T1.gcd	26	1,67	0,24	685,72	2,31E-08	1,08E-07	1,04E-06	1,17E-06
C4-T2.gcd	28,5	1,69	0,20	989,11	2,34E-08	9,19E-08	1,50E-06	1,62E-06
C4-T3.gcd	29,9	1,69	0,20	1179,86	2,34E-08	9,26E-08	1,79E-06	1,91E-06
C5-T0.gcd	23,9	1,64	0,22	668,91	2,27E-08	9,98E-08	1,01E-06	1,14E-06
C5-T1.gcd	26,3	1,66	0,32	704,76	2,29E-08	1,44E-07	1,07E-06	1,24E-06
C5-T2.gcd	28,7	1,81	0,50	1028,83	2,50E-08	2,27E-07	1,56E-06	1,81E-06
C5-T3.gcd	29	1,63	0,43	1818,28	2,26E-08	1,93E-07	2,76E-06	2,97E-06
C6-T0.gcd	22,8	1,62	0,13	522,63	2,24E-08	5,90E-08	7,93E-07	8,74E-07
C6-T1.gcd	26,9	1,64	0,25	899,67	2,27E-08	1,14E-07	1,36E-06	1,50E-06
C6-T2.gcd	29,4	1,64	0,26	1455,22	2,27E-08	1,15E-07	2,21E-06	2,35E-06
C6-T3.gcd	29,6	1,71	0,32	1510,50	2,37E-08	1,43E-07	2,29E-06	2,46E-06
Maximo	29,9	2,16	0,50	1818,28	2,99E-08	2,27E-07	2,76E-06	3,02E-06
Minimo	22,6	1,62	0,13	414,66	2,24E-08	5,90E-08	6,29E-07	7,10E-07
Fuente: Elaboración propia				Mineralización del Suelo	5,66E-07	2,70E-06	2,99E-05	3,31E-05
					2%	8%	90%	100%

En la gráfica que se presenta a continuación, pueden observarse las emisiones en toneladas de dióxido de carbono equivalente, registradas en cada una de las cámaras de muestreo ubicadas en la suerte con soca de manejo limpio. Las series T0, T15, T30, T45 hacen referencia al tiempo transcurrido después de cerrada la cámara de muestreo, representando los 0, 15, 30 y 45 minutos transcurridos después de haber cerrado la cámara.

Al graficar las emisiones de carbono equivalente registradas en las muestras tomadas sobre la suerte de manejo limpio (ver gráfica 14), puede observarse que inmediatamente después de cerrarse la cámara se registran los niveles más bajos de emisión para todas las cámaras, posteriormente, transcurridos los 45 minutos de muestreo de esta suerte, se observa que la concentración en todas las cámara se eleva a su máximo valor, pero en la cámara 3 la concentración regresa a un valor cercano al inicial. La concentración más alta de gases se registró en la

cámara 5 con $2,97 \times 10^{-6}$ tonCO₂-eq y la más baja en la cámara 4 con $7,67 \times 10^{-7}$ tonCO₂-eq.

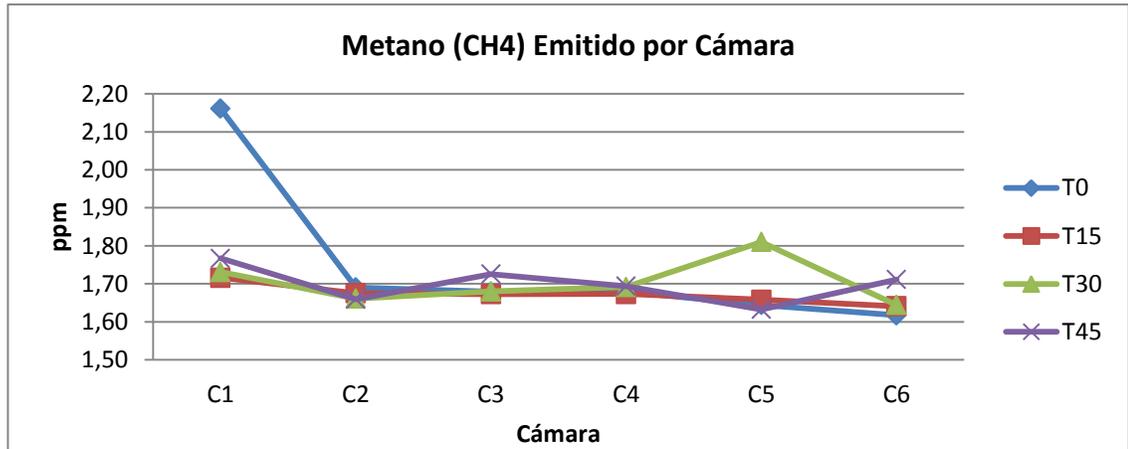
Gráfica 14. Gases por cámara por tiempo de muestreo



A continuación se presentan y describen las gráficas del nivel de emisión de metano, dióxido de carbono y óxido nítrico, por cámara en cada momento de muestreo:

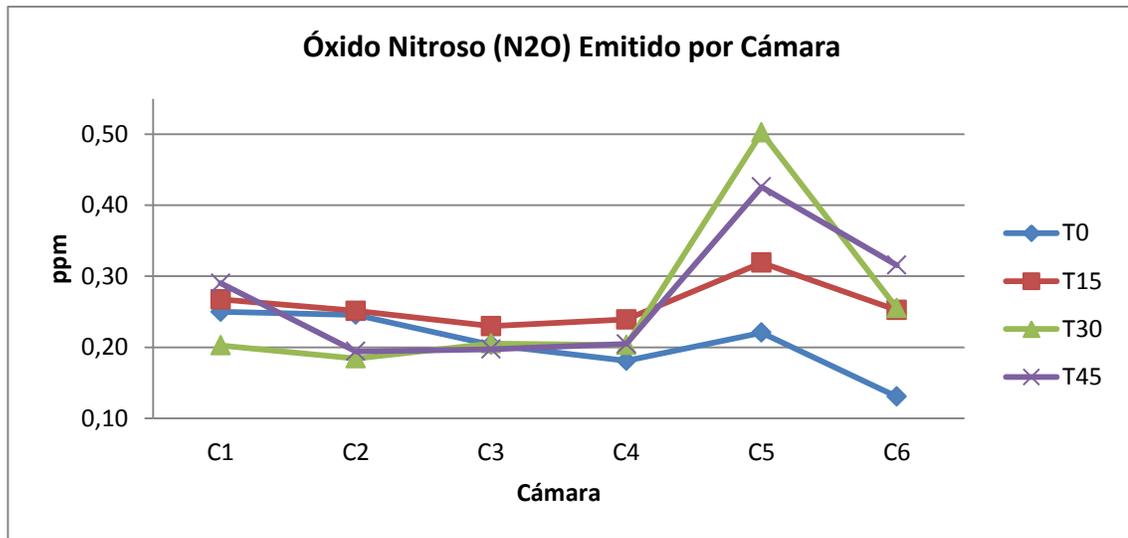
En cuanto a las emisiones de metano (ver gráfica 15), puede observarse que la cámara 1 inicia con una alta concentración de este gas, en 220ppm, sin embargo, transcurridos 15 minutos su nivel baja a 1,72ppm y se mantiene alrededor de este valor durante los 45 minutos que duró el muestreo, lo que podría interpretarse como un flujo negativo de emisión de metano en este punto del terreno. A nivel general, puede observarse que el metano tiene un rango de fluctuación relativamente bajo, entre 1,63ppm y 1,81ppm en 5 de las 6 cámaras analizadas y la mayor concentración de este gas no se registra siempre en el muestreo realizado pasados los 45 minutos de haber cerrado la cámara, lo cual podría indicar que el suelo presenta flujos negativos de este gas.

Gráfica 15. Emisiones de metano por cámara por tiempo



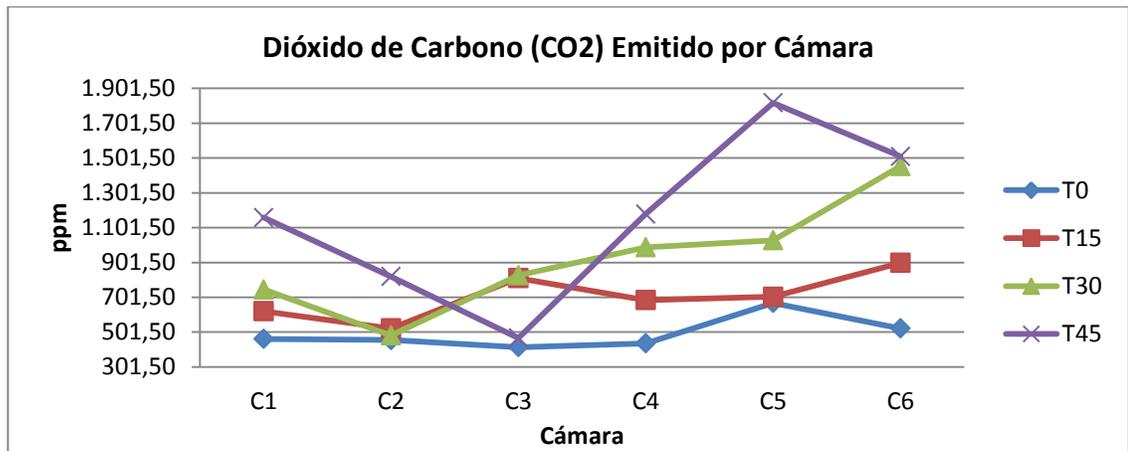
En cuanto a las emisiones de óxido nítrico (ver gráfica 16), puede observarse que en las cámaras 2, 3, 4 y 5, la concentración de óxido nítrico, transcurridos los 45 minutos de muestreo, no es la más alta de las concentraciones registradas. El nivel de emisiones en las cámaras 1, 2, 3 y 4 es relativamente estable y presenta un rango de variación mucho menor al de las cámaras 5 y 6 las cuales presentan concentraciones entre las 0,15ppm y 0,50ppm, siendo la cámara 5 la que alcanza el mayor nivel de concentración en sus emisiones totales.

Gráfica 16. Emisiones de óxido nítrico por cámara por tiempo



El dióxido de carbono presenta un comportamiento muy similar al del total de los gases medidos en toneladas de carbono equivalente (ver gráfica 17), dado que representa el 90% de los gases emitidos por el suelo. Su rango de variación está entre 414ppm y 1818ppm, mucho más amplio que el de los demás gases y en 5 de las 6 cámaras muestreadas tiene su mayor concentración transcurridos los 45 minutos de muestreo. En la cámara 3 puede evidenciarse que al inicio y al final del muestreo la concentración de los gases es casi la misma, lo cual podría estar relacionado con las características específicas del suelo en ese punto de muestreo.

Gráfica 17. Dióxido de carbono por cámara por tiempo



6.4.2.3 Cultivo de caña de azúcar tipo plantilla de manejo limpio

El tercer cultivo seleccionado para llevar a cabo el muestreo de emisiones de gases del suelo fue un cultivo de caña de azúcar tipo plantilla de manejo limpio el cual terminó de recibir todas las labores de preparación de suelo convencional el 13 de diciembre de 2013 y fue muestreado el 17 de diciembre de 2013, antes de que se llevara a cabo la siembra de la plantilla. Las cámaras de este muestreo fueron instaladas con una distancia diagonal de 25m entre cámara y cámara, con intervalos de tiempo de 20min entre cada muestra. En la tabla 9 se relacionan la hora y la temperatura a la que fue extraída cada muestra y en la tabla 10 se presentan los resultados de la cromatografía de gases, en ppm y en tonCO₂eq.

