

**DISEÑO DE EXPERIMENTO PARA EL CÁLCULO TEÓRICO DE EMISIONES  
DE CO<sub>2</sub> GENERADAS POR CUATRO TIPOS DE PREPARACIÓN DEL SUELO  
PARA UN CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR**

**JOSE LUIS ROJAS ORTÍZ  
ANGELA MARÍA CONCHA PELÁEZ**



**UNIVERSIDAD ICESI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL  
SANTIAGO DE CALI  
2011**

**DISEÑO DE EXPERIMENTO PARA EL CALCULO TEÓRICO DE EMISIONES  
DE CO<sub>2</sub> GENERADAS POR CUATRO TIPOS DE PREPARACIÓN DEL SUELO  
PARA UN CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR**

**JOSE LUIS ROJAS ORTÍZ  
ANGELA MARÍA CONCHA PELÁEZ**

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

**Director  
M.Sc. ANDRÉS LÓPEZ ASTUDILLO**

**UNIVERSIDAD ICESI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL  
SANTIAGO DE CALI  
2011**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

Firma Presidente de Jurado

---

Firma Jurado

---

Firma Jurado

Santiago de Cali, mayo 2011

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por acompañarnos en cada momento.

A nuestras familias por su apoyo y comprensión en el tiempo que tuvimos que dedicar a este trabajo.

A Ingenio Providencia S.A. y a la Gerencia de Campo por permitirnos desarrollar el experimento dentro de sus instalaciones y apoyarnos al 100% con recursos, logística, personal y conocimiento.

Al profe Luis Arnoby Rodríguez y a Cenicaña por su acompañamiento activo y constante que nos brindó durante todas las etapas del proyecto, por el tiempo dedicado y los conocimientos técnicos y científicos aportados al trabajo.

A la profe Judith Rodríguez y al profe Fernando Cuervo por sus valiosos aportes en temas de química y combustibles, además de sus explicaciones oportunas.

A nuestros compañeros y amigos: Adelita, Ricardo, Fabi y Mary por las largas estudiadas, los buenos consejos y la valiosa amistad.

Finalmente al profe Andrés López, quien nos dirigió y orientó dándonos una visión estratégica en el desarrollo del trabajo.

Gracias a quienes apoyaron de una u otra manera este proyecto.

## CONTENIDO

LISTA DE TABLAS .....	7
LISTA DE FIGURAS .....	8
lista de anexos.....	9
RESÚMEN.....	10
INTRODUCCIÓN .....	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	12
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. MARCO TEÓRICO.....	16
3.1 HUELLA DE CARBONO.....	16
3.2 MECANISMOS DE DESARROLLO LIMPIO .....	18
3.3 ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA (CUARTA APROXIMACIÓN) PARA EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL VALLE DEL RÍO CAUCA.....	22
3.3.1 Grupos homogéneos de suelos .....	23
3.3.2 Grupos de humedad.....	23
3.3.3 Zona Agroecológica Experimento HACIENDA LA TRAMPA SUERTE 2A : 6H1 .....	24
3.4 LABORES AGRÍCOLAS.....	26
3.4.1 Decepada .....	27
3.4.2 Subsuelo .....	28
3.4.3 Cincel .....	30
3.4.4 Rastroarado.....	31
3.4.5 Rastrillo .....	33
3.4.6 Surcado.....	34
3.5 LABRANZA MÍNIMA O REDUCIDA PARA CULTIVOS DE CAÑA DE AZÚCAR. ....	36
3.6 DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DOE).....	37
3.6.1 Historia de diseño de experimentos.....	37
3.6.2 Definiciones básicas en el Diseño de Experimentos .....	38
3.6.3 Etapas del Diseño de Experimentos.....	41
3.7 ESTEQUIOMETRÍA DE LAS COMBUSTIONES.....	43
3.7.1 Combustión Completa .....	44
3.7.2 Combustión Incompleta .....	45
3.7.3 Combustión Estequiométrica .....	45
3.8 COMBUSTIÓN Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL .....	48
3.8.1 Contaminación debida al Carbono.....	49
3.8.2 Contaminación debida al Azufre .....	49
3.8.3 Contaminación debida al Nitrògeno .....	50
3.9 MARCO TEÓRICO APLICADO AL EXPERIMENTO REALIZADO EN HACIENDA LA TRAMPA SUERTE 2 A.....	51
4. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DEL EXPERIMENTO Y CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) .....	53
4.1 PLANEACIÓN Y REALIZACIÓN.....	54
4.1.1 Entender y delimitación del problema .....	54

4.1.2	Variable respuesta y metodología de medición.....	59
4.1.3	Factores que influyen en la variable respuesta .....	61
4.1.4	Selección de tratamientos.....	63
4.1.5	Crear protocolo del experimento (Anexo B) .....	66
4.1.6	Realizar el experimento .....	66
4.2	ANALISIS .....	67
4.2.1	Datos consumo de combustible .....	68
4.2.2	Datos por cada una de las tareas desarrolladas en cada tipo de tratamiento. ....	68
4.2.3	Análisis estadístico .....	69
4.2.4	Cálculo teórico de CO <sub>2</sub> .....	73
4.3	INTERPRETACIÓN .....	78
4.3.1	Información de Área por Tipo de Preparación.....	78
4.3.2	Consumos de Combustibles por Tipo de Preparación .....	79
4.3.3	Escenarios de emisiones de CO <sub>2</sub> con Labranza Reducida.....	80
4.3.4	Impacto en Generación de CO <sub>2</sub> y Consumo de Combustible.....	81
5.	COSTOS DEL PROYECTO.....	82
6.	IMPACTO EN EL SISTEMA DE GESTIÓN AMBIENTAL DEL INGENIO .....	83
7.	EXPERIENCIAS PROCESO DE INVESTIGACION .....	84
8.	CONCLUSIONES y recomendaciones .....	86
	BIBLIOGRAFIA.....	89
	ANEXOS.....	92

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Potencial de calentamiento global de gases de efecto invernadero.....	17
Tabla 2. Ejemplo niveles y tratamientos.....	40
Tabla 3. Humedad de terreno .....	57
Tabla 4. Resultados análisis de suelos parte 1 .....	59
Tabla 5 Resultados análisis de suelos parte 2 .....	59
Tabla 6. Formato Registro de Datos de Planeación .....	67
Tabla 7. Consumos de combustible por tratamiento .....	68
Tabla 8. Consumos de combustibles por tarea de cada tratamiento .....	68
Tabla 9. Datos resumen para cálculo de ANOVA .....	69
Tabla 10. Tabla ANOVA .....	70
Tabla 11. Tabla de diferencia de medias por el método LSD .....	71
Tabla 12. Prueba de normalidad y varianza.....	72
Tabla 13. Composición diesel colombiano B-10.....	75
Tabla 14. Cálculo de oxígeno teórico necesario para hacer reaccionar los compuestos .....	76
Tabla 15. Relaciones presentes de GEI en un Kg de combustible diesel.....	76
Tabla 16. Combustible utilizado para el cálculo de GEI .....	77
Tabla 17. GEI generados en el proceso de combustión.....	78
Tabla 18. Proporción de tierras por tipo de preparación.....	79
Tabla 19. Total de área y haciendas por tipo de preparación.....	79
Tabla 20. Consumos de combustible promedio por tipo de preparación .....	80
Tabla 21. Emisiones de GEI por tipo de preparación .....	80
Tabla 22. Emisiones de GEI con labranza reducida.....	80
Tabla 23. Comparación livianas vs reducida.....	81
Tabla 24. Diferencia en costo diesel livianas vs reducida .....	81
Tabla 25. Costos de experimento .....	82

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología de asignación de zonas agroecológicas .....	26
Figura 2. Maquinaria y equipo para proceso de decepar .....	27
Figura 3. Recorrido al realizar la tarea de decepar.....	28
Figura 4. Maquinaria y equipo para proceso de subsuelo .....	29
Figura 5. Recorrido al realizar la tarea de subsuelo .....	30
Figura 6. Maquinaria y equipo para realizar proceso de cincel.....	30
Figura 7 Recorrido al realizar la tarea de cincel .....	31
Figura 8. Maquinaria y equipo para realizar la tarea de rastrearado .....	32
Figura 9. Recorrido al realizar la tarea de rastrearado .....	32
Figura 10. Maquinaria y equipo para realizar la tarea de rastrillo .....	33
Figura 11. Recorrido para realizar la tarea de rastrillo.....	34
Figura 12. Maquinaria y equipos utilizado al realizar la tarea de surcado.....	35
Figura 13. Recorrido para realizar la tarea de surcado .....	35
Figura 14. Proceso interactivo de la experimentación .....	37
Figura 15. Variables de un proceso y preguntas a responder al diseñar un experimento .....	39
Figura 16. Pasos diseño de experimento .....	41
Figura 17. Esquema de importancia del experimento .....	54
Figura 18. Distribución de tratamientos y repeticiones en la hacienda la trampa suerte 2A.....	55
Figura 19. Mapas de humedad diferentes profundidades .....	56
Figura 20. Mapas de resistencia a la penetración a diferentes profundidades .....	58
Figura 21. Descripción Variable .....	60
Figura 22. Recursos medición variable respuesta.....	60
Figura 23. Ruta para la toma de cada dato experimental .....	61
Figura 24. Paso a paso simplificado del procedimiento toma datos .....	61
Figura 25. Control de factores no estudiados.....	63
Figura 26. Clases de preparación de suelos en el ingenio objeto de estudio .....	64
Figura 27. Preparaciones convencionales .....	64
Figura 28. Preparaciones livianas.....	65
Figura 29. Preparación labranza reducida .....	65
Figura 30. Niveles del factor tipo de preparación .....	66
Figura 31. Proceso análisis.....	67
Figura 32. Proceso de combustión con Diesel .....	74
Figura 33. Proceso de interpretación .....	78

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Protocolo experimento.....	93
Anexo B. Datos tomados del experimento .....	96
Anexo C. Informe ejecutivo para la Gerencia .....	97

## RESÚMEN

La preocupación mundial por el deterioro ambiental y las exigencias del mercado actual por productos y servicios que sean amigables con el medio ambiente, ha generado que surjan iniciativas de prevención y control de la contaminación en las diferentes empresas, incluyendo al sector azucarero colombiano.

En el ingenio azucarero objeto de estudio se han identificado ciertos aspectos de las labores agrícolas que generan impactos al medio ambiente, como es la preparación del suelo, que debido a la amplia utilización de maquinaria (tractor) relacionado con el consumo de combustible, genera emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Basados en lo anterior, este trabajo busca diseñar un experimento que permita calcular teóricamente las emisiones de CO<sub>2</sub> de tres alternativas mecanizadas de labranza tradicional y de la labranza reducida en cultivo de caña, con el fin de marcar la pauta para futuras investigaciones en el marco de la huella de carbono y la posibilidad de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero contribuyendo al enlace estratégico entre el sistema de gestión ambiental y la productividad competitiva del ingenio.

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo surge de la necesidad de conocer los aspectos críticos que generan mayor impacto ambiental negativo dentro del sistema de gestión ambiental de un ingenio azucarero del Valle del Cauca, para a partir de ahí generar mecanismos de prevención y control en la protección del medio ambiente.

Basado en lo anterior, se escoge la preparación del suelo, debido a la amplia utilización de maquinaria (tractor) en esta labor y por ende a la generación de emisiones de CO<sub>2</sub> al aire. Con esta información se decide realizar un experimento, seleccionando cuatro tipos de preparación del suelo: Convencional 1, Liviana 2, Liviana 3 y Labranza Reducida, el cual permitiera a partir de los consumos de combustible por cada preparación calcular teóricamente las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), enfocándose en las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, generadas en lotes de 0,5 Has como unidad experimental.

Teniendo en cuenta los resultados del experimento, se procede a comparar las diferentes alternativas de preparación del suelo, confirmando las bondades de la Labranza Reducida, por su uso mínimo de labores mecanizadas, generando un posible escenario en el cual se cambien las preparaciones de suelo livianas por la alternativa reducida.

Finalmente, la información obtenida del experimento se convierte en un insumo para trabajos futuros en el cálculo de la Huella de Carbono, o para determinar acciones dentro del sistema de gestión ambiental de la empresa.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

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. En esta región hay 208.254 hectáreas sembradas en caña para azúcar, de las cuales, el 24% corresponde a tierras propias de los ingenios y el restante 76% a más de 1.700 cultivadores de caña. Dichos cultivadores abastecen a los 13 ingenios de la región (Cabaña, Carmelita, Manuelita, María Luisa, Mayagüez, Pichichi, Risaralda, San Carlos, Tumaco, Ríopaila-Castilla, Incauca y Providencia). Desde 2005, cinco de los trece ingenios tienen destilerías anexas para la producción de alcohol carburante (Incauca, Manuelita, Providencia, Mayagüez y Risaralda).

Gracias al clima privilegiado de la región, y al contrario de lo que sucede en el resto del mundo (con excepción de Hawái y el norte de Perú), se puede sembrar y cosechar caña durante todos los meses del año. Esta condición agroclimática, sumada al avance tecnológico impulsado por el Centro de Investigación de la Caña (Cenicaña), que funciona con el aporte de todos los cultivadores e ingenios, ha llevado a que la región se especialice en el cultivo y ostente el liderazgo en productividad a nivel mundial: más de 14 toneladas de azúcar por hectárea al año.<sup>1</sup>

El ingenio objeto de estudio, posee un área de influencia de alrededor de 25 mil hectáreas cultivadas en caña de azúcar de las cuales el 40% son propias, en participación y arrendadas y el 60% restante pertenecen a proveedores de caña, compras ocasionales y proveedores en administración.

Como se mencionó anteriormente, las labores agrícolas de campo y cosecha se pueden realizar durante todo el año, estas labores entre las que se incluye la preparación del suelo, utilizan maquinaria como unidad energética para el trabajo agrícola, que entre los impactos negativos sobre el entorno ambiental, se encuentra la contaminación de la atmósfera debido a los gases producto de la combustión.

En el año 2010, el ingenio objeto de estudio reorientó su estrategia hacia una misión y visión enfocada hacia el equilibrio del desarrollo económico, social y ambiental, de esta manera ha centrado su interés en conocer los puntos críticos de sus procesos para así implementar proyectos que generen ahorros y al mismo tiempo contribuyan a disminuir los impactos negativos al medio ambiente.

---

<sup>1</sup> ASOCAÑA. El sector azucarero en la actualidad. [en línea][www.asocana.org](http://www.asocana.org). [citado en 22 de marzo de 2011]

De acuerdo con lo anterior, este trabajo buscó contribuir a los esfuerzos del ingenio por la optimización de su sistema de gestión ambiental, mediante el diseño de un experimento, con el fin de confirmar un posible método para la medición de CO<sub>2</sub> liberado a la atmósfera por la maquinaria (tractor), en la labor agrícola de preparación del suelo.

Este experimento nos permitió establecer teóricamente las emisiones de CO<sub>2</sub> aproximadas de esta labor, sin embargo no se podría afirmar que con estos datos se pretende hallar la huella de carbono, debido a la complejidad de su cálculo, pues requiere de un análisis exhaustivo de todas las fuentes de carbono que se asocian a la labor. De todas maneras, este experimento es un pequeño fundamento de la importancia y complejidad de la huella de carbono, con la idea en un futuro de poder calcularla para las diferentes actividades del ingenio y de esta forma poder diseñar mecanismos de desarrollo limpio que contribuyan a disminuir el impacto negativo al aire.

La labor de preparación de suelos en el ingenio objeto de estudio, contribuye a las emisiones generadas por la agricultura que representa cerca del 45% de las emisiones totales anuales de gases de efecto invernadero de Colombia<sup>2</sup>. La preparación del suelo es una labor agrícola que utiliza maquinaria que consume gran cantidad de energía, generando un impacto ambiental negativo debido a los productos resultantes de la combustión.

Se revisaron las labores agrícolas en los cultivos de caña de este ingenio azucarero del Valle del Cauca, analizando cuatro diferentes tipos de preparaciones: convencional 1, liviana 2, liviana 3 y la labranza reducida para caña de azúcar (uso mínimo de labores agrícolas en la preparación del suelo) en los suelos en los cuales pueda ser aplicada.

La labranza reducida es una alternativa de preparación del suelo, que busca disminuir el impacto ambiental negativo de la maquinaria agrícola para esta labor. El criterio que se utilizará para determinar el beneficio de la labranza reducida en comparación con las otras tres alternativas es el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> que se genera por la combustión de la maquinaria utilizada en la ejecución de las labores de preparación de suelo. En el ingenio objeto de estudio, no se conoce la cantidad que de este gas es emitido al aire por realizar la preparación del suelo.

Lo anterior es una clara evidencia de la falta de conocimiento sobre la importancia de la huella de carbono de los procesos dentro de las empresas y la oportunidad que se puede aprovechar al integrar los sistemas de gestión ambiental con este elemento.

---

<sup>2</sup> CIAT. Informe Anual. Cali, 2009

De acuerdo con los resultados obtenidos de las comparaciones anteriores, se analizaron las áreas del ingenio objeto de estudio, en las cuales se puede reemplazar por la labranza reducida y así proyectar la variación de emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel de ingenio de manera exploratoria.

Para determinar el consumo de energía en las labores de labranza es importante conocer que el combustible utilizado es diesel, derivado del petróleo, el cual constituye el 11% de los costos totales de producción de la caña. Debido a lo anterior, este factor se convierte en un aspecto significativo, ya que cualquier posible reducción que se pueda efectuar, tendrá un impacto directo en los costos de trabajo del campo.

La ausencia de gestión para el desarrollo de proyectos que estén alineados con las políticas nacionales sobre cambio climático, es una debilidad en las empresas, pues a través de este tipo de proyectos hay una gran gama de ventajas competitivas y accesos a nuevos mercados, mejoramiento en las redes de los negocios y alcance comercial, reducción de costos operativos y finalmente un liderazgo empresarial proactivo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un experimento que permita calcular teóricamente las emisiones de CO<sub>2</sub> de tres alternativas mecanizadas de labranza tradicional y de la labranza reducida en cultivo de caña, con el fin de marcar la pauta para futuras investigaciones en el marco de la huella de carbono y la posibilidad de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo al enlace estratégico entre el sistema de gestión ambiental y la productividad competitiva del ingenio.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar la información pertinente a los procesos relacionados con el cultivo de caña de azúcar (labores agrícolas, maquinaria y equipos, mano de obra).
- Identificar las alternativas de labranza para los cultivos de caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca.
- Escoger cuatro (4) alternativas de labranza para cultivos de caña de azúcar que mejor se adapten al ingenio objeto de estudio.
- Realizar un diseño de experimentos para analizar los niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> en las cuatro (4) alternativas de labranza.
- Identificar en qué áreas se pueden implementar cada alternativa de labranza en el ingenio azucarero seleccionado.
- Proyectar la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub> por la implementación de las alternativas de labranza en un ingenio azucarero de la región.

### 3. MARCO TEÓRICO

A continuación se presentan los diferentes temas tenidos en cuenta para el desarrollo de este proyecto. Cada uno de ellos aportó conceptos teóricos para formar la base de los argumentos que permitieron la elaboración del experimento en campo y el posterior cálculo teórico de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el tractor en las labores de preparación del suelo.

- Huella de carbono.
- MDL (mecanismos de desarrollo limpio).
- DOE (Diseño de experimentos).
- Estequiometría de la combustión.
- Labores agrícolas.
- Contaminación por combustión.

#### 3.1 HUELLA DE CARBONO

“El término huella de carbono es comúnmente usado para describir la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases efecto invernadero (GEI) por la cual un individuo o una organización son responsables. La huella de carbono también puede ser calculada para un evento o un producto”.<sup>3</sup>

La unidad de medición de un GEI regularmente se expresa en CO<sub>2</sub>-equivalente. Cuando se trata de diferentes gases se suman con base en su factor de Potencial de calentamiento Global. También se utiliza Toneladas métricas de carbono equivalente. Esta resulta de multiplicar el peso (en toneladas) del CO<sub>2</sub>-equivalente por 12/44.

El potencial de calentamiento global es una medida relativa de cuanto calor puede atrapar un GEI. Compara la cantidad de calor atrapado por cierta cantidad del gas en cuestión comparado con la cantidad de calor atrapada por la misma masa de CO<sub>2</sub>.

---

<sup>3</sup> CARBON TRUST. Carbon footprinting. [en línea](<http://www.carbontrust.co.uk/cut-carbon-reduce-costs/calculate/carbon-footprinting/pages/carbon-footprinting.aspx>). [citado en 21 de abril de 2011].

De acuerdo con el Protocolo de Kyoto<sup>4</sup> los GEI más importantes se presentan en la tabla 1.

**Tabla 1. Potencial de calentamiento global de gases de efecto invernadero**

<b>Potencial de Calentamiento Global de Gases de Efecto Invernadero</b>		
<b>(Comparado al CO<sub>2</sub>)</b>		
<b>Gas de Efecto Invernadero</b>	<b>PCG después de 20 Años</b>	<b>PCG después de 100 años</b>
Dióxido de Carbono	1	1
Metano	62	23
Óxido de Nitrógeno	275	296
HFC-23	9400	12000
HFC-125	5900	3400
HFC-134a	3300	1300
HFC-143a	5500	4300
CF4	3900	5700
C2F6	8000	11900
SF6	15100	22200

Fuente: Climate Change 2007: the Fourth Assessment Report (AR4), Intergovernmental Panel on Climate Change.

Para establecer las emisiones de GEI, se han establecido varios estándares, en el año 2009, habían de 15 a 20 estándares, entre los cuales se destacan:

- PAS 2050. Desarrollado BSI y Carbon Trust 2008.
- PAS 2060 Neutralidad de las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- ISO 1440. LCA
- ISO 14025. Etiquetas y declaraciones ambientales tipo III
- ISO 14064. Reporte de emisiones corporativas.
- ISO 14067 Huella carbono producto.( En proceso).
- PROTOCOLO GHC. Dos: Reporte de emisiones por proyectos. Y a nivel de empresas. WRI y WBCSD. En este se han basado muchos de los demás

<sup>4</sup> NACIONES UNIDAS. Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. [en línea] <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>. [citado en abril 18 de 2011]

estándares. Además algunos gremios a nivel mundial, como por ejemplo el de pulpa y papel, han adaptado este estándar a su caso específico.

La Huella de Carbono, representa una medida para la contribución de las organizaciones a ser entidades socialmente responsables y un elemento más de concientización entre los empresarios y ciudadanos de prácticas más sostenibles. Con esta iniciativa se pretende cuantificar la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), medidas en emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, que son liberadas a la atmósfera debido a las actividades agroindustriales.

La medición de la huella de carbono de un producto crea verdaderos beneficios para las organizaciones. La huella de carbono identifica las fuentes de emisiones de GEI de un producto. Esto por lo tanto permite definir mejores objetivos, políticas de reducción de emisiones más efectivas e iniciativas de ahorros de costo mejor dirigidas, todo ello consecuencia de un mejor conocimiento de los puntos críticos para la reducción de emisiones, que pueden o no pueden ser de responsabilidad directa de la organización.

