

**EVALUACIÓN AMBIENTAL A PARTIR DEL ANÁLISIS TERMOECONÓMICO
Y EXPERIMENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIOCHAR OBTENIDO DE LOS
RESIDUOS BIOMÁSICOS INDUSTRIALES DE LA PALMA**

MAROLY VIVIAN VILLAMIZAR RODRIGUEZ

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA**

VALLEDUPAR - CESAR

2019

**EVALUACIÓN AMBIENTAL A PARTIR DEL ANÁLISIS TERMOECONÓMICO
Y EXPERIMENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIOCHAR OBTENIDO DE LOS
RESIDUOS BIOMÁSICOS INDUSTRIALES DE LA PALMA**

MAROLY VIVIAN VILLAMIZAR RODRIGUEZ

**Proyecto presentado para obtener el título de Ingeniero Ambiental y
Sanitario.**

DIRECTOR

LINA MARGARITA BUELVAS GUTIERREZ

Ing. Agroindustrial

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA**

VALLEDUPAR - CESAR

2019

Nota de aceptación

Director

Evaluador

Evaluador

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar un sincero agradecimiento, en primer lugar, a Dios por ser mi guía y acompañarme en el transcurso de mi vida, brindándome paciencia y sabiduría para culminar con éxito las metas propuestas.

A mi familia, pareja y amigos por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades e inconvenientes que se presentaron.

Agradezco a mi directora de tesis Ing. Lina Buelvas quien con su experiencia, conocimiento y motivación me orientó y a la Ing. Laura Quiroz por toda la ayuda en el desarrollo de la investigación. Al Dr Luis Carlos Diaz y Dr Marlos Bastidas por su colaboración, por sus consejos, enseñanzas, apoyo y por su dedicación en el momento de cada evaluación al proceso.

Agradezco a todos los docentes que, con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarme como persona y profesional.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
2. JUSTIFICACIÓN	14
3. OBJETIVOS	16
3.1. OBJETIVO GENERAL	16
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
4. MARCO REFERENCIAL	17
4.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	17
4.2. MARCO TEÓRICO	21
4.3. MARCO CONCEPTUAL	26
4.3.1. Bio-Carbón o Biochar	26
4.3.2. Exergía	27
4.3.3. Factores Ambientales	28
4.3.4. Impacto Ambiental (IA)	28
4.3.5. Indicador Ambiental	28
4.3.6. Pirólisis	30
4.3.7. Termoeconomía	31
4.4. MARCO CONTEXTUAL	33
4.5. MARCO LEGAL	35
5. MARCO METODOLÓGICO	39
5.1. LÍNEA Y SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN	39
5.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN	39

5.3. POBLACIÓN ESTUDIO Y MUESTRA POBLACIONAL	39
5.4. DESARROLLO METODOLÓGICO	40
Etapa 1. Evaluación de condiciones de operación.	40
Etapa 2. Análisis de metodologías de escalamiento.	41
Etapa 3. Aplicación de métodos de evaluación exergoeconómica y ambiental.	41
Etapa 4. Aplicación métodos de optimización.	42
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	44
Condiciones de operación	45
Balance de masa	47
Balance de energía	52
Consumo de energía eléctrica	53
Balance de exergía	55
Balance exergoeconómico	56
Optimización exergoeconómica	58
Identificación de acciones susceptibles de producir impacto	59
Determinación de los componentes ambientales que pueden ser afectados por el proyecto	60
Identificación de factores susceptibles de recibir impactos	61
Identificación de Impactos Ambientales	63
Valoración de Impactos Ambientales	65
Optimización ambiental	66
7. CONCLUSIONES	73
8. RECOMENDACIONES	75
9. BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXOS FOTOGRÁFICOS	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen parámetros de calificación de importancia.	22
Tabla 2. Rangos de jerarquización de la importancia del efecto.	25
Tabla 3. Normatividad ambiental colombiana relacionada.	35
Tabla 4. Proceso de producción de Biochar.	44
Tabla 5. Variables Internas y externas de operación de los sistemas energéticos en estudio.	45
Tabla 6. Condiciones de operación del horno experimental.	46
Tabla 7. Condiciones de operación de la planta piloto.	46
Tabla 8. Consumo de corriente del horno experimental.	53
Tabla 9. Consumo de corriente de la planta piloto.	54
Tabla 10. Costo de energía eléctrica.	56
Tabla 11. Proyección de costos de los equipos de pirólisis.	57
Tabla 12. Relaciones entre acciones del proyecto y aspectos ambientales.	59
Tabla 13. Matriz de relación acción del proyecto – componente ambiental.	60
Tabla 14. Indicadores de los factores ambientales afectados.	61
Tabla 15. Impactos ambientales significativos.	63
Tabla 16. Valoración de impactos.	65
Tabla 17. Ficha de manejo ambiental impacto generación de calor.	67
Tabla 18. Ficha de manejo ambiental impacto generación de gases.	67
Tabla 19. Ficha de manejo ambiental impacto generación de olores.	68
Tabla 20. Ficha de manejo ambiental impacto disminución de residuos orgánicos.	69
Tabla 21. Ficha de manejo ambiental impacto utilidad del Biochar.	70
Tabla 22. Ficha de manejo ambiental impacto alquitranes.	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista satelital de Campo Experimental El Palmar De La Sierra.	33
Figura 2. Ubicación geográfica de la sede Sabanas de la Universidad Popular.	34
Figura 3. Flujo másico de horno experimental.	49
Figura 4. Flujo másico de la planta piloto.	50

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Termo grama muestra de cuesco.	48
Gráfico 2. Relación temperatura vs. tiempo del horno experimental.	50
Gráfico 3. Relación temperatura vs. tiempo de la planta piloto.	51

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar ambientalmente el proceso a escala piloto y experimental para la producción de Biochar a partir de residuos biomásicos de la palma de aceite, los estudios para el diagnóstico del proceso tiene un enfoque termoeconómico, que permita conocer el comportamiento, energético y exergético de los sistemas estudiados; la valoración ambiental de los impactos identificados en las actividades del proceso de producción se realiza en base a la metodología Conesa que ofrece una observación más objetiva y acertada del impacto evaluado. Según los resultados obtenidos, el sistema energético de la planta piloto es más eficiente a las mismas condiciones ambientales, de lo que se obtiene una mejor calidad en el producto final. La mayoría de los impactos ambientales identificados afectan al factor aire debido a las emisiones generadas en el proceso de pirolisis, sin embargo, el Biochar representa un gran impacto positivo ambientalmente.

Palabras clave: Biochar; Termoeconomía; Exergía; Pirólisis; Factor ambiental

ABSTRACT

The objective of this research work was to environmentally evaluate the pilot and experimental scale process for the production of Biochar from biomass residues of the oil palm, the studies for the diagnosis of the process have a thermoeconomic approach, which allows to know the energetic and exergy behavior of the energy systems under study; the environmental assessment of the impacts identified in the activities of the production process is carried out based on the Conesa methodology that offers a more objective and accurate observation of the evaluated impact. According to the results obtained, the energy system of the pilot plant is more efficient at the same environmental conditions, which results in a better quality in the final product. Most of the environmental impacts identified affect the air factor due to the emissions generated in the pyrolysis process, however, Biochar represents a great environmentally positive impact.

Keywords: Biochar; Thermoeconomics; Exergy; Pyrolysis; Environmental factor

INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del incremento y concentración en la atmósfera terrestre de gases de efecto invernadero durante décadas, se ha visto evidenciado el cambio climático en las múltiples y significativas alteraciones acontecidas en los últimos años. Por la necesidad de tomar medidas de prevención, corrección y mitigación de los daños ocasionados al medio por las actividades que producen impacto, han surgido algunas propuestas para la optimización de los procesos que permitan la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero y propuestas para la compensación que permitan la absorción de los mismos.

El Biochar aparece como un novedoso producto generado a partir de estos subproductos que queremos eliminar transformándolos en otro, que siendo aportado a suelos agrícolas tiene la capacidad de captar el carbono de la atmósfera procedente de las emisiones de CO₂ y de otros gases contaminantes (Pastor, et al., 2010).

En esta investigación se hará una evaluación y valoración de los aspectos ambientales que pueden ser afectados por cada una de las actividades implicadas en el proceso de obtención de Biochar a partir del cuesco de la palma; mediante la metodología para la evaluación de impacto ambiental Conesa; por otro lado estudiar los costos económicos en relación a la eficiencia termodinámica del proceso de producción de Biochar teniendo en cuenta los beneficios que la biomasa vegetal trae para contrarrestar los efectos del dióxido de carbono como gas de efecto invernadero.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La composición de la atmósfera afecta de manera fundamental al clima; mientras más gases de efecto invernadero como el CO₂ se encuentren en la atmósfera terrestre, mayor será la temperatura global de nuestro planeta. La razón de este incremento en el CO₂ atmosférico puede estar ligada con procesos naturales, sin embargo, el componente antropológico tiene un impacto muy significativo, dado que la tala de bosques y la quema de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo incrementan la cantidad de CO₂ liberado a la atmósfera (Caballero, et al., 2007).

Se necesitan mayores esfuerzos de mitigación climática si se quiere evitar la pérdida severa de biodiversidad. Con un calentamiento de 4,5°C, casi 50% de las especies que se encuentran actualmente en lugares prioritarios corren el riesgo de sufrir extinción local. Pero si el aumento de la temperatura se limita a 2° C, este riesgo se reduce a la mitad, lo que subraya la importancia de una acción urgente para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (ONU, 2018).

En la actualidad uno de los problemas más relevantes a escala global es la desertificación, es decir, la degradación de suelos y tierras en ecosistemas secos. De acuerdo con el IDEAM (2003), Colombia posee 245.342 Km² en zonas secas, es decir aproximadamente el 21.5 % del país. Dentro de este contexto la región caribe se destaca a nivel nacional como una de las regiones más afectadas por los procesos de la desertificación (Corpocesar, 2004). Por otro lado, el manejo de los subproductos de la palma africana puede convertirse en una problemática para las empresas productoras de aceite de palma.

A Partir de estas afirmaciones surgen los siguientes interrogantes: ¿Es el proceso de producción de Biochar ambientalmente sostenible? Y ¿Es económica y termodinámicamente eficiente el proceso actual para la obtención del Biochar?

2. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo de investigación se realizó con el fin de conocer la magnitud y significancia de los impactos tanto benéficos como perjudiciales que se originan durante cada una de las actividades dentro del proceso de producción del Biochar del cuesco de la palma aceite, de modo que la evaluación ambiental ayude en la toma de decisiones para la optimización de los procesos de transformación para la obtención del Biochar y sirva como mecanismo para la identificación precisa de impactos que permite plantear las medidas adecuadas de prevención, mitigación y compensación.

El Biochar es un material que por sus propiedades ofrece beneficios importantes como son mejorar la fertilidad del suelo mediante el secuestro de carbono, la remediación del pH, estabilidad del suelo y reducir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Este material puede obtenerse a partir de subproductos de cultivos agrícolas, como los producidos en el cultivo de la palma africana. Además de que el desarrollo del proyecto ofrece un beneficio para las empresas productoras de aceite de palma si se tiene en cuenta que las plantaciones registran un enorme potencial de utilización de carbón vegetal para secuestro de carbono debido al continuo suministro de biomasa en los cultivos durante todo el año, ya que éste proyecta su aplicación al análisis de una metodología que permite, con base en el análisis del sistema energético de estudio, optimizar la producción de Biochar, a partir de la minimización de los costos generados por el sistema y su entorno, una técnica potencial para aliviar estos daños ambientales es convertir los residuos de palma aceitera en Bio-aceite y Biochar, a través de la pirólisis (Abnisa et al., 2013).

La aplicación de la teoría exergoeconómica en el proceso de obtención del Biochar permite colocar bajo una misma valoración de costos la generación del mismo, teniendo en cuenta que el proceso requiere consumos de energía, independiente de las tecnologías utilizadas, partiendo del hecho que la exergía es igual para cualquier caso de generación, lo cual permitió constituir indicadores

de costos exergéticos o exergoeconómicos al Biochar obtenido y a la vez establecer potenciales de ahorro energético y económico en el proceso y las tecnologías involucradas en el sistema. El modelo exergoeconómico obtenido y su solución, genera información sobre la proyección de utilidades, ahorro con respecto a otro tipo de tecnología, permite aumentar la eficiencia de la producción de Biochar a gran escala y aporta ideas para la disposición de residuos sólidos, gaseosos y exergéticos en el proceso (Daza, Y., Bastidas, M., 2018).

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar ambientalmente, mediante un análisis termoeconómico y experimental, la producción de Biochar obtenido de los residuos biomásicos industriales de la palma africana a partir de muestras tomadas del campo experimental Palmar de La Sierra.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las condiciones de operación que afectan las variables internas y externas del sistema energético de estudio.
- Analizar metodologías de escalamiento para el desarrollo del modelo termodinámico del sistema basado en el concepto recurso-producto y el de costos exergético específico (SPECO).
- Identificar cada una de las afectaciones generadas al ambiente por las distintas acciones del proceso de producción y determinar su valoración y significancia mediante la implementación de la metodología Conesa.
- Aplicar métodos de optimización exergoeconómica a diferentes escalas del sistema de producción de Biochar y diseñar estrategias de prevención, mitigación y compensación a los diferentes aspectos evaluados ambientalmente.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Pastor, Y., Martínez, M. d., & Valdes, R. (2010), presentan la investigación titulada “*CONSTRUCCION DE UNA PLANTA DE PRODUCCION DE BIOCHAR A PARTIR DE PURINES*”. con el objetivo de la creación de una planta pirolítica para la producción de Biochar. Con esto se consigue además de reutilizar un residuo y gestionarlo, producir un producto capaz de reducir una problemática ambiental. Las materias primas a utilizar son las generadas en las explotaciones ganaderas de Fuente Álamo que formen parte del grupo Fuertes, la empresa promotora del proyecto. La comercialización de la empresa es basada en la venta de este Biochar y de los subproductos del proceso de producción. El proceso industrial tiene dos etapas claramente diferenciadas el secado de las materias primas, que se realiza al exterior de la nave y a temperatura ambiente, de modo que el material tenga un índice de humedad por debajo del 10%; así como la pirólisis que se realiza en un horno pirolítico con una cama móvil, con flujo de contracorriente, cono rotativo y alcanza temperaturas entre 400°C y 20.000°C. La pirólisis comienza en torno a los 250°C, llegando a ser completa en torno a los 500°C de temperatura, a 500°C se mantiene la pirólisis hasta 4 horas para conseguir la mayor proporción de producto sólido (ya que lo que deseamos es producción de Biochar alcalino). El incremento de temperatura será de unos 0,5°C por cada minuto de trabajo del horno pirolítico. Así que después de 16 horas de haber introducido la materia prima tenemos la temperatura máxima de la pirólisis.

El análisis es basado en la norma ISO 562-1974 en la determinación de materias volátiles y la ISO 1171-1976 para la determinación de las cenizas. Para la determinación del poder calorífico inferior y superior de las materias primas en Kcal/Nm³ utilizan la norma ISO-1928-95. De manera general, el Biochar puede proporcionar protección contra algunas enfermedades foliares y del suelo y puede ser producido a base de biomasa tanto animal como vegetal. En este

estudio de factibilidad se usó como materia prima residuos de la explotación porcícola para la generación de Biochar.