Tabla 9. Datos de Muestreo Suerte 215

CÁMARA	TOMA 1:		TOMA 2:		TOMA3:		TOMA 4:	
	Hora	Temperatura	Hora	Temperatura	Hora	Temperatura	Hora	Temperatura
Primera	8:54am	27,6°C	9:14am	30,9°C	9:34am	30,6°C	9:55am	31,1°C
Segunda	8:57am	27,5°C	9:17am	30,9°C	9:37am	30,6°C	9:57am	31,2°C
Tercera	8:59am	27,4°C	9:20am	30,8°C	9:41am	30,5°C	10:02am	31,2°C
Cuarta	9:02am	28,2°C	9:22am	30,6°C	9:43am	30,3°C	10:03am	31,0°C
Quinta	9:04am	29,0°C	9:24am	30,3°C	9:44am	30,1°C	10:04am	30,8°C
Sexta	9:07am	29,0°C	9:29am	30,3°C	9:49am	30,1°C	10:08am	30,8°C

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Emisión de Gases por Cámara

Identificación de la muestra	Temperatura (°C)	Concentraciones (ppm)			Concentraciones (TonCO ₂ eq)			Total tonCO ₂ eq
		CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	
C1-T0	27,6	1,75	0,42	308,32	2,42E-08	1,91E-07	4,68E-07	6,83E-07
C1-T20	30,9	1,77	0,54	495,57	2,45E-08	2,46E-07	7,52E-07	1,02E-06
C1-T40	30,6	1,76	0,90	770,22	2,43E-08	4,07E-07	1,17E-06	1,60E-06
C1-T60	31,1	1,80	1,05	722,02	2,49E-08	4,75E-07	1,10E-06	1,60E-06
C2-T0	27,5	1,80	0,38	166,32	2,49E-08	1,72E-07	2,52E-07	4,49E-07
C2-T20	30,85	1,98	0,46	383,02	2,73E-08	2,08E-07	5,81E-07	8,16E-07
C2-T40	30,55	1,71	0,59	851,72	2,37E-08	2,65E-07	1,29E-06	1,58E-06
C2-T60	31,15	1,73	0,63	806,08	2,39E-08	2,85E-07	1,22E-06	1,53E-06
C3-T0	27,4	1,76	0,37	314,53	2,43E-08	1,67E-07	4,77E-07	6,69E-07
C3-T20	30,8	1,80	0,45	338,19	2,49E-08	2,03E-07	5,13E-07	7,41E-07
C3-T40	30,5	1,78	0,65	618,51	2,46E-08	2,92E-07	9,38E-07	1,26E-06
C3-T60	31,2	1,81	0,65	515,78	2,50E-08	2,94E-07	7,83E-07	1,10E-06
C4-T0	28,2	1,76	0,70	296,38				0,00E+00
C4-T20	30,55	1,91	7,29	1727,74				0,00E+00
C4-T40	30,3	1,86	12,40	2521,98				0,00E+00
C4-T60	31	2,26	17,34	6443,07				0,00E+00
C5-T0	29	1,90	1,22	544,15	2,63E-08	5,54E-07	8,26E-07	1,41E-06
C5-T20	30,3	1,77	0,48	245,16	2,45E-08	2,18E-07	3,72E-07	6,15E-07
C5-T40	30,1	1,77	0,42	389,72	2,45E-08	1,90E-07	5,91E-07	8,06E-07
C5-T60	30,8	1,69	0,43	726,90	2,34E-08	1,95E-07	1,10E-06	1,32E-06
C6-T0	29	1,80	0,29	213,38	2,49E-08	1,32E-07	3,24E-07	4,80E-07
C6-T20	30,3	1,82	1,30	544,41	2,51E-08	5,86E-07	8,26E-07	1,44E-06
C6-T40	30,1	1,81	2,17	787,10	2,50E-08	9,82E-07	1,19E-06	2,20E-06
C6-T60	30,8	1,87	2,80	867,84	2,59E-08	1,27E-06	1,32E-06	2,61E-06
Maximo	31,2	2,26	17,34	6443,07	3,12E-08	7,84E-06	9,78E-06	1,76E-05
Minimo	27,4	1,69	0,29	166,32	2,34E-08	1,32E-07	2,52E-07	4,07E-07
Maximo Ajustado	31,2	1,98	2,80	867,84	2,73E-08	1,27E-06	1,32E-06	2,61E-06
Minimo Ajustado	27,4	1,69	0,29	166,32	2,34E-08	1,32E-07	2,52E-07	4,07E-07
Fuente: Elaboración propia		Mineralización del Suelo			4,96E-07	7,33E-06	1,61E-05	2,39E-05
					2%	31%	67%	100%

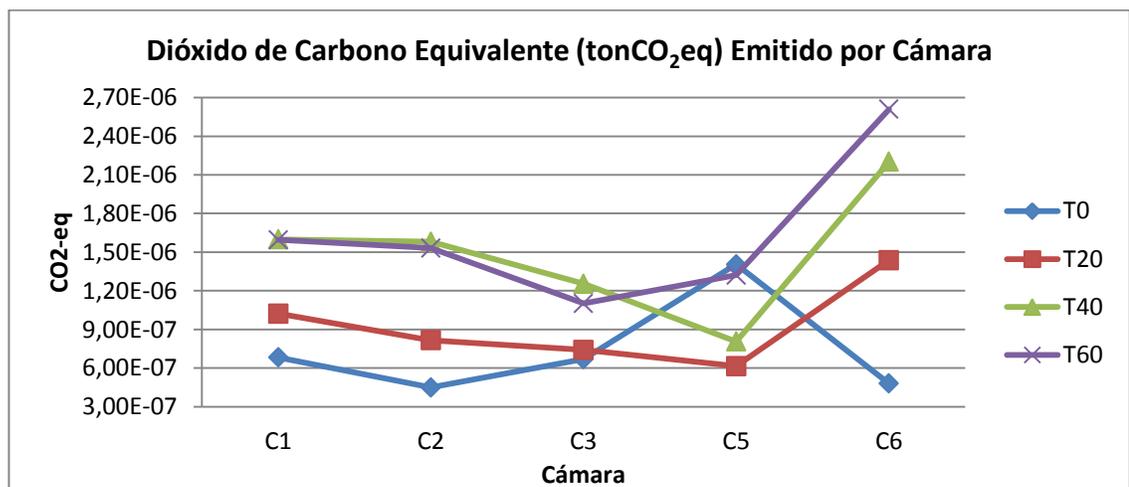
Al revisar los resultados obtenidos en la cromatografía de gases de las muestras extraídas en esta suerte, se pudo identificar niveles de concentración de CH₄, N₂O y CO₂ atípicos en la cámara cuatro, por lo tanto, con el objetivo de reducir la variabilidad de los resultados, se descartaron las muestras tomadas de la cámara 4 hasta tanto sea posible determinar si existe o no una causa asignable para este comportamiento.

De acuerdo con el total de gases emitidos por el suelo durante los 60 minutos de muestreo, se estimó que por mineralización del suelo, se emiten aproximadamente $2,39 \times 10^{-5}$ tonCO₂-eq cada hora, un valor menor al total registrado por la soca de manejo comercial y la soca de manejo limpio. De estas emisiones totales, se identificó que el 67% corresponde a emisiones de dióxido de carbono (CO₂), el 31% a óxido nitroso (N₂O) y el 2% a metano (CH₄). A diferencia de las 2 suertes analizadas anteriormente, el suelo de manejo limpio preparado para plantilla tiene un porcentaje de emisiones debido a óxidos nitrosos, más alto.

En la gráfica 18, pueden observarse las emisiones en toneladas de dióxido de carbono equivalente, registradas en cada una de las cámaras de muestreo ubicadas en la suerte preparada para la siembra de plantilla de manejo limpio. Las series T0, T20, T40 y T60, representan el tiempo transcurrido después de haber sido cerrada la cámara y son equivalentes a los 0, 20, 40 y 60 minutos transcurridos después de cerrar la cámara.

En dicha gráfica, puede apreciarse una alta variación en la concentración de los gases al interior de las 6 cámaras muestreadas, encontrándose que los niveles más altos y más bajos no están necesariamente relacionados con el tiempo transcurrido entre muestra y muestra. Así por ejemplo, la concentración de gases transcurridos 60 minutos de iniciado el muestreo, sólo es la más alta en la cámara 6, donde alcanza un valor de $2,61 \times 10^{-6}$ tonCO₂-eq. Mientras que en las cámaras 1, 2 y 3, la concentración de gases aumenta hasta los 40 minutos y disminuye levemente en los siguientes 20 minutos. En la cámara 5, la concentración de las emisiones se reduce en los primeros 20 minutos y luego empieza a aumentar sin lograr alcanzar su valor inicial de concentración, terminando con una concentración menor a la inicial al final del muestreo.

Gráfica 18. Emisiones de CO₂eq por cámara por tiempo

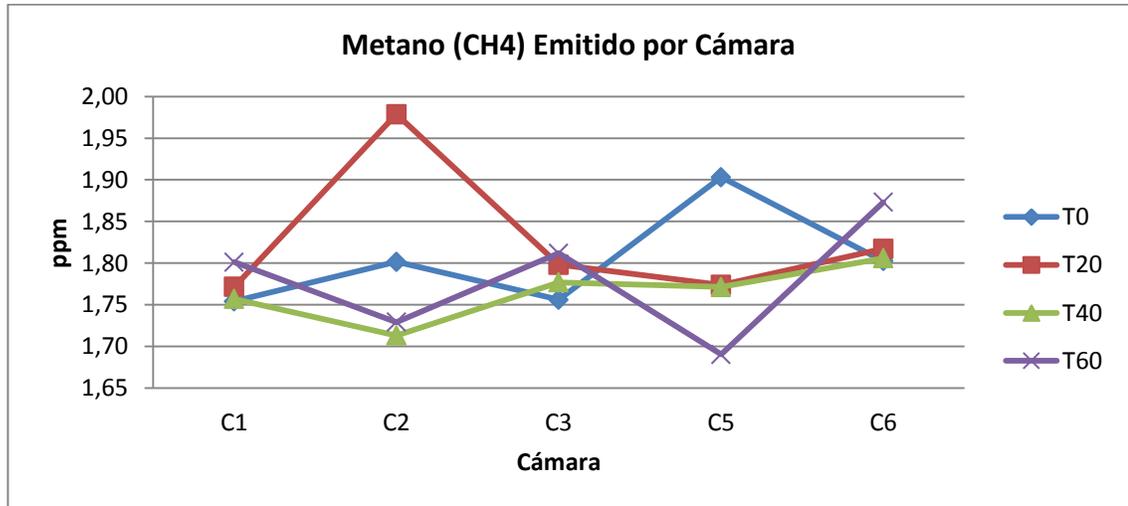


A continuación se presentan las gráficas del nivel de emisión de metano, dióxido de carbono y óxido nítrico, por cámara en cada momento de muestreo:

En la gráfica 19 puede observarse que la concentración del metano al interior de las cámaras tiene un alto nivel de fluctuaciones y no presenta un comportamiento uniforme en todas ellas. Su mayor concentración la alcanza en la cámara 2 a los 20 minutos de muestreo con un valor de 1,98ppm y la menor la alcanza en la cámara 5, trascurridos los 60 minutos de muestreo con un nivel de 1,69ppm. En general, puede observarse que en la única cámara donde la concentración al final

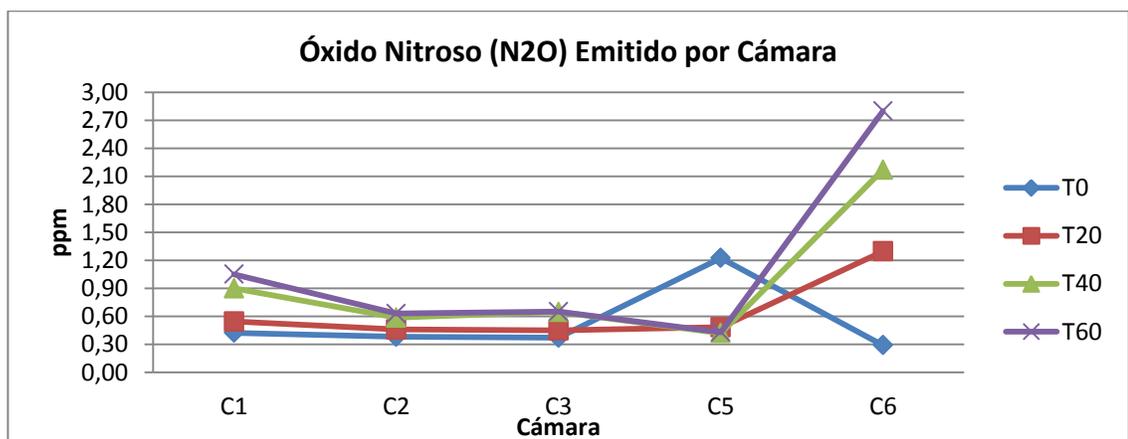
del muestreo fue mayor es la cámara 6, las demás, tuvieron una concentración menor que la inicial, al final del muestreo.

Gráfica 19. Emisiones de metano por cámara por tiempo



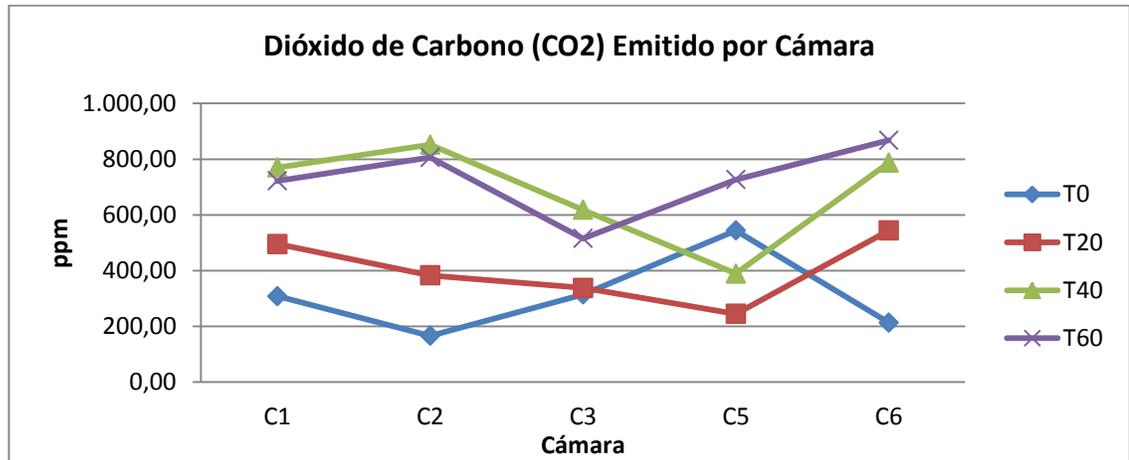
En cuanto al comportamiento del óxido nitroso, en la gráfica 20 puede observarse que en 5 de las 6 cámaras, las concentraciones más altas se alcanzan a los 60 minutos de iniciado el muestreo y las más bajas al inicio del mismo, sin embargo el flujo de emisiones es mayor en la cámara 6, donde se alcanzan las concentraciones extremas del muestreo, 0,29ppm al inicio y 2,80ppm al final. En la cámara 5, por otra parte, puede observarse un flujo aparentemente negativo de emisiones, obteniendo la concentración más alta en esa cámara al inicio del muestreo y la más baja al final.