Aunque Colombia no tiene compromisos de reducción de emisiones y participa marginalmente en las emisiones de GEI (0,37% de las emisiones globales), ha desarrollado e implementado diferentes políticas que promueven el desarrollo sostenible asociado a bajas emisiones de dichos gases.<sup>5</sup>

### **3.2 MECANISMOS DE DESARROLLO LIMPIO**

El clima de la tierra está cambiando por causa de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero provocadas por actividades humanas. Las concentraciones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) son más altas ahora que en cualquier otro momento durante los últimos 420 mil años. La abrumadora evidencia científica apoya la conclusión de que los cambios observados en el clima están relacionados con el consumo de combustible fósil (petróleo).<sup>6</sup>

En el 2009, el Programa de Análisis de Políticas (DAPA) del CIAT, junto con varios socios, entregó un cúmulo considerable de información, reflejando el profundo análisis de las implicaciones del cambio climático para Colombia. El análisis se realizó en coordinación con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), el Departamento Nacional de Planeación, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y otros. El análisis indica que la agricultura es gran parte del problema del cambio climático, pero que también

---

<sup>5</sup> COLOMBIA. Ministerio de Medio Ambiente. Memoria de la Segunda Comunicación Nacional de Colombia ante la CMNUCC. [en línea] [http://www.minambiente.gov.co/documentos/5783\\_res\\_ejecut\\_segun\\_comun\\_camb\\_clima.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/5783_res_ejecut_segun_comun_camb_clima.pdf). [citado el 18 de mayo de 2011]

<sup>6</sup> MORENO PADILLA, Pedro. La Cumbre de Copenhague, el cambio climático y la responsabilidad de los agricultores. [en línea] <[pmoreno@asocana.org](mailto:pmoreno@asocana.org)>. [citado en 8 de mayo de 2011]

puede figurar de manera destacada en los esfuerzos del país para hacerle frente.<sup>7</sup>

El tema del cambio climático ganó mayor pertinencia en la agenda política mundial a mediados de los años 80's. Es a partir de este momento histórico que se brinda verdadera importancia a la acumulación de gases de efecto invernadero, interferencia antropogénica del clima, desbalances climáticos y el calentamiento de la superficie del planeta.<sup>8</sup>

La Convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC por sus siglas en inglés), fue establecida durante la cumbre de la tierra en Río, en 1992. Explicita que “El objetivo último de la presente Convención y de todo instrumento jurídico conexo que adopte la Conferencia de las Partes, es lograr, de conformidad con las disposiciones pertinentes de la Convención, la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático”<sup>9</sup>

A raíz de las negociaciones en el marco de la UNFCCC (Las llamadas conferencias de las partes o COP's por sus siglas en inglés), para 1997 se establece como una medida de carácter global de la mitigación de los gases de efecto invernadero el Protocolo de Kioto. El Protocolo de Kioto es una herramienta de mitigación de la problemática del cambio climático más integral que logra introducir nuevos instrumentos de cambio e interrelación entre los grandes contribuyentes a la contaminación y las naciones en desarrollo.<sup>10</sup>

Un aspecto clave a resaltar del Protocolo de Kioto es la definición de los Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Los MDL definen que “El propósito del mecanismo para un desarrollo limpio es ayudar a las Partes no incluidas en el anexo A (países en desarrollo) a lograr un desarrollo sostenible y contribuir al objetivo último de la Convención, así como ayudar a las Partes incluidas en el anexo A (países industrializados) a dar cumplimiento a sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones”<sup>11</sup>

Colombia está en condiciones de reducir 22,9 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente y en condiciones óptimas estas representarían USD 435 millones, lo que colocaría la exportación de CO<sub>2</sub> a niveles similares que los del banano (USD 535) y las flores (USD 505). Los sectores con mayor potencial para el desarrollo del MDL en Colombia son el energético, forestal, transporte e industrial. Dentro del sector productivo son muchas las industrias que podrían aplicar el MDL, básicamente las que manejen altos volúmenes de combustibles

---

<sup>7</sup> CIAT. América Latina y el Caribe: Tierra fértil para la Eco-Eficiencia. Informe Anual 2009.

<sup>8</sup> CASTRO, J y AMADOR M., Enfoque metodológico: emisión de gases de efecto invernadero, la fijación de carbono y la agricultura orgánica. CEDECO, 2006 , p. 7

<sup>9</sup> Ibid, p. 8

<sup>10</sup> Ibid, p. 8

<sup>11</sup> CASTRO, J., AMADOR M., Enfoque metodológico: emisión de gases de efecto invernadero, la fijación de carbono y la agricultura orgánica. CEDECO, 2006 , p. 8

fósiles diferentes al gas natural, y/o tecnologías muy viejas cuyo mejoramiento implique un volumen significativo en reducciones de GEI. (Monroy & Aguirre, El Protocolo de Kyoto: ¿Una oportunidad para la industria colombiana?)

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) es uno de los tres mecanismos de flexibilidad para la reducción de gases efecto invernadero establecidos en el Protocolo de Kioto. MDL es un mecanismo diseñado para promover la inversión en proyectos que reduzcan o capturen emisiones de gases efecto invernadero en países en vía de desarrollo. Es el único mecanismo del protocolo de Kioto que promueve las alianzas entre países desarrollados y en vía de desarrollo.

Los proyectos MDL son aquellos cuya implementación deriva en la reducción de emisiones de gases efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC, SF<sub>6</sub>). Pueden ser clasificados de varias maneras, siendo la más simple la de proyectos fuente y proyectos sumidero. Los proyectos tipo fuente son aquellos que reducen las emisiones de GEI directamente en la fuente, a través de mejoramiento de la eficiencia energética, la generación eléctrica por fuentes renovables, el cambio de combustibles, etc. Los proyectos sumidero son básicamente proyectos forestales, tanto de forestación como de reforestación, que absorben CO<sub>2</sub> de la atmósfera y lo fijan como biomasa.

Los principales objetivos del Mecanismo de Desarrollo Limpio son<sup>12</sup>:

- Ayudar a los países en vía de desarrollo a alcanzar el desarrollo sostenible.
- Contribuir al objetivo primordial de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático para estabilizar la concentración de gases efecto invernadero en la atmósfera en niveles que prevengan una interferencia antropogénica peligrosa en el sistema climático.
- Ayudar a los países incluidos en el Anexo A del Protocolo de Kioto (países desarrollados) a cumplir el compromiso de reducción de emisiones establecido en el artículo 3 del Protocolo.

Los proyectos que reduzcan emisiones de Gases Efecto Invernadero, implementados en los países en desarrollo, pueden aplicar al MDL para vender Certificados de Reducción de Emisiones (Certified Emission Reductions, CERs), también conocidos como Bonos de Carbono, con lo cual se pueden conseguir fondos para la financiación o que ayuden a eliminar barreras que impidan la realización del proyecto. Los CERs son comprados por los países industrializados para cumplir con sus compromisos de reducción de emisiones.

Un CER corresponde a la reducción de una tonelada de dióxido de carbono equivalente. La equivalencia corresponde al potencial de efecto invernadero de

---

<sup>12</sup> MDL. Mecanismo de Desarrollo Limpio. Cambio Climático y Mecanismo de Desarrollo Limpio. [en línea] <http://www.co2.org.co/?IDPagina=72> [citado en abril 7 de 2011]

cada gas, y se expresa en unidades equivalentes de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>e) para efectos de simplicidad en los cálculos.

A pesar de que ya existen varios tipos establecidos de proyectos MDL, cualquier proyecto que reduzca emisiones de GEI, puede aspirar a vender CERs. Existen procedimientos a través de los cuales los desarrolladores de proyectos pueden proponer nuevas categorías de proyectos, así como las metodologías para su implementación y monitoreo.

Conceptos principales<sup>13</sup>:

CER: Corresponde a un crédito otorgado por la reducción de emisión (o fijación) de una tonelada de CO<sub>2</sub>e.

Línea base: Son las emisiones que se producirían en ausencia del proyecto MDL.

Adicionalidad: uno de los conceptos más importantes del MDL es la adicionalidad de los proyectos. Esta se compone de dos requisitos fundamentales: Un proyecto es adicional si sus emisiones de GEI son menores a las que habrían ocurrido en ausencia de la implementación del proyecto (línea base); al mismo tiempo, un proyecto es adicional si se presentan barreras de tipo financiero, tecnológico y demás, que la implementación como MDL puede ayudar a superar. Dicho de otra forma, en ausencia del MDL el proyecto no podría ser implementado; de esta forma, proyectos que ya han sido implementados, o que igualmente serían implementados sin MDL, no son adicionales y no pueden obtener CERs.

Contribución al desarrollo sostenible: Dado que el proyecto debe pasar por una serie de instancias para su aprobación, es importante demostrar que el proyecto contribuye al desarrollo sostenible del país en el cual se implementa. Los criterios de desarrollo sostenible son definidos por cada país y evaluados por la Autoridad Nacional Designada.

Monitoreo y Verificación: una vez registrado el proyecto, las emisiones deben ser monitoreadas periódicamente para garantizar que las reducciones reales, corresponden con las estimadas en la formulación del proyecto y de esa forma poder emitir los CERs.

Costos de transacción: son los costos en que se incurre en el proceso de registro del proyecto ante la UNFCCC (Conferencia Marco de Cambio Climático de Naciones Unidas). Corresponden a los gastos por auditorías de verificación, trámites ante la UNFCCC, etc. Son menores para los proyectos de pequeña escala.

---

<sup>13</sup> Ibid

Período de acreditación: La reducción de emisiones se estima año tras año y se define un periodo de emisión de CERs, según los lineamientos de la UNFCCC, durante el cual se van emitiendo a medida que se logre la reducción de emisiones prevista.

Actores: dentro del ciclo del proyecto intervienen diferentes actores de los cuales los más importantes son:

- Proponente del proyecto: Quien realiza la actividad de proyecto MDL.
- Consultores: Para la parte técnica o para la implementación como MDL (como el CNPMLTA).
- Autoridad Nacional Designada (DNA): Ente nacional (en Colombia es el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, a través del Grupo de Mitigación de Cambio Climático), que aprueba la ejecución de los proyectos MDL en el país.
- Entidad Operacional Designada (DOE): Son entes verificadores externos. Las DOE evalúan los proyectos según los requisitos y criterios definidos por la UNFCCC, para recomendar su registro y la emisión de CERs.
- Junta Ejecutiva de MDL (CDM Executive Board): Organismo de la UNFCCC que aprueba y registra los proyectos. Es la última instancia en el proceso de registro. Además, la Junta Ejecutiva es la máxima instancia para evaluación de metodologías, procedimientos y modalidades relacionados con el MDL.
- Compradores, brokers, fondos, etc, que intervienen en el comercio de los CERs internacionalmente.
- Interesados locales (stakeholders): Personas externas al proyecto que pueden verse afectadas o que desean llevar a cabo una vigilancia del mismo. Pueden ser comunidades vecinas, ONGs, autoridades ambientales, etc.

De esta manera, numerosos sectores de la economía colombiana buscan liderar proyectos que propendan por el desarrollo sostenible de las regiones y que al mismo tiempo generen un beneficio económico para las empresas.

### **3.3 ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA (CUARTA APROXIMACIÓN) PARA EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL VALLE DEL RIO CAUCA**

El clúster del azúcar está ubicado en el valle interandino del río Cauca, en el suroccidente de Colombia, en 39 municipios de los departamentos de Caldas, Cauca, Risaralda y Valle del Cauca. Considerando únicamente el área cultivada con caña de azúcar, el conglomerado abarca cerca de 200.000

hectáreas, el 78% de las cuales se encuentran en el departamento del Valle del Cauca, el 19% en Cauca, 1,6% en Risaralda y 1,3% en Caldas. Comprende desde el municipio de Belalcázar en Caldas, hasta el municipio de Santander de Quilichao en el Cauca. El área total del clúster, sumando área con caña y demás áreas de influencia, es de 429 mil hectáreas. El clúster del azúcar hace parte de los sectores agropecuario e industrial, con especialización en la producción de caña de azúcar, azúcares, mieles y alcohol (etanol).<sup>14</sup>

Cenicaña presenta la cuarta aproximación de la zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca, en la cual se identificaron 151 zonas agroecológicas definidas por factores biofísicos relativamente estables.

Las zonas resultan de combinar la información agroclimática correspondiente a 33 Grupos Homogéneos de Suelos y seis Grupos de Humedad, definidos con base en los estudios detallados de suelos realizados en 216.765 hectáreas de la parte plana del valle del río Cauca y en el balance hidrológico regional calculado con una probabilidad de exceso de 75%.

La nomenclatura de las nuevas zonas agroecológicas está definida por un número inicial entre 1 y 33 (identifica el Grupo Homogéneo de Suelos) seguido de la letra "H" unida a un número entre 0 y 5 (identifica el Grupo de Humedad). Así, por ejemplo, la zona agroecológica 11H3 reúne los suelos clasificados en el Grupo Homogéneo de Suelos No.11, donde prevalecen las características del Grupo de Humedad No.3

### **3.3.1 Grupos homogéneos de suelos**

Los grupos homogéneos de suelos reúnen los suelos identificados en los estudios detallados realizados en el valle del río Cauca, en un área total de 216.765 hectáreas donde predomina el cultivo de la caña de azúcar. Para la agrupación se tuvieron en cuenta los siguientes factores: (a) Familia textural, (b) Régimen de humedad edáfico, (c) Profundidad efectiva del suelo.

Un total de 235 suelos fueron ordenados en 33 grupos homogéneos de suelos.

### **3.3.2 Grupos de humedad**

Los grupos de humedad identifican zonas en donde ocurren niveles similares de exceso o déficit de humedad en el suelo.

Para la clasificación del área en grupos de humedad se tuvo en cuenta el balance hidrológico regional calculado para el cultivo de la caña de azúcar, junto con la información de los estudios detallados de suelos acerca de la

---

<sup>14</sup> CENICAÑA. El clúster del azúcar en Colombia. [en línea] [http://www.cenicana.org/quienes\\_somos/agroindustria/cluster\\_del\\_azucar.php](http://www.cenicana.org/quienes_somos/agroindustria/cluster_del_azucar.php). [citado en febrero 15 de 2011]

permeabilidad del suelo, la pendiente del terreno, la presencia de nivel freático y su profundidad y la presencia de signos de mal drenaje y su profundidad (gleyseado y moteado).

En el cálculo del balance hidrológico, la precipitación fue determinada con una probabilidad de exceso de 75%, que se puede interpretar también como el valor mínimo de precipitación que se obtendría en 7,5 años en un período de 10 años; es decir que solamente en 2,5 años de 10, es probable que ocurran eventos de precipitación menores al valor esperado.

### **3.3.3 Zona Agroecológica Experimento HACIENDA LA TRAMPA SUERTE 2A : 6H1<sup>15</sup>**

**Grupo 6:** está conformado por suelos de texturas finas, con contenidos de arcilla entre 35% y 60% en la sección control del perfil; distribuidos en el cuerpo y pie de los abanicos de la llanura aluvial y planos de terraza, en zonas de régimen de humedad ústico; moderadamente bien drenados y bien drenados; moderadamente profundos y profundos, limitados algunas veces por la presencia de horizontes compactos y condiciones de poca aireación derivadas del alto contenido de arcilla.

Constituyen este grupo las consociaciones Margarita, Ingenio, Samán, Corinto, Victoria y Puente Esclavos (Inceptisols); Cantarina, Arroyo, Chamburo, Palmiche, Troja, Desbaratado, Chontaduro y Palmito (Mollisols); Corintias, Galpón, Taula, Lisboa y Retiro (Vertisols) ricos en arcilla.

Las limitaciones más significativas son físicas y corresponden al agrietamiento observado en el campo, confirmado por los valores altos de Cole y de extensibilidad lineal que producen cambios volumétricos importantes a diferentes contenidos de humedad. El agrietamiento, no sólo en el cultivo de la caña sino en otros cultivos, puede producir daño mecánico de ruptura y estrangulación de las raíces de las plantas; sin embargo, las grietas favorecen la penetración del agua lluvia o de riego y la aireación, lo cual se dificultaría si las grietas no existieran, dada la permeabilidad reducida de los suelos. Otras limitaciones físicas son la mediana a baja capacidad de retención de humedad; el bajo contenido de macroporos que inciden en la baja capacidad de aireación y la permeabilidad lenta a muy lenta; la consistencia muy dura en seco, muy pegajosa y muy plástica en mojado; el índice de plasticidad superior a 20, lo que indica que son suelos que ofrecen dificultad para las prácticas de labranza porque se convierten en suelos muy pegajosos que se adhieren a los implementos agrícolas y causan el atascamiento de la maquinaria agrícola.

Las prácticas relacionadas con el manejo de los suelos de este grupo se pueden resumir en las siguientes: conservar un nivel adecuado de humedad

---

<sup>15</sup> CENICANA. Grupos homogéneos de suelos [en línea]  
[http://www.cenicana.org/aeps/grupos\\_homogeneos\\_4\\_aproximacion.php](http://www.cenicana.org/aeps/grupos_homogeneos_4_aproximacion.php) . [citado el 2 de mayo de 2011]

para su manejo; utilizar el arado de disco y rastrillos en condiciones adecuadas de humedad para evitar su compactación.

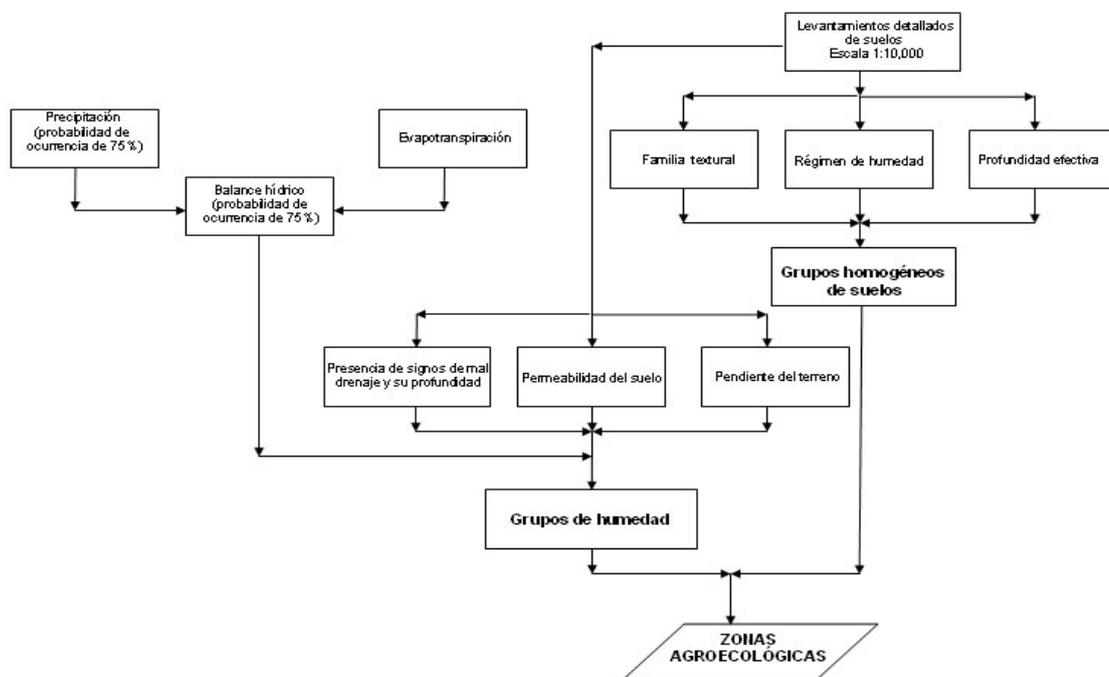
Si se preparan los suelos en altas condiciones de humedad se forma el pie de arado; incorporar materia orgánica (residuos de cosecha, cachaza, cenichaza o compost) para aumentar no solo la permeabilidad y la capacidad de retención de humedad, sino para facilitar la liberación del calcio del suelo; riegos frecuentes y de lámina alta (riegos pesados) cuando los suelos están agrietados, luego lámina media y baja para impedir el encharcamiento; los riegos deben ser en el momento oportuno es decir, frecuentes en época de verano, apoyados por un adecuado sistema de drenajes; subsolar para romper el pie de arado o para mejorar las condiciones de aireación. El subsuelo se debe hacer hasta 60 cm empezando por las primeras capas para continuar hacia la profundidad a fin de evitar la formación de bloques gruesos; construir drenajes superficiales para prevenir o controlar encharcamientos.

- H1: Humedad normal

En este grupo se incluyen las áreas con exceso de humedad inferior a 200 mm/año y permeabilidad del suelo media a alta, así como aquellas áreas en donde, a pesar de presentar déficit de humedad, pueden ocurrir encharcamientos debido a la poca pendiente del terreno o por tener suelos de permeabilidad baja. En este grupo son convenientes la nivelación y el aporque.

**Figura 1. Metodología de asignación de zonas agroecológicas**

**Diagrama metodológico con la secuencia de análisis de los factores utilizados para la zonificación agroecológica (cuarta aproximación)**



Fuente: Cenicaña Zonificación agroecológica (cuarta aproximación).  
[http://www.cenicana.org/aeps/zonificacion\\_4\\_aproximacion.php](http://www.cenicana.org/aeps/zonificacion_4_aproximacion.php)

### 3.4 LABORES AGRÍCOLAS

Las labores agrícolas que se realizan en la actividad de preparación de la tierra son todas aquellas tareas que se realizan con el propósito de preparar la tierra para poder sembrar y posteriormente obtener una cosecha altamente productiva.

En el desarrollo de estas actividades en el terreno se destruye la cepa anterior, se descompacta, se rotura y fracciona el suelo, además de desmenuzarlo al punto de que permita entrar en mejor contacto con la semilla de la caña que será ubicada después de la actividad de surcado que es la última que se realiza.

Las actividades que tienen contempladas dentro de las secuencias son las siguientes:

### 3.4.1 Decepada

En el desarrollo de esta actividad lo que se pretende principalmente es destruir y voltear las cepas de caña e incorporar este material vegetal al suelo, con el fin de facilitar la adecuación y preparación del terreno. La labor da inicio con la programación y la planeación de la actividad y termina al verificar en diferentes puntos del terreno que el diámetro de los terrones y la cantidad de residuos sean los adecuados.

Para realizar esta actividad se debe utilizar un tractor enllantado en la parte posterior dualmente con potencia mínima de 225 H.P al motor y con disposición de un enganche hidráulico y de tiro el cual debe estar utilizando una estructura metálica con su respectivo enganche al tractor, ruedas de tierra, discos (22 x 32", 20 x 32" , 20 x 36", 18x36") tornillo tensor y resorte soporte al que se le denomina rastro arado. Los equipos se presentan en la figura 2

**Figura 2. Maquinaria y equipo para proceso de decepar**



Tractor enllantado  
dualmente potencia mayor  
a 225 HP

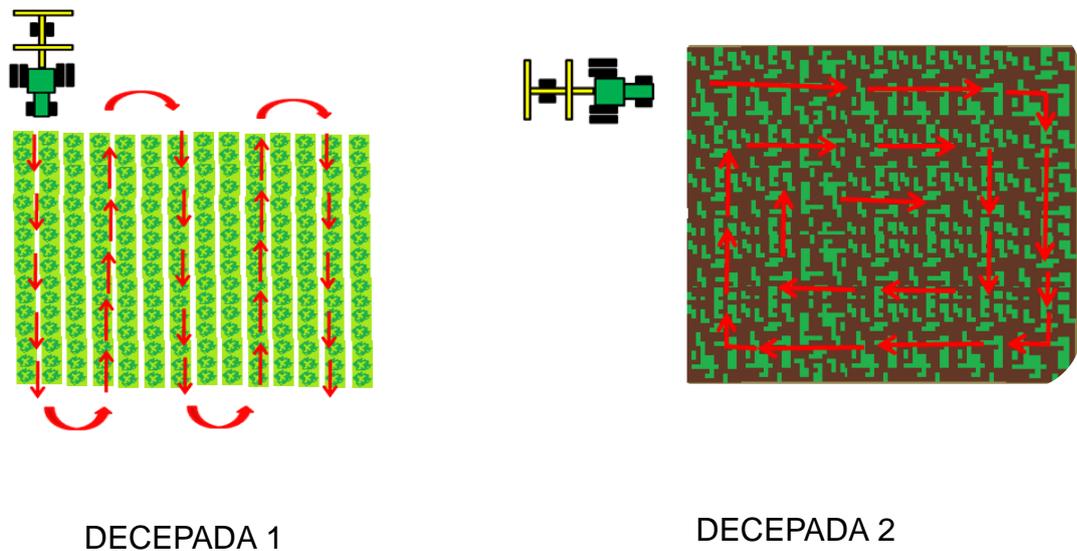


Equipo de rastroarado de  
18 discos de 36" cada uno

Fuente : Ingenio Providencia. Maquinaria contratista. 2011

Para el desarrollo de la tarea, el operador debe seguir una secuencia estandarizada en los pases, la cual se estableció como la que se muestra en la figura 3

**Figura 3. Recorrido al realizar la tarea de decepar**



Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

Para establecer que las labores de decepado se estén realizando de acuerdo con lo establecido por los procedimientos se debe hacer el seguimiento a los siguientes indicadores:

- Cumplimiento de la labor: 0,7 – 0,8 Ha / Hr. (dos pases)
- Profundidad de la labor: 25 - 30 cm.
- Velocidad del tractor en el tablón: 8,5 – 9 Km./hora.
- Revoluciones del tractor: 2.200 – 2.500 rpm.
- Trocha del tractor: 3,3 m.

### **3.4.2 Subsuelo**

En el desarrollo de esta actividad lo que se pretende principalmente disminuir la compactación del suelo, que se presenta como una consecuencia de las labores de cosecha. Así mismo, favorece la aireación y el drenaje del suelo, estimulando el crecimiento de raíces nuevas en la soca. La labor inicia después del encalle mecánico o Despaje manual; máximo doce (12) días después del corte.

Para realizar esta actividad se debe utilizar un tractor con una potencia entre 200 y 250 H.P Con enganche hidráulico por el sistema de 3 puntos, se pueden utilizar cualquiera de los siguientes equipos:

- Subsolador Minitandem
- Subsolador Subesca
- Subsolador semiparabólico
- Subsolador parabólico. (Utilizado en el experimento)
- Subsolador recto

Los equipos se presentan en la figura 4.