El autor Bastidas, M., (2010), presenta en su tesis un “*ANÁLISIS MULTIOBJETIVO PARA LA OPTIMIZACIÓN EN SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA*” en donde la intención de utilizar diferentes equipos para la conformación del sistema energético, conlleva a realizar el primer aporte de la tesis, el cual fue una adecuación a la ecuación termoeconómica, ajustando dichos factores para lograr que se puedan incluir la mayor cantidad de condiciones de operación minimizando el error de los resultados obtenidos. Uno de los aportes más importantes de esta tesis, fue enfocar el problema como un sistema global (sistema energético-entorno), este planteamiento muestra una visión diferente del sistema y permite hacer juicios que están fuera de lo común y por ende nuevas formas de optimizar el sistema globalmente, aunque haya diferenciación entre los tipos de sistemas (Lazzaretto et al., 2009). De este trabajo de investigación se concluye que los factores del entorno intervienen en la optimización del sistema energético y le permite al decisor manejar una información general del sistema, en el que puede hacer inferencia tanto en las condiciones del sistema energético, como de los recursos que tiene a sus alrededores. Tener un sistema muy eficiente, no significa que sea el óptimo, debido a que el entorno condiciona esta premisa y que cuando el decisor le dá más importancia al objetivo ambiental, las variables de decisión optan por tomar combustibles de buena calidad en el proceso de optimización, aunque tenga precios por encima de los demás. Lo importante de esta metodología, es que se pueden obtener mezclas óptimas de los combustibles que se utilizan, en concordancia con los requerimientos tecnológicos y la disponibilidad de recursos para hacer la inversión y las necesidades energéticas del entorno y el precio del mercado.

Por otra parte los autores Garcia-Perez M., J.A. Garcia-Nunez, T. Lewis, C. E. Kruger, M.R. Fuchs, G. Flora, S. Kantor, (2012), presentan “*Métodos para producir Biochar y biocombustibles avanzados en el estado de Washington -*

Parte 4: Revisión bibliográfica de temas de sostenibilidad, modelos de negocios y análisis financieros” realizada con la intención de abordar la creciente demanda de información sobre el diseño de unidades y sistemas avanzados de pirólisis para recolectar, transportar y pretratar la materia prima. Plantean que una de las principales debilidades de la mayoría de los modelos comerciales para la producción de Biochar es que ignoran el uso de la energía producida por los vapores de pirólisis. Los ingresos resultantes de la comercialización del calor o la electricidad derivados de los vapores de pirólisis son críticos para el éxito de las empresas de Biochar. Sin embargo, se encuentra muy poca información en la literatura sobre modelos de negocio para utilizar vapores de pirólisis; y resuelven que los análisis económicos no deben reducirse a simples estimaciones de costos. La estructura de costos obtenido es una herramienta poderosa para identificar áreas susceptibles de mejoras y es poco probable que las tecnologías de primera generación generen enormes ganancias, pero a través de los continuos esfuerzos de investigación y desarrollo para reducir los costos y aumentar su calidad total, estas tecnologías madurarán y gradualmente se volverán competitivas y sostenibles. Además de mejorar las unidades de pirólisis y las refinerías de biocombustibles, también es necesaria la investigación para desarrollar nuevos productos a partir de biocarburantes y biocarburantes. El desarrollo de productos de alto valor a partir de estas fracciones es fundamental para garantizar la viabilidad económica de estas tecnologías. Especialmente crítico para el éxito de las tecnologías de pirólisis es el desarrollo de Biochar diseñado para aplicaciones ambientales.

Harsono, S. S., Grundman, P., Lau, L. H., Hansen, A., Salleh, M. A. M., Meyer-Aurich, A., & Ghazi, T. I. M. (2013), exponen el documento *“Balances energéticos, emisiones de gases de efecto invernadero y economía de la producción de Biochar a partir de racimos de fruta vacíos de aceite de palma”* en el cual presentan los resultados de un análisis puerta a puerta del balance energético, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la eficiencia económica de la producción de Biochar a partir de racimos de frutas vacías (EFB) de aceite de palma. El análisis es basado en datos obtenidos de la combustión

de EFB en una planta de pirólisis lenta en Selangor, Malasia. Las salidas de la planta de pirólisis lenta son Biochar, Syngas, Bio-oil y vapor de agua. El rendimiento energético neto del Biochar producido en la planta de Selangor es de 11.47 MJ kg⁻¹EFB. El contenido energético del Biochar producido es mayor que la energía requerida para producir el Biochar, es decir, el balance energético de la producción de Biochar es positivo. La combustión de EFB con combustible Diesel tiene la mayor demanda energética de 2,31 MJ kg⁻¹EFB en el proceso de pirólisis. Se requieren cantidades comparativamente más pequeñas de energía como electricidad (0,39 MJ kg⁻¹EFB) y para el transporte de Biochar al almacén y al campo (0,13 MJ kg⁻¹EFB). Las emisiones netas de gases de efecto invernadero de la producción de Biochar estudiada representan 0.046 kg de CO₂-equiv. kg⁻¹EFB año⁻¹ sin considerar los efectos de sustitución de fertilizantes y la acumulación de carbono del Biochar en el suelo.

Finalmente Daza, Y., & Bastidas, M., (2018), desarrollan la investigación titulada *“ESTUDIO EXERGOAMBIENTAL DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIOCHAR A ESCALA PILOTO A PARTIR DE CUESCO, RAQUIS Y TRONCO DE LA PALMA AFRICANA”* cuyo objetivo fue estudiar exergo - ambientalmente el uso de Biochar obtenido a escala piloto a partir de subproductos provenientes del proceso de extracción de aceites de la industria de la palma africana, debido al gran potencial para la producción de Biochar y el secuestro de carbono, gracias a la creciente generación de materia prima provenientes de este tipo de industrias. Plantean que en diferentes investigaciones se han evaluado el impacto de la aplicación del Biochar en tierras agrícolas como una medida para mejorar la fertilidad del suelo, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la fijación de carbono en el suelo.

Para el desarrollo de la investigación se desarrollan tres tipos de balances, partiendo del balance de masa, energía y exergía, según las líneas de entrada y salida del sistema, el cual aporta información para entender los aportes reales del horno, frente a otros sistemas de gasto energéticos, con lo que se obtienen los datos exergéticos con base en un estado de referencia de condiciones

ambientales de tal manera que la información obtenida es importante para la evaluación de ciclo de vida y análisis exergo - ambiental, susceptibles de compararse con datos de diferentes precursores incluyendo con combustibles fósiles. Los resultados obtenidos muestran que la generación de CO₂ para producir un kg de Biochar es mucho mayor (15,2 kg CO₂ eq/ kg Biochar) que los generados por la gasolina (4,1 CO₂ eq/ kg de gasolina), el carbón (CO₂ eq/ kg de carbón) y el gas natural (CO₂ eq/ kg de GN). Este comportamiento se debe a que los tres primeros son precursores para la generación de energía eléctrica, mientras que el Biochar requiere consumir energía eléctrica este caso para producir Biochar, lo que significa que los niveles de producción de CO₂ son mayores dado que se involucran la producción por formación y gastos de electricidad.

4.2. MARCO TEÓRICO

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es una herramienta para que los tomadores de decisiones identifiquen los posibles impactos ambientales de los proyectos propuestos, a fin de evaluar los enfoques alternativos, y de diseñar e incorporar medidas adecuadas de prevención, mitigación, gestión y monitoreo. También se espera que la EIA ayude a garantizar la protección, mantenimiento y rehabilitación de los hábitats naturales y de sus funciones en el contexto de los proyectos de campo.

La EIA debe abordar tanto los posibles impactos ambientales positivos como negativos de un proyecto dado, cualquier implicación social relacionada, así como los posibles efectos transfronterizos. La EIA evalúa el potencial ambiental de un proyecto y los riesgos e impactos sociales en su zona de influencia. (FAO, 2012)

En la Actualidad existe gran variedad de métodos para la evaluación de impactos ambientales, Vicente Conesa Fernández formuló una matriz de causa-efecto y esta analiza diez parámetros y a su vez dentro de los mismos establece una serie

de atributos (Tabla 1), que al plasmarlos en la ecuación propuesta por el autor arrojan un resultado numérico, que corresponden a la importancia del impacto, posteriormente establece un rango de 0-100 y a los cuatro rangos propuestos le asigna la clase de efecto que hace referencia a si es compatible, moderado, crítico o severo y a su vez establece un color para cada uno.

Tabla 1. Resumen parámetros de calificación de importancia.

NATURALEZA (\pm)		INTENSIDAD (i)	
Impacto beneficioso	+	Baja	1
Impacto perjudicial	-	Media	2
		Alta	4
		Muy alta	8
		Total	12
EXTENSIÓN (EX)		MOMENTO (MO)	
Puntual	1	Largo plazo	1
Local	2	Mediano plazo	2
Extenso	4	Corto plazo	4
Total	8	Inmediato	4
Crítico	(+4)	Crítico	(+4)
PERSISTENCIA (PE)		REVERSIBILIDAD (RV)	
Fugaz	1	Corto plazo	1
Temporal	2	Mediano plazo	2
Permanente	4	Irreversible	4
SINERGIA (SI)		ACUMULACIÓN (AC)	
Sin sinergismo	1	Simple	1
Sinérgico	2	Acumulativo	4
Muy sinérgico	4		
EFFECTO (EF)		PERIODICIDAD (PR)	
Indirecto (secundario)	1	Irregular o periódico	1
Directo	4	Periódico	2
		Continuo	4

RECUPERABILIDAD (MC)		
Recuperable de manera inmediata	1	
Recuperable a mediano plazo		
Mitigable	2	
Irrecuperable	4	
	8	

A continuación, se describen brevemente los parámetros evaluados por la metodología propuesta por Vicente Conesa.

Naturaleza (±): Se refiere a si el orden del impacto generado es de carácter positivo o negativo.

Extensión (EX). Se refiere al área de influencia del impacto en relación con el entorno del proyecto.

Intensidad (i): Representa la incidencia de la acción causal sobre el factor impactado en el área en la que se produce el efecto.

Momento (MO). El plazo de manifestación del impacto se refiere al tiempo que transcurre entre la aparición de la acción y el comienzo del efecto sobre el medio considerado.

Persistencia (PE). Se refiere al tiempo que, supuestamente, pertenecería el efecto desde su aparición y, a partir del cual el factor afectado retornaría a las condiciones iniciales previas a la acción por medios naturales, o mediante la introducción de medios naturales, o mediante la introducción de medidas correctivas.

Reversibilidad (RV). Se refiere a la posibilidad de construcción del factor afectado por el proyecto, es decir, la posibilidad de retornar a las condiciones

iniciales previas a la acción, por medios naturales, una vez aquella deja de actuar sobre el medio.

Recuperabilidad (MC). Se refiere a la posibilidad de reconstrucción, total o parcial, del factor afectado como consecuencia del proyecto, es decir, la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales previas a la actuación, por medio de la intervención humana (introducción de medidas correctivas).

Sinergia (SI). Este atributo contempla el reforzamiento de dos o más efectos simples. La componente total de la manifestación de los efectos simples, provocados por acciones que actúan simultáneamente, es superior a la que cabría de esperar de la manifestación de efectos cuando las acciones que las provocan actúan de manera independiente no simultánea.

Acumulación (AC). Este atributo da idea del incremento progresivo de la manifestación del efecto, cuando persiste de forma continuada o reiterada la acción que lo genera.

Efecto (EF). Este atributo se refiere a la relación causa-efecto, o sea a la forma de manifestación del efecto sobre un factor, como consecuencia de una acción.

Periodicidad (PR). La periodicidad se refiere a la regularidad de la manifestación del efecto, bien sea de manera cíclica o recurrente (efecto periódico), de forma impredecible en el tiempo (efecto irregular), o constante en el tiempo (efecto continuo).

Seguidamente se presentan los rangos establecidos por el autor de la metodología, para los valores de importancia en donde se ubica un impacto.

En base a estos resultados, se detallan los impactos potenciales directos e indirectos, que actúan fundamentalmente sobre los factores físicos y bióticos, activando los diversos procesos sobre el medio ambiente.

Tabla 2. Rangos de jerarquización de la importancia del efecto.

RANGO DE IMPORTANCIA	CALIFICACIÓN	SIGNIFICADO
< 25	BAJO	La afectación del mismo es irrelevante en comparación con los fines y objetivos del Proyecto en cuestión.
25 ≥ < 50	MODERADO	La afectación del mismo, no precisa prácticas correctoras o protectoras intensivas.
50 ≥ < 75	SEVERO	La afectación de este, exige la recuperación de las condiciones del medio a través de medidas correctoras o protectoras. El tiempo de recuperación necesario es en un periodo prolongado.
≥ 75	CRÍTICO	La afectación del mismo, es superior al umbral aceptable. Se produce una pérdida permanente de la calidad en las condiciones ambientales. NO hay posibilidad de recuperación alguna.

Diferentes investigaciones han evaluado el impacto de la aplicación del Biochar en tierras agrícolas como una medida para mejorar la fertilidad del suelo, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la fijación de carbono en el suelo. El Biochar es un material rico en carbono obtenido cuando la biomasa, como madera, estiércol u hojas, se calienta en un recipiente cerrado sin oxígeno. Actualmente, existen varios procesos para producir Biochar, incluyendo, entre otros, la pirólisis lenta, pirólisis rápida y la conversión hidrotérmica (Harsono et al, 2013).

La producción de Biochar es un proceso relativamente nuevo en Suramérica, en donde únicamente se ha producido Biochar a partir de biomasa vegetal y de gallinaza. A nivel mundial se han desarrollado diferentes estudios en los que se ha obtenido Biochar a partir de biomásas diferentes, por ejemplo, residuos de la explotación porcícola para la generación de Biochar (Pastor, et al., 2010), pulpa de celulosa en Indonesia (Steiner, 2010) y muchos estudios a partir de biomasa de palma de aceite (Kong, 2014) (Harsono, 2015) confirman el potencial biomásico que tienen los subproductos de este cultivo para la producción de Biochar. Colombia es el cuarto productor de palmas de aceite en el mundo presentando el departamento del Cesar 15 zonas de 58 núcleos en todo el país (Portafolio.co, 2014), por esto y lo mencionado anteriormente el residuo de esta producción agrícola es de gran potencial para ser usado como biomasa en escalamiento piloto con pirólisis y de ser posible a escala industrial.

4.3. MARCO CONCEPTUAL

Dado que el enfoque central estará representado hacia la dimensión ambiental y exergoeconómica, será necesario plantear algunos parámetros que sirvan de ejes conceptuales sobre los cuales se apoya la lectura interpretativa del escrito.

4.3.1. Bio-Carbón o Biochar

Es un nombre para el carbón cuando se utiliza para fines particulares, especialmente como una enmienda del suelo. Como la mayor parte del carbón de leña, el Biochar es creado por pirolisis de la biomasa. El Biochar es usado para el secuestro de CO₂, reduce la presión sobre los bosques, y por lo tanto tiene el potencial de ayudar a mitigar el cambio climático. El Bio - carbón es un material rico en carbono que puede permanecer en el suelo durante miles de años. Se obtiene de la carbonización de la biomasa y se puede añadir a los suelos con la intención de mejorar las funciones de este; el Biochar reduce las emisiones de la biomasa que de otro modo se degradan naturalmente a gases de efecto invernadero.

