

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES DE
CARBONES DEL MUNICIPIO DE LA ESPERANZA MEDIANTE LA
APLICACIÓN DE BIOADITIVO NANOMAC**

**GINNETH ALEXANDRA HERRERA PABÓN
NICOLE CATHERINE RIVERA RUBIANO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2018

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES DE
CARBONES DEL MUNICIPIO DE LA ESPERANZA MEDIANTE LA
APLICACIÓN DE BIOADITIVO NANOMAC**

**GINNETH ALEXANDRA HERRERA PABÓN
NICOLE CATHERINE RIVERA RUBIANO**

**MONOGRAFIA PRESENTADA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
ESPECIALISTA EN INGENIERIA AMBIENTAL**

Director:

**Ing. Civil GUILLERMO CARDOZO CORREA
Msc Desarrollo Rural**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2018

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad de culminar un ciclo más para mi vida profesional. A mis padres por el apoyo incondicional a lo largo de ésta especialización. Al Ingeniero Guillermo Cardozo, por enseñarnos a entregarle cada tiempo de nuestras vidas primeramente a Dios, por su confianza en nosotras, por su tiempo y dedicación a lo largo de este proyecto, por su esmero para transmitir su conocimiento y experiencia y sobre todo que gracias a él se pudo realizar con éxito este proyecto.

GINNETH ALEXANDRA HERRERA PABÓN

Al **M.Sc. Guillermo Cardozo Correa** por brindarme la oportunidad de trabajar bajo su dirección basada en buenos principios provenientes de un hombre que tiene a Dios como pilar. Gracias por su confianza, experiencia, tiempo y dedicación en este proceso. A la directora de la Escuela de Ingeniería Química **Dr. María Paola Maradey** por permitir el uso de los laboratorios para la realización de este proyecto. A mi compañera **Ginneth Alexandra Herrera** por su dedicación, esfuerzo y por estar conmigo en cada paso de esta etapa. Al coordinador del laboratorio de Ingeniería Química **Héctor Joaquín Orozco** y al señor **Guillermo Acero** por la dirección y acompañamiento en la realización de las pruebas. A la **Universidad Industrial de Santander**, por la formación brindada tanto personal como profesionalmente.

NICOLE CATHERINE RIVERA RUBIANO

DEDICATORIA

A Dios por ser la persona que me dio la vida y la sabiduría, por ser la persona que conoce mis anhelos y mis deseos, por ser el Padre que me cuida y me bendice y lo más importante, por ser mi ejemplo a seguir.

GINNETH ALEXANDRA HERRERA PABÓN

A Dios por estar presente en todos los momentos de mi vida, más que pedirte siempre he tenido que agradecerte.

A mis padres Jairo Rivera Castañeda y Nohemí Rubiano Pabón; mi esposo Cristhian Javier Mantilla Ayala y a mi hija Gabriela Mantilla Rivera por ser mi motor, sustento, guía y refugio.

NICOLE CATHERINE RIVERA RUBIANO

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
2. MARCO TEÓRICO.....	17
3. TÉCNICAS UTILIZADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN.....	18
3.1 ANÁLISIS ELEMENTAL.....	18
3.2 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA.....	18
3.3 ANÁLISIS DEL PODER CALORÍFICO.....	19
3.4 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA).....	20
3.5 CROMATOGRAFÍA DE GASES.....	21
4. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA.....	22
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA GILSONITA, EL BIOADITIVO VEGETAL Y LA MEZCLA.....	22
4.1.1 Análisis Elemental.....	22
4.1.2 Espectroscopia Infrarroja.....	23
4.1.3 Análisis Termogravimétrico (TGA).....	23
4.1.4 Análisis De Poder Calorífico.....	23
4.1.5 Análisis De Gases De Combustión.....	23
4.1.6 Análisis Por Cromatografía de gases.....	24
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	25
5.1 ANÁLISIS ELEMENTAL.....	25
5.2 ANÁLISIS INFRARROJO.....	26
5.3 ANÁLISIS POR CROMATOGRAFÍA DE GASES.....	28