**Figura 4. Maquinaria y equipo para proceso de subsuelo**



Tractor con potencia entre  
200 y 250 HP

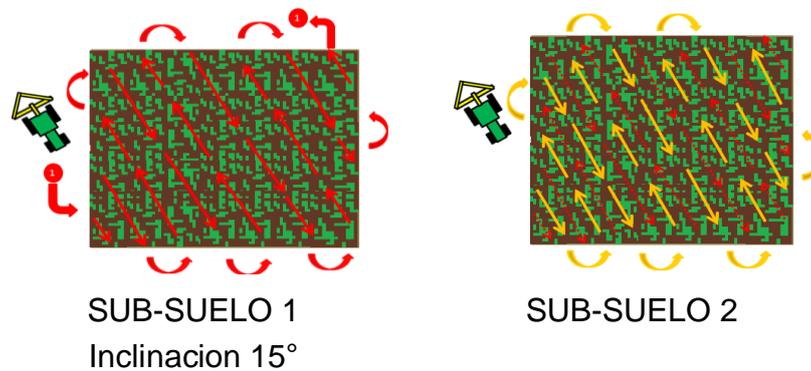


Subsolador de 3 vastagos

Fuente : Ingenio Providencia. Maquinaria contratista 2011.

Para el desarrollo de la tarea, el operador debe seguir una secuencia estandarizada en los pases la cual se estableció como la que se muestra en la figura 5

**Figura 5. Recorrido al realizar la tarea de subsuelo**



Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

### 3.4.3 Cincel

En el desarrollo de esta actividad lo que se pretende roturar y fraccionar el suelo después de la labor de subsuelo, para proporcionar una mejor aireación, drenaje interno y crear condiciones óptimas para un mejor desarrollo radicular del cultivo. De acuerdo con las características físicas del suelo se puede reemplazar la labor de subsuelo por la cincelada.

Para realizar esta actividad se debe utilizar un tractor con una potencia entre 200 y 250 haciendo uso del implemento denominado arado cincel. Los equipos se presentan en la figura 6

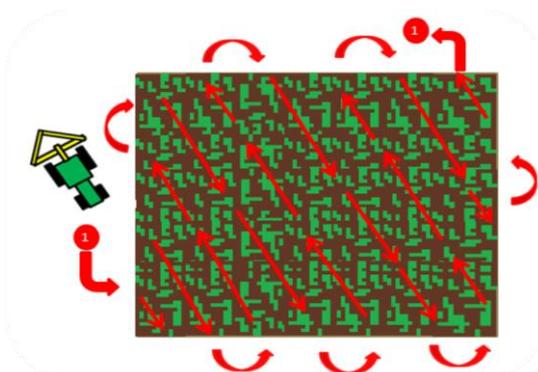
**Figura 6. Maquinaria y equipo para realizar proceso de cincel**



Fuente : Ingenio Providencia. Maquinaria contratista 2011.

Para el desarrollo de la tarea, el operador debe seguir una secuencia estandarizada en los pases, la cual se estableció como la que se muestra en la figura 7

**Figura 7 Recorrido al realizar la tarea de cincel**



Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

Para establecer que las labores de decepado se estén realizando de acuerdo con lo establecido por los procedimientos se debe hacer el seguimiento a los siguientes indicadores:

- Cumplimiento de la labor: 1,0 Ha / h.
- Profundidad de la labor: 40 - 50 cm.
- Cambio de velocidad: tercera y cuarta.
- Revoluciones del tractor: 2.100 rpm

#### **3.4.4 Rastroarado**

En el desarrollo de esta labor se utiliza un tractor enllantado con potencia mínima de 225 H.P al motor y con disposición de un enganche hidráulico y de tiro. la herramienta que se debe utilizar es una estructura metálica con su respectivo enganche al tractor, ruedas de tierra, discos (22 x 36", 20 x 32", 20 x 36", 24 x 36", 18 x 36) tornillos tensor y resorte levantador. Los equipos se presentan en la figura 8

**Figura 8. Maquinaria y equipo para realizar la tarea de rastrearado**



Tractor con potencia entre 225 y 250 HP



Rastro arado con 18 discos de 36"

Fuente : Ingenio Providencia. Maquinaria contratista 2011.

Para el desarrollo de la tarea, el operador debe seguir una secuencia estandarizada en los pases la cual se estableció como la que se muestra en la figura 9.

**Figura 9. Recorrido al realizar la tarea de rastrearado**



**RASTROARADO**

Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

Para establecer que las labores de rastrearado se están realizando de acuerdo con lo establecido por los procedimientos se debe hacer el seguimiento a los siguientes indicadores:

- Cumplimiento de la labor: 1,0 Ha / Hr. (dos pases).
- Profundidad de la labor: 18 - 25 cm.
- Tamaño partículas del suelo: Terrones no mayores de 20 cm. de diámetro.
- Cambio de velocidad: Séptima u octava.
- Revoluciones del tractor: 2.200 – 2.500 rpm.
- Velocidad del tractor: 7,5 – 8,5 Km./hora.

### 3.4.5 Rastrillo

En el desarrollo de esta actividad lo que se pretende es desmenuzar y voltear el suelo y poder garantizar buen contacto de la semilla de caña y una mejor cama de siembra. Esta tarea inicia al terminar el rastro arado o el cincel dependiendo del tipo de preparación que se esté realizando.

En el desarrollo de esta labor se utiliza un tractor enllantado con potencias entre 225-350 HP al motor y que disponen de un enganche hidráulico y de tiro. La herramienta que se debe utilizar es una estructura metálica con su respectivo enganche al tractor, ruedas de tierra, discos (40" x 26" , 48" x 24" , 66" x 24") tornillo tensor y resorte levantador. Los equipos se presentan en la figura 10

**Figura 10. Maquinaria y equipo para realizar la tarea de rastrillo**



Tractor con potencia entre 225 y 250 HP

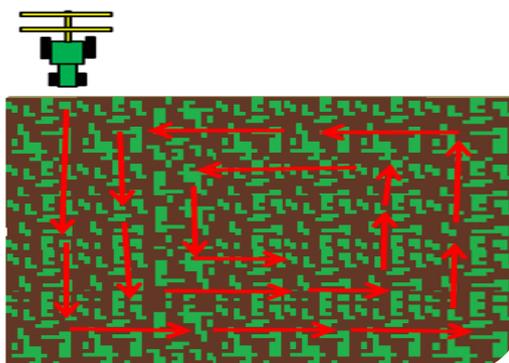


Rastro arado con 18 discos de 36"

Fuente : Ingenio Providencia. Maquinaria contratista, 2011.

Para el desarrollo de la tarea, el operador debe seguir una secuencia estandarizada en los pases la cual se estableció como se muestra en la figura 11.

**Figura 11. Recorrido para realizar la tarea de rastrillo**



### RASTRILLO

Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

Para establecer que las labores de rastrillo se están realizando de acuerdo a lo establecido por los procedimientos se debe hacer el seguimiento a los siguientes indicadores:

- Cumplimiento de la labor: 0.62 Ha / Hr. (Dos pases).
- Profundidad de la labor: 20 cm. o la tercera parte del diámetro del disco.
- Tamaño de partícula: Terrones no mayores de 10 cm.
- Cambio de velocidad: Cuarta o quinta.
- Revoluciones del tractor: 2.200 R.P.M.

#### **3.4.6 Surcado**

En el desarrollo de esta actividad lo que se pretende es conformar los surcos (cama), para acomodar la semilla de caña durante la siembra, conforme a la distancia entre surcos y profundidad establecida. Esta labor es la última que se realiza en el proceso de preparación de la tierra.

En el desarrollo de esta labor se utiliza un tractor enllantado con potencia mínima de 150 H.P., al motor y con disposición de un enganche hidráulico y de tiro. Para realizar esta tarea se utiliza una herramienta denominada surcador. Los equipos se presentan en la figura 12

**Figura 12. Maquinaria y equipos utilizado al realizar la tarea de surcado**



Jhon Deere 4450

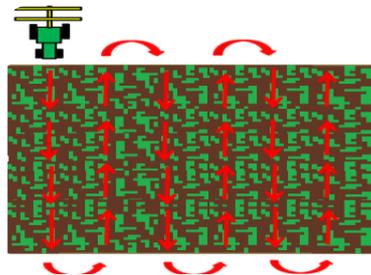


Surcador

Fuente: Ingenio Providencia. Maquinaria contratista 2011.

Para el desarrollo de la tarea, el operador debe seguir una secuencia estandarizada en los pases la cual se estableció como la que se muestra en la figura 13.

**Figura 13. Recorrido para realizar la tarea de surcado**



Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

Para establecer que las labores de surcado se estén realizando de acuerdo a lo establecido por los procedimientos se debe hacer el seguimiento a los siguientes indicadores:

- Cumplimiento de la labor: 2,5 - 3 Ha / Hr
- Profundidad de la labor: 25 - 30 cm
- Cambio de velocidad: Décima
- Revoluciones del tractor: 2.200 rpm

- Velocidad del tractor: 10,5 – 11,5 Km./hora
- Distancia entre surcos: 1,65 m

### **3.5 LABRANZA MÍNIMA O REDUCIDA PARA CULTIVOS DE CAÑA DE AZÚCAR.**

La Labranza Reducida es un sistema de renovación de plantaciones que reduce significativamente la utilización de maquinaria agrícola en las labores de preparación de tierras sin afectar el establecimiento y desarrollo del cultivo.

Para el cultivo de la caña de azúcar la labranza reducida es utilizada en los países con zafra como Mauricio, Estados Unidos, Suráfrica y Guatemala pero las labores que se realizan varían, principalmente en función de los suelos, al igual que en la labranza convencional.<sup>16</sup>

La renovación de plantaciones con Labranza Reducida se encuentra condicionada por la calidad de la erradicación química y de la preparación del suelo. Se sabe que la alta eficiencia de erradicación lograda con la metodología propuesta por Cenicaña evita la competencia entre el cultivo anterior y el nuevo cultivo y facilita la incorporación de cepas con el subsolador Cenitándem.

La secuencia preliminar de labores para renovar con Labranza Reducida en el experimento desarrollado durante este trabajo consta de:

Manejo de residuos post-cosecha: Como la cosecha de la suerte del experimento fue mecanizada los residuos son más finos, por lo cual fueron dejados en el lote para aprovecharlos orgánicamente, en el caso en que no hubiera sido así se debería realizar un despaje que se efectúa durante los diez primeros días después de la cosecha donde los residuos se retiran del lote y se llevan al callejón utilizando un rastrillo apilador tipo australiano.

Aplicación del herbicida: para erradicar la cepa se aplican entre 4 y 6 l/ha de Glifolag entre los días 30 y 35 después de la cosecha.

Subsolado: Luego de la aplicación del herbicida, entre los días 10 y 15, se rotura el surco del nuevo cultivo con el subsolador Triple, para erradicar la cepa anterior. Luego del pase del triple se puede iniciar con la surcada.

Siembra: se efectúa una vez el terreno se encuentre preparado.

---

<sup>16</sup> REBOLLEDO Juan Pablo; GOMEZ Jaime. Sistema de Labranza Reducida en el Ingenio Manuelita S.A. Cenicaña. Cali. En: carta Trimestral año 22 Nos. 1 y 2, 2000, p.30.

Levantamiento del nuevo cultivo: Se efectúan las mismas labores que en el sistema convencional (cultivo-abono-aporque, riegos y control de malezas. (Jorge S. Torres, Fernando Villegas, Eduardo Fabio Ceron Gonzalez, 1997)

Este sistema de Labranza Reducida se presenta como una gran oportunidad para estructurar un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio, que permita, no solo disminuir la huella de carbono de las labores de campo en el cultivo de caña y reducir costos de combustibles, si no también podría generar beneficios económicos por la posibilidad de acceder al mercado del carbono.

### 3.6 DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DOE)

#### 3.6.1 Historia de diseño de experimentos

El diseño estadístico de experimentos, desde su introducción por Ronald A. Fisher en la primera mitad del siglo XX en Inglaterra, se ha utilizado para conseguir un aprendizaje acelerado. El trabajo de Fisher a través de su libro *The design of experiments* (1935).<sup>17</sup> Influyó de manera decisiva en la investigación agrícola, ya que aportó métodos (ahora usados en todo el mundo) para evaluar los resultados con muestras pequeñas. La clave de las aportaciones de Fisher es que este investigador se dio cuenta de que las fallas en la forma de realizar los experimentos obstaculizaban el análisis de los resultados experimentales. Fisher también proporcionó métodos para diseñar experimentos destinados a investigar la influencia simultánea de varios factores, como se muestra en la figura 14.

**Figura 14. Proceso interactivo de la experimentación**



Los desarrollos posteriores en diseños de experimentos fueron encabezados por George E. P. Box quien trabajó como estadístico durante ocho años en la industria química de Inglaterra y desarrolló la metodología de superficies de respuestas (Véase Box y Wilson, 1951), la cual incluye nuevas familias de diseños y una estrategia para la experimentación secuencial. Es posible afirmar que entre 1950 y 1980, el diseño de experimentos se convirtió en una herramienta de aplicación frecuente, pero solo en las áreas de investigación y desarrollo. Hasta 1970 la aplicación a nivel de planta o procesos de manufactura no estaba generalizada, debido a la falta de recursos computacionales y a que los ingenieros y especialistas en manufactura carecían de la formación en el área de estadística.

<sup>17</sup> GUTIERREZ, Humberto y DE LA VARA, Roman. Analisis y diseño de experimentos. 2ª edición Mc Graw Hill. 2008.

En la década de 1980 se dio un gran impulso al conocimiento y la aplicación del diseño de experimentos debido al éxito en calidad de la industria japonesa. El movimiento por la calidad, empezado por los gurús Deming e Ishikawa, promovió el uso de la estadística en la calidad, donde el diseño de experimentos demostró su utilidad tanto en resolver problemas de fondo como para diseñar mejor los productos y procesos. En Japón se destaca el trabajo de Genichi Taguchi cuyos conceptos sobre diseños robustos, también tuvieron un impacto significativo en la academia del mundo occidental. Como respuesta al movimiento por la calidad y la mejora de procesos, las industrias empezaron a entrenar a sus ingenieros en la aplicación de diseño de experimentos. En la actualidad las escuelas de ingeniería han determinado como materia obligatoria en la formación de nuevos ingenieros.

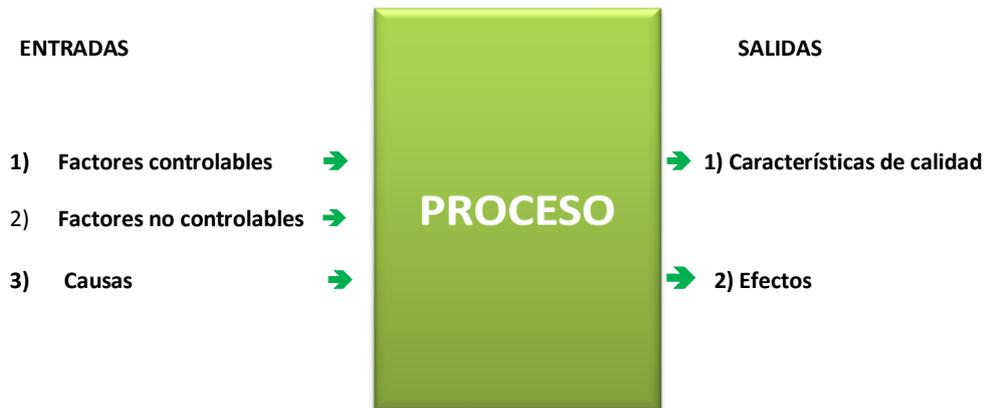
### **3.6.2 Definiciones básicas en el Diseño de Experimentos**

El diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permite entender mejor situaciones complejas de relación causa- efecto.

- **Experimento:** un experimento es un cambio en las condiciones de operación de un sistema o procesos, que se hace con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del producto o resultados. Asimismo, el experimento permite aumentar el conocimiento acerca del sistema.
- **Unidad Experimental:** la unidad experimental es la pieza(s) o muestra(s) que se utiliza para generar un valor que sea representativo del resultado del experimento o prueba. En cada diseño de experimentos es importante definir de manera cuidadosa la unidad experimental, ya que esta puede ser una pieza o muestra de una sustancia o un conjunto de piezas producidas, dependiendo del proceso que se estudia.
- **VARIABLES, Factores y Niveles:** en todo proceso intervienen distintos tipos de variables o factores como los que se muestran en el esquema 15, además de algunos interrogantes al planear un diseño de experimentos.
- **VARIABLES de respuesta:** a través de esta variable se conoce el efecto o los resultados de cada prueba experimental (figura 15), por lo que puede ser una característica de la calidad de un producto una variable que mide el desempeño de un proceso. El objetivo de muchos estudios experimentales es encontrar la forma de mejorar la variable de respuesta. Por lo general esta variable se denota por la letra *y*.

Las variables expuestas anteriormente se pueden visualizar en la figura 15

**Figura 15. Variables de un proceso y preguntas a responder al diseñar un experimento**



¿Cuáles características de calidad se van a medir?  
¿Cuáles factores controlables deben incluirse en el experimento?  
¿Qué niveles debe utilizar cada factor?  
¿Cuál diseño experimental es el adecuado?

Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

- Factores Controlables: son variables de proceso o características de los materiales experimentales que se pueden fijar en un nivel dado. Algunos de estos son los que usualmente se controlan durante la operación normal del proceso (figura 15), y se distinguen porque, para cada uno de ellos, existe la manera o el mecanismo para hacer cambiar el nivel de operación. Algunos factores que normalmente se controlan son: temperatura, tiempo de residencia, cantidad de cierto reactivo, tipo de reactivo, método de operación, velocidad, presión, etc. A los factores controlables también se les llama variables de entrada, condiciones de proceso, variables de diseño, parámetros del proceso, las  $x$  de un proceso, o simplemente los factores.
- Factores no Controlables o de Ruido: son variables o características de materiales y métodos que no se pueden controlar durante el experimento o la operación normal del proceso, por ejemplo, algunos factores que suelen ser no controlables son las variables ambientales (luz, humedad, temperatura, partículas, ruido, etc.), el ánimo de los operadores, la calidad del material que se recibe del proveedor. Un factor que aparece ahora como no controlable, puede volverse controlable si se cuenta con la tecnología y el mecanismo para ello.
- Factores Estudiados: son las variables que se investigan en el experimento, respecto de cómo influyen o afectan a la variable de respuesta. Los factores estudiados pueden ser controlables o no controlables, a estos últimos quizás fue posible y de interés controlarlos durante el experimento. Para que un factor pueda ser estudiado es necesario que durante el experimento

se haya probado en al menos dos niveles o condiciones. En principio cualquier factor, sea controlable o no, puede tener alguna influencia en la variable de respuesta que se refleja en su media o en su media o en su variabilidad. Para fines de un diseño de experimentos deben seleccionarse los factores que se considera, por conocimiento del objeto de estudio, que pueden tener efecto sobre la respuesta de interés. Obviamente si se decide o interesa estudiar el efecto de un factor no controlable, parte de la problemática a superar durante el diseño es ver la manera en que se controlara durante el experimento tal factor.

- Niveles y tratamientos: los diferentes valores que se asignan a cada factor estudiado en un diseño experimental se llaman *niveles*. Una combinación de niveles de todos los factores estudiados se denomina *tratamiento* o *punto de diseño*. Es necesario probar cada tratamiento y obtener el correspondiente valor de  $y$ . Un ejemplo se presenta en la tabla 2.

**Tabla 2. Ejemplo niveles y tratamientos**

Factores estudiados			
Niveles			
Factor a	1	2	
Factor b	$\alpha$	$\beta$	
Factor a	Factor b	Tratamiento	$y$
1	$\alpha$	1	
2	$\alpha$	2	
1	$\beta$	3	?
2	$\beta$	4	

De acuerdo con estas definiciones, en el caso de experimentar con un solo factor, cada nivel es un tratamiento.

- Error aleatorio y error experimental: siempre que se realice un estudio experimental, parte de la variabilidad observada en la respuesta no se podrá explicar por los factores estudiados. Esto es, siempre habrá un remanente de variabilidad que se debe a causas comunes o aleatorias, que generan la variabilidad natural del proceso. Esta variabilidad constituye el llamado *error aleatorio*. Por ejemplo, será parte de este error aleatorio el pequeño efecto que tienen los factores que no se estudiaron, siempre y cuando se mantengan pequeños o despreciables, así como la variabilidad de las mediciones hechas bajo las mismas condiciones. Sin embargo, el error aleatorio también absorberá todos los errores que el experimentador comete durante los experimentos, y si estos son graves, más que error aleatorio hablaremos de *error experimental*. De predominar este, la detección de cuáles de los factores estudiados tienen un efecto real sobre la respuesta será difícil, si no es que imposible.

Cuando se corre un diseño experimental es importante que la variabilidad observada de la respuesta se deba principalmente a los factores estudiados y en menor medida al error aleatorio, y además que este error sea efectivamente aleatorio. Cuando la mayor parte de la variabilidad se debe a factores no estudiados o a un error no aleatorio, no se podrá distinguir cual es el verdadero efecto que tienen los factores estudiados, con lo que el experimento no alcanzara su objetivo principal, de aquí la importancia de no dejar variar libremente a ningún factor que pueda influir de manera significativa sobre el comportamiento de la respuesta (principio de bloqueo).

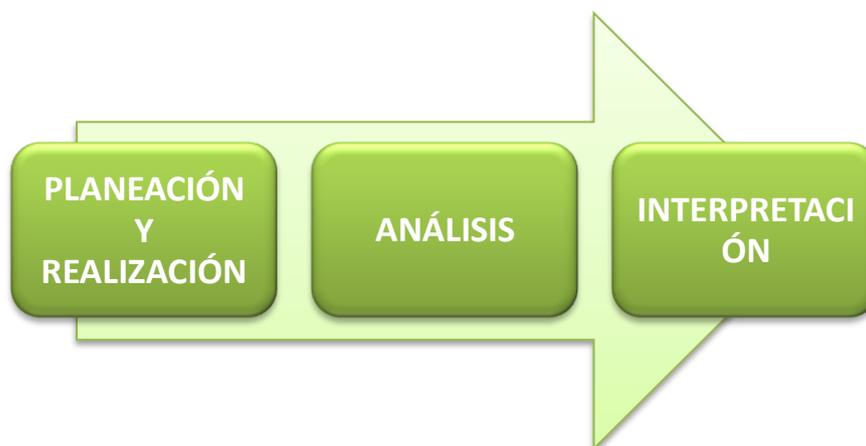
### 3.6.3 Etapas del Diseño de Experimentos

El experimento realizado en la Hacienda La Trampa para el cálculo teórico de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el tractor en las cuatro alternativas de preparación del suelo utilizadas, se basa en las etapas del diseño de experimentos que propone Gutiérrez (2008).

Un aspecto fundamental del diseño de experimentos es decidir cuáles pruebas o tratamientos se van a realizar y cuántas repeticiones de cada uno se requieren, de manera que se obtenga la máxima información al mínimo costo posible. El arreglo formado por los diferentes tratamientos que serán corridos, incluyendo las repeticiones, recibe el nombre de *matriz de diseño* o solo *diseño*.

Para que un estudio experimental sea exitoso es necesario realizar, por etapas, diferentes actividades. En este sentido, las etapas más importantes y la que se le debe dedicar mayor tiempo es la planeación. Estas etapas se presentan en la figura 16.

**Figura 16. Pasos diseño de experimento**



## -ANÁLISIS

- Planeación y Realización
  - Entender y delimitar el problema objeto de estudio: en la etapa de planeación se debe hacer investigaciones preliminares que conduzcan a entender y delimitar el problema u objeto de estudio, de tal forma que quede claro que se va a estudiar, por que es importante y, si es un problema, cual es la magnitud del mismo.
  - Elegir las variables de respuesta que serán medidas en cada punto del diseño y verificar que se mide de manera confiable; la elección de estas variables es vital, ya que en ellas se refleja el resultado de las pruebas, por ello se deben elegir aquellas que mejor reflejen el problema o que caractericen al objeto de estudio.

Además, se debe tener confianza en que las mediciones que se obtengan sobre esas variables sean confiables. En otras palabras, se debe garantizar que los instrumentos y/o métodos de medición son capaces de repetir y reproducir una medición, ya que tiene la precisión (error) y exactitud (calibración) necesaria.
  - Determinar cuáles factores deben estudiarse o investigarse, de acuerdo con la supuesta influencia que tienen sobre la respuesta: No se trata de que el experimentador tenga que saber a priori cuales factores influyen, puesto que precisamente para eso es el experimento, pero si de que utilice toda la información disponible para incluir aquellos que se consideran tienen un mayor efecto.
  - Seleccionar los niveles de cada factor, así como el diseño de experimentos adecuados a los factores que se tienen y el objetivo del experimento: este paso indica determinar cuántas repeticiones se harán por cada tratamiento, teniendo en cuenta el costo, el tiempo y la precisión deseada.
  - Planear y organizar el trabajo experimental: con base en el diseño seleccionado, organizar y planear con detalle el trabajo experimental, por ejemplo, las personas que van a intervenir, la forma operativa en que se harán las cosas.
  - Realizar el experimento: seguir al pie de la letra el plan previsto en la etapa anterior, y en caso de algún imprevisto, determinar a que persona se lo reportarían y lo que se haría.
- Análisis: en esta etapa no se deben perder de vista que los resultados son observaciones muestrales, no poblacionales. Por ello, se debe recurrir a métodos estadísticos inferenciales para ver si las diferencias o efectos muestrales son los suficientemente grandes para que garanticen

diferencias poblacionales (o a nivel de proceso). La técnica estadística central en el análisis de experimentos es el llamado análisis de varianza (ANOVA).