Gráfica 20. Emisiones de óxido nitroso por cámara por tiempo



Las emisiones de dióxido de carbono en esta suerte (ver gráfica 21), muestran un nivel de emisiones relativamente constante que mantiene un rango entre 166,32ppm y 867,84ppm a través de las 6 cámaras. En las cámaras 5 y 6 la concentración de CO2 es mayor transcurridos los 60 minutos del muestreo, mientras que en las cámaras 1, 2 y 3, el mayor nivel de concentración se alcanza transcurridos los primeros 40 minutos, posteriormente, la concentración se reduce, terminando en un nivel menor al alcanzado a los 40 minutos.

Gráfica 21. Emisiones de dióxido de carbono por cámara por tiempo



7. RESULTADOS DEL PROYECTO Y DISCUSIÓN

7.1 FUENTES DE EMISIÓN

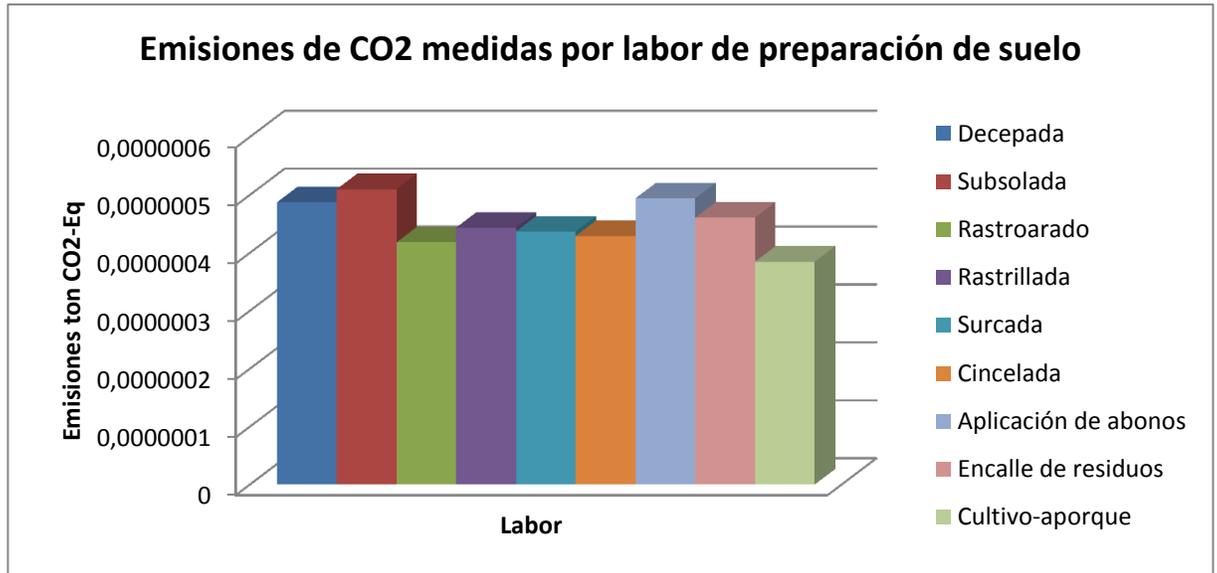
7.1.1 Emisiones por combustión

Las emisiones provenientes de la combustión móvil de los tractores empleados en las labores de preparación de suelo fueron estimadas de forma teórica y de forma experimental. En la estimación teórica se utilizaron los factores de emisión del diésel colombiano, desarrollados por la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia –UPME y, para la estimación experimental se empleó un equipo medidor de CO₂ marca Luthron que identifica la concentración de CO₂ en ppm en el aire, cada 6.66 segundos.

En la gráfica 22 se muestran las emisiones medidas durante el desarrollo de cada una de las labores de preparación de suelo para el cultivo de caña de azúcar. De las 9 labores que hacen parte de los procesos de preparación de suelo aplicados en el ingenio donde se desarrolló el estudio, las labores que presentaron el mayor nivel de concentración de CO₂ durante la operación del tractor, fueron las labores de decepada, subsolada y aplicación de abonos.

La decepada y la subsolada son las dos primeras labores que se llevan a cabo para preparar el suelo para la siembra de plantilla, por lo tanto demandan un mayor potencia de la máquina, al tener que preparar suelos compactados por el tránsito de los tractores empleados en la cosecha. La aplicación de abonos, por otra parte, es una labor en la que debe removerse el suelo a una profundidad de 25cm a 35cm y también demanda de un alta potencia, por tanto, puede afirmarse que los resultados obtenidos en las mediciones, fueron los esperados, teniendo en cuenta la demanda de potencia de las actividades desarrolladas, pues a medida en que la labor demanda mayor fuerza de la maquinaria, a mayores revoluciones por minuto debe trabajar el tractor, incrementando su consumo de combustible y por consiguiente, su nivel de emisiones de CO₂.

Gráfica 22. Emisiones de CO2 medidas por labor



Teniendo en cuenta las emisiones generadas por cada labor de preparación de suelo y la combinación de labores que hace parte de cada tipo de preparación de suelo, se hizo el cálculo de las emisiones generadas por tipo de preparación. En la tabla 11 se presenta la lista de labores que hacen parte de cada tipo de preparación de suelo. En la lista de preparación de las socas, no se incluyó la aplicación de abonos, dado que es una labor que no se lleva a cabo en todas las preparaciones de socas. Como se pudo observar en las socas analizadas, la soca de manejo comercial recibió dos aplicaciones de abonos, pero la soca de manejo limpio no recibió ninguna aplicación en la etapa de preparación de suelo.

Tabla 11. Labores por tipo de preparación

Tipos de Preparación de Suelo	Labor	Número de pases	Emisión Promedio Medida (ppm)	Tiempo de Ejecución de Actividad (Min)
Convencional 1	Decepada	2	321	60
	Subsolada	2	336	102
	Rastroarado	1	275	27
	Rastrillada	2	292	45
	Surcada	1	288	25
	Total			2462
Convencional 2	Decepada	2	321	60
	Subsolada	2	336	102
	Rastroarado	1	275	27
	Rastrillada	1	292	45
	Surcada	1	288	25
	Total			2170
Convencional 3	Decepada	2	321	60
	Subsolada	2	336	102
	Rastroarado	1	275	27
	Surcada	1	288	25
	Total			1877
Liviana 1	Decepada	2	321	60
	Subsolada	1	336	102
	Derrastroarado	1	292	45
	Rastrillada	1	292	45
	Surcada	1	288	25
	Total			1851
Liviana 2	Decepada	2	321	60
	Cincelada	1	283	30
	Rastroarado	1	275	27
	Rastrillada	1	292	45
	Surcada	1	288	25
	Total			1781
Liviana 3	Decepada	2	321	60
	Cincelada	1	283	30
	Rastrillada	1	292	45
	Surcada	1	288	25
	Total			1505
Socas	Encalle de residuos	1	304	30
	Subsolada	2	336	102
	Cultivo-aporque	1	254	20
	Total			1229

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 12 se presentan las emisiones de CO₂ por tipo de preparación de suelo, medidas experimentalmente y calculadas empleando la metodología del IPCC 2006. Para realizar dicho cálculo se utilizó el factor de emisión para el combustible diésel colombiano de 300539 mgCO₂/m³, desarrollados por la unidad de planeación minero energética de Colombia – UPMPE.

En dicha tabla se puede observar que las preparaciones convencionales son las que mayor nivel de emisión presentan, dado que es en estas preparaciones donde se realizan pases dobles de subsolado y decepada, dos de las labores con mayor nivel de emisiones de CO₂.

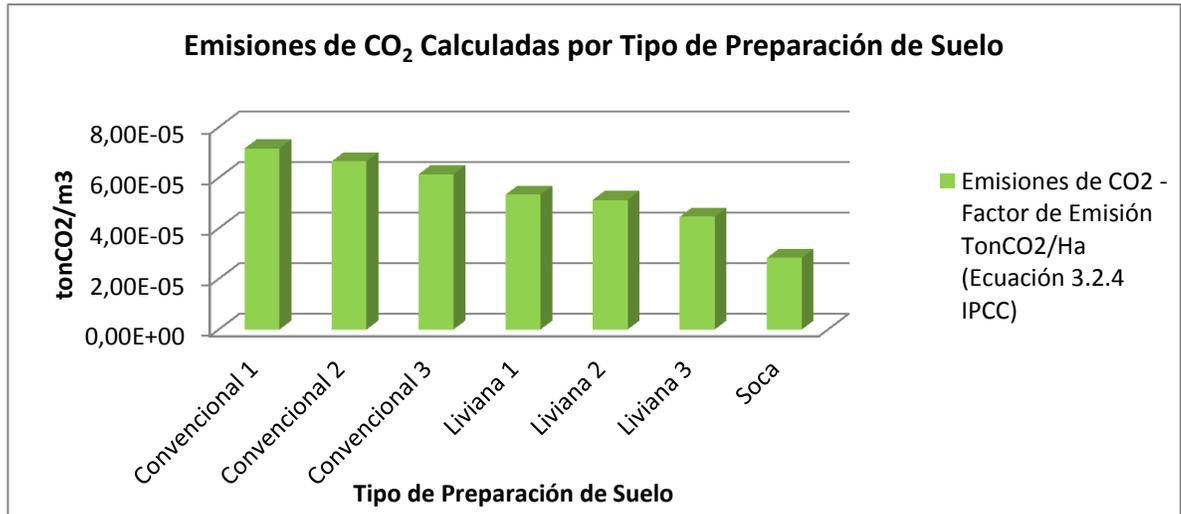
Tabla 12. Emisiones de CO2 por tipo de preparación de suelos

Tipos de Preparación de Suelo	Nivel Promedio de Emisiones PPM/Ha	Emisiones de Actividad Medidas TonCO2/m3	Emisiones de CO2 - Factor de Emisión TonCO2/Ha (Ecuación 3.2.4 IPCC)
Convencional 1	2462	3,74E-09	7,17E-05
Convencional 2	2170	3,29E-09	6,65E-05
Convencional 3	1877	2,85E-09	6,14E-05
Liviana 1	1851	2,81E-09	5,34E-05
Liviana 2	1781	2,70E-09	5,13E-05
Liviana 3	1505	2,28E-09	4,46E-05
Soca	1229	1,86E-09	2,84E-05

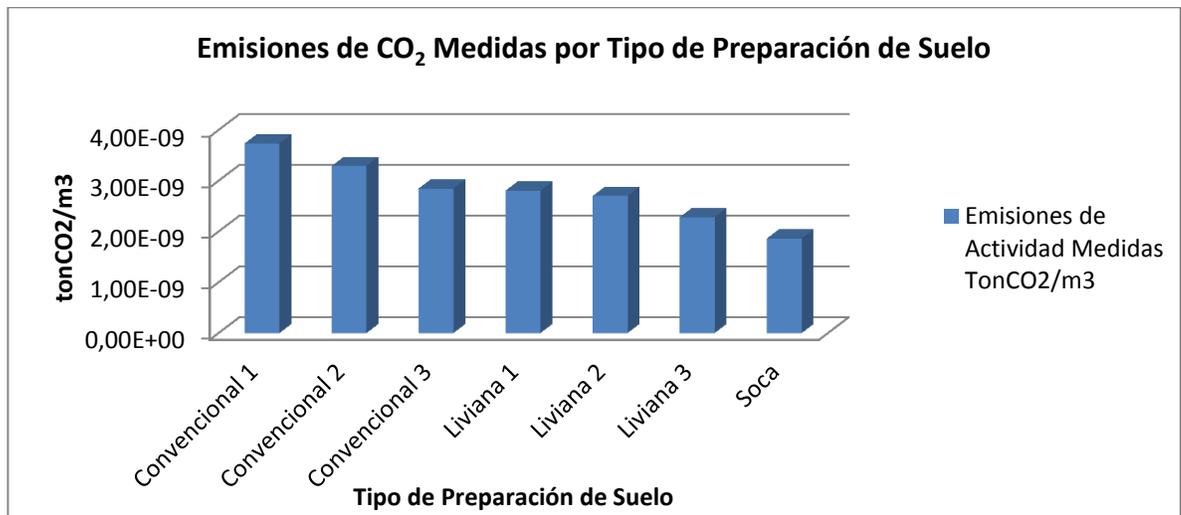
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los resultados de las mediciones experimentales con respecto a los cálculos desarrollados mediante la metodología del IPCC 2006, se encontró que las mediciones reflejan menos del 1% de las emisiones calculadas, dado que los factores de emisión consideran la combustión completa del combustible quemado por los tractores, mientras que las mediciones experimentales a campo abierto, tienen interferencia de factores del entorno (viento, plantas, animales, vehículos) y son el reflejo de un punto específico de la hectárea medida, sin embargo, el nivel de emisiones medidas si guarda relación con la emisión calculada, obteniéndose que tanto en la medición experimental, como en el cálculo de emisiones, el tipo de preparación con mayor emisión de CO₂ fue la convencional 1, seguida por la convencional 2, la convencional 3, las preparaciones livianas y finalmente, con el menor nivel de emisiones la soca, como se puede observar en las gráficas 23 y 24, donde se representan, mediante gráficos de barras, las emisiones de CO₂ calculadas teóricamente y las emisiones de CO₂ medidas experimentalmente.

Gráfica 23. Emisiones de CO₂ calculadas por tipo de preparación



Gráfica 24. Emisiones de CO₂ medidas pro tipo de preparación



Comparando las dos gráficas se puede observar que las emisiones medidas experimentalmente para el tipo de preparación convencional 3 refleja un nivel más cercano al del tipo de preparación liviana 1, que el nivel que se observa en las emisiones calculadas teóricamente, sin embargo, conserva la posición secuencial en cuanto al nivel de emisiones en ambas metodologías de estimación.