El Biochar se puede producir a través de pirólisis (descomposición de materia orgánica, causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno) con una temperatura de 300°C a 500°C por medio de un horno, a medida que la temperatura aumenta el presente O₂ en el aire es consumido por las partículas de coque de combustible y las muestras se piroliza en la atmósfera inerte generada (Mendez, Paz-Ferreiro, Araujo, & Gasco, 2014).

Los sistemas que convierten biomasa en energía y que producen carbón vegetal como un subproducto ofrecen la oportunidad de combinar la producción de energía renovable, el secuestro de carbono y la restauración del suelo; en la actualidad se registran avances en las tecnologías para la producción de Biochar, generando propiedades y beneficios con resultados diferentes en cuanto a adsorción de metales pesados, contaminantes orgánicos e inorgánicos. (Tan et al., 2015).

4.3.2. Exergía

Se denomina “exergía” a la cantidad máxima de energía que puede transformarse en trabajo útil, entendiendo por útil el que no se emplea en actuar contra el ambiente de esta manera la idea es que parte de la energía de un sistema se puede aprovechar para realizar trabajo mecánico, eléctrico o de otro tipo. El segundo principio de la termodinámica nos establece limitaciones en cuanto a la cantidad de trabajo que podemos realizar, pero existe además una limitación práctica en cuanto a que sólo se puede realizar trabajo si el sistema almacena una energía respecto al ambiente que le rodea.

La exergía se consume por completo cuando la presión y la temperatura (y el resto de variables de estado como la altura sobre el nivel del mar, el voltaje, etc. que lo diferencian de lo que le rodea) se igualan a la del entorno, una vez que se iguala la temperatura del sistema con la del ambiente y se iguala su presión con la exterior (llegándose al equilibrio mecánico), ya no se puede extraer energía

adicional. Se dice que en ese caso el sistema ha alcanzado el “estado muerto”. (Universidad de Sevilla, 2015).

4.3.3. Factores Ambientales

Bajo el nombre de Factores o Parámetros ambientales, englobamos los diversos componentes del Medio Ambiente entre los cuales se desarrolla la vida en nuestro planeta. Son el soporte de toda actividad humana. Son susceptibles de ser modificados por los humanos y estas modificaciones pueden ser grandes y ocasionar graves problemas, generalmente difíciles de valorar ya que suelen ser a medio o largo plazo, o bien problemas menores y entonces son fácilmente soportables (Conesa, 2006).

4.3.4. Impacto Ambiental (IA)

Se dice que hay impacto ambiental cuando una acción o actividad produce una alteración, favorable o desfavorable, en el medio o en alguno de los componentes medio. Esta acción puede ser un proyecto de ingeniería, un programa, un plan, una ley o una disposición administrativa con implicaciones ambientales. Hay que hacer constar que el término impacto no implica negatividad ya que éstos pueden ser tanto Positivos como negativos. El impacto de un proyecto sobre el medio ambiente es la diferencia entre la situación del medio ambiente futuro modificado, tal y como se manifestaría como consecuencia de la realización del proyecto, y la situación del medio ambiente futuro tal como habría evolucionado normalmente sin tal actuación, es decir, la alteración neta (positiva o negativa en la calidad de vida del ser humano) resultante de una actuación (Conesa, 2006).

4.3.5. Indicador Ambiental

Es una variable que, mediante la síntesis de la información ambiental, pretende reflejar el estado del medio ambiente, o de algún aspecto de él, en un momento

y en un espacio determinados, y que por ello adquiere gran valor como herramienta en los procesos de evaluación y de toma de decisiones políticas sobre los problemas ambientales. Los indicadores ambientales surgieron como respuesta a la creciente preocupación social por los aspectos ambientales del desarrollo económico y social, y entroncan con la dilatada experiencia existente en el campo de los indicadores socioeconómicos. Los indicadores siguen diferentes marcos organizativos, que pueden ser causales, temáticos, sectoriales, ecosistémicos. Estos marcos no son en absoluto excluyentes, y de hecho se cruzan frecuentemente. Funciones principales de los indicadores ambientales: reducir el número de medidas y parámetros que normalmente se requieren para ofrecer una presentación lo más cercana posible a la realidad de una situación. Simplificar los procesos de comunicación. (Ecured, 2014).

Los indicadores ambientales manejados por el IDEAM buscan apoyar la generación de conocimiento, y servir como herramienta en la toma de decisiones informadas a través de la generación de información estratégica organizada de forma sintética y producida periódicamente. Para tal fin se han organizado un grupo de estadísticas seleccionadas y estratégicas que tienen como propósito brindar información acerca del estado y dinámica de los recursos naturales y sus interrelaciones con la sociedad de forma sintética y fácilmente comprensible.

Los indicadores se encuentran clasificados de acuerdo a las siguientes temáticas: (a) Agua: indicadores que informan sobre el estado y evolución de la oferta, demanda y calidad del agua en el país; (b) Aire: indicadores relacionados con la contaminación atmosférica. (c) Clima: información relacionada con la atmósfera, el tiempo y el clima del país, aquí se podrán consultar las características climatológicas de las diferentes regiones del territorio nacional; (d) Ecosistemas: indicadores que hacen referencia a los ecosistemas de Colombia donde se incluyen los recursos forestales, como el indicador de Variación del volumen de madera otorgado para aprovechamiento; la dinámica de las coberturas de la tierra, el monitoreo y seguimiento del estado de la calidad de los suelos y las tierras y la dinámica de los glaciares; (e) Suelos y

tierras: indicadores relacionados con el monitoreo y seguimiento del estado de la calidad de los suelos; (f) Cambio climático: indicadores que guardan relación con las emisiones de GEI en el país, como el indicador de calidad del aire y el indicador de Emisiones Netas Nacionales de GEI per cápita; (g) Uso de los recursos y residuos peligrosos: indicadores sobre la generación y manejo de residuos o desechos peligrosos originados por las diferentes actividades productivas y sectoriales del país así como también indicadores sobre el uso, aprovechamiento o afectación de los recursos naturales renovables por las actividades económicas en el país (IDEAM, 2014).

4.3.6. Pirólisis

La pirólisis se define como un proceso termoquímico mediante el cual el material orgánico de los subproductos sólidos se descompone por la acción del calor, en una atmósfera deficiente de oxígeno y se transforma en una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles, residuos secos de carbón y agua. Los gases combustibles pueden servir para accionar motores Diesel, para producir electricidad, o para mover vehículos.

El proceso de pirólisis exige un aporte térmico, que puede provenir de la combustión de la alimentación o de los productos de pirogenación. Los sistemas pirolíticos que se han desarrollado se agrupan en dos categorías; primeramente, el pirólisis convencional puede efectuarse a baja temperatura, o a temperatura media. Los procesos a baja temperatura son hasta los 550°C, y se emplean para la producción de aceites y alquitranes; en tanto que los procesos de temperatura media se llevan entre los 550°C a 800°C, con lo cual se obtiene la producción de metano e hidrocarburos superiores. Por otro lado, la pirólisis a alta temperatura se efectúa a temperaturas superiores a los 800°C, con lo cual se logra la producción de gas con bajo poder calorífico (Masera et al., 2005). Esta última pirólisis denominada pirólisis súbita (Fast), que opera en tiempos cortos y a altas temperaturas (800°C- 1.000°C), permite obtener una pequeña parte de material sólido (10%) y convierte un 60% en gas rico en hidrógeno y monóxido de

carbono. Esto hace que la pirólisis súbita pueda competir con los métodos de gasificación convencionales (AgroWaste, 2013).

Actualmente, el proceso de pirólisis rápida es de gran importancia práctica, es un proceso con una alta velocidad de transferencia de calor a la alimentación y un corto tiempo de residencia del vapor caliente en la zona de reacción. Este proceso ha alcanzado un importante éxito comercial en la producción de sustancias químicas y está siendo activamente desarrollada para la producción de combustibles líquidos.

Los resultados de la pirólisis dependen de las condiciones de operación, considerándose los parámetros más importantes la velocidad de calentamiento; el tipo de reactor, que tiene gran importancia en la distribución de productos, por las distintas transferencias de calor, su elección es función del tamaño de partícula, ya que para partículas grandes la velocidad de transmisión de calor disminuye, a elevadas velocidades se favorece la aparición de líquidos condensables en zonas del pirolizador con menor temperatura y de gases en los puntos calientes, el rendimiento en carbón vegetal aumenta a velocidades de calentamiento bajas y tamaños de partícula grandes, en detrimento de productos volátiles, gases y líquidos; el tiempo de residencia del gas y de las partículas; la temperatura elevada favorece la producción de gas por craqueo y gasificación del residuo carbonoso con el vapor de agua, el monóxido de carbono y el hidrógeno, etc, gases producidos in situ; y la presión. Con diferentes configuraciones de reactor se ha demostrado que se pueden lograr rendimientos cercanos al 75% basado en el peso inicial de la alimentación seca.

4.3.7. Termoeconomía

El modelo termoeconómico representa matemáticamente la estructura productiva, que es una representación gráfica de la distribución de los recursos. Los flujos en la estructura productiva describir las relaciones productivas entre todos los componentes basados en la estructura física, cada componente en la

estructura física estará numerada para el análisis termoeconómico posterior, bajo las condiciones de diseño, se muestra los principales datos termodinámicos en el sistema propuesto combinado por ciclos, las definiciones de combustible de productos sean biomasa de origen animal, vegetal, electricidad, bio-aceite o demás, representaran el flujo de trabajo y el flujo de exergía.

La estructura productiva se compone de unidades físicas y ficticias representadas por un rectángulo, el diamante y la elipse, las líneas que conectan las diferentes unidades productivas son recursos exergía (combustibles y productos). Las flechas de entrada que entran en el rectángulo serán los combustibles de los correspondientes componentes, y las flechas representan los productos de salida. Todos los diamantes y las elipses, que se aplicaran son dispositivos ficticios y no se corresponden con los componentes físicos del sistema de ciclo combinado (Yao et al., 2013).

Para aplicar el análisis termoeconómico es necesario utilizar una metodología con enfoque específico hacia los sistemas térmicos, su interacción con el entorno y el flujo de variables (internas y externas) para esto la metodología se basa en el costo específico de la exergía (SPECOC, the specific exergy costing) enfoque en el que el combustible y el producto de un componente se definen mediante la adopción de un registro sistemático de todas las adiciones de exergía, la absorción de todos los flujos del sistema, y los costos se calculan mediante la aplicación de los principios básicos de administración de Empresas. La metodología se basa en las siguientes etapas: (a) Identificación de los flujos de exergía, (b) Determinación del recurso y el producto y (c) Definición de las ecuaciones de costos con base en los principios básicos de la administración de empresas; la cual se complementa con un modelo de optimización por la complejidad del problema planteado. De este modo, se establece una relación directa entre las definiciones de combustible y de productos para un componente y las ecuaciones de costos correspondientes; de esta forma en particular se muestra cómo obtener definiciones detalladas de eficiencias exergéticas utilizando formas separadas de exergía (térmica, mecánica y química) y cómo,

de acuerdo con estas definiciones, llevar a cabo una evaluación de los costos asociados a todas las corrientes de entradas y salidas de los componentes del sistema. Para este caso, las ecuaciones de costo se presentan en forma de matriz general (Lazzaretto & George, 2006).

4.4. MARCO CONTEXTUAL

La agroindustria de la palma de aceite en Colombia ha mostrado un gran dinamismo en la presente década con relación a las otras industrias agrícolas. Se ha notado un crecimiento anual del área sembrada de 9% en los últimos 5 años; hoy en día el aceite de palma representa el 93% de la producción nacional de aceites y grasas y la industria de biocombustible ha permitido una ampliación del mercado doméstico (ANEIA, 2016).

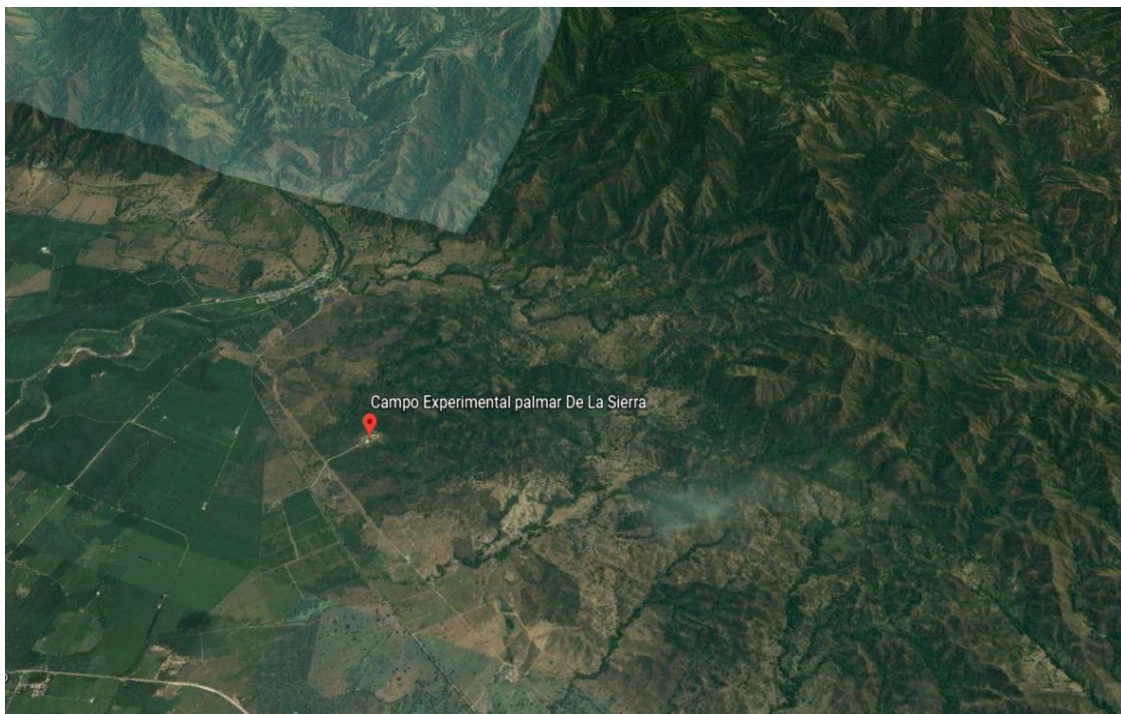


Figura 1. Vista satelital de Campo Experimental El Palmar De La Sierra.

Fuente: Google Earth, (2019).

El sur del Cesar es una zona selvática de la cuenca del Magdalena Medio, con buena productividad en el cultivo de la palma africana, gracias a su clima y suelos

regados por numerosos afluentes del río San Alberto y Lebrija. El clima es caliente y sus precipitaciones anuales están entre los 3.000 y 4.000 milímetros con diez o doce meses de lluvia. En este sector se encuentra el 19.7% del total de las tierras más aptas para la siembra de palma de aceite de Colombia y el 54.7% de las de la Costa Caribe. Los principales cultivos están ubicados en los municipios de San Alberto, San Martín, Codazzi y El Copey.

El Campo Experimental Palmar de La Sierra (CEPS) perteneciente a las empresas Cenipalma y Fedepalma, se encuentra ubicado en la Zona Norte de Colombia, bajo las estribaciones de La Sierra Nevada de Santa Marta de la cual recibe su nombre. Para llegar a él se toma la troncal de oriente sobre el km 64 vía Santa Marta - Fundación, en la vereda Guacamaya Macondo del municipio Zona Bananera del departamento de Magdalena (Cenipalma, 2019).