- Interpretación: aquí, con el respaldo del análisis estadístico formal, se debe analizar con detalle lo que ha pasado durante el experimento, deben contrastar las conjeturas iniciales con los resultados del experimento, hasta observar los nuevos aprendizajes que sobre el proceso se lograron, verificar supuestos y elegir el tratamiento ganador, siempre con apoyo de las pruebas estadísticas.
- Control y Conclusiones Finales: para concluir el estudio experimental se recomienda decidir que medidas se implementarán para generalizar el resultado del estudio y para garantizar que las mejoras se mantengan. Además, es preciso organizar una presentación para difundir los logros obtenidos.

### **3.7 ESTEQUIOMETRÍA DE LAS COMBUSTIONES<sup>18</sup>**

La combustión es un conjunto de reacciones de oxidación con desprendimiento de calor, que se producen entre dos elementos: el COMBUSTIBLE, que puede ser un sólido (carbón, madera, etc.), un líquido (Gasóleo, Fuel-Oil, etc.) o un gas (Natural, Propano, etc.) y el COMBURENTE, Oxígeno.

La combustión se distingue de otros procesos de oxidación lenta, por ser un proceso de oxidación rápida y con presencia de llama; a su vez también se diferencia de otros procesos de oxidación muy rápida (detonaciones, deflagraciones y explosiones) por obtenerse el mantenimiento de una llama estable.

Para que la combustión tenga lugar han de coexistir tres factores:

- COMBUSTIBLE
- COMBURENTE
- ENERGÍA DE ACTIVACIÓN

Estos tres factores se representan en el denominado triángulo de combustión, en el cual si falta alguno de los vértices la combustión no puede llevarse a cabo.

---

<sup>18</sup> GARCIA Ricardo. Combustión y combustibles. [en línea] < [www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller1BURE/COMBUSTION.PDF](http://www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller1BURE/COMBUSTION.PDF) >. [citado en 21 de abril de 2011]

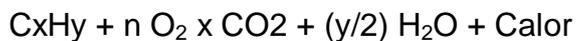
El comburente universal es el oxígeno, por lo que en la práctica se utiliza el aire como comburente, ya que está compuesto, prácticamente, por 21% oxígeno (O<sub>2</sub>) y 79% nitrógeno (N<sub>2</sub>); únicamente en casos especiales se utilizan atmósferas enriquecidas en oxígeno e incluso oxígeno puro (por ejemplo en soldadura). La energía de activación es el elemento desencadenante de la reacción de combustión; en los quemadores habitualmente suele obtenerse mediante una chispa eléctrica entre dos electrodos, en las calderas individuales de gas se obtiene por llama piloto, tren de chispas, etc.

La mayoría de los combustibles, al margen de que sean sólidos, líquidos o gaseosos, están compuestos, básicamente, por carbono (C) e hidrógeno (H); además de estos componentes principales tienen otros como azufre (S), humedad (H<sub>2</sub>O), cenizas, etc.

En primer lugar se analiza la combustión desde el punto de vista de sus componentes fundamentales (C, H); posteriormente se comentará la influencia de los restantes elementos. Las reacciones de combustión son:



En la práctica los combustibles pueden definirse de la forma C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, dando lugar a las siguientes reacciones:



La estequiometría de la combustión se ocupa de las relaciones másicas y volumétricas entre reactivos y productos. Los aspectos a determinar son principalmente:

- Aire necesario para la combustión
- Productos de la combustión y su composición

Para predecir estas cantidades es preciso referirse a un proceso ideal que dependa de unos pocos parámetros, básicamente la naturaleza del combustible.

Para definir este proceso ideal se consideran los tipos de combustión que pueden darse:

### **3.7.1 Combustión Completa**

Conduce a la oxidación total de todos los elementos que constituyen el combustible. En el caso de hidrocarburos:

- Carbono CO<sub>2</sub>
- Hidrogeno H<sub>2</sub>O
- Azufre SO<sub>2</sub>
- Nitrógeno N<sub>2</sub>

Oxigeno participará como oxidante

El nitrógeno se considera como masa inerte, si bien a las altas temperaturas de los humos pueden formarse óxidos de nitrógeno en pequeñas proporciones (del orden de 0,01%).

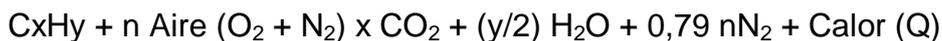
### 3.7.2 Combustión Incompleta

Los componentes del combustible no se oxidan totalmente por lo que aparecen los denominados inquemados, los mas importantes son CO y H<sub>2</sub>; otros posibles inquemados son carbono, restos de combustible, etc.

### 3.7.3 Combustión Estequiométrica

Es la combustión completa realizada con la cantidad estricta de oxígeno; es decir, el aire empleado en la combustión es el mínimo necesario para contener la cantidad de oxígeno correspondiente a la oxidación completa de todos los componentes del combustible.

La expresión de esta combustión es:



En este caso  $0,21 \cdot n = x + (y/4)$ , siendo el calor generado es el correspondiente a la combustión completa.

Sin embargo, en la práctica se halla que no es posible obtener combustión completa, suministrando el aire teórico requerido. Así pues, es necesario alimentar aire en exceso a la reacción (factor lambda), dependiendo del tipo de combustible<sup>19</sup>:

- Para combustibles sólidos: 40 a 150% de exceso de aire (lambda 1,4 – 2,5)
- Para combustibles líquidos: 25 a 60% de exceso de aire (lambda 1,25 – 1,6)

<sup>19</sup> Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN). UPME Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos. Bogotá: Julio, 2003. p 4.

- Para gases: 10 a 40% de exceso de aire ( $\lambda$  1,1 – 1,4).

En este caso se tiene una combustión completa con exceso de aire. En la medida en que se disponga de información acerca de la tecnología utilizada para llevar a cabo la combustión, se podrá alcanzar mayor precisión en el valor del factor  $\lambda$ . Para especificar el equipo de combustión se han de aplicar criterios de selección relativos al combustible y en particular a la aplicación concreta. Una vez establecido el equipo requerido, para cada tipo de quemador se puede trazar una curva de exceso de aire en función de la carga o demanda de calor, que permita establecer con precisión el exceso de aire requerido.

Para el cálculo del aire requerido, del poder calorífico y del volumen de gas quemado el desarrollo de la metodología descrita a continuación, contempló la composición elemental de los combustibles sólidos y líquidos, es decir, porcentaje en peso de cada uno de sus elementos componentes (carbono, hidrógeno, azufre, cloro, oxígeno, flúor) y la composición en volumen de los combustibles gaseosos, es decir, porcentaje en volumen de cada uno de sus componentes (metano, propano, etc.).

Es importante tener en cuenta que el  $\text{CO}_2$  es el más común de los gases de efecto invernadero y su mayor fuente la constituye la quema de los combustibles fósiles. Cuando estos combustibles se queman, gran parte del contenido de carbón se emite como  $\text{CO}_2$  y en menor proporción como  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  y otros hidrocarburos que finalmente se oxidan a  $\text{CO}_2$  en un periodo de aproximadamente 10 años. En este hecho reside la importancia de contar con un método que permita el cálculo de las emisiones de este contaminante.

Sin embargo, la combustión real produce además de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) otros compuestos como ácido fluorhídrico (HF), ácido clorhídrico (HCl), óxidos de azufre ( $\text{SO}_2$ ), cuya estequiometría se referirá en el siguiente capítulo y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). En relación con éstos últimos hay que señalar que en la mayoría de los procesos de combustión el oxígeno se suministra como aire, que se considera compuesto de 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno. El nitrógeno reacciona efectivamente con el oxígeno mediante una serie de relaciones altamente dependientes de las condiciones de reacción, lo que hace difícil su predicción teórica.

Una vez establecidos los productos de la combustión y su concentración en el gas quemado es posible, mediante la definición de su poder calorífico, precisar los factores de emisión correspondientes.

- Volumen de gases quemados: el cálculo de los productos unido al volumen de gases quemados permite determinar la concentración de los diferentes compuestos en los gases de salida. Para el cálculo de los gases quemados acudimos a las fórmulas sugeridas por Brandt<sup>20</sup>:

---

<sup>20</sup> Brandt, F. 2000. Brennstoffe und Verbrennungsrechnung. Ed. Vulkan. Verlag. Germany

- Para sólidos y líquidos:

$$\text{Volumen de gas quemado} = 8.887 \cdot C + 3,3174 \cdot S + 20,9597 \cdot H - 2,6408 \cdot O + 0.7997 \cdot (N + Cl + F)$$

Los valores para C, H, etc., están dados en porcentaje en peso (kg/kg), el volumen se expresa en m<sup>3</sup>/kg de combustible.

- Para gases:

$$\begin{aligned} \text{Volumen de gas quemado} = & N_2 + CO_2 + 1,8838 \cdot H_2 + 2,8000 \cdot CO + 6,6965 \cdot H_2S \\ & + 8,5538 \cdot CH_4 + 10,4048 \cdot C_2H_2 + 13,3974 \cdot C_2H_4 + 15,3340 \cdot C_2H_6 + \\ & 20,3218 \cdot C_3H_6 + 22,3114 \cdot C_3H_8 + 27,6078 \cdot C_4H_8 + 29,7424 \cdot (C_4H_{10n} + C_4H_{10i}) \end{aligned}$$

en donde i y n hacen referencia a i-butano o isobutano ( CH<sub>3</sub>-CH<sup>2</sup>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>3</sub> ) y n-butano o butano normal ( CH(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>).

Los valores de los gases corresponden a la composición volumétrica (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), el volumen se expresa en m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> de combustible

De esta manera, continuando con el mismo ejemplo de un carbón compuesto por 80% de C. y 20% de H<sub>2</sub>:

$$\begin{aligned} \text{Volumen de gas quemado} &= 8.887 \cdot 0,8 + 20,9597 \cdot 0.2 = 11,3 \text{ m}^3/\text{kg} \\ \text{Concentración de CO}_2 \text{ en gases quemados} &= 0,293/11,3 = 0,259 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

- Volumen de aire requerido: también es posible calcular el volumen de aire requerido que más adelante permitirá establecer el volumen real mediante la aplicación del factor lambda.

- Para sólidos y líquidos:

$$\text{Volumen de aire requerido} = 8,8996 \cdot C + 26,5139 \cdot H + 3,342 \cdot S - 3,3405 \cdot O$$

Los valores para C, H, etc. están dados en porcentaje en peso (kg/kg), el volumen se expresa en m<sup>3</sup>/kg de combustible.

- Para gases:

$$\begin{aligned} \text{Volumen de aire requerido} = & 2,3830 \cdot H_2 + 2,3860 \cdot CO + 7,2251 \cdot H_2S + \\ & 9,5611 \cdot CH_4 + 11,9048 \cdot C_2H_2 + 14,4158 \cdot C_2H_4 + 16,8594 \cdot C_2H_6 + 21,8665 \cdot C_3H_6 + \\ & 24,3715 \cdot C_3H_8 + 29,7063 \cdot C_4H_8 + 32,3753 \cdot (C_4H_{10i} + C_4H_{10n}) \end{aligned}$$

Los valores de los gases corresponden a la composición volumétrica (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), el volumen se expresa en m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> de combustible

- Cálculo de los poderes caloríficos: el último eslabón en la cadena de cálculos, antes de llegar al objetivo fundamental, que es el cálculo de los factores de emisión, lo constituye la determinación de los poderes

caloríficos, también establecida mediante las relaciones sugeridas por Brandt 20.

- Para sólidos y líquidos:

$$\text{Poder calorífico superior (HHV)} = 34,8 \cdot C + 93,8 \cdot H + 10,44 \cdot S + 6,28 \cdot N - 10,8 \cdot O + 2,5 \cdot (9 \cdot H)$$

$$\text{Poder calorífico inferior (LHV)} = 34,8 \cdot C + 93,8 \cdot H + 10,44 \cdot S + 6,28 \cdot N - 10,8 \cdot O - 2,5 \cdot W$$

En donde W es el contenido de agua. Si los valores para C, H, etc. están dados en porcentaje en peso (kg/kg), el poder calorífico se expresa en MJ/kg de combustible.

- Para gases:

$$\text{Poder calorífico superior (HHV)} = 12.745 \cdot H_2 + 39.819 \cdot CH_4 + 70.293 \cdot C_2H_6 + 63.429 \cdot C_2H_4 + 58.473 \cdot C_2H_2 + 101.234 \cdot C_3H_8 + 93.576 \cdot C_3H_6 + 134.128 \cdot C_4H_{10n} + 133.256 \cdot C_4H_{10i} + 125.919 \cdot C_4H_8 + 12.633 \cdot CO + 25.394 \cdot H_2S$$

$$\text{Poder calorífico inferior (LHV)} = 10.784 \cdot H_2 + 23.413 \cdot H_2S + 12.633 \cdot CO + 35.885 \cdot CH_4 + 56.494 \cdot C_2H_2 + 59.476 \cdot C_2H_4 + 64.349 \cdot C_2H_6 + 87.578 \cdot C_3H_6 + 93.213 \cdot C_3H_8 + 117.771 \cdot C_4H_8 + 123.883 \cdot nC_4H_{10} + 123.053 \cdot iC_4H_{10}$$

Si los valores de los gases corresponden a la composición volumétrica (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), el volumen se expresa en MJ/m<sup>3</sup> de combustible.

- Cálculo de los factores de emisión: la relación que existe entre el poder calorífico del combustible y la concentración del producto analizado en los gases quemados, permite establecer el factor de emisión correspondiente.

$$FE (CO_2) = \text{Volumen real [m}^3/\text{kg combustible]} \cdot \text{Concentración de CO}_2 \text{ [kg CO}_2/\text{m}^3 \text{ gas quemado]} \cdot \text{poder calorífico [MJ/kg combustible]}^{21}$$

### 3.8 COMBUSTIÓN Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL<sup>22</sup>

A la hora de seleccionar el combustible y de optimizar el proceso de combustión se deben considerar aspectos relacionados con la emisión de agentes polucionantes. Las normas actuales restringen estas emisiones, y de hecho uno de los factores mas importantes en el diseño de dispositivos de combustión en la actualidad reside en el control de emisiones contaminantes.

<sup>21</sup> ACCEFYN. UPME. Op cit

<sup>22</sup> GARCIA Ricardo. Combustión y combustibles. [en línea] < [www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller1BURE/COMBUSTION.PDF](http://www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller1BURE/COMBUSTION.PDF) >. [citado en 21 de abril de 2011]

Estas emisiones tienen diversos efectos perniciosos:

- Afectan al equilibrio de la atmósfera terrestre: efecto invernadero, desaparición de la capa de ozono, alteración de la meteorología, etc.
- Afectan a la salud humana
- Afectan a la vida animal y vegetal
- Ensucian y deterioran los materiales: edificios, vehículos, etc.

Con relación a los hidrocarburos como combustibles, las principales causas de contaminación son:

### **3.8.1 Contaminación debida al Carbono**

La combustión completa del carbono produce  $\text{CO}_2$  que es el principal contribuyente al efecto invernadero. Este componente es una consecuencia inevitable de la combustión.

Si la combustión del carbono no es completa se produce  $\text{CO}$ , gas tóxico que en concentraciones elevadas puede provocar incluso la muerte, por lo que se debe evitar al máximo.

La mejor forma de reducir el efecto de estos agentes es la de tratar de conseguir combustiones completas que no produzcan  $\text{CO}$ , y la de obtener los mayores rendimientos de combustión de modo que se consuma el mínimo combustible necesario, produciendo así la menor cantidad de  $\text{CO}_2$ ; otra manera es seleccionar combustibles con menor producción de  $\text{CO}_2$  para la misma energía, el mejor en este aspecto es el gas natural.

### **3.8.2 Contaminación debida al Azufre**

El azufre está presente en los combustibles en proporciones variables; la oxidación del azufre puede producir  $\text{SO}_3$ , este en contacto con el agua de la combustión o de la atmósfera puede dar lugar a ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) condensado que acompaña a las gotas de lluvia, dando lugar a lo que se conoce como "lluvia ácida".

Para combatir este problema debe tratarse de utilizarse combustibles con mínima presencia de azufre; en este sentido la normativa de combustibles fija la cantidad máxima de azufre que los mismos pueden contener.

Otro efecto pernicioso a tener en cuenta es la posibilidad de condensaciones ácidas en los dispositivos de combustión (calderas, chimeneas) si las temperaturas son suficientemente bajas, esto limita la temperatura de expulsión

de los gases de la combustión. A presión atmosférica, las temperaturas de condensación ácida son del orden de 160°C, variando con la composición de los humos.

### **3.8.3 Contaminación debida al Nitrògeno**

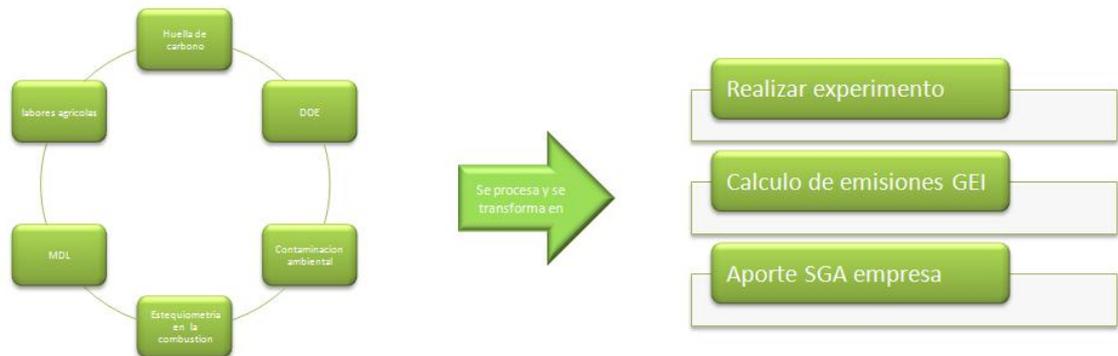
A las elevadas temperaturas de la llama, el nitrógeno que forma parte del combustible y el nitrógeno del aire comburente pueden combinarse con el oxígeno para formar NO, este producto en la atmósfera se combina lentamente con el oxígeno del aire para formar NO<sub>2</sub>.

Entre los diferentes efectos perniciosos de estos óxidos (NO y NO<sub>2</sub>, denominados conjuntamente como NO<sub>x</sub>) se pueden citar:

- Colaboran en la destrucción de la capa de ozono de forma importante
- En combinación con el agua de la atmósfera pueden dar lugar a condensaciones ácidas lo que incrementa la "lluvia ácida".
- El NO<sub>2</sub> es un gas venenoso.

La formación del NO se potencia a elevadas temperaturas, a temperaturas inferiores a unos 1,300°C apenas es considerable. El exceso de aire en la combustión también favorece su formación aunque en menor medida que la temperatura. Así las diferentes soluciones que se han propuesto para minimizar estas emisiones en lo posible tratan de disminuir las temperaturas de llama; en principio esto afectaría negativamente al rendimiento de la combustión, por lo que se trata de buscar soluciones que compensen la pérdida de rendimiento. El problema no es sencillo y esta lejos de resolverse definitivamente.

**Figura 17. Integración de los temas del marco teórico con trabajo de grado**



### 3.9 MARCO TEÓRICO APLICADO AL EXPERIMENTO REALIZADO EN HACIENDA LA TRAMPA SUERTE 2 A.

El marco teórico presentado en la figura 17 conceptualiza el trabajo que se desarrolló como experimento para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por la combustión de la maquinaria utilizada en la preparación de suelos en 8 has de la Hacienda La Trampa, la cual está en modalidad de participación del ingenio objeto de estudio.

Este experimento utiliza la Huella de Carbono como base teórica, sin embargo es sólo un primer paso para el cálculo de ésta a nivel de Ingenio. Se utilizaron 8 Has de la suerte 2A y se dividieron en lotes de 0,5 Has, para realizar 4 repeticiones de los 4 tratamientos de preparación de suelos escogidos (Convencional 1, Liviana 2, Liviana 3 y Labranza Reducida).

Con las emisiones de CO<sub>2</sub> obtenidas durante el experimento se pretende marcar la pauta para futuras investigaciones que conlleven a un enlace estratégico entre el sistema de gestión ambiental del ingenio y la producción competitiva dentro del marco de producción más limpia.

Durante el proceso de renovación de una plantación de caña se realizan diferentes operaciones de labranza que buscan la erradicación del cultivo anterior y la preparación de una cama de suelo adecuada para el establecimiento del cultivo nuevo. Las prácticas de cultivo no se deben generalizar porque los requerimientos de labranza en un mismo suelo pueden cambiar de acuerdo con el manejo, grado de compactación y distribución de la humedad dentro del perfil.<sup>23</sup>

<sup>23</sup> CENICANA. Prácticas culturales. [en línea] [www.cenicana.org/investigacion/agronomia/practicas\\_culturales.php](http://www.cenicana.org/investigacion/agronomia/practicas_culturales.php) . [citado en 22 de abril de 2011]

Uno de los impactos ambientales principales del sector azucarero es la mecanización agrícola. El tractor como unidad energética para el trabajo agrícola, produce un impacto negativo sobre el entorno ambiental, en tres direcciones: compactación del suelo, contaminación de la atmósfera debido a los gases producto a la combustión y la contaminación de aguas, suelos y productos de la cosecha a causa de roturas fortuitas, salideros y del trasiego de sustancias agresivas al medio.

Entre las fuentes fundamentales de contaminación atmosférica se encuentran las fuentes fijas (centros industriales, etc.) y las fuentes móviles (vehículo automotor, tractores agrícolas e industriales, etc.). A nivel internacional el creciente incremento del uso de la maquinaria para realizar la mayoría de las labores agrícolas, con el empleo en ella de motores de combustión interna que consumen combustible fósil, contribuye al calentamiento del planeta en alta medida debido a las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que es uno de los principales gases de efecto invernadero; además de grandes concentraciones en la atmósfera de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) que son gases contaminantes y afectan en proporción directa a sus emisiones dañinas para la salud, la economía y el Medio Ambiente; de ahí la importancia de mantener un control sobre las emisiones producidas por las fuentes de contaminación de origen tecnológico, considerando además una serie de factores que inciden en el desarrollo de los contaminantes en la atmósfera.<sup>24</sup>

El sistema convencional utilizado para la renovación de plantaciones de caña de azúcar en el valle del río Cauca comprende la destrucción del cultivo anterior con dos o tres pases de rastras pesadas, levantamiento topográfico, diseño de campo, nivelación, subsolado con dos pases cruzados de subsolador curvo, rastrearado o arado de cincel, rastrillado y surcado. Dicho sistema puede demandar hasta el 20% de los costos de producción de la plantilla.<sup>25</sup> Además de la labranza, las labores del cultivo de caña, incluyendo su cosecha aportan CO<sub>2</sub> que es importante tener en cuenta para la obtención de información precisa en el ciclo del cultivo de caña y determinar costos energéticos en los que se incurre.

La utilización efectiva de la maquinaria es una preocupación mundial debido a su alto costo y a la aplicación indebida de las prácticas de cultivo que incrementan ostensiblemente los costos de producción<sup>26</sup> a la vez que generan emisiones de gases de efecto invernadero por la combustión. Una alternativa importante para reducir la alta mecanización es la renovación de plantaciones de caña de azúcar con *labranza mínima o reducida*, de la cual se ampliará más adelante.

---

<sup>24</sup> ZAMORA GONZALEZ Luis y LLANOS CEDEÑO, Edilberto. Evaluación preliminar del impacto ambiental de cuatro tecnologías de preparación de suelo en áreas del CAI "Arquímedes Colina Antunes". Cuba: Universidad de Granma, 2005.

<sup>25</sup> TORRES, Jorge S.; VILLEGAS, Fernando, CERÓN GONZÁLEZ, Eduardo Fabio. En: Congreso de la Sociedad Colombiana de técnicos de la Caña de Azúcar, (4º:1997: Cali) Memorias v.1. Cali, TECNICAÑA septiembre 1997, p.24-26.

<sup>26</sup> Ibid. p 24-26.

#### **4. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DEL EXPERIMENTO Y CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)**

En la figura 18 se resume el desarrollo de este trabajo y su aplicabilidad. El cuadro interno muestra el punto en el cual se encuentra este proyecto.