7.1.2 Emisiones del suelo

Las emisiones generadas por el proceso de mineralización del suelo se calcularon mediante dos metodologías: 1. El muestreo de las emisiones del suelo mediante la técnica de cámara cerrada y 2. El cálculo de las emisiones de N₂O y CO₂ generadas a partir de la aplicación de abonos orgánicos y urea (este cálculo se

presentará más adelante, con los resultados de la huella de carbono calculada teóricamente).

En la tabla que se presenta a continuación, se muestran los resultados de los gases que son emitidos por el suelo como resultado de su proceso de mineralización. De los tres tipos de suelos que fueron preparados, el suelo que fue preparado para el levante de soca de manejo comercial reflejó el mayor nivel de emisiones de carbono equivalente con un total de $4,70 \times 10^{-5}$ tonCO₂-eq, de los cuales el 88% está representado por dióxido de carbono, el 11% por óxido nitroso y sólo el 1% por metano. La siguiente preparación que más emisiones reflejó, fue la implementada en el suelo con soca de manejo limpio, la cual tuvo una emisión total de $3,31 \times 10^{-5}$ tonCO₂-eq, compuesta en un 2% por metano, un 8% por óxido nitroso y un 90% por dióxido de carbono. Finalmente, el suelo que menor cantidad de emisiones de carbono equivalente reflejó, fue el preparado para la siembra de plantilla de manejo limpio, con una emisión total de $2,39 \times 10^{-5}$ tonCO₂-eq compuesta en un 2% por metano, 31% por óxido nitroso y 67% por dióxido de carbono.

Tabla 13. Gases emitidos por la mineralización del suelo preparado para cada tipo de cultivo

Tipo de Cultivo	Fuente	Concentraciones (TonCO ₂ eq)			Total tonCO ₂ eq
		CH ₄	N ₂ O	CO ₂	
Soca de Manejo Comercial	Mineralización del suelo	3,63E-07	5,19E-06	4,14E-05	4,70E-05
	Contribución por gas	1%	11%	88%	100%
Soca de Manejo Limpio	Mineralización del suelo	5,66E-07	2,70E-06	2,99E-05	3,31E-05
	Contribución por gas	2%	8%	90%	100%
Plantilla de Manejo Limpio	Mineralización del suelo	4,96E-07	7,33E-06	1,61E-05	2,39E-05
	Contribución por gas	2%	31%	67%	100%

Fuente: Elaboración propia

En general, los resultados de las emisiones de los tres tipos de preparaciones de suelo analizados, muestran que el gas que más se emite es dióxido de carbono, el cual, en la preparación de las socas fue superior al 80% y en la preparación de la plantilla superior al 60%, dado que esta última tuvo una mayor proporción de emisiones debidas a óxido nitroso, con un 31% de sus emisiones atribuidas a este gas. Como se puede observar, la aplicación de fertilizantes como urea, compost, lodos y vinaza, incrementan el nivel de emisiones del suelo, sin embargo, el tipo de suelo y la etapa de crecimiento del cultivo aparentemente inciden en los gases emitidos. En la plantilla de manejo limpio, las emisiones de óxido nitroso y metano son más altas que en la soca de manejo comercial, a pesar de no haber recibido

ninguna aplicación en su proceso de preparación, no obstante, la soca de manejo comercial si tuvo una emisión de dióxido de carbono, bastante mayor a la de la plantilla.

7.2 GASES EFECTO INVERNADERO IDENTIFICADOS Y PORCENTAJE DE PARTICIPACIÓN EN LA HUELLA DE CARBONO

7.2.1 Huella de carbono medida

Teniendo en cuenta las emisiones de gases medidas experimentalmente durante las labores de preparación de suelo y las muestras extraídas del proceso de mineralización del mismo en cada una de los tipos de cultivo, se desarrolló el cálculo de la huella de carbono generada por una hectárea de cultivo de caña de azúcar en sus procesos de preparación de suelo, inmediatamente después del corte de caña de azúcar y antes de la ejecución de las labores de levante.

Para calcular la huella de carbono de cada tipo de preparación, se sumaron las emisiones promedio de cada una de las labores mecanizadas y la suma total de las emisiones medidas durante el muestreo en suelo. Valores que representan las emisiones de la preparación del suelo, en una hectárea de suelo, durante e periodo de tiempo específico en el que se tomaron las muestras.

Como se puede observar en los resultados obtenidos, presentados en la tabla 14, las labores de preparación de suelo empleadas en la soca de manejo comercial arrojaron la mayor cantidad de emisiones de carbono equivalente, con un total de $4,94 \times 10^{-5}$ tonCO₂-eq, de las cuales el 95% de las emisiones corresponden al proceso de mineralización del suelo. La siguiente huella en magnitud fue la del cultivo soca de manejo limpio con una emisión de $3,55 \times 10^{-5}$ tonCO₂-eq, representado en un 94% por las emisiones de mineralización del suelo. Finalmente la preparación que menor nivel de emisiones registró fue la de plantilla de manejo limpio, la cual presentó emisiones por $2,76 \times 10^{-5}$ tonCO₂-eq, con un 86% debido al proceso de mineralización del suelo y un 14% debido a la aplicación de una secuencia convencional 1 en las labores mecánicas. Este resultado hace posible evidenciar la diferencia en el nivel de emisiones debidas a la combustión móvil cuando se prepara el suelo para una plantilla, frente a las emisiones por combustión móvil para una soca, puesto que en la preparación del suelo para la siembra de plantillas se requieren mayor cantidad de labores mecanizadas en la secuencia de preparación, lo cual incrementa la cantidad de emisiones y puede variar según el número de pases de cada labor que se ejecuten.

Tabla 14. Huella de Carbono por Tipo de Cultivo

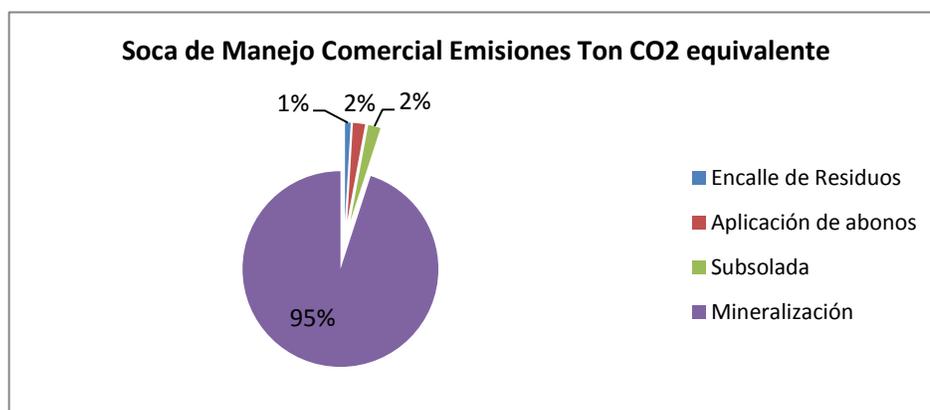
Soca de Manejo Comercial	
Labor	Emisiones Ton CO2 equivalente
Encalle de Residuos	4,606E-07
Aplicación de abonos	9,880E-07
Subsolada	1,020E-06
Mineralización	4,696E-05
Total	4,94E-05

Soca de Manejo Limpio	
Labor	Emisiones Ton CO2 equivalente
Encalle de Residuos	4,606E-07
Subsolada	1,529E-06
Cultivo-Aporque	3,847E-07
Mineralización	3,314E-05
Total	3,552E-05

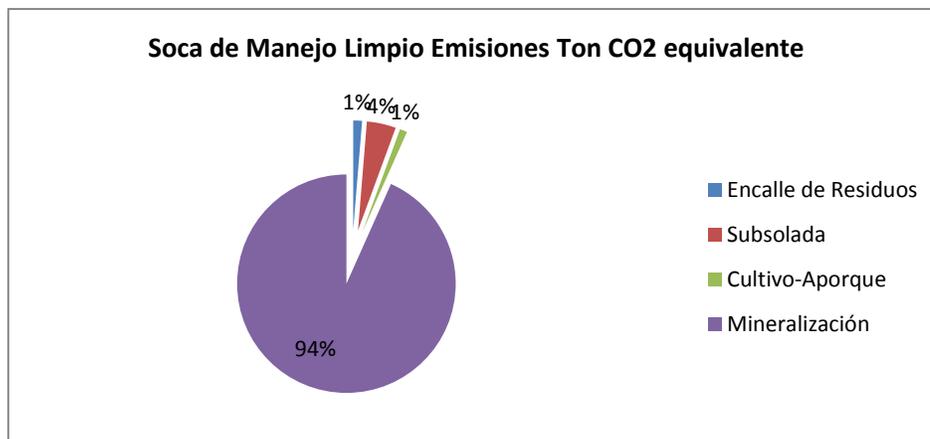
Plantilla de Manejo Limpio	
Labor	Emisiones Ton CO2 equivalente
Decepada	9,741E-07
Subsolada	1,020E-06
Rastroarado	4,179E-07
Rastrillada	8,873E-07
Surcada	4,369E-07
Mineralización	2,392E-05
Total	2,766E-05

En las gráficas 25, 26 y 27 que se muestran a continuación, se presenta la huella de carbono medida en la preparación de suelos de cada uno de los tipos de cultivo dividida por fuente de emisión.

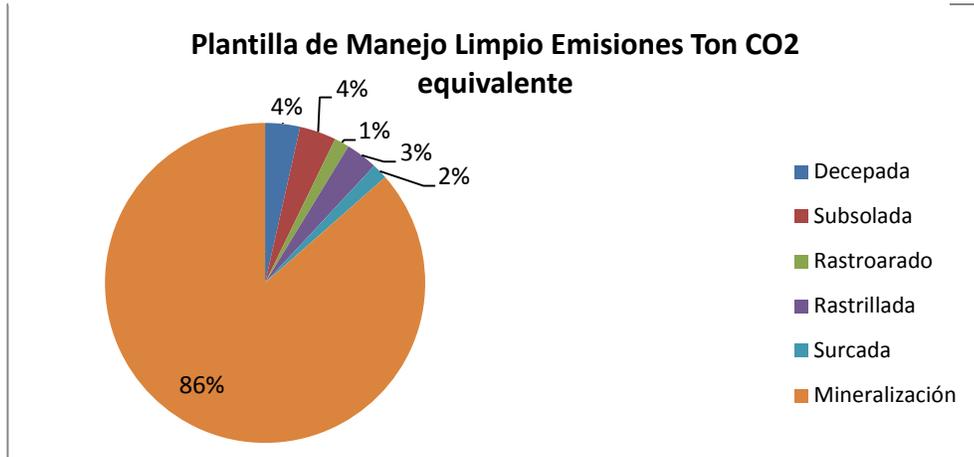
Gráfica 25. Huella de Carbono de la Preparación de una Soca Comercial



Gráfica 26. Huella de Carbono de la Preparación de una Soca de Manejo Limpio



Gráfica 27. Huella de Carbono de la Preparación de una Plantilla de Manejo Limpio



Haciendo una clasificación de la huella de carbono de cada uno de los tipos de preparaciones de suelo aplicados, por gas emitido, se encontró que en la soca de manejo comercial, el 89% de las emisiones correspondían a CO₂, el 10% a N₂O y el 1% a CH₄. En la soca de manejo limpio, el 91% de las emisiones correspondieron a CO₂, el 8% a N₂O y el 2% a CH₄. Finalmente, en la plantilla de manejo limpio, el 72% de las emisiones generadas fue CO₂, el 26% N₂O y el 2% CH₄. En la tabla 15 se presenta qué cantidad de gases corresponde al proceso de mineralización del suelo y qué cantidad al proceso de combustión de la maquinaria agrícola empleada.

Tabla 15. Emisiones medidas por gas

Tipo de Cultivo	Fuente	Concentraciones (TonCO ₂ eq)			Total tonCO ₂ eq
		CH ₄	N ₂ O	CO ₂	
Soca de Manejo Comercial	Mineralización del suelo	3,63E-07	5,19E-06	4,14E-05	4,70E-05
	Combustión vehicular			2,468E-06	2,47E-06
	Total	3,63E-07	5,19E-06	4,39E-05	4,94E-05
	Contribución por gas	1%	10%	89%	100%
Soca de Manejo Limpio	Mineralización del suelo	5,66E-07	2,70E-06	2,99E-05	3,31E-05
	Combustión vehicular			2,37E-06	2,37E-06
	Total	5,66E-07	2,70E-06	3,23E-05	3,55E-05
	Contribución por gas	2%	8%	91%	100%
Plantilla de Manejo Limpio	Mineralización del suelo	4,96E-07	7,33E-06	1,61E-05	2,39E-05
	Combustión vehicular			3,74E-06	3,74E-06
	Total	4,96E-07	7,33E-06	1,98E-05	2,77E-05
	Contribución por gas	2%	26%	72%	100%

Fuente: Elaboración propia.

7.2.2 Huella de carbono calculada

La huella de carbono que se presenta a continuación, fue calculada teniendo en cuenta los parámetros del IPCC2006, considerando el consumo de combustible en la ejecución de la labores de preparación de suelo y la cantidad de urea y nitrógeno agregado al suelo en la preparación que recibió aplicación de abonos.

Para calcular las emisiones de N₂O, se consideró el contenido de 1% de nitrógeno en el compost y de 0,4% de nitrógeno en la vinaza, según la información suministrada por el ingenio. En cuanto a las emisiones generadas por los lodos, se tomó en cuenta la composición química de los lodos de filtro presentada por (Aguilar-Rivera, Rodríguez L, & Castillo, 2010) según la cual el contenido de carbono de estos es de 20% y su relación C/N es de 38,40.