Figura 2. Ubicación geográfica de la sede Sabanas de la Universidad Popular del Cesar dentro de la ciudad de Valledupar - Cesar.

Fuente: Google Maps, (2019).

En el Campo experimental, Cenipalma desarrolla sus investigaciones con un énfasis en el uso eficiente del recurso hídrico y de sus cultivos se obtienen los residuos biomásicos como materia prima para los experimentos relacionados con la presente investigación. Cuentan con una extensión de terreno de 410 hectáreas de las cuales 97 hectáreas son de área cultivada. De los residuos industriales generados en estas instalaciones se obtiene la materia de evaluación para este trabajo de investigación.

El desarrollo experimental de la investigación se lleva a cabo en el campus universitario Sede Sabanas perteneciente a la Universidad Popular del Cesar, ubicado en la Diagonal 21 #29-56 del barrio Sabanas del Valle en la ciudad de Valledupar - Cesar - Colombia.

4.5. MARCO LEGAL

La legislación ambiental en Colombia organiza un sistema de planificación bajo el cual el ambiente debe ser preservado durante cualquier tipo de interacciones que el hombre tenga con este.

Tabla 3. Normatividad ambiental colombiana relacionada.

<p>Constitución política de Colombia. En sus artículos 8,49, 58, 67, 79, 80, 82, 333, 334.</p>	<p>El reconocimiento que el Constituyente de 1991 hizo del Ambiente como elemento esencial para el desarrollo humano, al igual que el establecimiento de su defensa como objetivo de principio, ha llevado a que se catalogue a la actual Constitución Política Colombiana como una constitución ecológica con un total de 33 disposiciones constitucionales que a juicio del alto tribunal, regulan constitucionalmente "la relación de la sociedad con la naturaleza", y que en consecuencia, reconocen al ambiente un interés jurídico superior en el contexto colombiano.</p>
---	---

<p>Ley 99 de 1993. Por el cual se crea el Ministerio de Ambiente</p>	<p>Se establecen los principios ambientales universales contenidos en la Declaración de Río de Janeiro de junio de 1992 sobre Ambiente y Desarrollo, la creación y objetivos del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible como organismo rector de la gestión del ambiente y de los recursos naturales renovables junto a la presidencia de la república.</p>
<p>Ley 9 de 1979. Título 1 de la protección del ambiente.</p>	<p>Se establecen las normas generales que servirán de base a las disposiciones y reglamentaciones necesarias para preservar, restaurar y mejorar las condiciones sanitarias en lo que se relaciona a la salud humana; los procedimientos y las medidas que se deben adoptar para la regulación, legalización y control de los descargos de residuos y materiales que afectan las condiciones sanitarias del Ambiente.</p>
<p>Ley 685 de 2001. Código de minas.</p>	<p>Por el cual la ley ordena la recuperación de los suelos o áreas degradadas por las actividades mineras, el aprovechamiento y utilización adecuada de los recursos naturales.</p>
<p>Decreto 1076 de 2015. Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.</p>	<p>En materia ambiental se compilaron en un solo decreto aproximadamente 1650 artículos que se encontraban dispersos en 84 decretos reglamentarios. El decreto contiene tres Libros el primero de ellos referente a la estructura del sector ambiental, el segundo al régimen reglamentario del sector ambiente y el tercero a disposiciones finales.</p>
<p>Decreto 2811 de 1974.</p>	<p>Lograr la preservación y restauración del ambiente y la conservación, mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables, según criterios</p>

<p>Código de recursos naturales y protección del ambiente.</p>	<p>de equidad que aseguran el desarrollo armónico del hombre y de dichos recursos, la disponibilidad permanente de éstos, y la máxima participación social para beneficio de la salud y el bienestar de los presentes y futuros habitantes del territorio Nacional.</p>
<p>Decreto 948 de 1995. Previsión de contaminación atmosférica.</p>	<p>Se reglamenta la regulación en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire. tiene por objeto definir el marco de las acciones y los mecanismos administrativos de que disponen las autoridades ambientales para mejorar y preservar la calidad del aire, y reducir el deterioro del ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana ocasionados por la emisión de contaminantes químicos y físicos al aire; a fin de mejorar la calidad de vida bajo el principio del desarrollo sostenible.</p>
<p>Ley 164 de 1994. Por medio de la cual se aprueba la “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, hecha en Nueva York el 9 de mayo de 1992.</p>	<p>El objetivo último de la presente Convención 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 antropógenas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.</p>
<p>Ley 629 de 2000.</p>	<p>Con el fin de promover el desarrollo sostenible se aplicará y/o seguirá elaborando políticas y medidas</p>

<p>Por medio de la cual se aprueba el “Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, hecho en Kioto el 11 de diciembre de 1997.</p>	<p>de conformidad con sus circunstancias nacionales como la promoción de modalidades agrícolas sostenibles a la luz de las consideraciones del cambio climático y la investigación y desarrollo de formas nuevas y renovables de energía, de tecnologías de secuestro del dióxido de carbono y de tecnologías avanzadas y novedosas que sean ecológicamente racionales.</p>
--	---

De esta manera queda resumida la base legal sobre la cual se deben tomar las decisiones ambientales en relación al principio de desarrollo sostenible que conduce al crecimiento económico y a la elevación de la calidad de vida, sin agotar la base de los recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de las necesidades propias.

5. MARCO METODOLÓGICO

5.1. LÍNEA Y SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Este proyecto se enmarca bajo la línea de investigación Producción más Limpia y Tecnologías Ambientales del programa de ingeniería ambiental y sanitaria de la Universidad Popular del Cesar, ya que fomenta la investigación con relación al buen uso de energía y la mitigación de impactos durante el desarrollo de los procesos industriales, con los consiguientes beneficios económicos y ambientales.

5.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Las investigaciones y en particular los diseños experimentales intentan establecer básicamente relaciones causa-efecto, consiste en la manipulación de una (o más) variable experimental no comprobada, en condiciones controladas, con el fin de describir de qué modo o porqué causa se produce una situación o acontecimiento particular. El experimento provocado por el investigador, le permite introducir determinadas variables de estudio manipuladas por él, para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto en las conductas observadas.

Para la implementación de la investigación experimental se aplica un nuevo sistema, modelo, tratamiento, programa, método o técnicas para mejorar y corregir la situación problemática, que ha dado origen al estudio de investigación (Alfaro, 2012).

5.3. POBLACIÓN ESTUDIO Y MUESTRA POBLACIONAL

La población objeto del estudio de evaluación ambiental y diseño experimental del proceso termoeconómico de producción de Biochar son los residuos biomásicos industriales de la palma, para lo que se toman como ejemplares de

trabajo el cuesco de palma de aceite obtenido de los cultivos del campo experimental de Cenipalma El Palmar de La Sierra.

5.4. DESARROLLO METODOLÓGICO

Los pasos metodológicos detallados se describen y desarrollan a continuación:

Etapa 1. Evaluación de condiciones de operación.

En la Primera etapa se evalúan las condiciones y variables de operación dentro de los hornos que afectan las variables internas y externas del sistema energético de estudio.

Actividad 1.1. Se realizan pruebas del proceso de obtención de Biochar en un horno experimental en operación.

Este equipo utilizado para la experimentación con muestras de biomasa para el proceso de obtención de Biochar cuenta con un sistema extracción previo tratamiento de los gases, los cuales evacuan a través de una chimenea desmontable, adicionalmente un sistema de calentamiento operado por resistencias.

Actividad 1.2. Se realizan pruebas del proceso de obtención de Biochar en un horno a escala piloto en pruebas para puesta a punto perteneciente a la Universidad Popular del Cesar; con esta información se consolida una base de datos experimental sobre las corrientes de flujo de los sistemas en estudio.

El equipo de Análisis Termo Gravimétrico o TGA por sus siglas en inglés (Thermo Gravimetric Analysis) es un equipo destinado a hallar, experimentalmente, valores de propiedades físicas o químicas de distintos materiales. Este equipo ha sido diseñado para analizar muestras de biomasa cruda, biomasa torrefactada, astillas de biomasa, pellets y briquetas de biomasa para la

producción de Biochar, ya que su horno alcanza temperaturas cercanas a los 600 °C. El horno de calentamiento es un horno vertical equipado con un set de resistencias en forma de U, cada una con una potencia de 1.5 KW, conectadas en paralelo. Enchaquetado y aislado térmicamente con lana de vidrio, el horno cuenta con un espacio reservado para la retorta, en donde se encuentran instaladas las tres resistencias sobre un soporte de cerámica refractaria. La retorta, elaborada con acero inoxidable (al igual que el resto del horno) tiene una capacidad para 150 kg de carga y lleva instalado el termopar que permite medir la temperatura a la que se encuentra el material dentro de la misma.

Etapa 2. Análisis de metodologías de escalamiento.

En esta etapa se analizan metodologías de escalamiento para el desarrollo del modelo termodinámico del sistema basado en el concepto recurso-producto y el de costos exergético específico (SPECO).

Actividad 2.1. Se obtienen datos de las corrientes de los dos sistemas térmicos, como temperatura, presión, potencia, flujo de gases, flujo de líquidos a diferentes condiciones de operación del sistema.

Actividad 2.2. Conocer información general del entorno de la industria nacional, como el costo del sistema, costo de tecnologías nuevas, costo y disponibilidades de los combustibles y con la información económica complementaria del entorno.

Actividad 2.3. Se establecen el balance energético con lo que queda formulado un problema de optimización que involucra el análisis de la metodología SPECO.

Etapa 3. Aplicación de métodos de evaluación exergoeconómica y ambiental.

Se aplican métodos de evaluación exergoeconómica a diferentes escalas del sistema de producción de Biochar mediante reglas de escalado y se obtienen los

impactos ambientales que genera cada etapa del proceso de producción y la importancia de los mismos.

Actividad 3.1. Aplicación de métodos de evaluación exergoeconómica a diferentes escalas del sistema de producción de Biochar mediante reglas de escalado usando la regla de factor de seis décimas o six tenth rule. Esta norma establece que si la unidad b con una capacidad tiene un costo que se conoce, entonces una unidad similar con una X veces la capacidad de la primera unidad costará X 0.6 veces el costo de la unidad inicial (Peters et al., 2003; Garcia-Perez et al., 2012).

Actividad 3.2. Una vez aplicada la regla de factor de seis décimas a los resultados obtenidos mediante los métodos de evaluación exergoeconómica y se contrasta con datos de industrias existentes.

Actividad 3.3. Identificación de las acciones susceptibles de producir impactos y factores ambientales susceptibles de recibir impactos durante el proceso de producción experimental del Biochar.

Actividad 3.4. Determinación de la significancia de cada una de las afectaciones que se causan al medio ambiente a partir del proceso de producción del Biochar mediante la implementación de la metodología Conesa.

Etapa 4. Aplicación métodos de optimización.

En este punto se aplican métodos de optimización exergoeconómica y ambiental a diferentes escalas del sistema de producción de Biochar mediante reglas de escalado aportadas por la literatura en contraste con industrias existentes.

Actividad 4.1. El modelo de optimización se plantea con ecuaciones lineales obtenidas de SPECO, variables estocásticas del entorno, ecuaciones no lineales de escalado y restricciones.

Aunque reconocemos que el concepto de "costo" es inevitablemente subjetivo, la idea de fundar este concepto en adiciones y eliminaciones de exergía a lo largo de las corrientes de exergía, o, en otras palabras, en el consumo y suministro de exergía "evaluado" a lo largo de estas corrientes, es, en nuestra opinión, el criterio que mantiene el concepto de "costo" más cercano al concepto de "consumo" y genera, por lo tanto, un vínculo estricto entre Costo y desarrollo físico del proceso. En este sentido, creemos que el enfoque SPECO expresa el mayor esfuerzo posible en la dirección de "validar" los valores de costo calculados.

Actividad 4.2. Diseño de estrategias de prevención, mitigación y compensación a los diferentes aspectos evaluados ambientalmente de modo que se evidencia la optimización ambiental del sistema de producción, mediante fichas de manejo ambiental.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se presentan los datos obtenidos del desarrollo metodológico implementado para el análisis termoeconómico del proceso pirolítico para la obtención de Biochar a partir de residuos biomásicos industriales, inicialmente se realiza un resumen de cada una de las etapas del proceso en general, se tienen en cuenta los insumos y equipos requeridos en cada periodo de la producción, así como los productos resultantes de los mismos.

Tabla 4. Proceso de producción de Biochar.

INSUMO	ETAPA	PRODUCTO
Residuos biomásicos industriales de la palma	Recolección y almacenamiento	Producto para envío a la planta experimental
Vehículo Combustible Conductor/ operador de carga	Transporte	Ruido Emisión de gases y micropartículas Empleo
Biomasa Horno Suministro de energía eléctrica Nitrógeno Solución de NaOH	Pirólisis	Biochar Gases Olor Aceites - Alquitranes Calor
Suelos deteriorados Biochar	Uso	Fijación de carbono Mejor fertilidad en suelos Regulación de PH

Se consideran etapas desde la obtención de la materia prima hasta la utilización del producto final, de modo que quede detallado el proceso de producción del Biochar y con el fin de abarcar todos los costos del proceso y analizar cada punto objetivamente en la evaluación ambiental de la producción.

Condiciones de operación

Como primera medida para el reconocimiento del proceso de pirólisis se evalúan las condiciones de operación dentro de cada horno que puedan afectar las variables internas y externas del sistema energético en estudio. De acuerdo con la tabla 5, las condiciones de operación que afectan las variables externas e internas de los sistemas se encuentran el tiempo de pirolisis el cual puede afectar a la calidad del Biochar.

Tabla 5. Variables Internas y externas de operación de los sistemas energéticos en estudio.

Sistemas energéticos	Horno experimental	Horno piloto
<i>Condiciones de operación</i>		
Tiempo del proceso	85 min	145 min
Flujo de nitrógeno	0,5 l/min	3 l/min
Volumen de cámara de pirolisis	2064 cm ³	10719 cm ³
Cantidad de biomasa	70g	2600g
Rampas de calentamiento	25 min / 60 min	20 min / 30 min 35 min / 60 min
<i>Variables internas</i>		
Velocidad de calentamiento real	10,61 °C/min	4,26 °C/min
Energía liberada	-	-
Energía absorbida	-	-
Temperatura real	30-450 °C	30-450 °C
<i>Variables externas</i>		
Calidad del cuesco y Biochar	-	-
Temperatura de los gases	450	450
Consumo de energía eléctrica	0,75 kWh	6,4 kWh
Costo de energía eléctrica	\$ 4.832,63	\$ 6.891,51

Fuente: autor.

El flujo de nitrógeno gaseoso dentro de la capsula de calentamiento es un componente esencial para la formación de una atmosfera inerte para que en consecuencia de las altas temperaturas a las que será sometido el material se evita la combustión y quema del mismo; el tiempo que se programe para la pirólisis influye en la absorción y liberación de energía del material, por lo tanto afecta la calidad del Biochar obtenido, un incremento en los tiempos de operación también se traduce en la elevación de los costos de consumo; las rampas de calentamiento condicionan la velocidad real interna de los hornos. La presión interna durante el proceso es relativamente normal.

Tabla 6. Condiciones de operación del horno experimental.