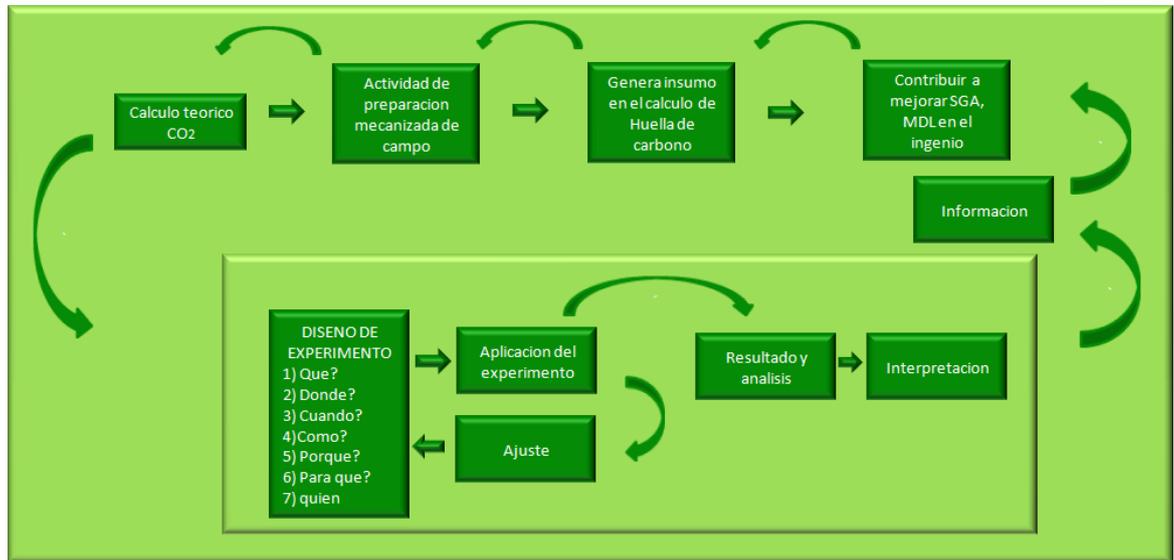
La medición de las emisiones de CO<sub>2</sub>, puede tener varias metodologías de acuerdo a la actividad que se desarrolle y del análisis que se requiera. Cuando se definió que se quería calcular la cantidad de CO<sub>2</sub> generada por la maquinaria (tractor) en la preparación del suelo, basado en su consumo de combustible, surgieron varias dudas en cuanto a cómo se haría, quien lo haría, para qué, cuándo y porqué, al ir respondiendo estas dudas, se pensó en el diseño de un experimento en un área que fuese a ser renovada y que tuviera las condiciones óptimas para preparar el suelo con las cuatro diferentes alternativas incluyendo la labranza reducida.

En la planeación y durante el experimento, debido a las condiciones de campo y tratando de llevar la teoría a la práctica, se requirió realizar ajustes que finalmente llevaron a unos resultados y a una interpretación de los datos obtenidos.

Los resultados, aunque pertenecen a un solo experimento, son información que alimenta al Sistema de Gestión Ambiental del ingenio y que contribuye a la generación de más proyectos como éste, inclusive más amplios, convirtiéndose en insumos para el cálculo de la huella de carbono, por las actividades de preparación mecanizada del suelo para el cultivo de caña de azúcar.

También es importante resaltar el ciclo que se desprende de proyectos como éste. Pues así como la información del experimento es un insumo para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub>, éstas a su vez generan información experimental comparativa, entre las diferentes preparaciones del suelo, que pueden ser tomadas en cuenta para la definición de la aplicación de una u otra alternativa, considerando así el consumo de combustible y el ahorro que puede generarse. Esto finalmente, es un aspecto que contribuye no sólo al aspecto productivo de la empresa si no también al conjunto de actividades que se desarrollan para contribuir al mejoramiento del sistema de gestión ambiental.

**Figura 17. Esquema de importancia del experimento**



Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

En el diseño del experimento se ajustó a la metodología sugerida por los investigadores mexicanos, Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar.<sup>27</sup>

## **4.1 PLANEACIÓN Y REALIZACIÓN**

### **4.1.1 Entender y delimitación del problema**

La metodología utilizada para obtener las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por las labores mecanizadas en la preparación de suelo en el ingenio objeto de estudio, busca contribuir en uno de los aspectos para el cálculo de la huella de carbono de esta actividad y así ayudar al desarrollo de los programas de gestión ambiental dentro del ingenio, como también a la propuesta de MDL (Mecanismos de desarrollo limpio).

Para lo anterior se realizó un experimento, en el cual se determinaron los consumos de combustible en cada una de las tareas que hace parte de la secuencia de preparación de suelos.

<sup>27</sup> GUTIÉRREZ PULIDO y DE LA VARA SALAZAR.. Op.cit.

- Selección terreno para el experimento

En el diseño de este experimento los factores que se tuvieron en cuenta para la selección del sitio fueron:

Suertes que fueran a realizar renovación de suelos.

Que tuvieran un tipo de suelo que permitiera trabajar secuencias de preparación liviana.

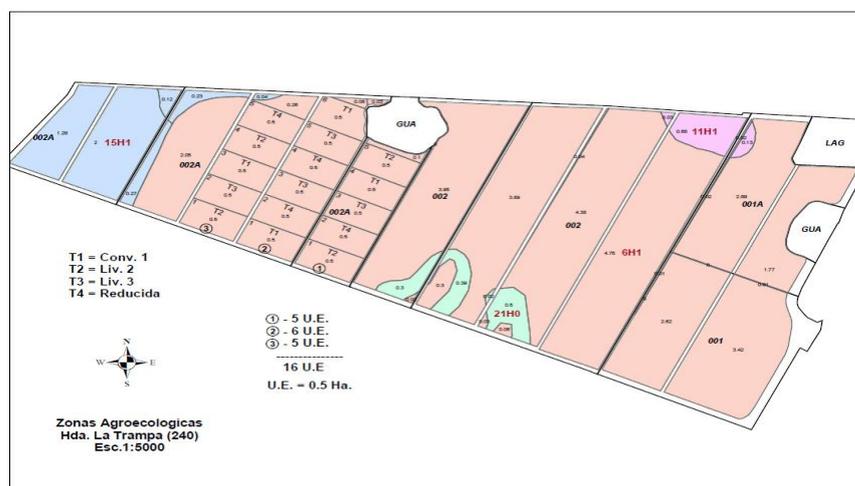
Un área en el cual la repetición de cada tratamiento fuera igual o superior a 0.5 hectáreas.

Un área administrada por el ingenio objeto de estudio.

El mismo tipo de suelo para todas las repeticiones (Misma zona agroecológica).

De acuerdo con lo anterior el lugar seleccionado fue la hacienda La Trampa, ubicada en la zona rural de municipio de El Cerrito, suerte 2 A perteneciente a la zona agroecológica 6H1. El trabajo de campo se desarrolló durante los meses de marzo y abril del 2011, en un área de 8 hectáreas correspondiente a 3 tablones, los cuales fueron divididos en 16 parcelas de 0.5 hectáreas cada uno. La distribución de los tratamientos en cada lote se realizó completamente al azar.

**Figura 18. Distribución de tratamientos y repeticiones en la hacienda la trampa suerte 2A**



Fuente: Mapa Hacienda La Trampa, marzo 2011. Ingenio Providencia S.A

Para demarcar cada uno de los tratamientos se utilizó el sistema de georeferenciación denominado GPS, el cual señaló los puntos donde se ubicaron las estacas que identifican los límites de cada tratamiento.

- Revisión de condiciones del terreno: en el Ingenio Providencia Hacienda la Trampa – suerte 2 A se determinaron el contenido de humedad y la resistencia a la penetración en las parcelas del experimento de renovación con labores reducidas, se tomaron muestras para determinar la humedad gravimétrica a 10, 30 y 50 cm de profundidad en el centro de cada parcela.

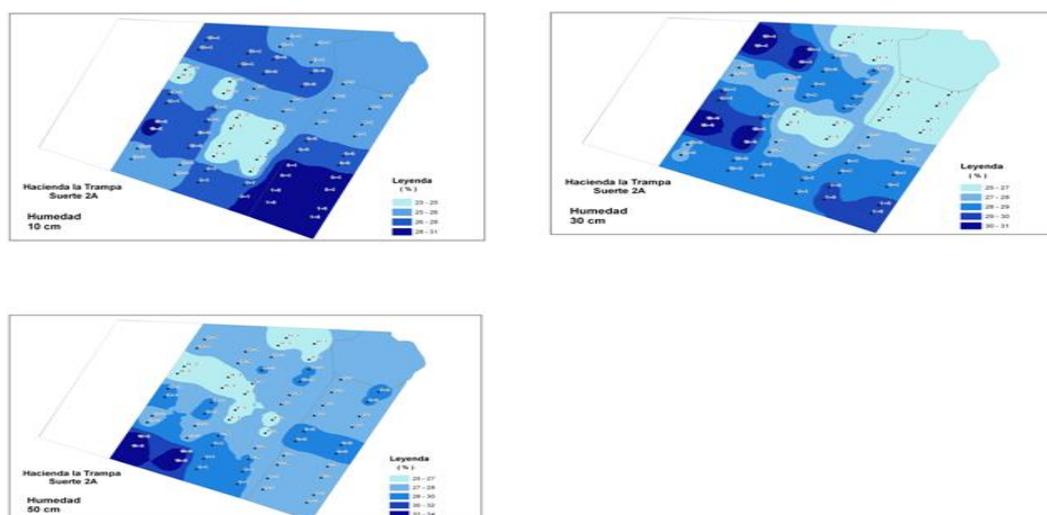
La otra variable que se determinó fue la resistencia a la penetración, los datos fueron tomadas con el penetrológico, se muestrearon cuatro puntos por parcela y cada medición se realizó de 0 a 80 cm de profundidad para todas las parcelas del experimento.

Tanto la humedad como la resistencia a la penetración fueron análisis desarrollados por Cenicaña, específicamente para el terreno escogido para el desarrollo del experimento.

Estas dos variables aportan información para determinar las condiciones del suelo antes y después de la utilización de la maquinaria en la preparación, con el fin de explicar su comportamiento.

- Mapas de Humedad en el terreno

**Figura 19. Mapas de humedad diferentes profundidades**



Fuente: Mapas de humedad Hacienda La Trampa, marzo 2011. CENICAÑA

Dentro del análisis, los datos fueron especializados sobre el mapa de la suerte y se encontraron las variaciones del contenido de humedad y la resistencia a la penetración a lo largo y ancho del lote.

En conjunto los tres mapas muestran la distribución de la humedad en el lote y su variación con respecto a la profundidad, a medida que aumenta la profundidad la humedad es más uniforme en el lote, también se observa mayor humedad a nivel superficial, indicativo de lluvias recientes o época húmeda.

**Tabla 3. Humedad de terreno**

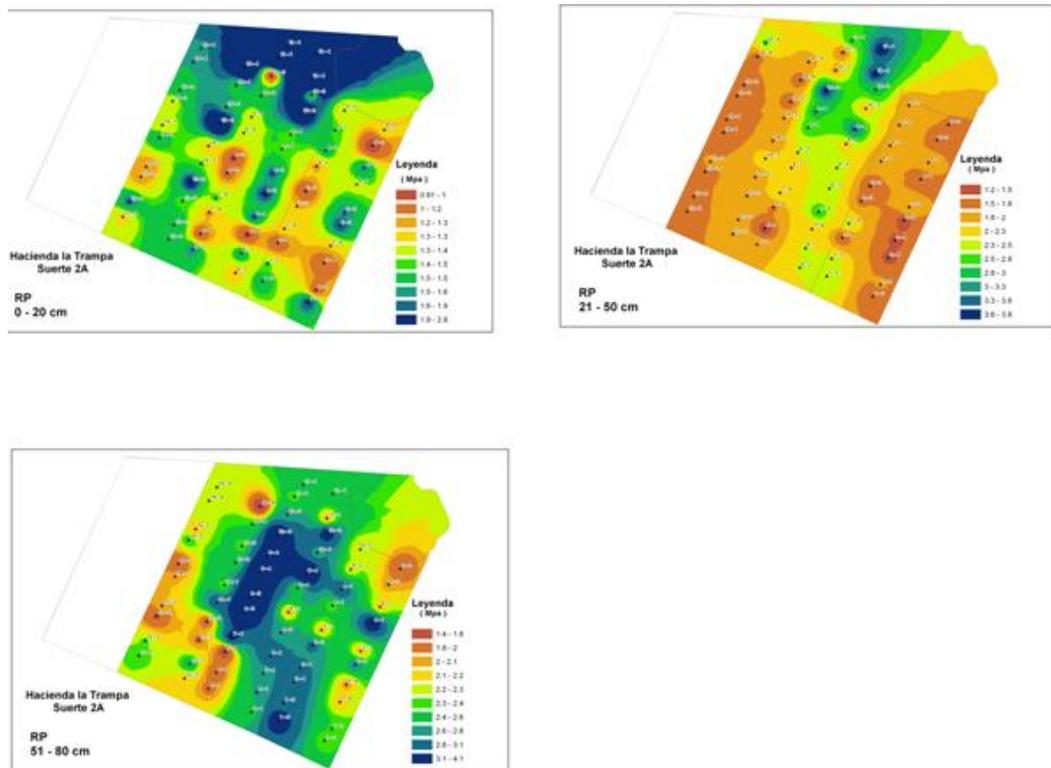
Suerte	Muestra	Profundidad (cm)	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Humedad (%)
2A	1	0-30	1,33	2,65	33,00
	2	0-30	1,36	2,66	32,50,
	3	0-30	1,43	2,63	27,00
	4	0-30	1,35	2,64	32,60
	5	0-30	1,43	2,62	30,30
	6	0-30	1,36	2,61	31.20

Fuente: Laboratorio químico de Campo, marzo 2011. Ingenio Providencia S.A

- Mapas de resistencia a la penetración

Para analizar los datos de resistencia a la penetración se realizaron 3 mapas (figura 20) en los que se muestra la resistencia dentro del lote en tres rangos de profundidad (0-20), (21-50), (51-80) cm.

**Figura 20. Mapas de resistencia a la penetración a diferentes profundidades**



Fuente: Mapas de resistencia a la penetración Hacienda La Trampa, marzo 2011. CENICAÑA

La magnitud de la resistencia a la penetración es susceptible a las variaciones del contenido de humedad de ahí que los mapas de humedad gravimétrica concuerdan con los datos de resistencia a la penetración, esto quiere decir, que en los lugares donde el contenido de humedad tiende a ser mayor, la resistencia a la penetración tiende a ser menor y viceversa. De acuerdo a los mapas, la RP aumenta con la profundidad y esto es indicador de compactación que se va acumulando en el subsuelo.

En cuanto a la composición del suelo, era importante conocer su textura, debido a que de acuerdo a las experiencias y conocimiento de los técnicos investigativos de Cenicaña, la Labranza Reducida (LR) aunque puede ser aplicada en suelos más pesados, se aplica mejor en suelos con menores requerimientos de mecanización (desde suelos arenosos a franco-arcillosos), pues en suelos muy pesados la respuesta estará relacionada a su condición al momento de la LR, y no es tan práctica en suelos con altos contenido de arcilla en condición muy seca o muy húmeda. Aunque se podría aplicar en estos suelos (arcillosos) si son vertisoles secos como los de ingenio objeto de estudio; donde la precipitación no llega a 1000 mm anuales. De acuerdo a lo anterior, el suelo en el cual se realizó el experimento cumple con estas condiciones (tabla 4).

- Análisis de composición del suelo

**Tabla 4. Resultados análisis de suelos parte 1**



**INGENIO PROVIDENCIA, S.A.**  
**LABORATORIO QUIMICO DE CAMPO**  
 Resultado Análisis de suelos  
 Fecha: Marzo 14 de 2011

METODOLOGIA DE ANALISIS	
pH:	V. - Cu, Fe, Mn, Zn: DTPA - TEA
CE:	(USDA) en el Manual 60 (1964)
M.O:	Walkler Black
P:	Bray II B: Hunter (Colorimetria)
Ca, Mg, K y Na:	(NH <sub>4</sub> OAc - 1N - pH 7)
	Textura Bouyoucos

HACIENDA: la Trampa (240)  
 DESTINATARIO: Ing. Angela Maria Concha

SUERTE (Tablòn)	Prof. cm	Lab. Nº	pH V:V 1:1	CEa dS/m	MO W.B %	P Bray II ppm	Cationes intercambiables meq/100 g							
							Ca	Mg	K	Na	CIC	Ca/Mg	PSI	PMgl
2A(1)	0-30	1028	7.4	0.23	1.98	5.01	15.48	9.46	0.25	0.77	35.56	1.64	2.17	26.60
2A(2)	0-30	1029	7.1	0.17	2.54	4.87	15.45	11.28	0.30	0.45	45.86	1.37	0.98	24.60
2A(3)	0-30	1030	7.7	0.27	2.18	45.79	20.82	13.22	0.33	0.68	33.56	1.57	2.03	39.39
2A(4)	0-30	1031	7.6	0.26	2.38	8.88	17.19	13.29	0.36	0.51	58.08	1.29	0.88	22.88
2A(5)	0-30	1032	7.8	0.26	2.33	13.05	18.92	15.82	0.45	0.45	48.84	1.20	0.92	32.39
2A(6)	0-30	1033	7.7	0.34	3.30	4.57	18.37	17.86	0.48	0.53	68.96	1.03	0.77	25.90

**Nota:** Los resultados de los análisis, corresponden a las muestras recibidas en el Laboratorio y no a otros materiales de la misma procedencia.

**Tabla 5 Resultados análisis de suelos parte 2**

Saturación de bases				Micronutrientes					Textura Bouyoucos			Clasif.
%				ppm					%			
Ca	Mg	K	Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Arena	Limos	Arcillas	Tex.
59.63	36.44	0.96	2.97	0.36	5.11	61.33	9.23	1.06	11.12	38.00	50.88	Ar
56.22	41.05	1.09	1.64	0.40	5.98	74.84	13.25	0.91	11.12	40.00	48.88	ArL
59.40	37.72	0.94	1.94	0.38	5.69	34.96	15.02	0.99	7.12	42.00	50.88	ArL
54.83	42.39	1.15	1.63	0.35	6.50	55.74	13.26	1.33	9.12	36.00	54.88	Ar
53.09	44.39	1.26	1.26	0.36	6.02	32.34	8.30	0.66	5.12	38.00	56.88	Ar
49.32	47.96	1.29	1.42	0.43	8.68	57.46	11.70	0.97	9.12	40.00	50.88	ArL

Cordialmente,

JAVIER JARAMILLO B.  
 Jefe Laboratorio Químico de Campo

#### 4.1.2 Variable respuesta y metodología de medición

Para calcular de forma teórica el nivel de CO<sub>2</sub> que se genera por las labores agrícolas, es de suma importancia conocer la información que permita conocer este dato, por lo tanto se estableció como variable respuesta, presentada en la figura 21.

**Figura 21. Descripción Variable**

## Variable

- Consumo de combustible diesel al realizar cada tarea en el proceso de preparación de campo

Esto es debido a que el combustible utilizado está compuesto por cadenas de carbonos que al reaccionar por el proceso de combustión se transforman en gases de combustión como el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{CO}$  entre otros.

La metodología utilizada para la medición de esta variable se presenta en la figura 22.

**Figura 22. Recursos medición variable respuesta**



Contador de tanque



Tanque de almacenamiento



Operador llenado



Operador toma datos

Con estos elementos se utilizó un procedimiento para la toma de datos que consistió en la siguiente lista de pasos:

- Ubicar una zona que sea completamente plana y que no presente ningún tipo de desnivel, para designarla como zona de suministro de combustible y registro de datos.
- Se debe establecer secuencia de las operaciones y coordinar los tiempos de trabajo de cada uno de los equipos, para evitar sub-utilización de la maquinaria, además de llenar el tanque de combustible de las máquinas a su máxima capacidad y registrando esta medida.
- Establecer ciclo de la labor para capturar datos por cada repetición de cada tratamiento.
  - Salir de la zona de suministro de combustible y dirigirse a la parcela designada para hacer la tarea.
  - Realizar la tarea designada con la secuencia de pases establecidos por el procedimiento.
  - Salir a la zona de suministro de combustible

**Figura 23. Ruta para la toma de cada dato experimental**



Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

- Realizar el ciclo de labor
- En el área de suministro de combustible, el tanque debe llenarse hasta que alcance el nivel establecido antes de empezar la labor.
- Registrar los datos en el formato designado para tal fin.

La anterior secuencia se simplifica en la figura 24.

**Figura 24. Paso a paso simplificado del procedimiento toma datos**



Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

#### **4.1.3 Factores que influyen en la variable respuesta**

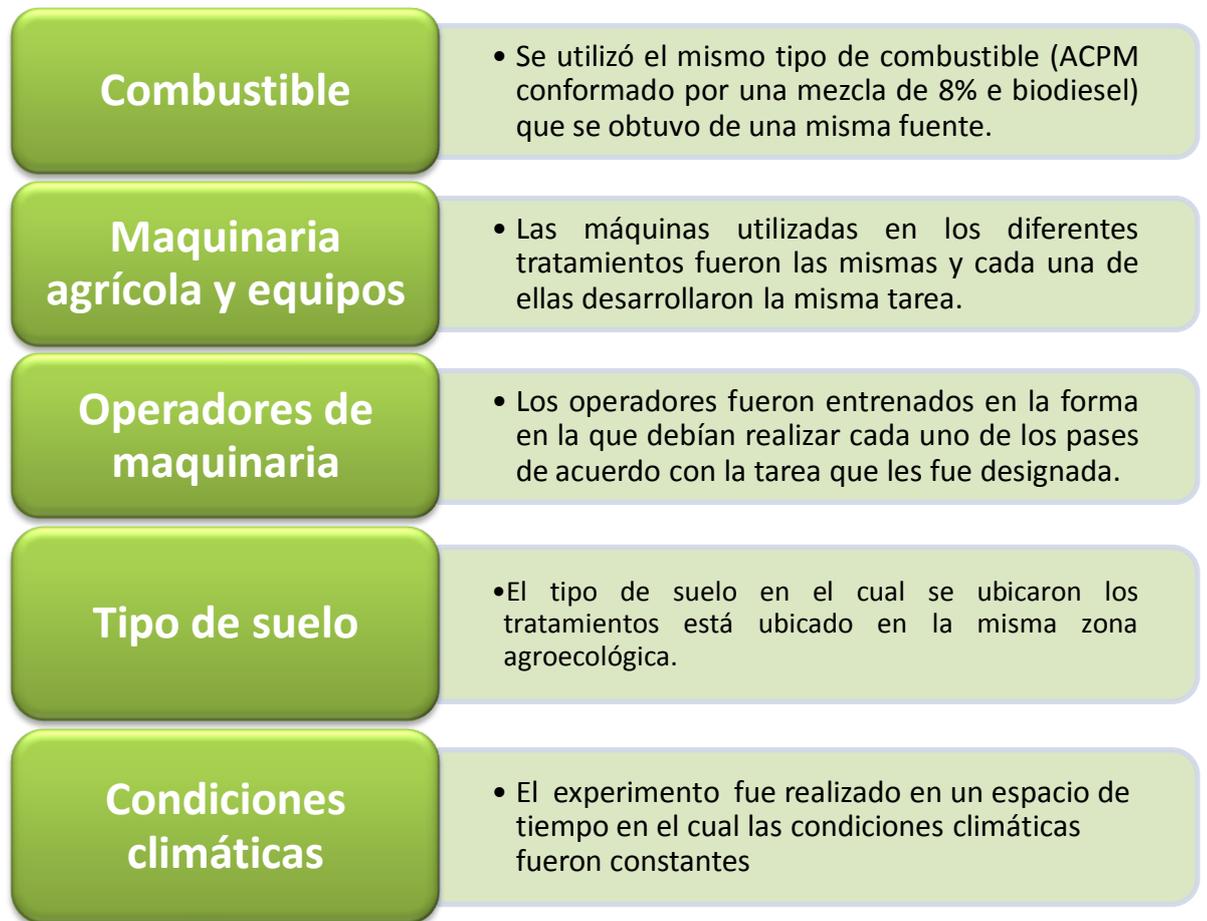
Para determinar los factores que inciden en el consumo de combustible en las labores mecanizadas de preparación de suelos, se revisaron en compañía de expertos de CENICAÑA (Centro de investigación de la caña de azúcar de Colombia) y personal del ingenio encargado del área de investigación en campo, preparación de suelos y agronomía, los tipos de preparaciones de suelo, los tipos de suelo, la maquinaria utilizada para desarrollar estas labores, el combustible utilizado, y la incidencia de los operadores en el proceso. De lo anterior se identificó lo siguiente:

- Tipos de preparaciones de suelos: en el ingenio se tienen establecidas 6 preparaciones divididas en dos grupos (Convencionales y livianos) y al mismo tiempo existe otro tipo de preparación que es la denominada labranza reducida para caña de azúcar, estos factores puede conllevar a un mayor o menor uso de maquinaria por lo tanto afectaría el consumo de combustible.
- Tipo de suelo: el tipo de suelo está definido bajo una metodología de CENICAÑA la cual lo estableció por medio de zonas agroecológicas, que relacionan la humedad con la composición del suelo, esto afecta el consumo de combustible debido a la resistencia al trabajo que puede ejercer al tractor, traducido en variaciones en el consumo de combustible.
- Maquinaria utilizada: tractores con una fuerza mínima de 225 HP.
- Combustible utilizado: para la maquinaria utilizada en las labores agrícolas el combustible utilizado es el diesel, es un factor porque dependiendo del tipo de combustible el consumo de este puede ser mayor o menor.
- Operadores: determinan las condiciones en las que trabajan los equipos mecánicos, por lo tanto influyen en el aumento o disminución del consumo de combustible.