Según los resultados de dicho cálculo, la aplicación de estos abonos genera una emisión de 1,2 ton CO₂-eq. En la tabla 16, se presenta el cálculo de las emisiones generadas a partir de la aplicación de vinaza, urea, compost y lodos en la preparación de suelos para un cultivo de caña de azúcar tipo soca de manejo comercial, donde se puede observar que de los fertilizantes aplicados en la preparación del suelo para un cultivo tipo soca de caña de azúcar de manejo comercial, los fertilizantes que mayor nivel de emisiones generaron fueron el compost y los lodos, con 0,67 y 0,42 ton CO₂-eq respectivamente.

Tabla 16. Cálculo de emisiones de suelos gestionados

Tipo de Fertilizante	Cantidad Aplicada		Contenido de N		Emisiones	Emisiones directas de N ₂ O (kgN ₂ O/ha)	Emisiones directas de CO ₂ (kgCO ₂ /ha)	Emisiones indirectas de N ₂ O por deposición atmosférica y volatilización(kgN ₂ O/ha)	Emisiones indirectas de N ₂ O por lixiviación (kgN ₂ O/ha)	Emisiones totales por fertilización (Ton CO ₂ Equivalente)
Vinaza	9000	lt/ha	0,04194	kg/m ³	N ₂ O	0,000658934		0,000131787	0,00014826	2,80E-04
Urea	100	kg/ha			CO ₂		73,33133333			7,33E-02
Compost	10	ton/ha	100	kg/ha	N ₂ O	1,571133815		0,314226763	0,353505108	6,67E-01
Lodos	12	ton/ha	62,5	kg/ha	N ₂ O	0,981958634		0,196391727	0,220940693	4,17E-01

Fuente: Elaboración propia

Con los datos del cálculo de emisiones de los suelos gestionados, presentadas en la tabla 16 y los datos de las emisiones por combustión móvil, calculados con base en el combustible consumido, presentados en la tabla 17, se calculó la huella de carbono para cada uno de los tipos de preparación de suelos que fueron aplicados.

Tabla 17. Emisiones de CO₂eq por Labor de Preparación de Suelos

Labor de preparación de Suelo	Emisiones Calculadas tonCO ₂ eq./ha	Combustible Consumido(gal/h)
Decepada	1,48E-05	13
Subsolada	1,98E-05	10
Rastroarado	3,00E-06	6
Rastrillada	3,84E-06	5
Surcada	7,93E-07	2
Cincelada	3,99E-06	7
Aplicación de abonos	1,21E-06	3
Encalle de residuos	1,42E-06	3
Subsolado Convencional	1,98E-05	10
Cultivo-aporque	7,59E-07	2

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los cálculos desarrollados, presentados en la tabla 18, el tipo de preparación de suelo que mayor huella de carbono generó fue la preparación de suelo para una soca de manejo comercial con una emisión total de 1,16 tonCO₂-eq/ha, seguida por la preparación para la soca de manejo limpio, con una emisión de $2,84 \times 10^{-5}$ tonCO₂-eq/ha y finalmente por la preparación de la plantilla de manejo limpio, con una emisión de $7,17 \times 10^{-5}$ tonCO₂-eq/ha.

En la huella de carbono de la preparación de suelos de la soca de manejo comercial, se puede evidenciar que el 99,99% de las emisiones de carbono equivalente, corresponde a la aplicación de abonos nitrogenados (vinaza, compost, lodos) y urea. Dado que los otros 2 tipos de preparación no incluían en su proceso la aplicación de fertilizantes, la huella de carbono de la preparación aplicada a la soca de manejo comercial, es notoriamente más alta que la de los otros procesos de preparación. En cuanto a las preparaciones para cultivo de manejo limpio, se puede evidenciar que la preparación de suelos para la siembra de plantilla tiene una huella de carbono mayor que la preparación para la soca, dado que esta tiene una mayor cantidad de labores mecanizadas en su proceso de preparación, lo cual demanda mayor consumo de combustible y por tanto, genera mayor cantidad de emisiones de carbono equivalente.

Tabla 18. Huella de Carbono Calculada por Tipo de Cultivo

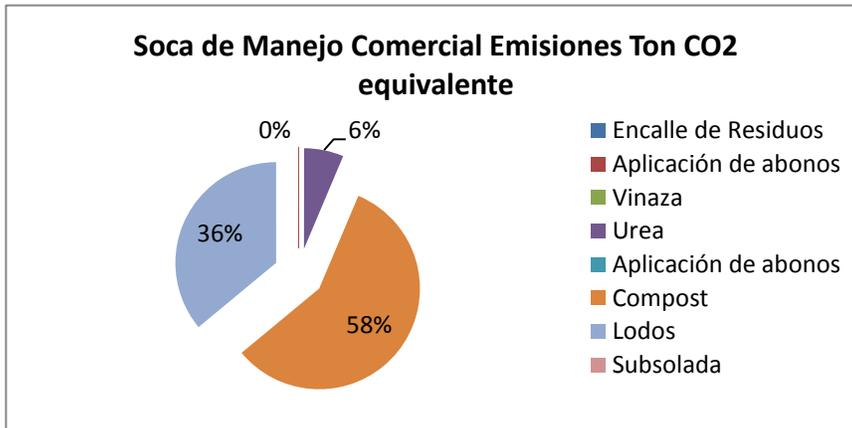
Soca de Manejo Comercial	
Labor	Emisiones Ton CO2 equivalente
Encalle de Residuos	2,848E-06
Aplicación de abonos	3,303E-06
Vinaza	2,798E-04
Urea	7,333E-02
Aplicación de abonos	3,303E-06
Compost	6,672E-01
Lodos	4,170E-01
Subsolada	2,324E-05
Total	1,1578

Soca de Manejo Limpio	
Labor	Emisiones Ton CO2 equivalente
Encalle de Residuos	2,848E-06
Subsolada	2,324E-05
Cultivo-Aporque	2,278E-06
Total	2,836E-05

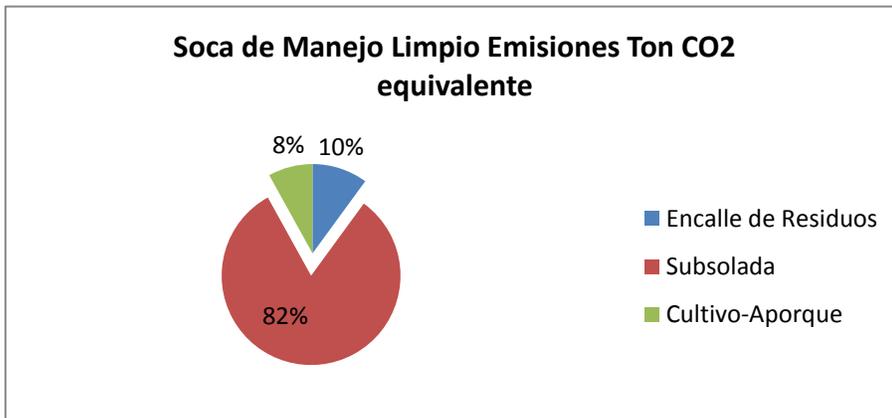
Plantilla de Manejo Limpio	
Labor	Emisiones Ton CO2 equivalente
Decepada	2,962E-05
Subsolada	2,324E-05
Rastroarado	6,663E-06
Rastrillada	1,025E-05
Surcada	1,902E-06
Total	7,167E-05

En las gráficas 28, 29 y 30, presentadas a continuación, puede observarse la huella de carbono para cada tipo de preparación de suelo, seccionada por el porcentaje de contribución de cada fuente de emisión.

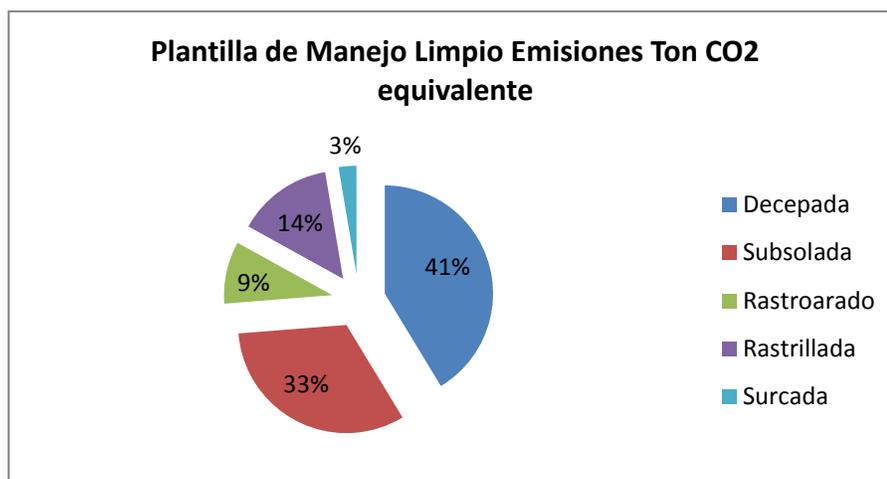
Gráfica 28. Huella de Carbono Calculada para una Soca Comercial



Gráfica 29. Huella de Carbono Calculada para una Soca de Manejo Limpio



Gráfica 30. Huella de Carbono Calculada para una Plantilla de Manejo Limpio



7.2.3 Análisis de incertidumbre

Las estimaciones de la huella de carbono de los procesos de preparación de suelos para cada uno de los tipos de cultivo analizados, se hicieron para una hectárea específica de suelo, sobre terrenos ubicados en la región del Valle del Cauca, a una altura de 1.000msnm en promedio.

Las categorías incluidas en el inventario de gases emitidos por cada uno de los procesos de preparación de suelos implementados fueron: uso de tierra, perteneciente al sector de agricultura, silvicultura y otros usos de tierra (AFOLU), y combustión móvil, perteneciente al sector de Energía, según las directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. De acuerdo con las categorías analizadas, los gases incluidos en el inventario fueron CO₂, N₂O y CH₄.

Los datos de actividad para la categoría de uso de tierra, fueron recopilados bajo la técnica de muestreo en cámara cerrada. En cada uno de los suelos preparados se tomaron 24 muestras del gas emitido y bajo la metodología de cromatografía de gases, se determinó la composición de la muestra en cuanto a CO₂, N₂O y CH₄. Estos datos representan las emisiones del suelo durante un periodo de 45min a 60min. Por cuestiones de presupuesto y tiempo, fueron tomados una única vez, por tanto, aunque representan la actividad mineral real del suelo, no son extrapolables para desarrollar otras predicciones. Una buena práctica para mejorar esta incertidumbre es el muestreo completo del comportamiento del suelo durante todo su periodo de cultivo, con esta información, ya sería posible determinar los flujos de emisión y absorción de los gases analizados. Este proyecto de investigación, hace parte de uno más grande en el que se considerarán las emisiones del suelo después de cada aplicación,

durante los 12 meses de cultivo, por tanto servirá de insumo para análisis posteriores.

En cuanto a los datos de actividad de los tractores durante la ejecución de cada una de las labores de preparación, se debe tener en cuenta que las mediciones representan las condiciones reales de operación del tractor, en cuanto a consumo de combustible y emisión de gases, sin embargo, las mediciones de CO₂ se desarrollaron en campo abierto, por tanto, las condiciones climáticas, el viento, la presencia de plantaciones y de otros vehículos en zonas aledañas, no fueron consideradas y constituyen una fuente de incertidumbre en los datos.

Para determinar la incertidumbre de los datos de actividad, se exploró la distribución de las mediciones obtenidas para cada una de las labores de preparación de suelos y las emisiones del suelo de cada una de las suertes preparadas, utilizando histogramas, acompañados de una función de suavizamiento de Kernel (función empírica de los datos) y de una distribución normal que mejor se adapta a los datos, utilizando el paquete estadístico Stata 13.

Los histogramas obtenidos muestran que, en general, los datos no siguen una distribución normal. En consecuencia fue necesario estimar los intervalos de confianza utilizando el método de bootstrap (o bootstrapping) como lo recomienda el IPCC en su capítulo 3: Incertidumbres (IPCC, 2006). Para cada una de las variables, se hizo lo siguiente: Se tomaron 1000 muestras de cada variable del 75% de los datos. Es decir, para una variable de 20 observaciones (como los datos de emisiones de la suerte 215) se tomaron 1000 muestras aleatorias, cada una con 15 observaciones. A cada una de las muestras se les estimó la media. A este conjunto de 1000 medias se le estimaron los intervalos de confianza de la forma convencional.

Debido al Teorema Central del Límite, aunque las variables no sigan una distribución normal, las medias del muestreo repetido se aproximan a una distribución normal a medida que el muestreo tiende a infinito. Por esta razón, el intervalo sigue siendo simétrico en la media. Se podría haber corregido por sesgo, y esto haría que el intervalo de confianza sea de diferente magnitud en cada una de las colas de la distribución. Este refinamiento no afecta de manera significativa los datos así que se prefirió el intervalo de confianza simétrico. En general, los intervalos de confianza estimados con bootstrapping son más grandes que los estimados de una distribución normal. En la tabla 19 se muestran los intervalos de confianza estimados para cada una de las variables de los datos de actividad. Los intervalos de confianza muestran que hay una incertidumbre no despreciable en las emisiones del suelo de la suerte 8 (Soca de manejo comercial), Suerte152b (Soca de manejo limpio) y Suerte 215 (Plantilla de manejo limpio).