5.4 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA).....	30
5.4.1 Análisis TGA para la muestra Gilsonita.....	30
5.4.2 Análisis TGA para la muestra de Bioaditivo Nanomac.	31
5.4.3 Análisis TGA para la muestra de la mezcla Gilsonita – Bioaditivo Nanomac.	31
5.5 ANÁLISIS DE PODER CALORÍFICO	32
5.6 ANÁLISIS DE EMISIONES	34
6. RECOMENDACIONES.....	36
7. CONCLUSIONES	37
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
BIBLIOGRAFIA.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización Geográfica y límites del Municipio La Esperanza.	17
Figura 2 Diagrama de la metodología empleada en el proyecto	22
Figura 3 Espectros FT-IR de las tres muestras a) Gilsonita ; b) Bioaditivo nanoMAC; c) Mezcla (G+N).....	27
Figura 4 Cromatograma del Bioaditivo NanoMAC.....	28
Figura 5 Cromatograma de la mezcla (G+N)	29
Figura 6. Termograma para la muestra Gilsonita	30
Figura 7. Termograma para la muestra de Nanomac.....	31
Figura 8. Termograma para la muestra de Gilsonita con Bioaditivo Nanomac	32
Figura 9. Gráfico de Parr para la clasificación de los carbones.....	33

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición química de la Gilsonita	25
Tabla 2. Composición química de la mezcla (G+N)	26
Tabla 3. Poder Calorífico (BTU/lbm) de las tres muestras	34
Tabla 4. Emisiones para la Gilsonita y la Mezcla (G+N)	35

RESUMEN

TÍTULO EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES DE CARBONES DEL MUNICIPIO DE LA ESPERANZA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE BIOADITIVO NANOMAC*.

AUTORES GINNETH ALEXANDRA HERRERA PABÓN
NICOLE CATHERINE RIVERA RUBIANO**.

PALABRAS CLAVE Combustibles fósiles, emisión, bioaditivo.

DESCRIPCIÓN

En Colombia y en el mundo, el uso masivo de combustibles fósiles y la explotación minera son los principales causantes de la problemática ambiental generada por la emisión de contaminantes como lo son material particulado y otros compuestos tóxicos tales como CO₂, CO, NO₂, los cuales ocasionan efecto invernadero, contaminación ambiental y daños en la salud humana. En consecuencia de esto a lo largo de los años, se han buscado alternativas con el fin de disminuir dicha contaminación mediante el uso de compuestos que sean amigables con el medio ambiente y a su vez se reduzcan las emisiones de esos compuestos nocivos. Este proyecto busca crear una alternativa para disminuir las concentraciones de compuestos contaminantes generados por el uso de carbón bituminoso tipo Gilsonita el cual está ubicado en el Municipio de La Esperanza Departamento de Norte de Santander mediante la aplicación de un bioaditivo con el fin de mejorar las emisiones por combustibles fósiles, para este fin se realizó la caracterización del carbón bituminoso antes y después de agregarle el bioaditivo seguido de una análisis del poder calorífico y un análisis de emisión de gases. Los resultados del presente trabajo permitieron observar una disminución de emisiones contaminantes al reducir las concentraciones de gases tóxicos al agregarle el bioaditivo a la Gilsonita en comparación a la Gilsonita sin aditivar.

*Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental Director: Msc Guillermo Cardozo Correa.

ABSTRACT

TÍTULO IMPACT EVALUATION OF THE POLLUTANT EMISSIONS OF CARBONS OF THE ESPERANZA MUNICIPALITY THROUGH THE APPLICATION OF NANOMAC BIOADITIVE*.

AUTHORS GINNETH ALEXANDRA HERRERA PABÓN
NICOLE CATHERINE RIVERA RUBIANO**.