Condiciones iniciales		Condiciones finales	
Variables	Cantidad	Variables	Cantidad
Masa del cuesco (kg)	0,07	Masa del Biochar (kg)	0,023
Volumen de nitrógeno (L)	42,5	Volumen de gases (L)	300,58
Presión (atm)	1,02	Presión (atm)	1
Temperatura (°K)	303, 15	Temperatura (°K)	723,15
Tiempo (min)	85	Tiempo (min)	-
Masa de nitrógeno (kg)	0,024	Masa de los gases (kg)	0,071

El horno experimental cuenta con un sistema de control lógico y con una distribución de gases, con lo que se tiene versatilidad en la experimentación, debido a que se puede controlar las rampas de calentamiento y regular la atmosfera de nitrógeno.

Tabla 7. Condiciones de operación de la planta piloto.

Condiciones iniciales		Condiciones finales	
Variables	Cantidad	Variables	Cantidad
Masa del cuesco (kg)	2,6	Masa del Biochar (kg)	1,16
Volumen de Nitrógeno (L)	435	Volumen de gases (L)	7.154,7
Presión (atm)	1,02	Presión (atm)	1
Temperatura (°K)	303, 15	Temperatura (°K)	723,15

Condiciones iniciales		Condiciones finales	
Tiempo (min)	180	Tiempo (min)	-
Masa de Nitrógeno (kg)	0,25	Masa de los gases (kg)	1,69
Constante de los gases (atm/mol°K)	0,082	Constante de los gases (atm/mol°K)	-

Este dispositivo piloto cuenta con un sistema de control de temperatura y temporizador para programar las rampas a temperatura y tiempo deseados, además de contar con un sistema de inyección de gases que permite establecer la atmosfera requerida. Se programa para trabajar con dos (2) rampas de temperatura, en el primer ascenso de temperatura se elimina la humedad del material y en la segunda se alcanzan los 450°C para el proceso de pirólisis lenta.

Balance de masa

A continuación, se analizan metodologías de escalamiento para el desarrollo del modelo termodinámico del sistema basado en el concepto recurso-producto y el de costos exergético específico (SPECO).

Se realiza un análisis termogravimétrico a una muestra del material biomásico con el fin de conocer el comportamiento del peso del mismo en función a la temperatura a la que está siendo sometido, el resultado se muestra en el Gráfico 1 que nos indica que de la totalidad de la masa de cuesco sometida al proceso de pirólisis se obtiene al final del proceso aproximadamente el 31,08% de la masa inicial; se relacionan las pendientes más inclinadas de la curva del peso en relación a la temperatura (curva verde) con los picos o puntos máximos de la curva de la derivada del peso o velocidad de pérdida del material (curva azul).

Se observa una pequeña curvatura en la derivada del peso alrededor de los 100°C lo que correspondería a el porcentaje de humedad que contenía el material de 9.422%; solo después de los 200°C el peso del material empieza a variar de manera significativa y la mayor velocidad de diferenciación de la masa

se da alrededor de los 342.31°C, donde se pueden llegar a consumir cerca del 25% de la masa, lo que suma al material volátil que se desprende antes de los 400°C que representa en total el 58,632% de la masa del material pirolizado.

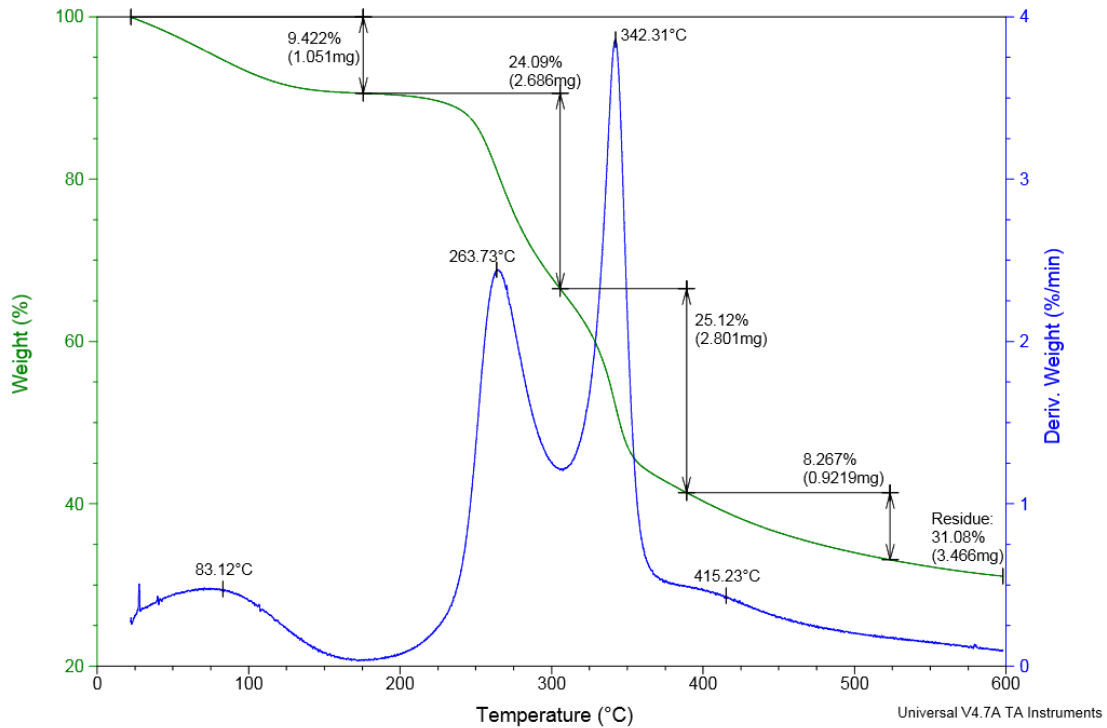


Gráfico 1. Termograma muestra de cuesco.

El balance de masa para cada uno de los sistemas energeticos evaluados se realizó aplicando la Ecuacion (1), con la cual se puede obtener la masa total de los gases m_{gas} a la salida del horno durante el proceso.

$$m_c + m_{N_2} = m_B + m_{gas} \quad (1)$$

Donde m_c es la masa del cuesco (materia prima) para el tratamiento y m_{N_2} corresponde a la masa del nitrógeno gaseoso que es inyectado al sistema; como elementos de salida se considera la masa obtenida de Biochar (m_B) y los gases evacuados.

Teniendo en cuenta que la cantidad de nitrógeno que entra y sale del sistema se mantiene la masa de los gases o alquitranes producidos durante el proceso es de 0.047 kg en el horno experimental y de 1,44 kg para la planta piloto.

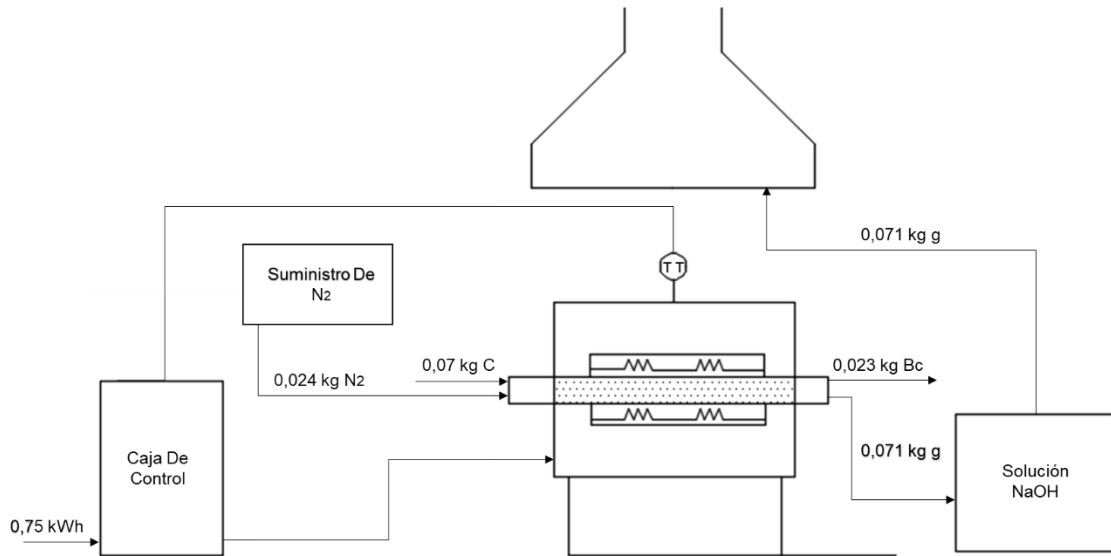


Figura 3. Flujo másico de horno experimental.

En la Figura 3, se representa el horno experimental con los flujos de masa que se dan en el sistema durante el proceso de pirólisis, donde *C* identifica a la masa de Cuesco que es ingresada al sistema (0,07 kg) y *Bc* la masa de Biochar que se obtiene al final del proceso (0,023 kg).

Para el horno piloto, igualmente se representan los flujos masicos en la Figura 4, se incluyen en las representaciones la cantidad de nitrógeno gaseoso que es suministrado al sistema, el total de los gases generados, que en ambos casos se hace pasar por una cámara con solución de hidróxido de sodio (NaOH) que actúa como una trampa de gases y la corriente de energía requerida para la puesta en funcionamiento de cada uno de los equipos.

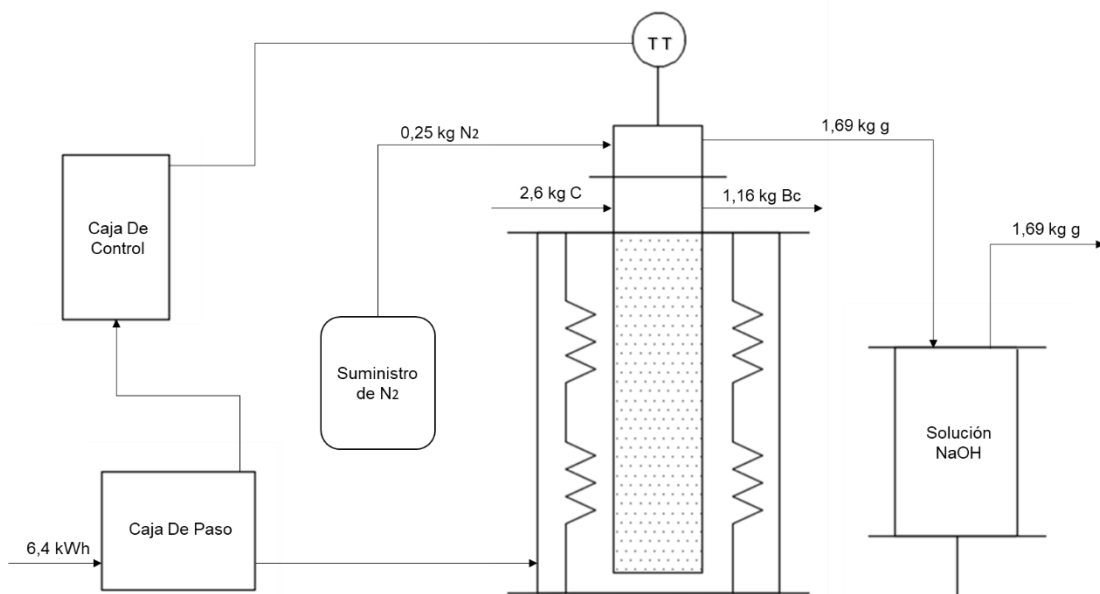


Figura 4. Flujo másico de planta piloto.

Durante la ejecución de los equipos de pirólisis se tomaron datos de temperatura en relación al tiempo transcurrido con el fin de conocer la tasa de calentamiento o velocidad real de calentamiento con la que estaban trabajando los sistemas energéticos, estas se muestran los gráficos 2 y 3.

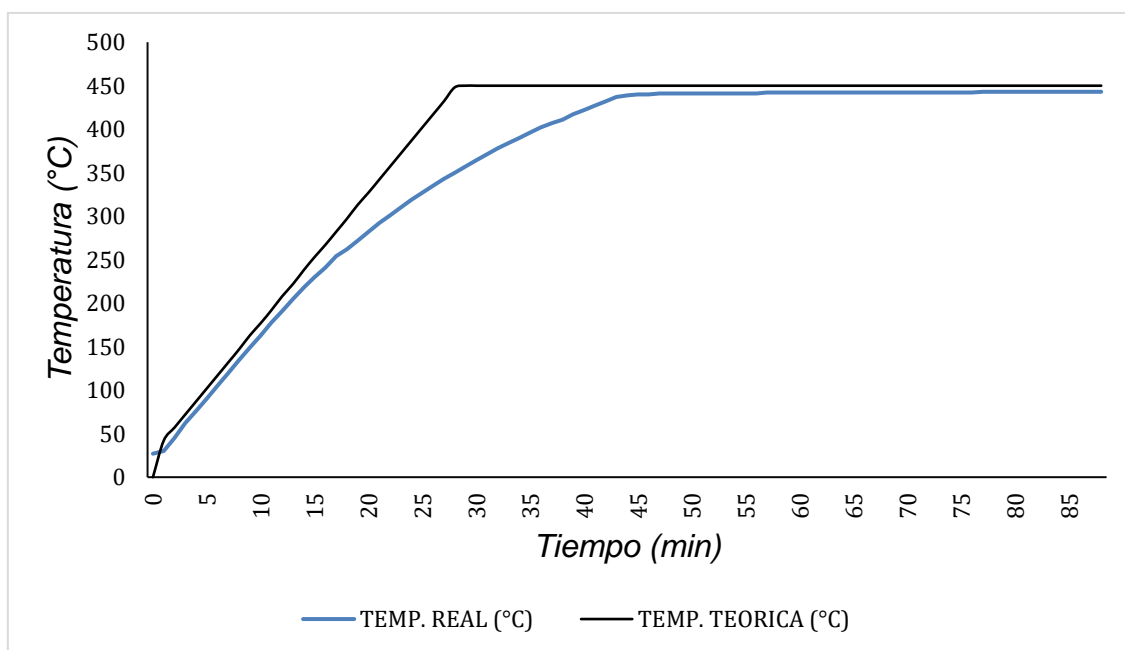


Gráfico 2. Tasa de calentamiento del horno experimental.

En el Gráfico 1, se observa el comportamiento real de la temperatura interna del horno experimental, donde se evidencia que este equipo no logra alcanzar la velocidad de calentamiento que se incorpora teóricamente, el promedio de velocidad de calentamiento real que corresponde al tiempo teórico del ascenso de temperatura es de $11,68\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, que es sin embargo una mayor velocidad de calentamiento que la observada en el tasa de calentamiento reflejada en el Grafico 3 para la planta piloto.