Tabla 19. Intervalos de Confianza

Intervalo de Confianza Bootstrap				
Variable	Mean	[95% Conf. Interval]		En porcentaje
Decepada (ppm)	321	307,2028	334,7972	4,30
Subsolada (ppm)	336	300,4961	371,5039	10,57
Rastro-arado (ppm)	275,4667	266,2469	284,6865	3,35
Rastrillada (ppm)	292,4	284,6714	300,1285	2,64
Surcada (ppm)	287,9333	277,7513	298,1153	3,54
Cincelada (ppm)	282,8	269,0916	296,5084	4,85
Aplicación de abonos (ppm)	325,6	317,4196	333,7804	2,51
Encalle de residuos (ppm)	303,6	292,4305	314,7695	3,68
Subsolado convencional (ppm)	336	299,5686	372,4314	10,84
Cultivo-aporque (ppm)	253,5333	238,6269	268,4398	5,88
Suerte8 (grCO ₂ eq)	1,956715	1,144869	2,768561	41,49
Suerte152b (grCO ₂ eq)	1,381023	1,059263	1,702783	23,30
Suerte215 (grCO ₂ eq)	1,196028	0,8430269	1,549029	29,51

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 19, se puede observar que de las labores mecanizadas de preparación de suelos, la que mayor nivel de incertidumbre presentó fue la subsolada, la cual tuvo una emisión promedio de 336ppm, con una incertidumbre de $\pm 10,57\%$, que corresponde, con un rango de probabilidad del 95%, a un intervalo de 300,49ppm a 371,50ppm. En cuanto a las muestras de mineralización del suelo, las emisiones de la suerte con soca de manejo comercial reflejaron una incertidumbre de $\pm 41,49\%$ que, con un rango de probabilidad del 95%, corresponde a un intervalo de variación entre 1,14 grCO₂eq y 2,77 grCO₂eq.

Combinación de incertidumbres

Para estimar la incertidumbre de la huella de carbono medida experimentalmente para cada uno de los 3 procesos de preparación de suelos presentados, se empleó el método de propagación de errores presentado en la ecuación 3.2 del capítulo 3: Incertidumbres de las directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases efecto invernadero (IPCC, 2006).

Ecuación 5. Combinación de incertidumbres

ECUACIÓN 3.2

COMBINACIÓN DE INCERTIDUMBRES – MÉTODO 1 – SUMA Y RESTA

$$U_{total} = \frac{\sqrt{(U_1 \cdot x_1)^2 + (U_2 \cdot x_2)^2 + \dots + (U_n \cdot x_n)^2}}{|x_1 + x_2 + \dots + x_n|}$$

Fuente: Directrices del IPCC de 2006, volumen 1, capítulo 3, pág. 3.31

Las U_i hacen referencia a los porcentajes de incertidumbres de cada variable, presentados en la tabla 16, y las x_i corresponden a los promedios de cada una de las variables. Empleando la ecuación 3.2 de acuerdo con la secuencia de labores que fue aplicada en cada uno de los tipos de cultivos preparados, se obtuvo la incertidumbre combinada de la huella de carbono calculada experimentalmente. En la tabla 20, que se muestra a continuación, se puede observar que, con una incertidumbre de 4,48%, la huella de carbono de la soca de manejo limpio es la que presenta mayor nivel de incertidumbre. No obstante, en términos generales, el nivel de incertidumbre de las huellas calculadas es relativamente pequeño, lo cual indica que son una buena aproximación a las emisiones reales para los tipos de cultivo descritos.

Tabla 20. Incertidumbre Combinada de la Huella Experimental

Soca de Manejo Comercial		Soca de Manejo Limpio		Plantilla de Manejo Limpio	
Encalle de Residuos	1247577,30	Encalle de Residuos	1247577,30	Decepada	1903627,28
Aplicación de abonos	669189,44	Subsolada	12605269,15	Subsolada	12605269,15
Subsolada	12605269,15	Cultivo-Aporque	2222007,61	Rastroarado	850047,12
Mineralización (Suerte 8)	6590,94	Mineralización (Suerte 152b	1035,29	Rastrillada	597312,58
Numerador	3811,64	Numerador	4009,47	Surcada	1036731,24
Denominador	965,20	Denominador	894,51	Mineralización (Suerte 215)	1246,10
Incertidumbre	3,95	Incertidumbre	4,48	Numerador	4122,41
				Denominador	1514,00
				Incertidumbre	2,72

Fuente: Elaboración Propia

7.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA HUELLA DE CARBONO MEDIDA FRENTE A LA HUELLA DE CARBONO CALCULADA

En los valores de huella de carbono obtenidos tanto experimental como teóricamente, es posible evidenciar que la mayor contribución a las emisiones de carbono equivalente está relacionada con los procesos de mineralización del suelo, los cuales generan emisiones de óxidos nitrosos y dióxido de carbono principalmente.

En el cálculo teórico sólo es posible evidenciar la participación del suelo en las emisiones de CO₂eq, cuando hay aplicación de fertilizantes nitrogenados y urea, por lo tanto, en las preparaciones de la soca y la plantilla de manejo limpio, estas emisiones no son consideradas porque durante su proceso de preparación, estos productos no fueron adicionados.

En la tabla 21, se presenta la huella de carbono calculada teóricamente y medida experimentalmente, separada por fuente de emisión y con el porcentaje de participación de cada una de estas fuentes.

Tabla 21. Huella de Carbono Calculada vs Huella de Carbono Medida

Tipo de Cultivo	Fuente	Total Calculado tonCO ₂ eq	Porcentaje	Total Medido tonCO ₂ eq	Porcentaje
Soca de Manejo Comercial	Mineralización del Suelo	1,158E+00	99,9972%	4,69612E-05	95,01%
	Combustión vehicular	3,269E-05	0,0028%	2,46825E-06	4,99%
	Total	1,157814548	100,0000%	4,94294E-05	100,00%
Soca de Manejo Limpio	Mineralización del Suelo		0,0000%	3,31E-05	93,31%
	Combustión vehicular	2,84E-05	100,0000%	2,37E-06	6,69%
	Total	2,84E-05	0,0024%	3,55E-05	100,00%
Plantilla de Manejo Limpio	Mineralización del Suelo		0,0000%	2,39E-05	86,49%
	Combustión vehicular	7,17E-05	100,0000%	3,74E-06	13,51%
	Total	7,17E-05	100,0000%	2,77E-05	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

En la huella de carbono medida para la preparación de suelos de la soca de manejo comercial, es posible evidenciar que el proceso de mineralización genera el 95% de las emisiones, mientras que la combustión móvil tan solo representa el 5% de esta. En la huella de carbono del proceso de preparación de la soca de manejo limpio, el 93% de la huella corresponde al proceso de mineralización del suelo y el 7% al proceso de combustión. Finalmente, en la huella de la preparación de la plantilla de manejo limpio, la mineralización del suelo representó el 86% de las emisiones y el proceso de combustión el 14%. En esta comparación de porcentajes, se puede evidenciar que el proceso de mineralización del suelo que más emite es el de la soca de manejo comercial, donde el 95% de la huella de carbono corresponde a esta fuente. Y, la preparación de suelos que tiene mayor proporción de emisiones por el proceso de combustión móvil, es la plantilla de manejo limpio, con un 14% de emisiones debidas a este proceso.

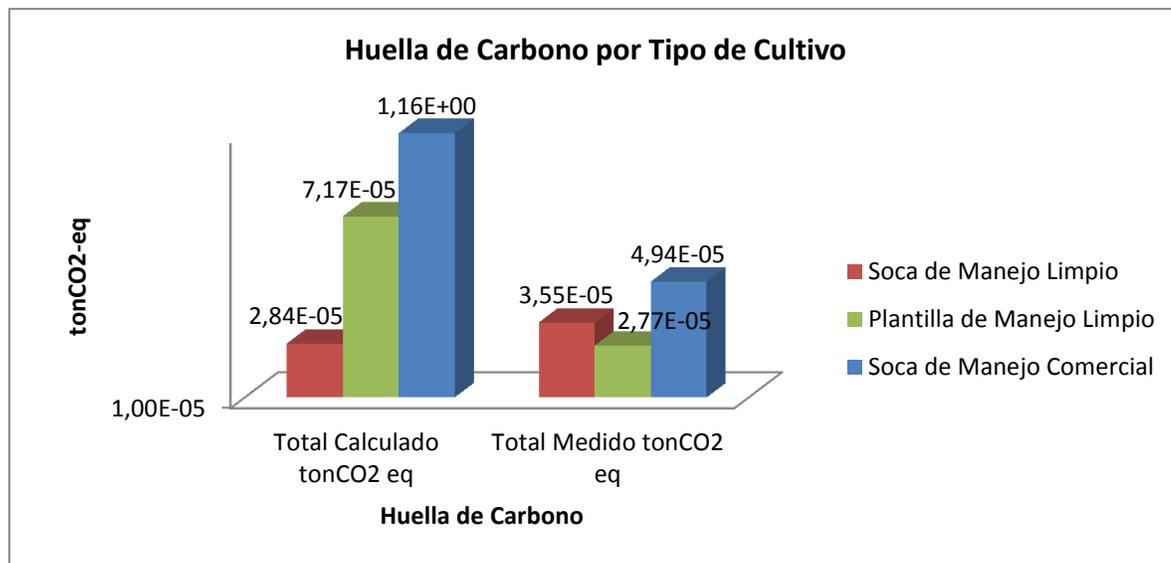
Por otra parte, en la huella de carbono calculada, las emisiones por mineralización de los fertilizantes aplicados en la suerte 8, representan el 99,99% de las emisiones, las cuales no son consideradas en las emisiones producidas por las otras dos preparaciones de suelo, dado que la soca de manejo limpio y la plantilla de manejo limpio, no reciben aplicación de fertilizantes durante su proceso de preparación de suelos.

En este ejercicio de estimación de la huella de carbono teórica y experimental de los procesos de preparación de suelos, se puede encontrar que las mediciones

experimentales no son comparables con las emisiones calculadas para los procesos de preparación de suelo, dado que hacen referencia a momentos de emisión diferentes. Las emisiones por mineralización del suelo, en la huella de carbono experimental, presentan la emisión de gases durante un periodo de tiempo específico (el tiempo de muestreo), mientras que el cálculo teórico presenta el valor de la emisión de gases después de que su proceso de reacción química en el suelo está completo, es decir, considera las emisiones totales, independientemente del tiempo que tardan.

En la gráfica 31 se comparan las huellas de carbono de cada tipo de preparación de suelo medidas con respecto a las calculadas. En esta gráfica se puede observar que la huella de carbono del proceso de preparación de suelos para una soca comercial fue la mayor tanto medida experimentalmente, como calculada teóricamente, guardando relación con el impacto que tiene el procesos de mineralización del suelo sobre el nivel de emisiones de los procesos de preparación. La huella de carbono calculada para los procesos de preparación de la soca y la plantilla de manejo limpio, en cambio, se encuentran invertidas con respecto a la huella de carbono medida experimentalmente, dado que en la huella de carbono calculada para estos dos tipos de preparación de suelo, no se tienen en cuenta las emisiones del suelo durante su proceso de mineralización, por lo tanto son reflejo solo de la cantidad de labores mecanizadas que se desarrollan en la preparación de estas.

Gráfica 31. Huella de Carbono Medida vs Huella de Carbono Calculada



Fuente: Elaboración propia.

Analizando las fuentes de emisión de cada una de las huellas de carbono medidas frente a las calculadas, se puede encontrar que, tanto en las mediciones experimentales, como en los cálculos teóricos, el proceso de mineralización del

suelo es el que mayor impacto tiene sobre la huella de carbono de los procesos de preparación del mismo.

De acuerdo con los cálculos realizados, de los fertilizantes aplicados, el compost y los lodos son los que mayor nivel de emisiones generan, representando el 93% de las emisiones de carbono equivalente calculadas para la soca de manejo comercial.

En cuanto a las preparaciones que no recibieron aplicación de abonos, se puede observar que, las emisiones por combustión móvil de las labores de decepada y subsolada son las más representativas con respecto a la huella de carbono total calculada para estos dos tipos de preparación de suelo.

En la tabla 22 se presentan las estimaciones de la huella de carbono para cada tipo de preparación de suelos, detallada por fuente de emisión, tanto medida experimentalmente, como calculada teóricamente.