Después de haber revisado los factores que inciden en el consumo de combustible se llegó a la conclusión que el factor principal que determina una variación representativa es el tipo de preparación del suelo, debido a que cada una de las diferentes alternativas , implica un secuencia diferente que conlleva a realizar más o menos tareas.

Para evitar que los otros factores identificados no influyan en los resultados del consumo de combustible se tomaron una serie de medidas con el objetivo de que las condiciones generadas por cada factor sean las mismas.

**Figura 25. Control de factores no estudiados**



Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

#### **4.1.4 Selección de tratamientos**

Dentro del factor de tipos de preparación de suelo existen diferentes niveles a tener en cuenta por lo tanto se deben determinar aquellos que serán tomados en cuenta para el experimento, y para hacer eso se debe tener en cuenta las alternativas que actualmente están en práctica (figura 26).

**Figura 26. Clases de preparación de suelos en el ingenio objeto de estudio**



Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

Preparaciones Convencionales:

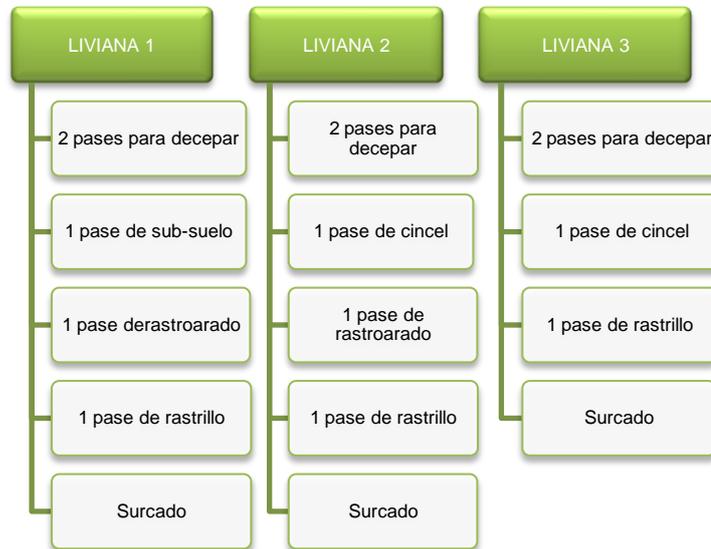
**Figura 27. Preparaciones convencionales**



Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

Preparaciones Livianas:

**Figura 28. Preparaciones livianas**



Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

Preparación: Labranza Reducida

**Figura 29. Preparación labranza reducida**



Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

El experimento se planeó como un diseño con 4 tratamientos asignados completamente al azar: (Convencional 1, Liviana 2, Liviana 3 y Labranza Reducida) y cuatro repeticiones cada uno, con el objetivo de determinar las diferencias significativas entre cada uno de ellos para esto se utilizó la metodología de ANOVA y el método LSD (diferencias mínimas significativas).

Los siguientes tratamientos (Figura 30) fueron seleccionados al comparar los dos grupos de preparaciones establecidos por el ingenio, la convencional y la liviana con la labranza reducida diseñada para caña de azúcar, por lo tanto se decidió tomar la convencional 1 debido a que es la que requiere más trabajo mecanizado, la labranza reducida que requiere el mínimo de labor mecanizada y 2 dos livianas que se encuentran en un punto intermedio en lo correspondiente al uso de maquinaria agrícola.

**Figura 30. Niveles del factor tipo de preparación**

Tratamiento 1 (Convencional 1)	Tratamiento 2 (liviana 2)	Tratamiento 3 (Liviana 3)	Tratamiento 4 (reducida)
<ul style="list-style-type: none"> <li>•8 tareas</li> <li>•4 repeticiones</li> <li>•mayor uso de maquinaria</li> <li>•Utilizada en el ingenio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•6 tareas</li> <li>•4 repeticiones</li> <li>•Uso medio de maquinaria</li> <li>•Utilizada en el ingenio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•5 tareas</li> <li>•4 repeticiones</li> <li>•Uso medio de maquinaria</li> <li>•Utilizada en el ingenio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•3 tareas</li> <li>•4 repeticiones</li> <li>•bajo uso de maquinaria</li> <li>•experimental</li> </ul>

#### 4.1.5 Crear protocolo del experimento (Anexo B)

Para el desarrollo del experimento, se realizó un protocolo, con el fin de estandarizar las actividades a ejecutar.

#### 4.1.6 Realizar el experimento

Al realizar el experimento de acuerdo con lo establecido en la fase de planeación se procedió a registrar los datos obtenidos en la siguiente tabla.

**Tabla 6. Formato Registro de Datos de Planeación**

Dato	Parcela	Tratamiento	Máquina	Implemento	Labor	Consumo

Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

La información del experimento se encuentra referenciada en el Anexo C.

## 4.2 ANALISIS

Para poder analizar los datos obtenidos durante el experimento se seguirá la estructura establecida en la figura 31.

**Figura 31. Proceso análisis**



Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

#### 4.2.1 Datos consumo de combustible

El consumo de combustible que se generó por cada uno de los tratamientos evaluados durante el experimento se ven reflejados en la tabla 7.

**Tabla 7. Consumos de combustible por tratamiento**

	Consumo de combustible preparación suelo (galón)			
	Tratamiento Convencional 1	Tratamiento Liviana 2	Tratamiento Liviana 3	Tratamiento Reducida
Repetición 1	35,3	23,8	15,5	10,3
Repetición 2	30,4	16,5	18,4	8,1
Repetición 3	27,5	16,4	15,3	6
Repetición 4	30,6	22,3	15,6	7,3

#### 4.2.2 Datos por cada una de las tareas desarrolladas en cada tipo de tratamiento.

**Tabla 8. Consumos de combustibles por tarea de cada tratamiento**

		Consumo combustible preparación suelo (galones)			
		Tratamiento convencional	Tratamiento Liviana 2	Tratamiento Liviana 3	Tratamiento Reducida
Repetición 1	Decepado 1	8	4,1	3	
	Decepado 2	5	5,9	2,1	
	Cinzel		4,9	6,3	
	Sub-suelo 1	7,6			7,2
	Sub-suelo 2	4			
	Rastroarado	4	5		
	Rastrillo 1	3	3	3	
	Rastrillo 2	2,4			
	Surcado	1,3	0,9	1,1	3,1
	Total	35,3	23,8	15,5	10,3
Repetición 2	Decepado 1	4,3	3	4,8	
	Decepado 2	4	4,1	5,1	
	Cinzel		3	4,3	
	Sub-suelo 1	5,6			5,5
	Sub-suelo 2	4,3			
	Rastroarado	5,1	3,1		
	Rastrillo 1	3,2	2,2	2,5	
	Rastrillo 2	2,5			
	Surcado	1,4	1,1	1,7	2,6
	Total	30,4	16,5	18,4	8,1
Repetición 3	Decepado 1	4,5	3,6	3,7	
	Decepado 2	3,5	3,7	3,8	
	Cinzel		3,6	3,9	
	Sub-suelo 1	5,4			3,5
	Sub-suelo 2	4,5			
	Rastroarado	3,6	4,4		
	Rastrillo 1	2,2		2,8	
	Rastrillo 2	2			
	Surcado	1,8	1,1	1,1	2,5
	Total	27,5	16,4	15,3	6
Repetición 4	Decepado 1	4	4,2	3,9	
	Decepado 2	4,5	3,8	4	
	Cinzel		4,4	3,5	
	Sub-suelo 1	5,1			4,7
	Sub-suelo 2	4,7			
	Rastroarado	4,1	4,8		
	Rastrillo 1	3,7	3,6	2,5	
	Rastrillo 2	3,2			
	Surcado	1,3	1,5	1,7	
	Total	30,6	22,3	15,6	

### 4.2.3 Análisis estadístico

- Diseño de experimentos
- Cálculo ANOVA: el análisis de varianza (ANOVA) es la técnica central en el análisis de datos experimentales. La idea general de esta técnica es separar la variación total en las partes con las que contribuyen cada fuente de variación del experimento. En este caso se separa la variabilidad debido al experimento y la del error, cuando la primera domina “claramente” sobre la segunda, es cuando se concluye que los tratamientos tienen efecto o dicho de otra manera las medias son diferentes.

Para estos tratamientos lo que se pretende es validar estadísticamente si los consumos de combustibles son significativamente diferentes entre cada uno de los tipos de preparación.

- Tratamientos
  - $T_1$  = Convencional 1
  - $T_2$  = Liviana 2
  - $T_3$  = Liviana 3
  - $T_4$  = Reducida

Hipótesis nula y alternativa

$$H_0 = T_1 = T_2 = T_3 = T_4$$

$$H_a = T_1 \neq T_2 \neq T_3 \neq T_4$$

**Tabla 9. Datos resumen para cálculo de ANOVA**

- Etapas para generar el ANOVA

$$SCT \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} = 6940,45 - \frac{303,5^2}{16} = 1183,4343$$

$$SCtra \sum_{i=1}^4 \frac{y_{i.}^2}{4} - \frac{y_{..}^2}{N} = \frac{(123,8^2 + 83,2^2 + 64,8^2 + 31,7^2)}{4} - \frac{303,5^2}{16} = 1106,14$$

$$SCerror = SCT - SCtra = 1183,43 - 1106,14 = 77,29$$

$$CMtra = \frac{SCtra}{K - 1} = \frac{1106,14}{4} = 368,71 \quad y \quad CMerror = \frac{SCerror}{N - K} = \frac{77,29}{12} = 6,44$$

$$F^o = \frac{CMtra}{CMerror} = \frac{368,71}{6,44} = 57,24$$

**Tabla 10. Tabla ANOVA**

FV	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F crítico	Valor -p
Tratamiento	1106,14	3	368,71	57,2531056	2,20971E-07
Error	77,2943,	12	6,44		
Total	1183,4343	15			

Basado en lo anterior (Tabla 10), se puede concluir que no se encontró evidencia con un nivel de significancia de 0,05 para no rechazar la hipótesis nula, de acuerdo al valor – p de 2,20971 E<sup>-07</sup> que es menor al 0,05. Por lo tanto el consumo de combustible este ligado a el tipo de preparación que se realice en el suelo.

- Comparación de parejas de medias de tratamientos: Se establece para determinar cuáles tratamientos resultaron diferentes o cuales provocan diferencias, para eso se deben sacar las parejas que pueden surgir dentro de los 4 tratamientos con la siguiente fórmula:

$$\text{Número de pares de media: } \frac{\text{Número de tratamientos}(\text{número de tratamientos} - 1)}{2}$$

$$\text{Número de pares de media: } \frac{4(4 - 1)}{2} = 6$$

Hipótesis Nulas y alternas:

$$\begin{aligned} H_0: \mu_{T1} &= \mu_{T2} \quad \text{vs} \quad H_a: \mu_{T1} \neq \mu_{T2} \\ H_0: \mu_{T1} &= \mu_{T3} \quad \text{vs} \quad H_a: \mu_{T1} \neq \mu_{T3} \\ H_0: \mu_{T1} &= \mu_{T4} \quad \text{vs} \quad H_a: \mu_{T1} \neq \mu_{T4} \\ H_0: \mu_{T2} &= \mu_{T3} \quad \text{vs} \quad H_a: \mu_{T2} \neq \mu_{T3} \\ H_0: \mu_{T2} &= \mu_{T4} \quad \text{vs} \quad H_a: \mu_{T2} \neq \mu_{T4} \\ H_0: \mu_{T3} &= \mu_{T4} \quad \text{vs} \quad H_a: \mu_{T3} \neq \mu_{T4} \end{aligned}$$

Utilizando el método LSD *diferencia mínima significativa* (Least significant difference). En el ANOVA que calculamos anteriormente, se observa que los grados de libertad del error son 12 y que el  $CM_{error} = 6,44$ , si usamos una significancia predefinida de  $\alpha = 0.05$ , de la tabla de distribución T de student con 12 grados de libertad se obtiene que  $T_{0.025,12} = 2.1788 \approx 2.18$ . Como en cada tratamiento se hicieron 4 pruebas entonces:

$$LSD = T_{\frac{\alpha}{2}, GL_{error}} \sqrt{\frac{2CM_{error}}{\text{Numero de repeticiones}}} = 2.18 \sqrt{\frac{2 \times 6.44}{4}} = 3.91$$

**Tabla 11. Tabla de diferencia de medias por el método LSD**

Diferencia poblacional	Diferencia muestra en valor absoluto	Decisión
$\mu_{T1} - \mu_{T2}$	10.15 > 3.91	SIGNIFICATIVA
$\mu_{T1} - \mu_{T3}$	14.75 > 3.91	SIGNIFICATIVA
$\mu_{T1} - \mu_{T4}$	23.01 > 3.91	SIGNIFICATIVA
$\mu_{T2} - \mu_{T3}$	4.60 > 3.91	SIGNIFICATIVA
$\mu_{T2} - \mu_{T4}$	12.875 > 3.91	SIGNIFICATIVA
$\mu_{T3} - \mu_{T4}$	8.275 > 3.91	SIGNIFICATIVA

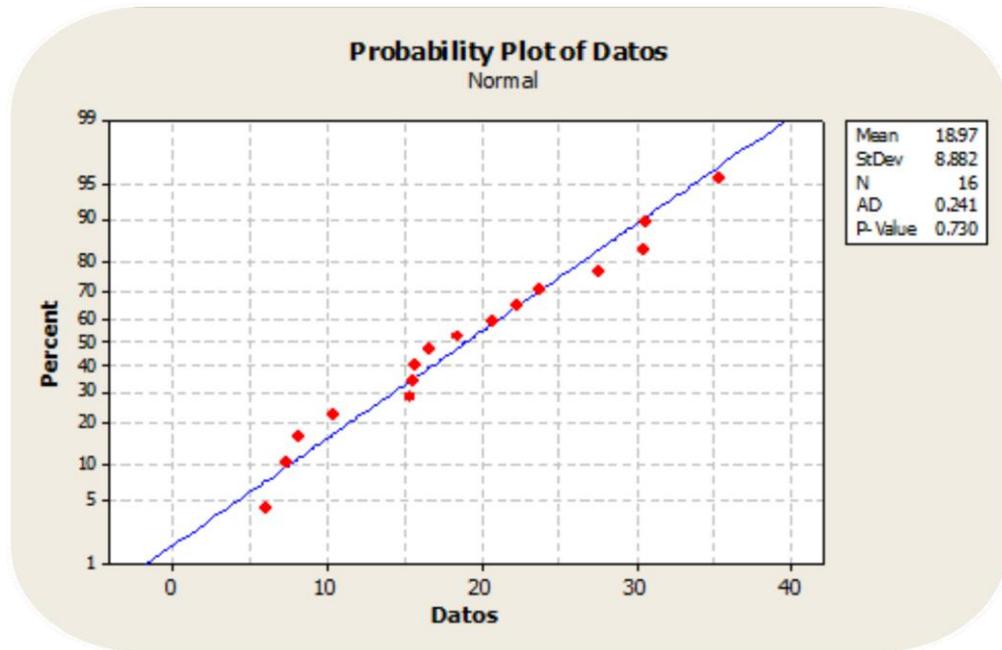
De acuerdo con la información suministrada en la tabla 11 se puede afirmar que las medias de cada uno de los tratamientos de preparación de suelos son significativamente diferentes entre sí, esto se afirma asumiendo un riesgo del 5% de estar equivocados, Además nos muestra que los consumos de combustibles no solo son significativamente diferentes como grupo, como lo establecimos con el cálculo del ANOVA, sino que también cada uno de las medias de cada tratamiento son significativamente diferentes entre ellas al compararlas una a una

#### Prueba de supuestos

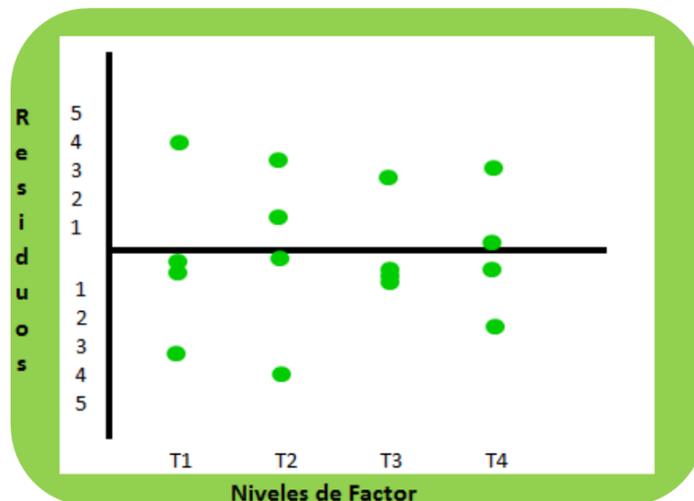
La validez de los resultados obtenidos en cualquier análisis de varianza queda supeditada a que los supuestos del modelo se cumplan, estos son:

- Normalidad
- Varianza constante
- Dependencia

Tabla 12. Prueba de normalidad y varianza



PRUEBA DE NORMALIDAD



PRUEBA DE VARIANZA

Estos supuestos se cumplen, lo cual valida la información obtenida por medio del ANOVA.

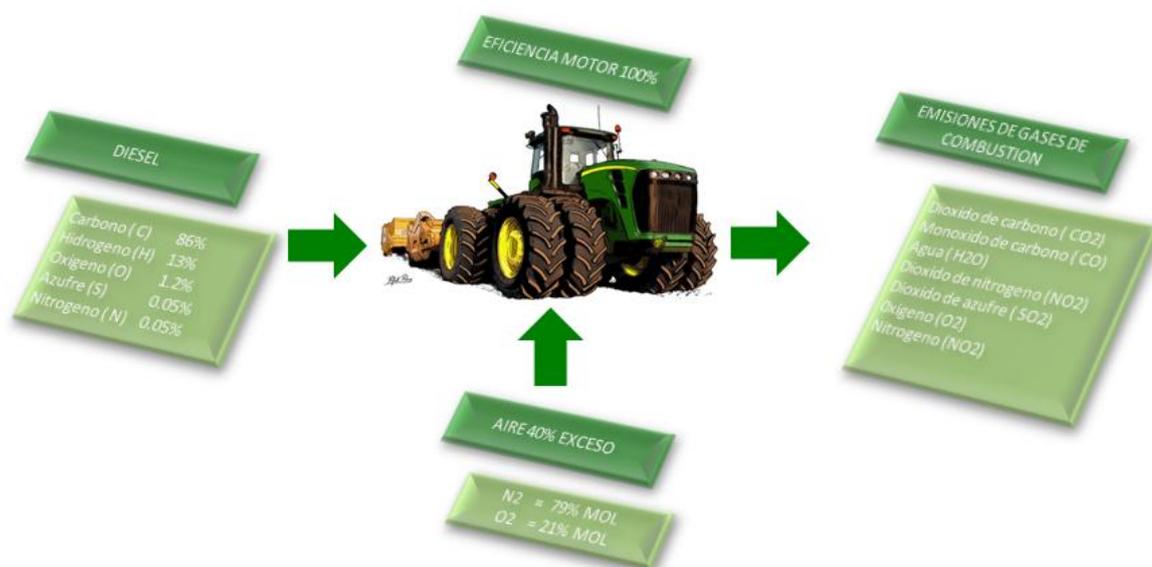
#### 4.2.4 Cálculo teórico de CO<sub>2</sub>

Luego de obtener los datos sobre consumo de combustible al realizar cada una de las secuencias de preparación de suelos, se procedió a revisar en bibliografía y en el ICP (Instituto Colombiano de Petróleo) la composición del combustible diesel colombiano con su respectiva mezcla de biodiesel, seleccionando una aproximación de la unión de moléculas que lo conforman, así por medio de análisis estequiométrico se estableció la proporción de CO<sub>2</sub> que se genera al utilizarse una cantidad específica de combustible diesel.

Para el análisis estequiométrico de la combustión, tal como se explicó en el marco teórico correspondiente este tema, se partió de las siguientes consideraciones teóricas:

- Combustión completa, con coeficiente de exceso de aire  $\alpha = 1,4$ .
- Régimen estable de funcionamiento del motor.
- Motores sincronizados.
- Todo el carbono y el azufre contenido en el combustible analizado se transforman en CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> respectivamente.
- En los productos de la combustión de los MCI (motores de combustión interna) que trabajan con combustible Diesel siempre se va a formar una determinada cantidad de CO debido a las imperfecciones del proceso de combustión, se asume un 1% tanto para CO como para SO<sub>3</sub>.
- Solo se transforma una parte del nitrógeno del aire y el combustible en NO<sub>2</sub>, (se asume un 0,5 %).

**Figura 32. Proceso de combustión con Diesel**



Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

- Composición de combustible diesel colombiano (dato suministrado por el ICP):

El combustible diesel colombiano utilizado actualmente en el país tiene un porcentaje de mezcla de biodiesel.

Para poder obtener los datos de emisiones de gases por la combustión es importante conocer la composición del combustible, esta puede ser hallada mediante un análisis de laboratorio (por medio de cromatografía de gases, por ejemplo) o por referencias bibliográficas. Sin embargo, un análisis elemental en el cual se estableciera la composición del Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, Azufre, y otros en el combustible diesel actual utilizado en Colombia no fue fácil, pues no hay muchos laboratorios que tengan esta información para el público en general. No obstante, después de buscar en varias fuentes, finalmente el Instituto Colombiano de Petróleo (ICP) de Ecopetrol suministró la composición elemental del diesel colombiano mezclado con biodiesel. (Tabla 13).

**Tabla 13. Composición diesel colombiano B-10**

Composición combustible			
Elemento	%	B.C.=100 Kg (Kg)	B.C.=1 Kg (Kg)
C	86	86	0,86
H	13	13	0,13
O	1,2	1,2	0,012
N	0,05	0,05	0,0005
S	0,05	0,05	0,0005
W (water)	0	0	0

Generación de gases GEI a partir de C,N,S,O

Teniendo base de cálculo 1 kg

Carbono (C) 86%:

- Para CO<sub>2</sub> → 0,8514 kg C
- Para CO → 0,0086 kg C

Azufre (S) 0.05%:

- Para SO<sub>2</sub> → 0,000495 kg S
- Para SO<sub>3</sub> → 0,000005 kg S

Nitrógeno (N) 0.05%:

- Para NO<sub>2</sub> → 0.0000025 kg N

Se debe calcular el O<sub>2</sub> teórico necesario (TN) para el C, H, S, N. A este O<sub>2</sub> se le debe restar el que ya se encuentra siendo parte del compuesto del hidrocarburo.

**Tabla 14. Cálculo de oxígeno teórico necesario para hacer reaccionar los compuestos**

	Descripción	Reacción química	Calculo O <sub>2</sub> TN	Resultado
<b>Carbono</b>	Dióxido de carbono	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$0.8514 \text{ kg } C \times \frac{.32 \text{ kg } O_2}{.12 \text{ kg } C}$	$2.27 \text{ kg } O_2$
	Monóxido de carbono	$C + O_2 \rightarrow CO$	$0.0086 \text{ kg } C \times \frac{.16 \text{ kg } O_2}{.12 \text{ kg } C}$	$0.0115 \text{ kg } O_2$
<b>Azufre</b>	Dióxido de azufre	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	$0.000495 \text{ kg } S \times \frac{.32 \text{ kg } O_2}{.32 \text{ kg } S}$	$0.000495 \text{ kg } O_2$
	Oxido de azufre	$S + 3/2O_2 \rightarrow SO_3$	$0.000005 \text{ kg } S \times \frac{.48 \text{ kg } O_2}{.32 \text{ kg } S}$	$0.0000075 \text{ kg } O_2$
<b>Nitrógeno</b>	Dióxido de nitrógeno	$N + O_2 \rightarrow NO_2$	$0.000005 \text{ kg } N \times \frac{.32 \text{ kg } O_2}{.14 \text{ kg } N}$	$5,7 \times 10^{-6} \text{ kg } O_2$

Para realizar la combustión se requiere oxígeno en las cantidades mencionadas anteriormente.