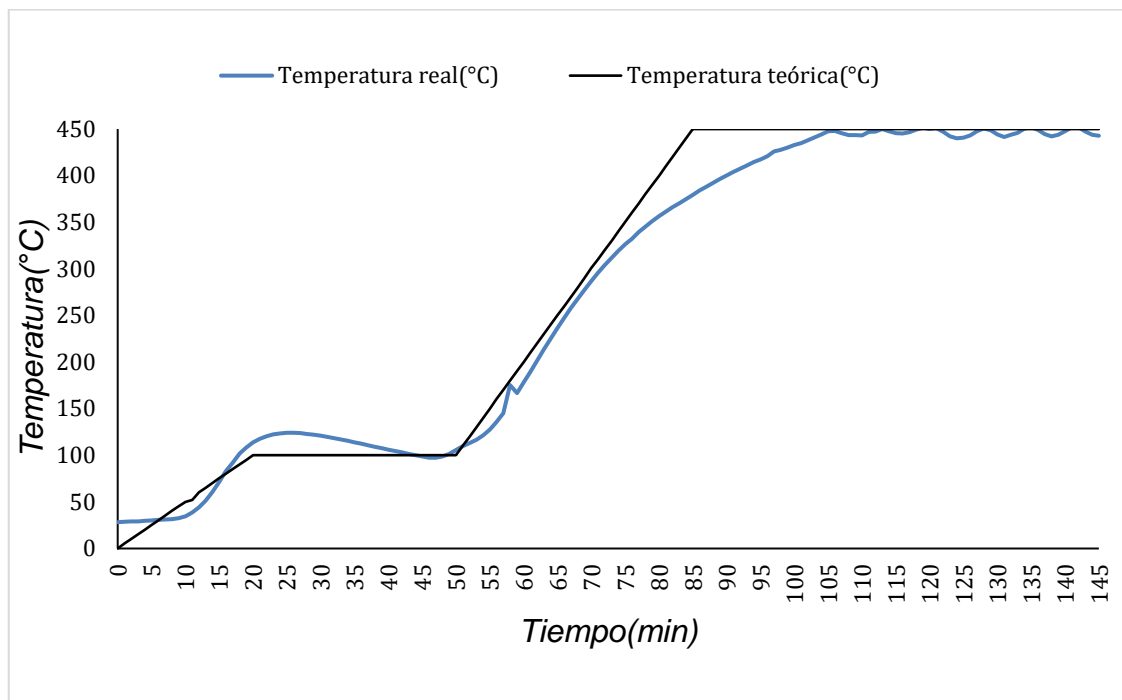


Gráfico 3. Tasa de calentamiento de la planta piloto.

Con respecto a la relación de la temperatura en función al tiempo, medido por minutos para figurar el comportamiento de la velocidad de calentamiento en la planta piloto, se pueden apreciar gráficamente más oscilaciones en la línea que representa la temperatura real, lo que se traduce en momentos de inercia térmica en los que la temperatura tiende a seguir incrementando mientras el horno hace un esfuerzo por mantener la velocidad y temperatura para los que fue programado.

Balance de energía

Una vez calculada cada una de las masas de las corrientes, se puede hacer un modelo de balances de energía, el cual se representa en la Ecuación (2).

$$W + m_c e_c + m_{N_2} e_{N_2} = m_B e_B + m_{gas} e_{gas} \quad (2)$$

Donde W es la energía eléctrica suministrada al horno, e_c , e_{N_2} , e_B y e_{gas} , corresponden a las energías por cada kg de material transportados por la biomasa, el nitrógeno, el Biochar y el gas, respectivamente. En este caso la energía suministrada por la corriente eléctrica se refleja térmicamente en el calentamiento del Biochar, los volátiles y el nitrógeno que salen del horno transformados en gases. La energía de los gases (E_{gas}) se puede obtener por diferencia de temperatura y el calor específico (C_p) promedio de los gases, como se muestra:

$$E_{gas} = m_{gas} C_p \cdot \Delta T \quad (3)$$

Para la producción de Biochar tanto en el horno experimental como en la planta piloto requiere del suministro constante de Nitrógeno (N_2) gaseoso para mantener el medio inerte y al momento de ingreso de la materia biomásica queda atrapado un porcentaje de aire dentro del sistema, durante el proceso de pirólisis se producen otros gases debido al desprendimiento de materia volátil por el aumento de la temperatura interna; la presión dentro del sistema se mantiene relativamente constante ya que los gases tienen un conducto de salida; los gases que se obtienen al final del proceso son hidrógeno (H_2) en un 3%, dióxido de carbono (CO_2) alrededor de 36%, metano (CH_4) con un 17% y monóxido de carbono (CO) correspondiente al 23%, lo que resta un 21% de nitrógeno que se mantuvo constante; las diferentes proporciones dependen de la composición del material y de la temperatura máxima a la que es sometido.

Para el cálculo de la energía promedio de los diferentes gases generados se considera la fracción másica que le corresponde a cada gas junto a su C_p , de lo que se obtiene una energía total de los gases a 450°C de 11,692 kJ/kg para el horno experimental y de 278,303 kJ/kg en la planta piloto.

Consumo de energía eléctrica

Para conocer la energía eléctrica que requiere el sistema para el proceso de producción se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_w = E_c + E_g \quad (4)$$

Donde E_w es la energía eléctrica, E_c es la energía absorbida por el cuesco y E_g es la energía liberada en los gases. Reemplazando la Ecuación (3) en (4) se tiene:

$$E_w = m_c C_{pc} (T_f - T_i) + m_g C_{pg} (T_f - T_i) \quad (5)$$

Con lo que se conoce un valor de energía suministrada a los equipos de pirólisis de 520.54 kJ/kg para el horno experimental y de 19178.302 kJ/kg para el horno piloto.

Sin embargo, se toman datos de voltaje e intensidad con los que trabajan los hornos durante la producción y se calcula la potencia de la corriente eléctrica suministrada al sistema y teniendo en cuenta el tiempo de producción se conoce el consumo total de energía eléctrica utilizadas por los equipos de pirólisis para el proceso de obtención del Biochar de forma más precisa.

Tabla 8. Consumo de corriente del horno experimental.

Voltaje (V)	Intensidad (A)	Potencia (kW)	Tiempo (Hora)	Consumo de energía kWh
110	4,9	0,539	1,4	0,7546

El horno experimental trabaja con una sola rampa de temperatura, por lo tanto, durante todo su proceso se mantiene en un voltaje constante de 110 voltios, el consumo total de energía eléctrica que requiere el horno experimental para producir una carga de material es de 0,75 kWh equivalente a 2716,56 kJ.

Tabla 9. Consumo de corriente de la planta piloto.

Rango de temperatura (°C)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	Potencia (kW)	Tiempo (Hora)	Consumo de energía kWh
0-100	220	15,2	3,344	0,33	1,10352
100-450	220	15,4	3,388	0,58	1,96504
450	220	15,15	3,333	1	3,333

Por otro lado, la planta piloto de producción hace una pausa al alcanzar teóricamente los 100 °C, por lo que en ese periodo de tiempo no se consume energía; durante los periodos de calentamiento se obtiene un promedio de intensidad de corriente de 15,3 Amperios y un sumario de consumo de energía de 6.4 kWh equivalentes a 23040 kJ. Los valores finales de consumo de energía eléctrica por peso de material son de 118111.31 kJ/kg para el horno experimental y 19862.07 kJ/kg para el horno piloto.

Para la comparación de los datos de consumo de energía eléctrica teóricos y experimentales se calcula la diferencia entre los valores calculados y las medidas realizadas, de lo que resulta un porcentaje de error de 99.5% entre los datos del horno experimental, lo que refleja la falta de control sobre el sistema energético de este equipo debido a las pequeñas cantidades de masa que se utilizan para las experimentaciones en este, que no son capaces de absorber toda la energía real que toma el equipo de la conexión eléctrica, para los cálculos consiguientes del horno experimental se tomará el valor obtenido teóricamente, para los datos de la planta piloto el porcentaje de error es de solo 3.4% que se puede asumir como un error normal, en este caso se tomará como real el valor de la medición directa de la energía eléctrica.

Aplicando los datos obtenidos a la Ecuación 2 y considerando que el nitrógeno aporta energías mínimas cercanas a cero y la biomasa de 18900 kJ/kg, se obtiene la energía del Biochar la cual sería de 38702.087 kJ/kg para la muestra obtenida del horno experimental y de 20200.838 kJ/kg para la muestra resultante de la pirolisis en el horno piloto.

Balance de exergía

Con los aportes de energía y las masas de las líneas de entrada y salida del sistema, se puede realizar el balance exergético que permiten establecer los consumos de energía útil y la eficiencia de horno por consumos de exergía. El balance de exergía estaría dado por la ecuación (6) a continuación:

$$W_{ex} + m_c ex_c + m_{N_2} ex_{N_2} = m_B ex_B + m_{gas} ex_{gas} \quad (6)$$

Donde ex corresponde a las exergías de cada línea y W_{ex} es la exergía de la línea de entrada de corriente eléctrica. Para este caso se toma como referencia la temperatura ambiente (T_0) y se considera la ecuación de la exergía.

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (7)$$

Donde h es la entalpía y s es la entropía de cada línea de sistema a la temperatura de operación del horno y h_0, s_0 corresponden a la entalpía y entropía a las condiciones de referencia del sistema. Para determinar la exergía de los gases (ex_{gas}) fue necesario asumir el porcentaje de generación del metano (CH_4) como parte del dióxido de carbono (CO_2) ya que en la literatura no había disposición de los valores de entalpías y entropías del metano a las temperaturas de evaluación. Haciendo las exergías de la biomasa y del nitrógeno cero por estar en condiciones de referencia, se obtiene una exergía de 38268,13 kJ/kg para la muestra manejada en el horno experimental y de 24488,79 kJ/kg para el Biochar tratado en la planta piloto.

Balance exergoeconómico

Para la determinación del costo de la energía eléctrica suministrada a los sistemas se debe considerar un costo unitario de valor del servicio, el costo de comercialización y cuatro (4) niveles de tensión nominal de operación según el voltaje suministrado en los sistemas de transmisión y distribución de la energía.

Tabla 10. Costo de energía eléctrica.

Niveles de tensión	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Costo unitario (Cu) (\$/kWh)	476,17	429,31	406,56	364,60
Consumo horno experimental (kWh)	0,75	0,75	0,7546	0,75
Consumo horno piloto (kWh)	6,40	6,40	6,40	6,40
Cargo de comercialización (Cf)	12,5	12,5	12,5	12,5
Costo energía horno exp. (\$)	6311,44	5690,33	5388,79	4832,62
Costo energía horno piloto (\$)	9000,35	8114,62	7684,61	6891,50

El costo unitario varía mensualmente y en función de los niveles de tensión, los valores de este presentados en la Tabla 10 corresponden al mes de octubre del presente año. El costo de la energía eléctrica que es suministrada al sistema es de 6891,50 pesos por proceso de producción en la planta piloto considerando el nivel de tensión cuatro (4).

Teniendo en cuenta que los equipos para la producción del Biochar fueron adquiridos por la institución hace algunos años, realizamos una proyección de los valores reales, para lo que implementamos los valores de Índices de precios al consumidor (IPC) del año de compra, que en relación con el IPC actual nos refleja el valor que estos equipos tendrían para el año 2019.

Aplicando el concepto de la Ecuación (9) se obtiene la proyección del valor de cada uno de los equipos de operación del sistema, mostrados en la Tabla 11.

$$C_f = C_i \cdot \left(\frac{IPC_p}{IPC_i}\right) \quad (8)$$

Donde C_f representa el costo actual o proyectado, C_i es el costo original del producto y IPC_p y IPC_i corresponden a los índices de precios al consumidor del año actual y del año de compra respectivamente.

Tabla 11. Proyección de costos de los equipos de pirólisis.

Equipo	Valor	Año de compra	IPC Año de compra	Proyección 2019
Horno experimental	\$ 12.200.000	2007	71,684	\$ 19.891.800
Controlador lógico Watlow	\$ 2.170.000	2007	71,684	\$ 3.538.131
Cilindro de nitrógeno	\$ 220.000	2007	71,684	\$ 358.704
Planta piloto de producción	\$ 19.136.800	2015	96,386	\$23.205.549
Cilindro de nitrógeno	\$ 295.812	2015	96,386	\$ 358.705

La proyección de costos totales de los equipos del sistema energético del horno piloto es de \$23.564.254, este valor debe ser amortizado para incluirse en la Ecuación (9) en la que se plantea el balance exergoeconómico, en este se debe tener en cuenta el costo del envío como parte del costo de adquisición del cuesco (C_c) que se establece en 0,6 pesos/kg·km.

$$E_w \cdot C_w + Z + E_c \cdot C_c = E_b \cdot C_b + E_g \cdot C_g \quad (9)$$

Donde, C_w es el costo de energía eléctrica, Z es el costo amortizado de los equipos y C_g corresponde al valor nulo de los gases. Para la obtención de los costos totales de la producción del Biochar (C_b) se despeja de la ecuación, con

lo que se define un costo final de producción de 65,74 \$/kg de Biochar obtenido en el horno experimental y 5.589,5 \$/kg de Biochar producido en la planta piloto.

Optimización exergoeconómica

En este punto se aplican métodos de optimización exergoeconómica a diferentes escalas del sistema de producción de Biochar mediante reglas de escalado aportadas por la literatura en contraste con industrias existentes. La optimización exergoeconómica solo se realizará a la planta piloto, ya que el horno experimental es un equipo para pruebas que maneja muestras de biomasa muy pequeñas solo con la finalidad de realizar ensayos experimentales, por lo tanto, sus datos no son escalables.

Los costos de capital de instalaciones similares para otras capacidades (C_A) se pueden calcular utilizando la regla del factor de seis décimas:

$$C_A = C_E \left(\frac{X_A}{X_E} \right)^{0.6} \quad (10)$$

Donde, C_E es el costo del equipo conocido, X_A y X_E son la capacidad a proyectar y de la capacidad del equipo conocido, respectivamente. De la Ecuación (10) se define un costo de inversión para la expansión del sistema energético en relación al conocido de capacidad de 2 kg, el cual sería de \$61.892.170 para un equipo de capacidad de 10 kg, para este escalamiento el costo final de producción de Biochar sería de \$2.936,2 con lo que se concluye la optimización exergoeconómica del sistema de producción de Biochar a escala piloto, ya que al incrementar la capacidad de manejo de biomasa del equipo para la producción masiva del Biochar es más elevado el costo de inversión inicial, sin embargo, el costo total de producción por kilogramo de material disminuye de manera considerable casi hasta la mitad del costo de producción a menor capacidad.

Identificación de acciones susceptibles de producir impacto

Se reconocen las acciones susceptibles de producir impactos durante la fase de recolección, almacenamiento y transporte de la biomasa y acciones que pueden ser causa de impactos durante la fase de funcionamiento de los hornos de producción y los beneficios trae el Biochar como producto final.

Tabla 12. Relaciones entre acciones del proyecto y aspectos ambientales.

INSUMOS	ACCIÓN	DESCRIPCIÓN	ASPECTO AMB.
Residuos biomásicos industriales	Recolección	Con la alternativa de tratamiento de la biomasa se reduce la problemática asociada con su disposición final.	Disminución de carga de desechos
Residuos biomásicos Vehículo Combustible Conductor	Transporte	Se requiere transporte de la biomasa desde la zona de cultivo de la palma hasta la sede de experimentación.	Ruido Emisión de gases y micropartículas Empleo
Biomasa Horno Suministro de energía eléctrica Nitrógeno (N ₂) NaOH	Pirólisis	Durante el proceso se alcanzan altas temperaturas (Hasta 450°C) para lograr la transformación de la biomasa.	Biochar Gases Olor Aceites - Alquitrans Altas temperaturas
Suelo dañado Biochar	Uso	El Biochar es utilizado como medida para la remediación de suelos.	Fijación de carbono Mejora fertilidad Regulación de PH

Se entiende que las dos etapas que conllevan mayor número de interacciones con el medio ambiente son la etapa de pirólisis que representa la fase de ejecución del proyecto y la etapa de utilización del material obtenido con alteraciones positivas al entorno.

Determinación de los componentes ambientales que pueden ser afectados por el proyecto

Mediante una matriz de doble entrada se contrastan las acciones identificadas en la etapa anterior con los componentes ambientales que puedan ser afectados por las mismas.