Tabla 22. Huella de Carbono Calculada vs Huella de Carbono Medida Detalladas por Labor

Huella de Carbono de los Procesos de Preparación de Suelo Calculada Según los Lineamientos del IPCC2006

Soca de Manejo Comercial		
Labor	Emisiones Ton CO2 equivalente	Porcentaje
Encalle de Residuos	2,848E-06	0,00%
Aplicación de abonos	3,303E-06	0,00%
Vinaza	2,798E-04	0,02%
Urea	7,333E-02	6,33%
Aplicación de abonos	3,303E-06	0,00%
Compost	6,672E-01	57,62%
Lodos	4,170E-01	36,02%
Subsolada	2,324E-05	0,00%
Total	1,1578	100,00%

Soca de Manejo Limpio		
Labor	Emisiones Ton CO2 equivalente	Porcentaje
Encalle de Residuos	2,848E-06	10,04%
Subsolada	2,324E-05	81,93%
Cultivo-Aporque	2,278E-06	8,03%
Total	2,836E-05	100,00%

Plantilla de Manejo Limpio		
Labor	Emisiones Ton CO2 equivalente	Porcentaje
Decepada	2,962E-05	41,32%
Subsolada	2,324E-05	32,42%
Rastroarado	6,663E-06	9,30%
Rastrillada	1,025E-05	14,30%
Surcada	1,902E-06	2,65%
Total	7,167E-05	100,00%

Huella de Carbono de los Procesos de Preparación de Suelo Estimada Según Emisiones Medidas Experimentalmente

Soca de Manejo Comercial		
Labor	Emisiones Ton CO2 equivalente	Porcentaje
Encalle de Residuos	4,606E-07	0,93%
Aplicación de abonos	9,880E-07	2,00%
Subsolada	1,020E-06	2,06%
Mineralización	4,696E-05	95,01%
Total	4,94E-05	100,00%

Soca de Manejo Limpio		
Labor	Emisiones Ton CO2 equivalente	Porcentaje
Encalle de Residuos	4,606E-07	1,30%
Subsolada	1,529E-06	4,31%
Cultivo-Aporque	3,847E-07	1,08%
Mineralización	3,314E-05	93,31%
Total	3,552E-05	100,00%

Plantilla de Manejo Limpio		
Labor	Emisiones Ton CO2 equivalente	Porcentaje
Decepada	9,741E-07	3,52%
Subsolada	1,020E-06	3,69%
Rastroarado	4,179E-07	1,51%
Rastrillada	8,873E-07	3,21%
Surcada	4,369E-07	1,58%
Mineralización	2,392E-05	86,49%
Total	2,766E-05	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

7.4 OPORTUNIDADES DE REDUCCIÓN

A lo largo del desarrollo del proyecto, se ha trabajado en la caracterización de las emisiones de 2 fuentes emisoras de GEI: la combustión móvil y la mineralización⁶ del suelo. Sobre las emisiones por combustión móvil tienen relación el tipo de suelo preparado, el tipo de vehículo empleado en el desarrollo de las labores mecanizadas de preparación de suelo y el tipo de combustible con el que estos operan. En cuanto a las emisiones por mineralización del suelo, sobre este aspecto inciden factores como la cantidad de fertilizantes y materia orgánica aplicada, el tipo de fertilizante aplicado y, las características específicas del suelo sobre el que se hace la aplicación.

De acuerdo con los resultados de la huella de carbono estimada para cada una de las hectáreas estudiadas, las emisiones relacionadas con la aplicación de material orgánico y mineral al suelo, son las que mayor impacto generan sobre la cantidad de gases efecto invernadero emitidos al ambiente. Por lo tanto, teniendo en cuenta que la huella de carbono le permitirá a la empresa conocer la contribución de gases efecto invernadero que está haciendo al medio ambiente, así como compararse con otras empresas de la misma industria, dichos factores deben ser un foco de atención para definir estrategias que permitan reducir el valor de la huella de carbono del proceso de preparación de suelos para cada uno de los tipos de cultivo.

Se elaboraron tres huellas de carbono para estimar las emisiones generadas durante el proceso de preparación de suelo para un cultivo de caña de azúcar tipo soca de manejo tradicional, un cultivo tipo soca de manejo limpio y un cultivo tipo plantilla de manejo limpio, obteniendo como resultado que, la mayor huella de carbono fue generada por la soca de caña de azúcar de manejo comercial, la cual, dentro de su proceso de preparación de suelo, recibió la aplicación de tres fuentes de materia orgánica diferente: vinaza, compost y lodos, así como un fertilizante sintético: la urea.

En los resultados de las muestras de gases tomadas en la suerte con soca de manejo comercial, de forma posterior a la ejecución de las labores de preparación, el suelo emitió un 88% de CO₂, un 11% de N₂O y sólo un 1% de CH₄. De acuerdo con el material nitrogenado y la urea (CO(NH₂)₂) aplicada al suelo, se esperaba que el mayor porcentaje de emisiones proviniera del CO₂ y el N₂O, pues los procesos de desnitrificación, nitrificación y reducción, del material orgánico y la urea, generan emisiones de estos dos gases especialmente. Por lo tanto, se

⁶ Mineralización: proceso microbiano por medio del cual el nitrógeno del suelo es convertido a formas inorgánicas.

puede evidenciar que los resultados reflejan el impacto (considerado por el IPCC en las directrices para los inventarios de gases) de las emisiones que son consecuencia de la aplicación de material orgánico y urea, al obtenerse una mayor cantidad de emisiones de gases en dicha suerte, así como un mayor porcentaje de este, correspondiente a CO_2 y N_2O .

La siguiente huella en magnitud fue la soca de manejo limpio, la cual no recibió ningún tipo de aplicación de materia orgánica, sin embargo si reflejó una emisión de CO_2 del 91%, de N_2O del 8% y de CH_4 del 2%. Esta suerte con cultivo tipo soca se encuentra en un periodo de transición a suelo orgánico, por lo tanto, en el último año no ha recibido fertilizantes minerales y su suelo ha estado en proceso de mejoramiento, por medio de la aplicación de material orgánico, lo cual, como se puede evidenciar, incide en que la proporción de emisiones de N_2O sea muy cercano al registrado por la soca de manejo comercial.

Finalmente, la menor huella de carbono fue medida en la plantilla de manejo limpio, la cual emitió una menor cantidad de gases, sin embargo, en la distribución porcentual de los gases emitidos, a diferencia de las socas, tuvo un porcentaje de emisiones de N_2O del 31%, más de dos veces el porcentaje registrado por las socas. El alto nivel de emisiones de N_2O en esta suerte puede estar relacionado principalmente con la condición orgánica del suelo, el cual, en los últimos 8 años sólo ha recibido aplicaciones de material orgánico. El abono orgánico aumenta la capacidad de retención de nutrientes del suelo y enriquece su capacidad para albergar actividad biológica (Pinzón Pinto, 2010). Adicionalmente, el cultivo en su estado de plantilla debe extraer del suelo la mayor cantidad posible de nutrientes para lograr el brote de las yemas, lo cual genera que su proceso de mineralización sea más intenso (Carmo et al., 2013). En cuanto a los otros gases, el CH_4 se mantuvo en una emisión del 2%, pero el CO_2 disminuyó a 67%.

Con los resultados de las mediciones realizadas en el suelo de cada tipo de cultivo, es posible evidenciar que la aplicación de material orgánico y mineral en el proceso de preparación de suelos para el cultivo de caña de azúcar, incrementa la cantidad de emisiones de GEI, sin embargo, la distribución porcentual de emisión de cada gas, parece ser afectada también, por factores como la calidad del suelo y la etapa de crecimiento de la planta.

Según la investigación desarrollada por Carmo et al. (Carmo et al., 2013) sobre las prácticas de fertilización en cultivos de caña de azúcar en Brasil, las emisiones de N_2O y CO_2 incrementan significativamente cuando fertilizantes orgánicos son aplicados junto con fertilizantes minerales, pero en especial cuando se utilizan residuos de cosecha. De acuerdo con los resultados de dicha investigación, cuando se adiciona urea con vinaza sobre un cultivo con plantilla de caña, las emisiones se incrementan alrededor del 340% con respecto a las emisiones de una aplicación sólo de urea. Igualmente, cuando se adicionan más de 14 ton/ha de residuos de caña sobre un cultivo de soca, las emisiones de CO_2eq se

incrementan hasta 7 veces el valor de las emisiones cuando se adiciona esta misma cantidad de residuos sin aplicación de vinaza.

A pesar de que el factor de emisión del suelo varía de un país a otro, la importancia del estudio citado es que presenta evidencia de que el uso de la vinaza y residuos de caña de azúcar, como fertilizantes orgánicos del suelo, tiene una fuerte incidencia sobre las emisiones de N_2O y por tanto, deben ser utilizados en las cantidades adecuadas, de manera que no se incremente la huella de carbono generada durante el proceso de preparación de suelo de las socas de caña de azúcar de manejo comercial, pues son las que reciben aplicación de vinaza, compost, lodos y urea, además de los residuos del corte de caña.

Los resultados de la investigación presentada por Carmo et al. (2013) y la alta cantidad de materia orgánica que es aplicada al suelo en el proceso de preparación para el levante de la soca de caña de azúcar de manejo comercial, abren una oportunidad a futuras investigaciones en las que se pueda determinar la mezcla adecuada de vinaza, residuos de caña, urea, compost y lodo que generen una menor huella de carbono sin afectar la productividad del cultivo. De esta forma, es una práctica recomendable para el ingenio, empezar a cuantificar los residuos de caña que son dejados sobre cada hectárea de suelo.

En cuanto a los resultados de las emisiones de CO_2eq generadas por los procesos mecanizados de preparación de suelos, la huella de carbono con mayor participación de emisiones por combustión la tuvo el proceso de preparación de suelos para una plantilla de manejo limpio, con un 13.51% de sus emisiones, generadas por las labores mecanizadas de preparación convencional 1, uno de los tipos de preparación con mayor número de labores. Después de esta, la soca de manejo limpio y la soca de manejo comercial, tuvieron un nivel de emisiones del 6,69% y 4,99% respectivamente.

De todos los tipos de preparación considerados, el 86% incluye en su secuencia de labores la decepada y el 71% incluye la labor de subsolada (ver la secuencia de labores por tipo de preparación en la tabla 8.), dos de las labores que mayor nivel de emisiones de gases registraron. El ingenio donde se realizó el estudio, prepara el 88,7% de las hectáreas de administración propia con el tipo de preparación convencional 1, el 4,4% con convencional 2 y el 6.9% con liviana 1. Como se puede evidenciar, este asigna el tipo de preparación que mayor cantidad de emisiones genera, a la mayor cantidad de hectáreas preparadas, pues en su secuencia de labores, incluye dos pases de decepada y subsolada, labores que si bien mejoran las condiciones de los suelos muy compactos, podrían no ser necesarias con ese nivel de intensidad en todos los grupos de suelo.

La zonificación agroecológica representa, por tanto, una oportunidad para reducir el nivel de emisiones generadas por la combustión móvil de los tractores agrícolas, pues teniendo en cuenta las características específicas del suelo a preparar, se

podrían reducir la cantidad de labores a incluir en los procesos de preparación de ese 88.7% de hectáreas que se prepara con el método convencional 1, haciendo uso de las herramientas de la agricultura específica por sitio.

8. CONCLUSIONES

A partir de los resultados de la medición y el cálculo teórico de las emisiones por combustión móvil y mineralización del suelo, presentados anteriormente para obtener la huella de carbono de los 3 tipos de preparaciones de suelo para el cultivo de caña de azúcar: preparación de suelo para una soca de caña de azúcar de manejo comercial, una soca de caña de azúcar de manejo limpio y una plantilla de caña de azúcar de manejo limpio, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se identificó que la combustión móvil, la mineralización del suelo y el empleo de fertilizantes orgánicos y minerales, son las fuentes que inciden en la emisión de gases efecto invernadero durante los procesos de preparación de suelos.
- En la huella de carbono medida experimentalmente, se identificó que entre el 87% y el 95% de las emisiones de gases efecto invernadero son resultado del proceso de mineralización del suelo. Por lo tanto, a pesar de que el uso de maquinaria agrícola contribuye con la emisión de GEI, el impacto más significativo proviene de las prácticas de fertilización.
- De acuerdo con los resultados de las mediciones experimentales realizadas sobre el proceso de mineralización del suelo, la diferencia de emisiones entre una soca de manejo comercial que recibió aplicación de fertilizantes orgánicos y minerales, y una soca de manejo limpio que no recibió ningún tipo de aplicación, fue del 28%, lo cual indica una vez más que las prácticas de fertilización inciden significativamente sobre las emisiones de GEI y por tanto, constituyen una fuente de reducción de la huella de carbono.
- De los procesos mecanizados ejecutados en la preparación del suelo para el cultivo de caña de azúcar, los procesos de decepada, subsolada y aplicación de abonos, con un 6%, 10% y 7% respectivamente, por encima de la emisión promedio de todos tractores, fueron los que en mayor consumo de combustible incurrieron y mayor concentración CO_2 en el ambiente generaron.
- En la huella de carbono medida experimentalmente sobre la soca de caña de azúcar de manejo comercial se encontró que, del total de emisiones, el 89% correspondían a CO_2 , el 10% a N_2O y sólo el 1% a CH_4 . En la soca de caña de azúcar de manejo limpio se encontró que el 91% eran emisiones de CO_2 , el 7% emisiones de N_2O y el 2% de CH_4 . En la plantilla de caña de manejo limpio, en cambio, se encontró que el 72% de las emisiones fueron de CO_2 , el 26% fueron de N_2O y el 2% correspondieron a CH_4 . Concluyéndose así que, el gas que más emite el suelo en su proceso de mineralización es el CO_2 , seguido por el N_2O , el cuál además, fue mayor en el suelo en renovación de plantilla que en las socas.

- Al contrastar la huella de carbono calculada con la huella de carbono medida experimentalmente, se encontró que en la huella de carbono calculada no se ve reflejada la incidencia de las emisiones del suelo cuando no se hace aplicación de fertilizantes, sin embargo, en la huella de carbono medida experimentalmente, el proceso de mineralización de suelo representó más del 86% de las emisiones de GEI en los tres tipos de preparaciones de suelo evaluados.
- En cuanto a las emisiones por combustión generadas por el tractor, se pudo observar que las mediciones experimentales reflejaron menos del 1% de las emisiones esperadas, según el cálculo teórico realizado utilizando el factor de emisión para el diésel colombiano, resultado que es esperable, si se tiene en cuenta que fueron mediciones experimentales realizadas en campo abierto donde hay incidencia de factores no controlados como la cantidad y dirección del viento, los cuales dispersan el CO₂ emitido, y la absorción de CO₂ de plantaciones aledañas. Al respecto queda la inquietud acerca de si las emisiones estimadas por medio del cálculo teórico están sobreestimando las emisiones reales, o si lo que sucede es que las emisiones generadas por los tractores realmente son tan altas que, utilizando sólo un equipo de muestreo y bajo condiciones ambientales, se puede identificar la presencia de ese 1% en el ambiente.