**Tabla 15. Relaciones presentes de GEI en un Kg de combustible diesel**

GEI	CALCULO	RESULTADO
<b>Dióxido de carbono</b>	$0.8514 \frac{\text{kg } C}{\text{kg comb}} \times \frac{44 \text{ kg } CO_2}{.12 \text{ kg } C}$	$3.122 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{kg combustible}}$
<b>Monóxido de carbono</b>	$0.0086 \frac{\text{kg } C}{\text{kg comb}} \times \frac{.28 \text{ kg } CO}{.12 \text{ kg } C}$	$0.020 \frac{\text{kg } CO}{\text{kg combustible}}$
<b>Dióxido de azufre</b>	$0.000495 \frac{\text{kg } S}{\text{kg comb}} \times \frac{.64 \text{ kg } SO_2}{.32 \text{ kg } S}$	$0.00099 \frac{\text{kg } SO_2}{\text{kg combustible}}$
<b>Oxido de azufre</b>	$0.000495 \frac{\text{kg } S}{\text{kg comb}} \times \frac{.80 \text{ kg } SO_3}{.32 \text{ kg } S}$	$0.0000125 \frac{\text{kg } SO_2}{\text{kg combustible}}$
<b>Dióxido de nitrógeno</b>	$0.0000025 \frac{\text{kg } N}{\text{kg comb}} \times \frac{.80 \text{ kg } NO_2}{.32 \text{ kg } N}$	$8.21429E - 06 \frac{\text{kg } NO_2}{\text{kg combustible}}$

Los consumos de combustible utilizados para hallar las emisiones de GEI son el resultado promedio del análisis estadístico por cada tipo de preparación. Es decir, el consumo de combustible del tratamiento 1 (Convencional 1), tratamiento 2 (Liviana 2), tratamiento 3 (Liviana 3), tratamiento 4 (Labranza Reducida), es el resultado de la media de las repeticiones de cada tratamiento.

Con los factores anteriormente hallados y teniendo en cuenta los siguientes consumos de combustible obtenidos por la preparación de 0,5 hectáreas en cada tratamiento (tabla 16) se procede a realizar el cálculo teórico de GEI.

**Tabla 16. Combustible utilizado para el cálculo de GEI**

	Consumo combustible			
	T1	T2	T3	T4
<b>Gal Combustible</b>	30,95	20,8	16,2	7,925
<b>m3 Combustible</b>	0,11715497	0,0787342	0,06132183	0,02999849
<b>Kg Combustible</b>	98,4101749	66,136725	51,5103339	25,1987281

<b>Densidad Combustible (Kg/m3)</b>	840
-------------------------------------	-----

Cada factor de Kg de gas/Kg de combustible es multiplicado por el consumo en Kg, el cual es hallado teniendo en cuenta la densidad del diesel mezclado con biodiesel (dato suministrado por ICP), así se obtienen las cantidades de los gases emitidos.

La tabla 17 muestra la cantidad en masa (Kg) de gases que son generados por el proceso de combustión de la maquinaria agrícola (tractor) para preparar 0,5 hectáreas de terreno de cultivo de caña de azúcar.

Se puede observar que efectivamente el gas que se genera en mayor cantidad es el CO<sub>2</sub>, y se ve una gran diferencia entre los tres primeros tratamientos y el último, dado a las pocas labores mecanizadas que este conlleva. Igualmente la generación de CO está ligado a que las combustiones no son 100% completas y aunque se haya contado con motores sincronizados y con régimen estable, hay algún porcentaje mínimo de imperfección en la combustión, es por eso la importancia de que los motores de los equipos estén en muy buenas condiciones y así evitar al máximo la generación de CO, así como también utilizar el combustible estrictamente necesario para disminuir la generación de CO<sub>2</sub>. Igualmente sucede con el Azufre, el cual reacciona a Dióxido de Azufre en mayor proporción por la buena combustión de este elemento y en una mucho menor proporción a óxido de azufre por las imperfecciones que puedan presentarse.

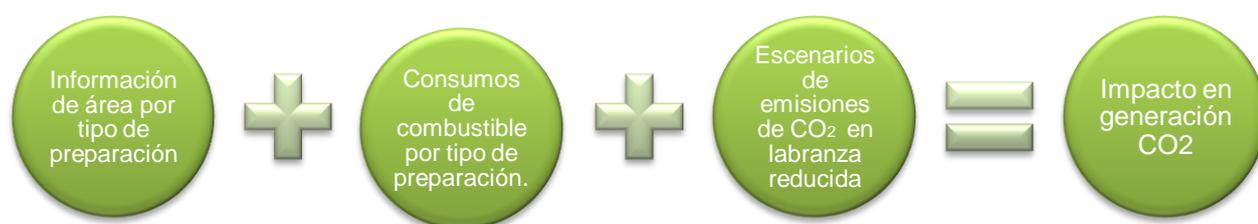
**Tabla 17. GEI generados en el proceso de combustión**

	Kg Gas emitido por media hectárea			
	T1	T2	T3	T4
G CO <sub>2</sub>	307,216884	206,465628	160,80496	78,6653895
G CO	1,97476418	1,32714361	1,0336407	0,50565448
G SO <sub>2</sub>	0,09742607	0,06547536	0,05099523	0,02494674
G SO <sub>3</sub>	0,00123013	0,00082671	0,00064388	0,00031498
G NO <sub>2</sub>	0,00080837	0,00054327	0,00042312	0,00020699

En términos de cantidades se puede decir que las diferentes preparaciones aportan al ambiente una gran cantidad de gases nocivos, en el caso del CO<sub>2</sub> entre 0,078 Ton por el tratamiento 4 (labranza reducida) y 0,307 Ton aproximadamente del tratamiento 1(Convencional 1), los cuales solo se generan al preparar un terreno de 0.5 hectáreas. Asumiendo un comportamiento lineal y teniendo presente una fuerte influencia entre la cantidad de trabajo con el consumo de combustible, podemos establecer que al preparar terrenos más grandes la generación de estos gases tiende a incrementarse mucho más.

### 4.3 INTERPRETACIÓN

**Figura 33. Proceso de interpretación**



Fuente: Creación propia de los autores de este trabajo.

#### 4.3.1 Información de Área por Tipo de Preparación

Las preparaciones de suelos en tierras propias, en participación y arrendadas son realizadas por el ingenio, las demás son realizadas por los dueños de las haciendas.

De acuerdo a lo anterior, este proyecto considera solo las haciendas en modalidad de tenencia propia, participación y arrendada que tengan una asignación previa de un tipo de preparación de suelo.

Teniendo en cuenta esta información, se establece que la proporción de cada uno de los grupos de preparación de los suelos es la siguiente:

**Tabla 18. Proporción de tierras por tipo de preparación**

	Área Ha	%
Convencional	5061,76	65,2%
Liviana	2697,2	34,8%

La labranza reducida debe aplicarse primero en suelos livianos, pero también en suelos pesados (arcillosos) se podría aplicar si son vertisoles secos como los del ingenio objeto de estudio; donde la precipitación no llega a 1000 mm anuales; en ingenios donde llueve mucho más, sería más complicado pues el suelo se compacta por el tráfico de la cosecha. De acuerdo con lo anterior se basará el impacto de la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en las preparaciones livianas, pues por los tipos de suelo sería más fácil disminuir la cantidad de pases de la maquinaria (tractor) en la preparación.

**Tabla 19. Total de área y haciendas por tipo de preparación**

Tipos de preparación	Número de haciendas	Área Ha	Escenario con reducida
Convencional 1	319	2311,7	No
Convencional 2	254	1960,54	No
Convencional 3	138	789,52	No
Liviana 1	122	949,28	Si
Liviana 2	140	1263	Si
Liviana 3	58	484,92	Si
Total	1031	7748,96	

#### 4.3.2 Consumos de Combustibles por Tipo de Preparación

Los datos de consumo de combustible de la convencional 1, liviana 2 y liviana 3 fueron adquiridos de los resultados del experimento, para los otros tipos de preparación utilizados en el ingenio: convencional 2, convencional 3 y liviana 1 se asumieron los datos obtenidos del experimento de la misma clase de

preparación realizada ya fuera de convencional o liviana, quedando pendiente de realizar el mismo procedimiento para estos otros tipos de preparaciones.

Los datos que se muestran a continuación son del consumo de combustible en galones:

**Tabla 20. Consumos de combustible promedio por tipo de preparación**

Tipos de preparación	Tareas de Preparación									Total
	Decepado 1	Decepado 2	Cinzel	Sub-Suelo 1	Sub-Suelo 2	Rastro-arado	Rastrillo 1	Rastrillo 2	Surcado	
Convencional 1	5,2	4,25		5,925	4,375	4,2	3,025	2,525	1,45	30,95
Convencional 2	5,2	4,25		5,925	4,375	4,2	3,025		1,45	28,425
Convencional 3	5,2	4,25		5,925	4,375	4,2			1,45	25,4
Liviana 1	3,85	3,75		5,925		4,325	3,025		1,4	22,5
Liviana 2	3,725	4,375	3,975			4,325	3,025		1,15	20,8
Liviana 3	3,85	3,75	4,5				2,7		1,4	16,2

#### 4.3.3 Escenarios de emisiones de CO<sub>2</sub> con Labranza Reducida

Estos consumos de combustible, nos permite realizar cálculos de generación de GEI por cada tipo de preparación.

**Tabla 21. Emisiones de GEI por tipo de preparación**

Tipos de preparación	Consumo promediado combustible	Consumo En M3	Consumo en kilogramos	Cantidad en kilos de GEI generados en 0,5 Hectáreas preparadas				
				CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>
Convención 1	30,95	0,11715497	98,41017488	307,2168839	1,97476	0,09743	0,00123	0,00081
Convención 2	28,425	0,107597093	90,38155803	282,1531479	1,81366	0,08948	0,00113	0,00074
Convención 3	25,4	0,096146567	80,76311606	252,1262957	1,62065	0,07996	0,00101	0,00066
Liviana 1	22,5	0,085169203	71,54213037	223,3402226	1,43561	0,07083	0,000894	0,00059
Liviana 2	20,8	0,078734196	66,13672496	206,465628	1,32714	0,06548	0,000827	0,00054
Liviana 3	16,2	0,061321826	51,51033386	160,8049603	1,03364	0,051	0,000644	0,00042

Para la preparación con labranza reducida se obtuvo la siguiente información:

**Tabla 22. Emisiones de GEI con labranza reducida**

Tipos de preparación	Consumo promediado combustible	Consumo En M3	Consumo en kilogramos	Cantidad en kilos de GEI generados en 0,5 Hectáreas preparadas				
				CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>
Labranza reducida	7,925	0,029998486	25,19872814	78,66538951	0,50565	0,02495	0,000315	0,00021

#### 4.3.4 Impacto en Generación de CO<sub>2</sub> y Consumo de Combustible

Teniendo en cuenta la anterior información, se procede a cambiar las preparaciones livianas, por la de labranza reducida, para así poder determinar el impacto en la generación de CO<sub>2</sub> principalmente. Es importante tener en cuenta que este cálculo es realizado bajo el supuesto de que cada año se renueva la totalidad del área tomada para este estudio, pero en la realidad se renuevan aproximadamente 1000 has.

**Tabla 23. Comparación livianas vs reducida**

Tipos de preparación	Áreas	Lotes de 0,5 Hectáreas	Escenario con reducida	CO <sub>2</sub> en Kg por 0,5 hectáreas	Total CO <sub>2</sub> en Ton generado por preparación	Total CO <sub>2</sub> en Ton generado con reducida	Diferencia	Diferencia %
Liviana 1	949,28	1898,56	Si	22,34	424,02	149,35	274,67	65%
Liviana 2	1263	2526	Si	206,47	521,53	198,71	322,82	62%
Liviana 3	484,92	969,84	Si	160,80	155,96	76,29	79,66	51%
Total	2697,2	5394,4			1.101,51	424,35	677,16	61%

En el anterior cuadro podemos observar que con el cambio de de las preparaciones livianas por la de labranza reducida podemos obtener una disminución de más del 50 % en el CO<sub>2</sub> generado lo que se encuentra relacionado a un menor gasto de combustible y por lo tanto disminución en los costos de preparación de tierras en los que incurre el ingenio.

Para el siguiente cálculo se utilizará un precio del galón comercial de ACPM de \$7288,30 pesos

Los datos del combustible se dan en galones (gal):

**Tabla 24. Diferencia en costo diesel livianas vs reducida**

Tipos de preparación	Consumo Promediado de combustible	Consumo con labranza reducida	Costos de combustible (\$)	Costos de combustible labranza reducida (\$)	Diferencia en GAL	Diferencia %
Liviana 1	22,5	7.925	163.99	57.760	14.575	64,78
Liviana 2	20,8	7.925	151.60	57.760	12.875	61,90
Liviana 3	16,2	7.925	118.07	57.760	8.275	51,08

Se debe aclarar que en la preparación de la labranza reducida se debe incurrir en otra actividad que no es de naturaleza mecanizada, como lo es la aplicación del herbicida para destruir la cepa, esto implica que a los costos de disminución por consumo de combustible se le deben incrementar el costo de esta otra tarea, el cual es de \$18.565 por hectárea.

## 5. COSTOS DEL PROYECTO

Para la realización de este proyecto se contó con el apoyo del ingenio objeto de estudio, para lo cual se incurrieron en los siguientes costos:

Maquinaria

**Tabla 25. Costos de experimento**

Preparación de suelos (mano de obra, maquinaria, combustible)					Total
Tratamientos	Convencional 1	Liviana 2	Liviana 3	Labranza reducida	
Área (Has)	2	2	2	2	
Costo labor (\$/Ha)	\$ 963.467	\$ 5476.430	\$ 461.233	\$ 260.335	
Costo labor (\$/exp)	\$ 1'926.934	\$ 1'152.860	\$ 922.466	\$ 520.670	4'522.930

Personal

Personal Experimento	Ingeniero 1 (\$)	Ingeniero 2 (\$)	Superv. Invest. (\$)	Auxiliares Muestras (\$t)	Líder Cenicaña (\$)	Ingenieros Cenicaña (\$)	Total
Horas	100	100	40	8	20	40	
\$/horas							
Total	1'218.750	812.500	168.000	22.336	520.840	270.800	3'013.226

Otros

	IPSA (\$)	CENICAÑA (\$)	Total (\$)
Análisis laboratorio Suelos	513.600	521.000	1'034.600
Demarcación lotes	350.000		
Otros	500.000		
Total experimento	9'420.756		

## **6. IMPACTO EN EL SISTEMA DE GESTIÓN AMBIENTAL DEL INGENIO**

La planeación y ejecución de proyectos investigativos que logren aportar disminución en el impacto ambiental generado por las actividades del ingenio son uno de los fundamentos para el desarrollo continuo del sistema de gestión ambiental actualmente implementado.

Este proyecto contribuye al inicio de la identificación de puntos de contaminación críticos dentro de uno de los procesos del ingenio, soportados en el concepto de huella de carbono, metodología para el diseño de experimentos y en mediciones de emisiones teóricas aproximadas.

Basados en lo anterior y bajo los lineamientos de la norma NTC ISO 14001 Sistema de Gestión Ambiental, este proyecto se integra a la política ambiental del ingenio, la cual establece que con el ánimo de preservar el medio ambiente, el ingenio realizará sus actividades buscando el equilibrio para atender sus responsabilidades económicas, sociales y ambientales, e igualmente sus programas de prevención y mejoramiento continuo buscarán siempre racionalizar el uso de los recursos naturales, con el fin de mejorar el desempeño ambiental.

Dentro de la planificación del sistema ambiental, se incluye la identificación de los aspectos ambientales significativos, entre los cuales se ha identificado la generación de emisiones de gases de la maquinaria agrícola, es por eso que a partir de allí se puede establecer programas para la disminución del consumo de combustible, optimizando las labores agrícolas en el campo. Este proyecto propone la utilización de Labranza Reducida para la preparación del suelo, la cual por la reducción de las labores, disminuye el consumo de combustible, pudiéndose utilizar primero lógicamente en terrenos livianos, desde suelos arenosos a franco – arcillosos, con la posibilidad de aplicarla en terrenos más pesados si son vertisoles secos como los del ingenio objeto de estudio; donde la precipitación no llega a 1000 mm anuales.

Así mismo la Labranza Reducida se convierte en una oportunidad para realizar las preparaciones para renovación rápida en épocas de transición verano – invierno para lograr establecer el cultivo antes que inicien las lluvias, representando una buena ganancia en tiempo.

Basados en lo anterior y en los datos aquí obtenidos, se pueden establecer metas de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> por la implementación paulatina de la Labranza Reducida en los terrenos en la cual pueda ser aplicada.

De esta forma se pueden generar procedimientos de operación documentados, definiendo controles y criterios operacionales de las diferentes labores que constituyen la Labranza Reducida, dejando documentos y registros que soporten esta actividad en el sistema de gestión ambiental del ingenio.

## 7. EXPERIENCIAS PROCESO DE INVESTIGACION

La experiencia que conlleva realizar una investigación, implica efectuar un trabajo de documentación teórica, una experiencia en campo, un análisis de datos y su posterior interpretación al contexto en el cual se esté desarrollando el tema. Al realizar cada una de esas etapas, se fueron encontrando diferentes situaciones a solucionar, unas más críticas que otras, pero cada una de ellas necesarias para poder cumplir con el objetivo establecido.

De acuerdo con lo anterior, es importante nombrar los inconvenientes que fueron enfrentados dividiéndolos en cada una de las etapas que se presentaron, además de la manera en la que fueron solucionados:

**Documentación teórica:** en esta etapa los primeros inconvenientes que surgieron se deben a la dificultad que existe en obtener información confiable que permitiera obtener datos reales sobre la problemática planteada. La forma en la que el grupo superó este obstáculo fue estableciendo el tipo de información que se requería, y realizando un análisis de los posibles lugares donde se podría obtener información de primera calidad, lo cual nos llevó a los centros de investigación especializados en cultivos de caña de azúcar, bases documentales de empresas pertenecientes al sector azucarero, como también acercándose a docentes universitarios especializados en temas relacionados directamente con el proyecto, de esta experiencia se pudo establecer que la comunidad científica por naturaleza es colaborativa, debido a que muchas de estas personas que ayudaron, lo hicieron de forma desinteresada y con excelente disposición.

**Experiencia en campo:** las adversidades que se presentaron en el desarrollo de este experimento, se vieron enmarcadas principalmente en dos temas, el primero en aspectos logísticos, debido a que al desarrollar un ejercicio en el cual se ven involucrados una gran cantidad de factores como lo son maquinaria, equipos, operadores, disposición de tierras, condiciones climáticas y disposición de jefes entre otras, siempre se presentan inconvenientes que amenazan con poner fin a las actividades que se están realizando. Lo importante es mantener la mente clara, planear con anterioridad posibles planes de contingencia, mantener buenas relaciones y actitud de escucha con el personal involucrado y ante todo no dejarse vencer por la adversidad o claudicar al ser convencido por personas que no comparten la misma visión que se tiene con respecto al trabajo que se está desarrollando.

El segundo tema es la resistencia al cambio, que pueden llegar a ofrecer los involucrados en el proyecto, la principal consigna de este grupo es que las cosas siempre se han realizado de esta forma y siempre han funcionado, lo que el grupo implementó es explicar de una forma clara y entendible los beneficios y los soportes técnicos sobre los cuales están establecidas nuestras

hipótesis, además de hacerlos partícipes en la etapa de implementación, teniendo cuidado que los objetivos del proyecto no se vean alterados.

***Análisis de datos:*** dentro de esta etapa las dificultades que se presentaron fueron la necesidad de hacer uso de temas académicos por fuera de lo visto en el desarrollo de nuestros estudios, que imposibilitaban avanzar con los posteriores análisis, la decisión que se tomó fue acudir a la asesoría y el consejo de personas expertas en el tema, además de que pertenecieran a instituciones educativas o centros de investigación que certifiquen la calidad de la información obtenida.

***Interpretación de la información:*** al realizar la unión de los datos obtenidos en el análisis del experimento, con el contexto del ingenio donde se desarrolló este proyecto, se presentó la problemática de que la información no se podía integrar de una manera que mostrara los resultados como se tenían establecidos, lo que se procedió a realizar es analizar la situación, revisar la información del ingenio y adaptarla a las necesidades del grupo.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante la realización de este trabajo se adquirió conocimiento sobre los factores que intervienen en el proceso de preparación de suelo para el cultivo de caña de azúcar, comprendiendo los impactos que se generan al medio ambiente, y las prácticas que se pueden implementar para mejorar el proceso y disminuir sus impactos negativos.

Luego de identificar los diferentes tipos de preparación del suelo utilizados en el ingenio objeto de estudio, como son las preparaciones convencionales y livianas, se puede concluir, que la alternativa de Labranza Reducida puede ser tomada en cuenta, gracias a las condiciones de suelo en las haciendas de este ingenio, igualmente, se pudo identificar una asignación de los tipos de preparación en las haciendas del ingenio, en la cual se podría cambiar prácticas utilizadas actualmente por labranza reducida.

El diseño de experimentos es una herramienta muy útil para generar información que pueda ser utilizada en la toma de decisiones dentro de los procesos. Sin embargo, lograr abarcar todas las condiciones requeridas para su diseño, resulta un tanto complejo, pasar de la teoría a la práctica conlleva diversos factores que hacen que la ejecución no sea tan fluida como se espera y estas situaciones hacen que se quiera desistir del objetivo o pensar que los resultados no valdrán la pena o que quizá no haya sido necesario incurrir en todo el trabajo.

Una vez realizado este experimento y después de pasar por todas las etapas que esto conlleva, como estudiantes de maestría, se comprende que el desarrollo de ejercicios en ambientes controlados, difieren de la realidad, por la dificultad de eliminar o controlar muchos de los factores que influyen en el experimento. Lo anterior hace que se generen mayores esfuerzos y una completa y total dedicación, con el fin de obtener resultados representativos para las condiciones en las cuales se desarrolla el experimento.

Los experimentos realizados en el campo requieren de mucha planeación, disponibilidad de tiempo, maquinaria, repuestos y apoyo logístico para lograr controlar las diferentes variables y que los resultados no se vean afectados por aspectos como varadas de la maquinaria, daños en los equipos, dificultades en el transporte de la maquinaria por las vías públicas, cambios del personal, entre otros. De la misma forma, hay aspectos como las variaciones del clima que no se pueden controlar, por lo cual, para la realización de este tipo de experimentos, específicamente este caso en particular, es importante poder ejecutarlos en condiciones de verano, para lo cual se debe planificar muy bien y realizarlo en el tiempo estimado.

La utilización de labores de preparación reducidas que disminuyen el consumo de combustible, manteniendo o aumentando la calidad de dichas labores, con

un beneficio económico minimizan el impacto que sobre el medio ambiente provoca los productos resultantes de la combustión.

Con la metodología planteada se logra obtener datos experimentales y teóricos sobre las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) producidos por la combustión de maquinaria agrícola que pueden servir como base para futuras investigaciones en este campo y la obtención de la huella de carbono por procesos y a nivel de la organización.

Con los resultados obtenidos del experimento se concluye que al preparar 0,5 Ha en la Hacienda La Trampa la disminución en CO<sub>2</sub> por la utilización de Labranza Reducida es de un 64,8% con respecto a la Liviana 1, 61,9% con respecto a Liviana 2 y 51,08% con respecto a Liviana 3.

En este proyecto además de estimar las bondades en cuanto a reducción de emisiones de gases efecto invernadero de la Labranza Reducida también obtenemos la relación de disminución que existe en el consumo de combustible que se traduce en reducción aproximada de costos. Por preparar media hectárea con una preparación Liviana 1 para un cultivo de caña en el experimento realizado en la Hacienda La Trampa el costo del combustible es de \$106.227, mientras que si se prepara con Labranza Reducida cuesta \$ 57.760 por concepto de combustible y se incrementaría \$18.565 por la aplicación del herbicida para destrucción de cepa y así quedaría completa la labor de preparación con labores reducidas, esto quiere decir que ahorraría \$29.900 en media hectárea. De igual forma el ahorro para reemplazar la preparación de Liviana 2 sería de \$ 17.512/0,5 Ha y para el reemplazo de Liviana 3, por concepto de combustible no generaría un ahorro. Sin embargo, el costo del combustible es solo un factor en la tarifa completa de preparación.

Considerando lo anterior y revisando las tarifas actuales de preparación en el experimento realizado en la Hacienda La Trampa suerte 2A se concluye que para reemplazar las preparaciones Liviana 2 y Liviana 3 por Labranza Reducida por hectárea se obtiene un ahorro de \$316.095 y \$200.898 respectivamente.