Tabla 13. Matriz de relación acción del proyecto – componente ambiental.

ASPI	SISTEMAS	Biótico			Abiótico						Antrópico				
	Componentes Ambientales	Vegetación terrestre	Fauna Terrestre	Biota acuática	Clima	Geología	Geomorfología	Suelo	Agua	Aire	Paisaje	Demográfico	Económico	Cultural	Político
Recolección								x			x				x
Transporte										x			x		x
Pirólisis					x					x		x			
Usos	x							x		x	x		x		

De la observación de la Tabla 13 se interpreta que independientemente de la naturaleza de los impactos y de su magnitud el componente del aire es el que más interacciones tiene con las acciones del proyecto y que los componentes que menos afectaciones reciben durante el proceso general de obtención de Biochar son los pertenecientes al sistema natural biótico.

Identificación de factores susceptibles de recibir impactos

Se lleva a cabo la identificación de factores ambientales con la finalidad de detectar aquellos aspectos del medio ambiente cuyos cambios motivados por las distintas acciones del proyecto en sus sucesivas fases, supongan modificaciones positivas o negativas de la calidad ambiental del mismo. Con los datos representados en la Tabla 14 se facilita la identificación específica de los factores ambientales que son afectados por el proceso en general ya que se tienen en cuenta los indicadores que evalúan la calidad de cada uno de los factores considerados dentro de los componentes identificados anteriormente.

Tabla 14. Indicadores de los factores ambientales afectados.

Sistema	Componente ambiental	Factores Ambientales	Indicador	Unidad de medida
Abiótico	Clima	Atmosférico	Temperatura	°C
			Humedad	% de humedad
			Evaporación	mm/H
			Insolación	cal/cm ²
			Viento	m/s
			Precipitaciones	mm/m ²
			Presión atm.	Atm.
			Brillo solar	h/mes
	Aire	Calidad	PM ₁₀	µg/m ³
			PM _{2.5}	µg/m ³
			CO ₂	µg/m ³
			CO	µg/m ³
			NO _x	µg/m ³
			SO _x	µg/m ³
			Pb	µg/m ³
CH ₄	µg/m ³			

Sistema	Componente ambiental	Factores Ambientales	Indicador	Unidad de medida
			Vapor de agua	µg/m ³
		Ruido	Nivel sonoro	dBA
		Olor	Intensidad	ouE
	Suelo	Material arrastre	Perdida del suelo	Ton/m ³
		Generación de residuos sólidos	Orgánicos	Kg/año
			Inorgánicos	Kg/año
			Peligrosos	Kg/año
			Reciclable	Kg/año
		Derrames	Combustible	Galones
			Grasas superficiales	mg/Lt
			Caudal	M ³ /seg
Paisaje	Imagen	Contraste	Cualitativo	
Biótico	Vegetación	Básicos	Densidad	Ind/m ²
			Cobertura	m ²
			Diversidad	esp/m ²
			Soporte	Cualitativo
Antrópico	Demográfico	Salud	Calidad de vida	Adimensional (%)
		Servicios básicos	Cobertura	Adimensional (%)
	Económico	Nivel de empleo	Demanda de empleo	Adimensional (%)
		Costos	Egresos	\$
		Ventas	Ingresos	\$/Kg

Cruzando la información de las acciones, componentes y factores ambientales involucrados en el proceso de producción del Biochar podemos identificar con

mayor claridad los impactos más significativos que se presentan en cada uno de los componentes ambientales señalados.

Identificación de Impactos Ambientales

Se presenta una descripción de los impactos asociados a cada uno de los componentes ambientales evaluados anteriormente.

Tabla 15. Impactos ambientales significativos.

COMPONENTE	IMPACTO
Clima	Durante el proceso de pirólisis se alcanzan altas temperaturas, sin embargo, las afectaciones por esta variable son puntuales y centradas en el equipo de producción del Biochar.
Suelo	La recolección y almacenamiento de los residuos biomásicos industriales de la palma representan un cambio de uso y disposición de un área determinada.
	Que el material almacenado sea destinado al tratamiento para la producción de Biochar significa una disminución de la generación de residuos orgánicos industriales.
	La aplicación del Biochar como fertilizante trae múltiples beneficios a los suelos en los que es implementado.
Aire	En la trayectoria que debe realizar el vehículo transportador de la materia prima de van liberando micro partículas (PM ₁₀ - PM _{2.5}) y gases (CO ₂ - CO - NO _x - SO _x) contaminantes al medio ambiente.
	El proceso de pirólisis genera olores característicos que pueden llegar a tener grandes alcances en términos de

COMPONENTE	IMPACTO
	<p data-bbox="499 320 1356 398">distancia e intensidad.</p> <p data-bbox="499 409 1356 692">Debido al suministro de gas que utiliza el sistema y a la cantidad de energía acumulada se generan gases como hidrógeno (H₂), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y monóxido de carbono (CO) del desprendimiento de material volátil.</p>
Paisaje	<p data-bbox="499 714 1356 837">El almacenamiento de las grandes cantidades de material biomásico puede significar un gran impacto visualmente.</p> <p data-bbox="499 848 1356 1072">A largo plazo la utilización del Biochar como reestructurador de los suelos conlleva a la reforestación de grandes áreas, lo que alberga (además de los beneficios al terreno) un valor paisajístico agregado.</p>
Vegetación	<p data-bbox="499 1104 1356 1263">El Biochar como producto final del proceso aporta al suelo mayor capacidad para la fijación de carbono (CO₂ y N₂O) y regulación de PH, mayor fertilidad y estabilidad al terreno.</p>
Demográfico	<p data-bbox="499 1296 1356 1444">Los olores y gases generados durante el proceso de producción pueden provocar molestias y afectaciones en la salud de personas próximas al punto de experimentación.</p>
Económico	<p data-bbox="499 1489 1356 1702">La economía del proyecto queda estrechamente relacionada con la eficiencia del funcionamiento de los hornos durante el proceso de producción. Y se puede ver reflejado en el balance económico del sistema en general.</p>

Una vez caracterizado el proyecto y el ambiente e identificadas las acciones susceptibles de producir impactos, los aspectos y los factores ambientales susceptibles de recibir los impactos y habiendo determinado las afectaciones

generadas por el proceso de producción se realizará una valoración de impactos ambientales.

Valoración de Impactos Ambientales

Para la valoración de los impactos identificados anteriormente se implementará la metodología planteada por Vicente Conesa en la cual se toman en cuenta 11 variables para una evaluación más acertada de cada uno de los impactos según su naturaleza del impacto (*M*), la intensidad con la que este se presenta (*IN*), la extensión que pueda alcanzar (*EX*), el momento en el que se presenta el impacto en relación a la acción que lo causa (*MO*), la persistencia que tenga el efecto generado (*PE*), la reversibilidad (*RV*), sinergia (*SI*), capacidad de acumulación (*AC*), efecto (*EF*), periodicidad con la que se presenta la afectación (*PR*) y la recuperabilidad (*MC*) que permita.

Tabla 16. Valoración de impactos.

Impacto	N	IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	VI	INT
Generación de calor	-	8	1	4	1	1	1	4	1	4	1	42	Moderao
Disminución de residuos orgánico	+	4	2	2	4	4	2	4	1	2	1	36	Moderao
Emisión de gases	-	1	4	2	2	1	2	4	4	4	4	34	Moderao
Alquitrán	-	4	1	4	2	2	2	4	4	2	1	35	Moderao

Impacto	N	IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	VI	INT
Generación de olores	-	8	2	8	2	2	2	4	4	4	2	56	Severo
Utilidad Biochar	+	8	8	2	4	4	4	1	4	4	4	67	Severo
Económica	+	4	2	1	2	2	2	4	1	2	2	32	Moderado

$$I = \pm [3IN + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC] \quad (11)$$

La Ecuación (11) da como resultado la importancia de cada impacto que ha sido valorado cuantitativamente en relación a las intensidades que representa para cada una de las variables tenidas en cuenta, de lo que obtuvimos mayoría de impactos moderados lo que nos indica que las afectaciones causadas por estos impactos no precisan prácticas correctoras o protectoras intensivas. Resulta además un impacto de naturaleza negativa con intensidad severa lo que implica que sus afectaciones exigen la recuperación de las condiciones del medio a través de medidas correctoras o protectoras con la finalidad de que el tiempo de recuperación del ambiente en relación a la generación de olores presentada durante el proceso de obtención del Biochar no signifique un periodo prolongado; por otro lado, la utilidad del Biochar como enmienda de suelos refleja una intensidad severa de naturaleza positiva, lo que mejora los indicadores ambientales de los factores que se han estado viendo influenciados por el proyecto en general.

Optimización ambiental

A continuación, se establecen de forma independiente los posibles mecanismos de manejo para cada uno de los diferentes impactos ambientales identificados

con anterioridad mediante fichas de manejo ambiental de modo que se hace objetiva la selección de estrategias de prevención, mitigación, compensación y mejora en caso de impactos positivos y facilita la toma de decisiones.

Tabla 17. Ficha de manejo ambiental impacto generación de calor.

Nombre del impacto	Generación de calor
Actividad que lo genera	Aumento eminente de la temperatura durante el proceso de pirólisis.
Etapas del proyecto en la que se presenta	Pirólisis.
Sujeto afectado	Atmosfera circundante.
Descripción del impacto	Durante el proceso de pirólisis se llegan a alcanzar altas temperaturas, sin embargo, las afectaciones por esta variable son puntuales y centradas en el equipo de producción del Biochar, influenciando solo una proporción de la atmosfera próxima al equipo de calentamiento.
Criterios asumidos para su evaluación	Naturaleza del impacto, intensidad, extensión, momento, persistencia, reversibilidad, sinergia, capacidad de acumulación, efecto, periodicidad y recuperabilidad.
Calificación obtenida	- 42 Moderado.
Mecanismos de manejo posibles	Como medida de prevención se establece que las personas cercanas al sistema de calentamiento se acerquen demasiado o lleguen a tocar el equipo para evitar lesiones y accidentes.

Tabla 18. Ficha de manejo ambiental impacto emisión de gases.

Nombre del impacto	Emisión de gases
Actividad que lo genera	Actividad química y termina al interior del sistema durante el proceso de producción del Biochar.

Etapa del proyecto en la que se presenta	Pirólisis.
Sujeto afectado	Factor aire.
Descripción del impacto	Debido al suministro de gas que utiliza el sistema y a la cantidad de energía acumulada se generan gases como hidrógeno (H ₂), dióxido de carbono (CO ₂), metano (CH ₄) y monóxido de carbono (CO) del desprendimiento de material volátil.
Criterios asumidos para su evaluación	Naturaleza del impacto, intensidad, extensión, momento, persistencia, reversibilidad, sinergia, capacidad de acumulación, efecto, periodicidad y recuperabilidad.
Calificación obtenida	- 34 Moderado.
Mecanismos de manejo posibles	La medida de mitigación implementada para el manejo de las emisiones de gases generados durante el proceso de pirólisis es el uso de una pipeta con solución de hidróxido de sodio para hacer pasar los gases por esta y que funcione como una trampa de gases, con el objetivo de que la carga contaminante desprendida del sistema disminuya su intensidad. El gas liberado de poco poder calórico, puede servir para accionar motores Diesel, para producir electricidad, o para mover vehículos.

Tabla 19. Ficha de manejo ambiental impacto generación de olores.

Nombre del impacto	Generación de olores
Actividad que lo genera	Actividad química y termina al interior del sistema durante el proceso de producción del Biochar.
Etapa del proyecto en la que se presenta	Pirólisis.
Sujeto afectado	Factor aire.

Descripción del impacto	El proceso de pirólisis genera olores característicos que pueden llegar a tener grandes alcances en términos de distancia e intensidad. Los olores y gases generados durante el proceso de producción pueden provocar molestias y afectaciones en la salud de personas próximas al punto de experimentación.
Criterios asumidos para su evaluación	Naturaleza del impacto, intensidad, extensión, momento, persistencia, reversibilidad, sinergia, capacidad de acumulación, efecto, periodicidad y recuperabilidad.
Calificación obtenida	- 56 Severo.
Mecanismos de manejo posibles	Se implementa como medida de mitigación del impacto realizar la actividad de la producción durante periodos en los que el número de personas circundantes sea el menor posible, para así evitar molestias por los olores emitidos durante el proceso. Las plantas de producción se deben ubicar distantes a las poblaciones y en dirección contraria a las corrientes de aire.

Tabla 20. Ficha de manejo ambiental impacto disminución de residuos orgánicos.

Nombre del impacto	Disminución de residuos orgánico
Actividad que lo genera	Recolección y almacenamiento del material biomásicos experimental.
Etapas del proyecto en la que se presenta	Recolección.
Sujeto afectado	Suelo.
Descripción del impacto	Que el material almacenado sea destinado al tratamiento para la producción de Biochar significa una disminución de la generación de residuos

	orgánicos industriales; sin embargo, esta misma actividad representan un cambio de uso y disposición de un área de suelo determinada.
Criterios asumidos para su evaluación	Naturaleza del impacto, intensidad, extensión, momento, persistencia, reversibilidad, sinergia, capacidad de acumulación, efecto, periodicidad y recuperabilidad.
Calificación obtenida	+ 36 Moderado.
Mecanismos de manejo posibles	Solicitar la disposición de un almacén el que se conserve la materia prima que tenga gran potencial de utilización para la generación de Biochar.

Tabla 21. Ficha de manejo ambiental impacto utilidad del Biochar.

Nombre del impacto	Utilidad del Biochar
Actividad que lo genera	Implementación del Biochar para la remediación de suelos.
Etapas del proyecto en la que se presenta	Usos.
Sujeto afectado	Factor suelo.
Descripción del impacto	El Biochar brinda múltiples servicios ambientales como la minimización del cambio climático por su capacidad para la absorción de carbono; reduce el requerimiento de nutrientes por el suelo; reduce la acidez por lo que aumenta el pH; aumenta la biomasa microbiana; estimula el crecimiento de las plantas; aumenta la producción sostenible de alimentos; mejora la calidad de las aguas subterráneas y suprime emisiones de metano.
Criterios asumidos para su evaluación	Naturaleza del impacto, intensidad, extensión, momento, persistencia, reversibilidad, sinergia,

	capacidad de acumulación, efecto, periodicidad y recuperabilidad.
Calificación obtenida	+ 67 Severo.
Mecanismos de manejo posibles	Registrar periódicamente los factores que evidencien mejoras en los suelos destinados a remediación con Biochar y así reconocer todo el potencial benéfico que ofrece esta alternativa de reparación.

Tabla 22. Ficha de manejo ambiental impacto Alquitranes.