9. RECOMENDACIONES

Con base en las conclusiones del proyecto, a continuación se presentan las recomendaciones para tomar ventaja de los hallazgos y poder efectuar acciones de mejoramiento y reducción de la huella de carbono generada en la etapa de preparación de suelo del cultivo de caña de azúcar.

- Teniendo en cuenta que el 86% de los tipos de preparaciones de suelo incluyen en su secuencia de labores, las labores de decepada y subsolada, se recomienda re-evaluar la aplicación de los tipos de preparación de suelo convencionales, tomando como referencia la zonificación agroecológica a la que pertenece cada suerte, de manera que labores como la decepada y la subsolada sean aplicadas sólo en los suelos en los que resulte definitivamente indispensable para el crecimiento de la planta.
- Dado que el tipo de combustible, el desempeño del motor y su tecnología, inciden en el nivel de emisiones de GEI de los tractores, se recomienda establecer procesos de negociación con los proveedores para emplear vehículos que trabajen con biocombustibles, y tengan mayor número de marchas, de manera que operen a menos revoluciones por minuto, consuman menos combustible y de esta forma emitan menos CO₂.
- Con respecto a las emisiones medidas en campo sobre la operación del tractor, se recomienda incrementar el número de instrumentos y puntos de medición de las emisiones, de manera que se pueda mejorar el contraste de las mediciones tomadas en condiciones normales de operación, a pesar de la interferencia de factores como el clima y el viento.
- Teniendo en cuenta la incidencia que tiene la aplicación de materia orgánica al suelo, sobre el nivel de emisiones de GEI, se recomienda cuantificar los residuos de caña que son dejados en el suelo para el encalle de residuos, de manera que sea una aplicación controlada y acorde a las necesidades del suelo.
- Con base en los resultados de las emisiones medidas y las investigaciones desarrolladas por otros autores, se recomienda realizar el diseño de un experimento para evaluar la cantidad óptima, de cada uno de los abonos, a aplicar, de manera que no se aplique más de la cantidad que realmente necesita el suelo, pues el exceso de materia orgánica incrementa las emisiones de N₂O.
- Finalmente, teniendo en cuenta que la información de los tratamientos aplicados al suelo durante toda su vida productiva inciden en la generación de emisiones, y ésta es la principal fuente para calcular de forma más acertada y precisa la huella de carbono, se recomienda sistematizar o llevar un registro centralizado del manejo que se le da a cada suerte cultivada, de manera que se cuente con un registro exacto de las fechas de ejecución de

cada una de las labores o aplicaciones, las cantidades utilizadas, las condiciones que generaron cada tratamiento, etc. Esto facilitaría el acceso a la información, haciendo menos dispendiosa experiencia de recolección de la misma, pues actualmente, los registros dependen de los ayudantes y mayordomos de las suertes, quienes a veces olvidan hacer el registro en el momento en el que se desarrolla la labor y por tanto, tiempo después, cuando se solicita la información, hacen el registro empleando la memoria, lo cual incrementa el nivel de incertidumbre en la información. La sistematización de la información, además de reducir la incertidumbre y mejorar la disponibilidad de la información, promovería, la futura automatización del cálculo de la huella de carbono.

10. FUTURAS INVESTIGACIONES

- Los tratamientos aplicados al cultivo de caña de azúcar son muy diversos, pues dependen de las características del suelo, la edad de la planta y el sistema bajo el que se están cultivando. El manejo limpio de las plantaciones demanda tratamientos con fertilizantes orgánicos y productos naturales que mejoran las características del suelo en el largo plazo, mientras que los cultivos de manejo comercial reciben aplicación de fertilizantes minerales que buscan mejorar la productividad de la planta en el corto plazo, independientemente de los procesos que ocurran con el suelo. Por otra parte, cuando han transcurrido de 6 a 8 cortes de una misma soca de caña de azúcar, dependiendo de su productividad, se ejecuta un proceso de renovación de soca en el que se efectúan aplicaciones adicionales a las labores de preparación de suelo. De los tratamientos mencionados, en este proyecto tan solo se alcanzaron a cubrir los procesos empleados en la preparación de suelos para preparar una soca de manejo comercial, una soca de manejo limpio y una plantilla de manejo limpio. Sin embargo, todavía son objeto de investigación los procesos que ocurren en el suelo cuando se hace la renovación de una soca, así como durante las siguientes etapas del cultivo: fertilización para el levante, aplicación de herbicidas para el control de maleza y aplicación de madurantes de preparación para el corte. Con dichas actividades, se completaría el ciclo efectuado en campo para la siembra de caña de azúcar y se podrían generar estrategias que conduzcan a reducciones significativas de las emisiones, así como modelaciones dinámicas que permitan evaluar dichas estrategias.
- En cuanto a las emisiones por la combustión móvil de los tractores empleados en las labores del cultivo de caña de azúcar, los resultados encontrados dejan la inquietud y abren la puerta a una nueva investigación con la que se pueda conocer a fondo lo que realmente sucede con las emisiones de CO₂ en el ambiente, pues así como aparentemente son considerablemente más bajas que las calculadas teóricamente, podría darse también que fueran tan altas que, a pesar a la interferencia de factores como el clima, el viento y las plantaciones aledañas, hubiese un 1% que no se logra disolver y se alcanza a medir en el ambiente.

11.GLOSARIO

AGRICULTURA ESPECÍFICA POR SITIO: es la ejecución de las prácticas agronómicas requeridas por una especie vegetal, de acuerdo con las condiciones espaciales y temporales del lugar donde se va a cultivar, para obtener de este su rendimiento potencial. (Cenicaña, 2014).

ARADA: labor de preparación de suelo que busca fracturar y voltear el suelo a una profundidad de 30 o 40cm, con el fin de favorecer la distribución de los agregados.

COMPOST: es un material producto del proceso de descomposición aeróbica y termofílica de desechos orgánicos que deja el material parcialmente estilizado. El empleo de compost contribuye a activar la vida edáfica, el almacenamiento de humedad y el reciclaje de nutrientes(Madero Morales et al., 2010).

CROMATOGRAFÍA DE GASES: técnica analítica utilizada para separar e identificar los compuestos volátiles de una muestra.

DESCEPADA: destrucción e incorporación al suelo de los residuos de cultivos anteriores.

LABRANZA REDUCIDA: sistema de cultivo que emplea menos operaciones de labranza que el sistema tradicional de producción.

PLANTILLA: planta de caña de azúcar que será plantada por primera vez en el campo.

RASTRILLADA: labor de preparación de suelo que busca destruir los terrones resultantes de labores anteriores, con el fin de garantizar el buen contacto entre las semillas y el suelo.

RESIDUOS DE COSECHA: La utilización de los desechos orgánicos que quedan del corte del cultivo anterior protegen el suelo contra la erosión, pues actúan como cobertura y cuando se incorporan al suelo, mejoran el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas, mejoran el almacenamiento de agua en el subsuelo y restituyen algunos nutrientes extraídos por el cultivo anterior.

SOCA: nombre dado a la raíz de la caña de azúcar, de donde brotan nuevos tallos

SUBSOLADA: labor de preparación del suelo que consiste en fracturarlo hasta una profundidad de 60cm, para destruir las capas compactadas y facilitar el movimiento del aire y el agua.

SURCADA: delimitación de surcos o camas donde se coloca la semilla o material vegetativo de siembra.

VINAZA: es un material líquido residual de la producción de etanol, ya sea por destilación de melaza fermentada o de la fermentación directa de los jugos de la caña, que fomenta la reproducción de microorganismos en el suelo y aporta nutrientes como potasio, calcio, sulfatos y micronutrientes (García O. & Rojas C., 2006) que, como consecuencia de ello, de acuerdo con la investigación desarrollada por (Carmo et al., 2013) en Brasil, incrementa las emisiones de N₂O aproximadamente a 1060kg CO₂-eq ha¹ yr¹ y de CO₂ alrededor de 965kg CO₂-eq ha¹ yr¹.

ZONA AGROECOLÓGICA: nomenclatura de un territorio específico, definida con base en las características agroclimáticas correspondientes a las características físicas de un grupo homogéneo de suelo y la humedad. En el valle del Cauca, como criterios e zonificación se tienen en cuenta los factores de suelo y clima ordenados en 33 grupos homogéneos de suelos (definidos por la familia textural, el régimen de humedad y la profundidad efectiva) y en seis grupos de humedad (definidos por el balance hídrico, la permeabilidad del suelo, la pendiente, los signos de mal drenaje y su profundidad) (Carbonell González et al., 2011).

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar-Rivera, N., Rodríguez L, D. A., & Castillo, A. (2010). Azúcar, co-productos y sub-productos en la diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. *revista virtual pro*(106).
- Arapatsakos I, C., & A. Gemtos, T. (2008). Tractor engine and gas emissions. *Wseas Transactions on environment and development*, 4(10), 897-906.
- Ballesteros, K., & Sotelo, K. (2013). *Estimación de la Huella de Carbono para una hectárea cultivada con Caña de Azúcar en un ingenio del Valle del Cauca*. Universidad Icesi. Cali- Colombia.
- Carbonell González, J. A., Quintero Durán, R., Torres Aguas, J. S., Osorio Murillo, C. A., Isaacs Echeverri, C. H., & Victoria Kafure, J. I. (2011) Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el Valle del río Cauca (cuarta aproximación). Principios metodológicos y aplicaciones. In *Cenicaña (Series Ed.): Vol. 38: Cenicaña*.
- Carmo, J. B. d., Filoso, S., Zotelli, L. C., de Sousa Neto, E. R., Pitombo, L. M., Duarte-Neto, P. J., . . . Martinelli, L. A. (2013). Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. *GCB Bioenergy*, 5(3), 267-280. doi: 10.1111/j.1757-1707.2012.01199.x
- CENICAÑA. (Mayo 15 de 2014). Centro de Investigación en Caña de Azúcar. Recuperado de <http://www.cenicana.org/aeps/>
- deFigueiredo, E. B., Panosso, A. R., Romão, R., & La Scala, J. N. (2010). Greenhouse gas emission associated with sugar production in southern Brazil. *Carbon Balance & Management*, 5, 3-9. doi: 10.1186/1750-0680-5-3
- Frohmann, A., Herreros, S., Mulder, N., & Olmos, X. (2012). *Huella de carbono y exportaciones de alimentos. Guía práctica*. (LC/W.503).

- García O., A., & Rojas C., C. A. (2006). Posibilidades de uso de la vinaza en la agricultura de acuerdo con su modo de acción en los suelos. *Revista Tecnicaña* (Vol. 10, pp. 10): Tecnicaña.
- Goldemberg, J. (2009). **Biomass and energy**. *Química Nova*, 32(3).
- IPCC, P. I. d. E. e. C. C. (2006). Directrices IPCC para los inventarios nacionales de gases efecto invernadero: Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático.
- Larsen, H. N., & Hertwich, E. G. (2009). The case for consumption-based accounting of greenhouse gas emissions to promote local climate action. *Environmental Science & Policy*, 12(7), 791-798. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2009.07.010>
- Londoño-Capurro, L. F. (2013). Aspectos Generales del Sector Azucarero Colombiano 2012-2013: Asocaña.
- Madero Morales, E., Lora Silva, R., Valenzuela Balcázar, I., Torrente Trujillo, A., Castro Franco, H. E., & Gómez Sánchez, M. I. (2010). *Ciencia del Suelo: principios básicos*. (H. Burbano Orjuela & F. Silva Mojica Eds. Vol. 1): Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Pinzón Pinto, A. (2010). *Edafología*.
- Porras Gutiérrez, V. J. (1995). Labores de cultivo. In CENICAÑA (Ed.), *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia* (pp. 179-189).
- Rojas Ortiz, J. L., & Concha Peláez, A. M. (2011). *Diseño de experimento para el cálculo teórico de emisiones de CO2 generadas por cuatro tipos de preparación del suelo para un cultivo de caña de azúcar*. (Maestría en Ingeniería Industrial), Universidad Icesi. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10906/5610>
- Salazar-Sosa, E., Beltrán-Morales, A., Fortis-Hernández, M., Leos-Rodríguez, J. A., Cueto-Wong, J. A., Vázquez-Vázquez, C., & Peña-Cabriales, J. J. Mineralización de nitrógeno en el suelo y producción de maíz forrajero con tres sistemas de labranza. *TERRA Latinoamericana*, 21, 569-575.

- Van Rikxoort, H. (2011). *The potential of mesoamerican coffee production systems to mitigate climate change*. (Bachelor of Applied Science (Ing)), Wageningen University and Research Center, The Netherlands. Retrieved from <http://dapa.ciat.cgiar.org/climate-change-mitigation-in-mesoamerican-coffee-production/>
- Viglizzo, E. F., Frank, F. C., CarreÑO, L. V., JobbÁGy, E. G., Pereyra, H., Clatt, J., . . . Ricard, M. F. (2011). Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina
- Global Change Biology Volume 17, Issue 2. *Global Change Biology*, 17(2), 959-973. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2010.02293.x/abstract>
- Yuttitham, M., Gheewala, S. H., & Chidthaisong, A. (2011). Carbon footprint of sugar produced from sugarcane in eastern Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 19(17/18), 2119-2127. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.07.017