Los trabajos de investigación requieren apoyo, tiempo y recursos, lo cual en muchas ocasiones no se consigue fácilmente, es importante saber vender los proyectos en las empresas y los beneficios que generan a mediano y largo plazo que cubren la inversión inicial, igualmente sería importante realizar alianzas entre las empresas, la academia y los centros de investigación para generar proyectos que aporten al desarrollo económico, social y ambiental de las regiones.

En el caso de este proyecto además del apoyo del ingenio, se contó con el apoyo del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar (Cenicaña), quienes con su experiencia y conocimiento en investigación dieron las bases técnicas para el desarrollo de este proyecto.

Las acciones de mejora en los Sistemas de Gestión Ambiental de las empresas a través de su ciclo PHVA (Planear, hacer, verificar y actuar), son insumos importantes para el buen desempeño organizacional, pues además de contribuir a disminuir los impactos negativos generados y a la protección del medio ambiente, también son acciones que representan ahorros y beneficios económicos.

Para futuros trabajos se recomienda utilizar los demás tipos de preparación de suelo no estudiados en este proyecto, como son: Convencional 2, Convencional 3 y Liviana 1, con el fin de obtener datos más aproximados de consumo de combustible, para ese tipo de preparaciones. Igualmente se recomienda involucrar otras variables en el diseño del experimento para analizar el efecto que puedan tener entre ellas y sobre la variable respuesta, teniendo presente la implicación en los costos del experimento que podría tener tal ampliación.

Se recomienda aplicar esta metodología a diferentes tipos de suelo y diferentes extensiones de terreno por tratamiento, con el objetivo de comparar los datos obtenidos en este estudio y generar información más real de la situación presentada.

Se recomienda actualizar las asignaciones de los tipos de preparación en las haciendas del ingenio objeto de estudio, con el propósito de poder extrapolar los datos obtenidos por tipo de preparación durante los experimentos.

Se recomienda llevar la suerte que se preparó en este experimento a datos de producción en toneladas de caña por hectárea (TCH) con el objetivo de evaluar y comparar los cuatro tratamientos utilizados.

## BIBLIOGRAFIA

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN). UPME. Factores de emisión de los combustibles colombianos, 2003.

ASOCAÑA. El sector azucarero en la actualidad. [En línea] [www.asocana.org](http://www.asocana.org). [citado en 22 de marzo de 2011]

BESOSA, Ramiro; et al. Experiencias con labranza reducida en el Ingenio Providencia. En: Congreso Sociedad Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar de Colombia. 2000, 14 p

BRANDT, F. 2000. Brennstoffe und Verbrennungsrechnung. Ed. Vulkan. Verlag. Germany.

CARBON TRUST. Carbon footprinting. [en línea] (<http://www.carbontrust.co.uk/cut-carbon-reduce-costs/calculate/carbon-footprinting/pages/carbon-footprinting.aspx>). [citado en 21 de abril de 2011].

CASTRO, J y AMADOR M., Enfoque metodológico: emisión de gases de efecto invernadero, la fijación de carbono y la agricultura orgánica. CEDECO, 2006 , p. 7

CASTRO, Jonathan; AMADOR, Manuel. Emisión de Gases de Efecto invernadero y Agricultura Orgánica. CEDECO, 2006.

CENICAÑA. Prácticas culturales. [en línea] [www.cenicana.org/investigacion/agronomia/practicas\\_culturales.php](http://www.cenicana.org/investigacion/agronomia/practicas_culturales.php) . [citado en 22 de abril de 2011]

CENICAÑA. Grupos homogéneos de suelos [en línea] [http://www.cenicana.org/aeps/grupos\\_homogeneos\\_4\\_aproximacion.php](http://www.cenicana.org/aeps/grupos_homogeneos_4_aproximacion.php) . [citado el 2 de mayo de 2011]

CHANG, Raymond; COLLEGE Williams , Química. 7 Edición Mc Graw Hill. 2003.

CIAT. Informe Anual. Cali, 2009

CIAT. América Latina y el Caribe: Tierra fértil para la Eco-Eficiencia. Informe Anual 2009.

CIRIA; J. Ignacio. Estudio de la combustión en motores diesel. Wearcheck Ibérica. [En línea] [www.wearcheckiberica.es](http://www.wearcheckiberica.es) [citado en 4 de febrero de 2011].

CIRIA; J. Ignacio. Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel. Wearcheck Ibérica [en línea] [www.wearcheckiberica.es](http://www.wearcheckiberica.es) [citado en 4 de febrero de 2011]

COLOMBIA. Ministerio de Medio Ambiente. Memoria de la Segunda Comunicación Nacional de Colombia ante la CMNUCC. [en línea] [http://www.minambiente.gov.co/documentos/5783\\_res\\_ejecut\\_segun\\_comun\\_camb\\_clima.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/5783_res_ejecut_segun_comun_camb_clima.pdf) . [Citado el 18 de mayo de 2011].

GARCIA Ricardo. Combustión y combustibles. [en línea] <[www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller1BURE/COMBUSTION.PDF](http://www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller1BURE/COMBUSTION.PDF) >. [Citado en 21 de abril de 2011].

GUTIERREZ, Humberto; DE LA VARA, Roman, Analisis y diseño de experimentos, 2ª edición Mc Graw Hill. 2008.

ISAACS-E, Camilo H; URIBE-J, Paula T; BESOSA-T, Ramiro.; MORENO-G, Carlos A; Posada-C Claudia. Aplicación de prácticas reducidas al cultivo de la caña de azúcar y su impacto en la productividad y rentabilidad en el valle geográfico del río Cauca. En:VII Congreso Tecnicaña. 2006.

MDL. Mecanismo de Desarrollo Limpio. Cambio Climático y Mecanismo de Desarrollo Limpio. [en línea] <http://www.co2.org.co/?IDPagina=72> [citado en abril 7 de 2011].

Memoria de la Segunda Comunicación Nacional de Colombia ante la CMNUCC. [en línea] [http://www.minambiente.gov.co/documentos/5783\\_res\\_ejecut\\_segun\\_comun\\_camb\\_clima.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/5783_res_ejecut_segun_comun_camb_clima.pdf) [citado en 27 de marzo de 2011]

MENDENHALL, Wiliam; SINCICH Terry, Statistics for engineering and the sciences fifth edition. 2007.

MONROY, Nestor; AGUIRRE Alejandro. El Protocolo de Kyoto: ¿Una oportunidad para la industria colombiana?. En: Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá. Noviembre, 2003.

MORENO-PADILLA, Pedro. La Cumbre de Copenhague, el cambio climático y la responsabilidad de los agricultores Asocaña. En: Carta trimestral 3 y 4 Cenicaña. 2009 [en línea] <[pmoreno@asocana.org](mailto:pmoreno@asocana.org)>[citado en 27 de marzo de 2011].

NACIONES UNIDAS. Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. [En línea] <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>. [citado en abril 18 de 2011]

REBOLLEDO Juan Pablo; GOMEZ Jaime. Sistema de Labranza Reducida en el Ingenio Manuelita S.A. Cenicaña. 2000.

REBOLLEDO, JP; GÓMEZ, J. Sistema de Labranza Reducida en el Ingenio Manuelita S.A. Cali, Cenicaña- En: carta Trimestral año 22 Nos. 1 y 2, 2000, p.30.

TORRES, JS; VILLEGAS, F. En: Congreso de la Sociedad Colombiana de técnicos de la Caña de Azúcar, (4º:1997: Cali) Memorias v.1. Cali, TECNICAÑA septiembre 1997, p.24-26.

ZAMORA GONZALEZ Luis y LLANOS CEDEÑO, Edilberto. Evaluación preliminar del impacto ambiental de cuatro tecnologías de preparación de suelo en áreas del CAI "Arquímedes Colina Antunes". Cuba: Universidad de Granma, 2005.

# **ANEXOS**

## Anexo A. Protocolo experimento

- 1) Divulgación del objetivo del experimento.  
Obtener datos de consumo de combustible por cada una de las tareas de preparación que comprende cada tipo de labranza.
- 2) Asignación de operadores y herramienta a cada una de las tres maquinas utilizadas durante la labor agrícola.



JOHN DEER  
8420 N 111



RASTRA 18  
DISCOS X 36"



JOHN DEER  
8420 N 152



CINCEL 7  
VASTAGOS



SUB-SUELO 3  
VASTAGOS



JOHN DEER  
8410 N 153



RASTRA 40  
DISCOS X 26"

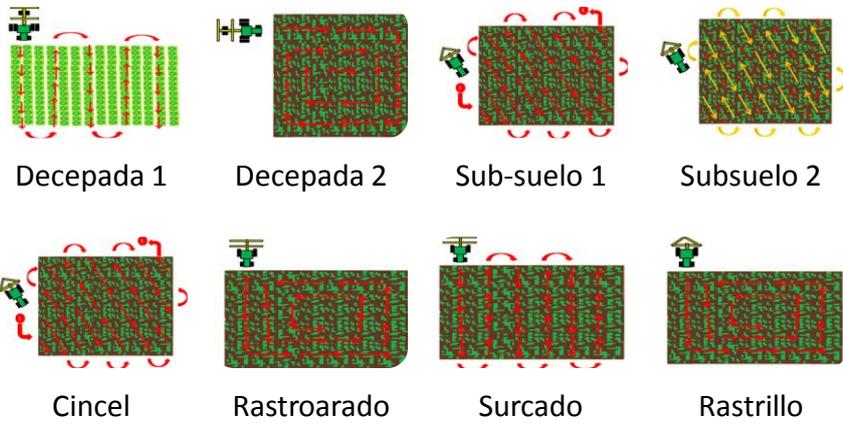
- 3) Explicación de metodología de toma de datos

Ver tabla toma de datos ANEXO C



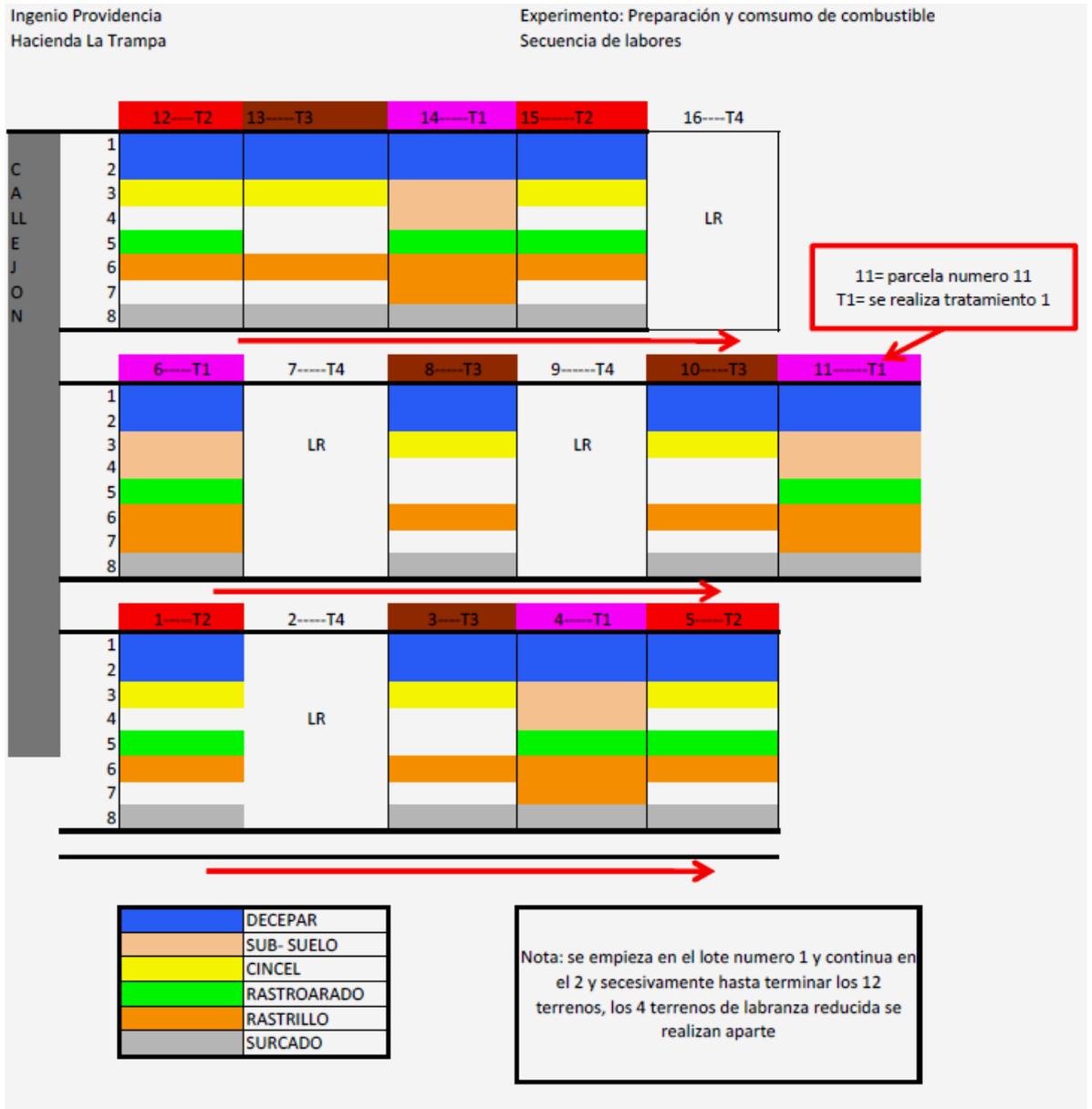
- 4) Divulgación esquema de secuencia de tareas a realizar.  
Ver esquema ANEXO B

- 5) Capacitar al personal operativo sobre la forma en que deben realizar cada una de las tareas agrícolas



Las revoluciones para cada una de las maquinas se deben encontrar entre 2000 y 2200 RPM y los cambios entre 8 y 10.

## Anexo A. Preparación y consumo de combustible Ingenio Providencia Hacienda La Trampa



## Anexo B. Datos tomados del experimento

DATOS TOMADOS EN EXPERIMENTO						
DATO	PARCELA	TRATAMIENTO	MAQUINA	IMPLEMENTO	LABOR	CONSUMO
1	1	2	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	4,1
2	1	2	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	5,9
3	1	2	JOHN DEER 8420 N 152	CINCEL 7 VASTAGOS	CINCEL	4,9
4	3	3	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	3
5	3	3	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	2,1
6	1	2	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	RASTROARADO	5
7	1	2	JOHN DEER 8410 N 153	RASTRA 40 DISCOS X 26"	RASTRILLADO	3
8	3	3	JOHN DEER 8420 N 152	CINCEL 7 VASTAGOS	CINCEL	6,3
9	4	1	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	8
10	4	1	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	5
11	3	3	JOHN DEER 8410 N 153	RASTRA 40 DISCOS X 26"	RASTRILLADO	3
12	4	1	JOHN DEER 8420 N 152	SUB-SUELO 3 VASTAGOS	SUB-SUELO	7,6
13	4	1	JOHN DEER 8420 N 152	SUB-SUELO 3 VASTAGOS	SUB-SUELO	4
14	5	2	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	3
15	5	2	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	4,1
16	5	2	JOHN DEER 8420 N 152	CINCEL 7 VASTAGOS	CINCEL	3
17	4	1	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	RASTROARADO	4
18	4	1	JOHN DEER 8410 N 153	RASTRA 40 DISCOS X 26"	RASTRILLADO	3
19	4	1	JOHN DEER 8410 N 153	RASTRA 40 DISCOS X 26"	RASTRILLADO	2,4
20	5	2	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	RASTROARADO	3,1
21	5	2	JOHN DEER 8410 N 153	RASTRA 40 DISCOS X 26"	RASTRILLADO	2,2
22	11	1	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	4,3
23	11	1	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	4
24	11	1	JOHN DEER 8420 N 152	SUB-SUELO 3 VASTAGOS	SUB-SUELO	5,6
25	11	1	JOHN DEER 8420 N 152	SUB-SUELO 3 VASTAGOS	SUB-SUELO	4,3
26	11	1	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	RASTROARADO	5,1
27	11	1	JOHN DEER 8410 N 153	RASTRA 40 DISCOS X 26"	RASTRILLADO	3,2
28	11	1	JOHN DEER 8410 N 153	RASTRA 40 DISCOS X 26"	RASTRILLADO	2,5
29	9	3	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	4,8
30	9	3	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	5,1
31	9	3	JOHN DEER 8420 N 152	CINCEL 7 VASTAGOS	CINCEL	4,3
32	7	3	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	3,7
33	7	3	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	3,8
34	9	3	JOHN DEER 8410 N 153	RASTRA 40 DISCOS X 26"	RASTRILLADO	2,5
35	7	3	JOHN DEER 8420 N 152	CINCEL 7 VASTAGOS	CINCEL	3,9
36	7	3	JOHN DEER 8410 N 153	RASTRA 40 DISCOS X 26"	RASTRILLADO	2,8
37	6	1	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	4,5
38	6	1	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	3,5
39	6	1	JOHN DEER 8420 N 152	SUB-SUELO 3 VASTAGOS	SUB-SUELO	5,4
40	6	1	JOHN DEER 8420 N 152	SUB-SUELO 3 VASTAGOS	SUB-SUELO	4,5
41	12	2	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	3,6
42	12	2	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	3,7
43	13	3	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	3,9
44	13	3	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	4
45	6	1	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	RASTROARADO	3,6
46	12	2	JOHN DEER 8420 N 152	CINCEL 7 VASTAGOS	CINCEL	3,6
47	6	1	JOHN DEER 8410 N 153	RASTRA 40 DISCOS X 26"	RASTRILLADO	2,2
48	6	1	JOHN DEER 8410 N 153	RASTRA 40 DISCOS X 26"	RASTRILLADO	2
49	13	3	JOHN DEER 8420 N 152	CINCEL 7 VASTAGOS	CINCEL	3,5
50	13	3	JOHN DEER 8410 N 153	RASTRA 40 DISCOS X 26"	RASTRILLADO	2,5
51	14	1	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	4
52	14	1	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	DECEPADA	4,5
53	14	1	JOHN DEER 8420 N 152	SUB-SUELO 3 VASTAGOS	SUB-SUELO	5,1
54	14	1	JOHN DEER 8420 N 152	SUB-SUELO 3 VASTAGOS	SUB-SUELO	4,7
55	12	2	JOHN DEER 8420 N 111	RASTRA 18 DISCOS X 36"	RASTROARADO	4,4

## **Anexo C. Informe ejecutivo para la Gerencia**

### **Introducción**

El ingenio se ha caracterizado por ser una empresa líder en la industria azucarera por el mejoramiento continuo de sus procesos y la implementación de tecnologías más limpias que no solo le apuntan a la productividad de la empresa si no que también contribuyen al cuidado del medio ambiente.

Siendo consecuentes con lo anterior y basados en la estrategia de la organización que busca la sostenibilidad en lo económico, social y ambiental, este proyecto luego de identificar a la preparación del suelo como una labor agrícola en la cual se genera un impacto al aire por los gases resultantes de la combustión, contribuye en un primer paso a la estrategia, por medio del diseño de experimentos en tres diferentes preparaciones de suelo que se utilizan en el ingenio, con el objetivo de validar las bondades económicas y ambientales de la Labranza Reducida para la preparación de suelo en el cultivo de caña de azúcar en el ingenio.

### **Planteamiento del problema**

Las labores agrícolas de campo y cosecha se pueden realizar durante todo el año, estas labores entre las que se incluye la preparación del suelo, utilizan maquinaria como unidad energética para el trabajo agrícola, requiriendo un consumo de combustible que representa el 34% de los costos totales de la preparación del suelo, adicional a esto, de acuerdo a la norma NTC14001, por la cual el ingenio busca certificarse este año 2011, se ha identificado que entre los impactos negativos sobre el entorno ambiental, se encuentra la contaminación de la atmósfera debido a los gases producto de la combustión cuando se realiza esta labor.

Basado en lo anterior, este proyecto se centró en el diseño de un experimento en campo para calcular los consumos de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub> de tres alternativas de labranza (preparación de suelo) tradicional y la labranza reducida en la hacienda La Trampa en una suerte ubicada en una misma zona agroecológica (6H1), marcando la pauta para el desarrollo de otros experimentos con el fin mejorar prácticas en la preparación del suelo, introduciendo la labranza reducida (uso mínimo de maquinaria) en los terrenos donde pueda ser fácilmente aplicada con el fin de disminuir el consumo de combustible y por ende ahorrar costos y contribuir a la disminución de gases efecto invernadero generados por la combustión.

Este proyecto propone la utilización de Labranza Reducida para la preparación del suelo, la cual por la reducción de las labores, disminuye el consumo de

combustible, pudiéndose utilizar primero lógicamente en terrenos livianos, desde suelos arenosos a franco – arcillosos, con la posibilidad de aplicarla en terrenos más pesados si son vertisoles secos como los de este ingenio; donde la precipitación no llega a 1000 mm anuales.

#### Resultados

En cuanto a consumo de combustible, las preparaciones tradicionales oscilaron entre 30.95 galones de diesel (a.c.p.m) para la Convencional 1, 20.8 gal para la Liviana 2 y 16.2 gal para la Liviana 3, mientras que la Labranza Reducida sólo consumió 8 gal de combustible. Lo anterior es válido para el experimento realizado en la Hacienda La Trampa en 8 Has de la suerte 2A que pertenecen a la zona agroecológica 6H1.

Para el siguiente cálculo se utilizara un precio del galón comercial de ACPM de \$7288,30 pesos (mayo 2011), ver Tabla 1:

Los datos del combustible se dan en galones (gal) (ver Tabla 1):

Tabla 1. Diferencia en costo del combustible diesel en Livianas vs Reducida

TIPOS DE PREPARACION	CONSUMO PROMEDIADO DE COMBUSTIBLE	CONSUMO CON LABRANZA REDUCIDA	COSTOS DE COMBUSTIBLE	COSTOS DE COMBUSTIBLE LABRANZA REDUCIDA	DIFERENCIA EN GAL	DIFERENCIA %
liviana 1	22.5	7.925	\$ 163,987	\$ 57,760	14.575	64.78%
liviana 2	20.8	7.925	\$ 151,597	\$ 57,760	12.875	61.90%
liviana 3	16.2	7.925	\$ 118,070	\$ 57,760	8.275	51.08%

Se debe aclarar que en la preparación de la labranza reducida se debe incurrir en otra actividad que no es de naturaleza mecanizada, como lo es la aplicación del herbicida para destruir la cepa, esto implica que a los costos de disminución por consumo de combustible se le deben incrementar el costo de esta otra tarea, el cual es de \$18.565 por hectárea.

De acuerdo a los resultados del experimento si se cambia las preparaciones livianas por la de labranza reducida podemos obtener una disminución de más del 50 % en el CO2 generado lo que se encuentra relacionado a un menor gasto de combustible y por lo tanto disminución en los costos de preparación de tierras en los que incurre el ingenio.

#### Conclusiones

En este proyecto además de estimar las bondades en cuanto a reducción de emisiones de gases efecto invernadero de la Labranza Reducida también obtenemos la relación de disminución que existe en el consumo de combustible que se traduce en reducción aproximada de costos. Por preparar media hectárea con una preparación Liviana 1 para un cultivo de caña en el experimento realizado en la Hacienda La Trampa el costo del combustible es de \$106.227, mientras que si se prepara con Labranza Reducida cuesta \$

57.760 por concepto de combustible y se incrementaría \$18.565 por la aplicación del herbicida para destrucción de cepa y así quedaría completa la labor de preparación con labores reducidas, esto quiere decir que ahorraría \$29.900 en media hectárea. De igual forma el ahorro para reemplazar la preparación de Liviana 2 sería de \$ 17.512 / 0.5 Ha y para el reemplazo de Liviana 3, por concepto de combustible no generaría un ahorro. Sin embargo, el costo del combustible es solo un factor en la tarifa completa de preparación.

Considerando lo anterior y revisando las tarifas actuales de preparación en el experimento realizado en la Hacienda La Trampa suerte 2A se concluye que para reemplazar las preparaciones Liviana 2 y Liviana 3 por Labranza Reducida por hectárea se obtiene un ahorro de \$316.095 y \$200.898 respectivamente.

Con los resultados obtenidos del experimento se concluye que al preparar 0,5 Ha en la Hacienda La Trampa la disminución en CO<sub>2</sub> por la utilización de Labranza Reducida es de un 64,8% con respecto a la Liviana 1, 61,9% con respecto a Liviana 2 y 51,08% con respecto a Liviana 3.

La utilización de labores de preparación reducidas que disminuyen el consumo de combustible, manteniendo o aumentando la calidad de dichas labores, con un beneficio económico minimizan el impacto que sobre el medio ambiente provoca los productos resultantes de la combustión.

Con la metodología planteada se logra obtener datos experimentales y teóricos sobre las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) producidos por la combustión de maquinaria agrícola que pueden servir como base para futuras investigaciones en este campo y la obtención de la huella de carbono por procesos y a nivel de la organización.