Nombre del impacto	Alquitranes
Actividad que lo genera	Actividad química y termina al interior del sistema durante el proceso de producción del Biochar.
Etapas del proyecto en la que se presenta	Pirólisis.
Sujeto afectado	Factor aire.
Descripción del impacto	A partir de los 300°C se empieza a fraccionar la materia produciendo alquitranes, este es uno de los problemas técnicos con los que se encuentra en estos momentos la metodología de la gasificación de la biomasa, ya que su condensación en las zonas frías de los equipos genera problemas de taponamiento, atasco y desactivación, provocando las paradas indeseadas de la instalación (De Lucas, 2012). Los alquitranes y el humo producidos por la carbonización, si bien no son directamente venenosos pueden tener efectos perjudiciales a largo plazo sobre el sistema respiratorio.
Criterios asumidos para su evaluación	Naturaleza del impacto, intensidad, extensión, momento, persistencia, reversibilidad, sinergia,

	capacidad de acumulación, efecto, periodicidad y recuperabilidad.
Calificación obtenida	- 35 Moderado.
Mecanismos de manejo posibles	<p>El mantenimiento y limpieza de los equipos es de vital importancia para no reducir la eficiencia del proceso.</p> <p>La eliminación de alquitranes a temperaturas mayores de 600°C consiste en la separación física de sus partículas a gases más ligeros y para el aumento de la proporción de carbono fijo hasta un 90%.</p> <p>También está la alternativa de eliminación de gases y alquitranes a bajas temperaturas en torres de lavado con disolventes orgánicos (Ruiz, 2014).</p> <p>Recolección y venta a plantas de refinación.</p>

De esta manera quedan plasmadas las medidas de mejora, prevención, mitigación y compensación al medio ambiente por las afectaciones recibidas por las actividades implicadas en el proceso para la obtención de Biochar a partir de residuos biomásicos de palma de aceite.

7. CONCLUSIONES

La eficiencia de cada uno de los hornos se ve evidenciada en las diferencias entre el comportamiento de real del horno en relación a los tiempos y velocidades a los que fueron configurados para que desarrollaran el proceso de pirólisis, se entiende que esta diferencia se presenta principalmente debido a la absorción de calor por parte de la biomasa, sin embargo, también influyen variables como los leves cambios en la presión del sistema y las reacciones químicas a las que se da lugar durante el proceso; de estas diferencias se puede concluir que la planta piloto trabaja con mayor eficiencia que el horno experimental, por lo que de este se obtiene además mejor calidad en el producto final.

De los datos de exergía obtenidos se observa que el horno experimental libera mayor cantidad de energía útil que la planta piloto, a pesar de que el primero maneja una capacidad menor de material orgánico.

En relación a los costos de suministros de energía eléctrica se conocen los costos unitarios correspondientes a cada nivel de tensión durante los primeros diez (10) meses del presente año, de los que se generan los valores del servicio de energía eléctrica y se distingue en nivel de tensión uno (1) en el mes de marzo por 9414.30 pesos para el material producido en el horno piloto y en el mismo mes para el nivel de tensión tres (3) un costo de 3310.73 pesos por un tratamiento de material en el horno experimental que corresponden los valores máximos y mínimos de los costos del servicio de energía eléctrica. En general el nivel de tensión que representa mayor eficiencia en relación a los costos de consumo de energía eléctrica es el número cuatro (4).

A nivel industrial las instalaciones deben manejar capacidades superiores a los 10 kg a los que se realizó el escalamiento, sin embargo el principio de optimización es el mismo, a mayores capacidades mayores inversiones iniciales se requieren pero la eficiencia económica se ve reflejada en la baja del costo total de producción del material.

En cuanto a las interacciones que cada una de las actividades del proceso de producción puedan tener con el entorno, se deduce que el factor ambiental que más alteraciones presenta es el aire, refiriéndonos a los olores y las emisiones de gases resultantes del proceso como los impactos más significativos, sin embargo, si son aplicadas las medidas de manejo establecidas será efectiva la mitigación de los impactos.

Por otro lado, el Biochar como producto final del proceso representa un aporte positivo muy significativo para el ambiente por los múltiples beneficios que tiene en su aplicación, como la elevada capacidad de absorción de gases contaminantes como el CO₂ y el aporte de materia orgánica que incorpora a los suelos en el proceso de remediación, lo que se traduce en la mejora de la fertilidad de los suelos y su capacidad como soporte biológico a microorganismos, animales y vegetación en general.

8. RECOMENDACIONES

La primera de las recomendaciones tiene que ver con que la información utilizada para el escalamiento del sistema energético corresponde a la planta piloto perteneciente a la Universidad Popular Del Cesar, y este proceso depende mucho del diseño del sistema energético evaluado, por lo que se debería evaluar los sistemas energéticos y costos de producción de otros prototipos de hornos pirolíticos y comparar los datos obtenidos para conocer el contraste de eficiencias entre los sistemas considerados.

Por otro lado, en relación a los potenciales servicios que brinda el Biochar se pueden estudiar de dos formas; la primera es con la medición y definición de la capacidad de absorción de carbono y la segunda con el monitoreo periódico de los factores o indicadores del suelo que puedan interpretarse y dar a conocer el grado de influencia de Biochar en sus condiciones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Agrowaste. 2013. *Pirólisis*. Life; Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación; Consejo Superior de Organizaciones Científicas; Agrupal. De: agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/PIROLISIS.pdf

ANEIA. 2016. *Lo que hay detrás del negocio de la Palma de Aceite*. AGRONEGOCIOS E INDUSTRIA DE ALIMENTOS. facultad de administración. universidad de los andes <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2016/03/21/lo-que-hay-detras-del-negocio-de-la-palma-de-aceite/>.

Bastidas Barranco, M. J. (2010). *Análisis multiobjetivo para la optimización en sistemas de generación de energía*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia.

Bastidas Pallares, M. J. & Daza Cervantes, Y. (2018). *ESTUDIO EXERGOAMBIENTAL DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIOCHAR A ESCALA PILOTO A PARTIR DE CUESCO, RAQUIS Y TRONCO DE LA PALMA AFRICANA*. Universidad Popular del Cesar. Valledupar - Cesar.

Benitez, Celia; Pece, Marta; Galíndez, Margarita. 2010. *ANÁLISIS DE LA VARIANCIA EN EXPERIMENTOS FACTORIALES*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SANTIAGO DEL ESTERO. Facultad de Ciencias Forestales.

Caballero, Margarita; Lozano, Socorro; Ortega, Beatriz; 2007. *Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra* Instituto de Geofísica. Instituto de Geología Universidad Nacional Autónoma de México.

Carlos Humberto Alfaro Rodríguez, 2012; *"METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA APLICADO A LA INGENIERÍA"*. FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA ESCUELA PROFESIONAL DE

INGENIERÍA ELECTRÓNICA. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO. Lima, Perú.

Cenipalma. 2019. Campo Experimental Palmar de la Sierra. De: <https://www.cenipalma.org/camposexperimentales/campo-experimental-palmar-de-la-sierra/>

Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR). (2004). *Plan de accional regional (PAR) para la lucha contra la desertificación y la sequía en el departamento del cesar, con énfasis en la region del rio cesar (Convenio 172/2004)*. Bogota D.C.

De Lucas, Ana; Del Peso, Carlos; Rodriguez, Encarna; Prieto, Prado. 2012. *Biomasa, Biocombustibles y Sostenibilidad*. Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible. Universidad de Valladolid-INIA (IUGFS). Avenida de Madrid, Palencia.

EcuRed, 2014. *Indicador ambiental*. Obtenido de: https://www.ecured.cu/index.php?title=Indicador_ambiental&action=edit

Electricaribe, 2019. *Tarifas y subsidios*. Costo unitario de prestación del servicio. Electrificadora del Caribe S.A ESP. Obtenido de: <https://www.electricaribe.co/tu-energia/>

Garcia-Perez M., J.A. Garcia-Nunez, T. Lewis, C. E. Kruger, M.R. Fuchs, G. Flora, S. Kantor (2012). *Methods for Producing Biochar and Advanced Bio-fuels in Washington State*. Part 4: Literature Review of Financial Analysis. Fourth Project Report. Department of Biological Systems Engineering and the Center for Sustaining Agriculture and Natural Resources, Washington State University, Pullman, WA, 75 pp.

Google Earth. 2019. Campo Experimental Palmar De La Sierra. Google.com. De: https://earth.google.com/web/@10.7288889,74.1168353,46.14223439a,1035.89751268d,35y,161.86988512h,45t,0r/data=Cj8aFQoNL2cvMTFkZmpjMGNfcHgCIAEoAilmCiQJeaqQSNdvSEARrYFKVttSEAZ_60F_7CKAkaHljkgXMBKAka

Google Maps. 2019. Universidad Popular del Cesar. Google.com. De: <https://www.google.com/maps/place/Universidad+Popular+del+Cesar/@10.4491106,73.2643501,17z/data=!4m2!1m6!3m5!1s0x8e8ab9f0380dfce7:0x48c70aed89305d79!2sParque+La+Vallenata!8m2!3d10.4491053!4d73.2621614!3m4!1s0x8e8ab9ee203ab5b3:0x67acd0380303e569!8m2!3d10.4504476!4d73.2606842?hl=es>

Harsono, S. S., Grundman, P., Lau, L. H., Hansen, A., Salleh, M. A. M., Meyer-Aurich, A., & Ghazi, T. I. M. (2013). Energy balances, greenhouse gas emissions and economics of biochar production from palm oil empty fruit bunches. *Resources, Conservation and Recycling*, 77, 108-115.

Harsono, S. S., Grundmann, P., & Siahaan, D. (2015). Role of Biogas and Biochar Palm Oil Residues for Reduction of Greenhouse Gas Emissions in the Biodiesel Production. *Energy Procedia*, 65, 344-351.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2014. *INDICADORES Y ESTADISTICAS AMBIENTALES DEL IDEAM* En: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/indicadores>.

Kong, S. H., Loh, S. K., Bachmann, R. T., Rahim, S. A., & Salimon, J. (2014). Biochar from oil palm biomass: A review of its potential and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 729-739.

Lazzaretto, A., & Tsatsaronis, G. (2006). SPECO: a systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*,31(8), 1257-1289.

Mendez, A., Paz-Ferreiro, J., Araujo, F., & Gasco, G. (2014). Biochar from pyrolysis of deinking paper sludge and its use in the treatment of a nickel polluted soil. En A. Mendez, J. Paz-Ferreiro, F. Araujo, & G. Gasco, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* (págs. 46-52). Madrid: Elsevier.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2012; *Evaluación del impacto ambiental. Directrices para los proyectos de campo de la FAO*.

Pastor, Y., Martinez, M. d., & Valdes, R. (2010). *CONSTRUCCION DE UNA PLANTA DE PRODUCCION DE BIOCHAR A PARTIR DE PURINES*. Cartagena: Universidad Politecnica de Cartagena.

Portafolio.co. (18 de septiembre de 2014). *portafolio*. Obtenido de Portafolio.co: <http://www.portafolio.co/especiales/portafolio-21-aniversario/colombia-productor-aceite-palma-2014>.

Programa de las naciones unidas para el medio ambiente (2018) *El calentamiento global amenaza el inventario de vida del planeta* en: unenvironment - <https://www.unenvironment.org/es/news-and-stories/reportajes/el-calentamiento-global-amenaza-el-inventario-de-vida-del-planeta>.

Red por la Justicia Ambiental en Colombia, 2018. *Legislación Ambiental*. En: <https://justiciaambientalcolombia.org/herramientas-juridicas/legislacion-ambiental/>

RUBERTO, Alejandro. (2006). "GUÍA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL". De: centro.paot.mx/documentos/varios/guia_metodologica_impacto_ambiental.pdf

Ruiz, E. & Sanchez, J.M. 2014. *Purificación y acondicionamiento del gas de gasificación de biomasa*. Departamento de Energía CIEMAT, Av. Complutense 40, 28040 Madrid. España.

Secretaria Distrital de Integración Social. 2013. *Guía metodológica para la Evaluación de Aspectos e impactos Ambientales*. Área de Gestión Ambiental. Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.

Steiner, C. (2010). *PALMAS, la palma de aceite, una agroindustria eficiente, sostenible y mundialmente competitiva*. Georgia: Athens, GA 30602 USA.

Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., & Yang, Z. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*, 125, 70-85.

Tsarsaronis, G., Adrian, B., & Moran, M. (1996). *Thermal Design and Optimazation*. New York: Jhon Wiley and Sons Inc.

Universidad de Sevilla. (22 de abril de 2015). Laplace. Obtenido de: laplace.us.es/wiki/index.php/Introducci%C3%B3n_a_la_exerg%C3%ADa#Exerg.C3.ADa

Yao, H., Sheng, D., Chen, J., Li, W., Wan, A., & Chen, H. (2013). Exergoeconomic analysis of a combined cycle system utilizing associated gases from steel production process based on structural theory of thermoeconomics. *En Applied Thermal Engineering* (págs. 476-489). Zhejiang: Elsevier.

ANEXOS FOTOGRÁFICOS



Vista externa horno experimental.



Revisión de horno experimental.



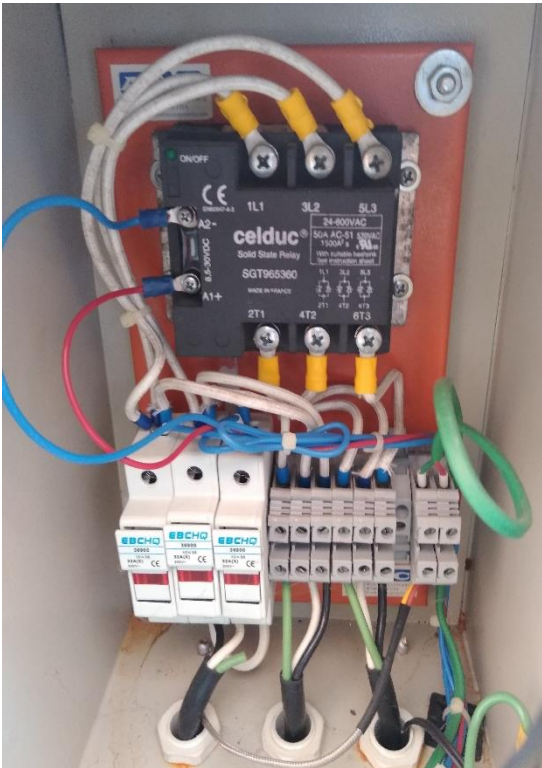
Puesta en funcionamiento del Horno Experimental.



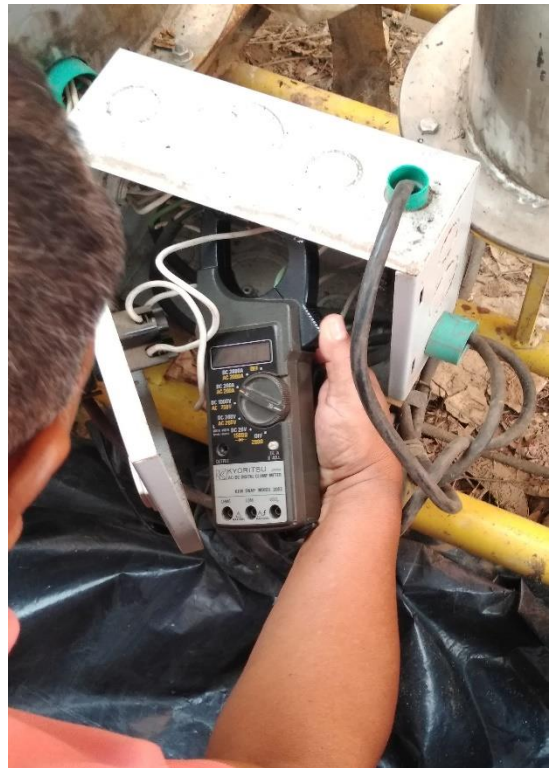
Exterior planta piloto.



Caja de control de planta piloto



Interior caja de control.



Revisión de resistencias.



Puesta en funcionamiento de la planta piloto.



Medición de intensidad de la corriente.