KEYWORDS Fossil fuels, emission, bioadditive

DESCRIPTION

In Colombia and the world, the massive use of fossil fuels and mining are the main causes of the environmental problems generated by the emission of pollutants such as particulate matter and other toxic compounds such as CO₂, CO, NO₂, which cause a greenhouse effect, environmental pollution and damage to human health. As a result of this over the years, alternatives have been sought in order to reduce such pollution by using compounds that are environmentally friendly and in turn reduce the emissions of these harmful compounds. This project seeks to create an alternative to reduce the concentrations of polluting compounds generated by the use of bituminous coal type Gilsonite which is located in the Municipality of La Esperanza Department of Norte de Santander through the application of a bioadditive in order to improve emissions For fossil fuels, characterization of the bituminous coal before and after adding the bioadditive was carried out for this purpose, followed by an analysis of the calorific value and a gas emission analysis. The results of the present work allowed to observe a decrease of polluting emissions when reducing the concentrations of toxic gases when adding the bioadditive to the Gilsonite in comparison to the Gilsonite without additive.

*Graduation project.

** Faculty of Physico-chemical Engineering, School of Chemical Engineering. Specialization in Environmental Engineering Director: Msc Guillermo Cardozo Correa

INTRODUCCIÓN

La presencia de mezcla de partículas sólidas y gases que evidencian afectación a las personas y seres vivos son generados por la emisión, acumulación y mezcla de contaminantes en el aire provenientes de fuentes naturales (Ej. volcanes y plantas) y fuentes antropogénicas (Ej. industrias, servicios y vehículos), sin embargo, muchos de estos problemas son debido a las actividades humanas, el aumento en la población mundial y la búsqueda de la comodidad, los cuales son factores que contribuyen al incremento en el consumo de energía y a la generación de residuos, seguido de los problemas económicos asociados con el incremento en el precio y la escases del petróleo.

De acuerdo con la forma en que se liberan los contaminantes al aire, las fuentes de emisión se clasifican en: fuentes fijas en las que las emisiones se generan en un lugar determinado e inamovible (Ej. Industrias y quemas agrícolas controladas) y fuentes móviles en las que, por razón de su uso o propósito, las emisiones se generan durante el desplazamiento de la fuente (Ej. vehículos, trenes y aviones) [1]

Se ha encontrado que los principales inventarios de emisión de contaminantes al aire del país de mayor cantidad son el Material Particulado - MP, los óxidos de azufre SO_x, los óxidos de nitrógeno NO_x, el monóxido de carbono CO (contaminantes criterio) y el dióxido de carbono CO₂, lo anterior como consecuencia del uso masivo de combustibles fósiles, la suspensión de polvos y la explotación minera [2]

Con el paso de los años, se ha venido estimulado la búsqueda de combustibles renovables con el objetivo de reducir el consumo, disminuir la contaminación atmosférica o incluso sustituir completamente a los combustibles derivados del

petróleo, a pesar de esto el planeta depende mayoritariamente de los combustibles fósiles por lo tanto la creación de compuestos a base de este tipo de combustibles y que sean amigables con el medio ambiente sin perder su potencial energético es un tema de gran interés y aplicación.

En Colombia, la normativa que regula las concentraciones ambientales de material particulado en el aire ha venido evolucionando rápidamente. Las Resoluciones 601 de 2006 y 610 de 2010, así como las Resoluciones 909 y 910 de 2010, demandan estándares estrictos sobre las emisiones de fuentes fijas y fuentes móviles enfocadas a la reducción de las emisiones contaminantes al aire, las cuales son indispensables para mejorar la calidad de vida de los seres humanos y proteger sus riquezas naturales [3].

Actualmente, alrededor del 40% de la energía eléctrica mundial se genera en plantas de combustión de carbón bituminoso como fuente de energía. El uso de este carbón crea emisiones peligrosas como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, entre otros [4]. Debido a esto, en este proyecto se pretende disminuir la concentración de estos compuestos contaminantes con el uso de bioaditivo, mejorando la calidad del aire, disminuyendo la liberación de gases en la atmosfera, además de asegurar el cumplimiento de dichas emisiones según la Normatividad Colombiana.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia al igual que en el mundo el uso de la gasolina, el diésel y el carbón son los causantes de los mayores contaminantes como el material particulado y el CO₂. En Europa los derechos de emisión al carbón alcanzan el en 2018 a U\$ 16/ Ton Métrica. La propuesta para un país como Colombia, productor de excelentes carbones y exportador por excelencia de este mineral es lograr que la combustión del carbón se realice de manera más limpia y se siga usando a nivel internacional.

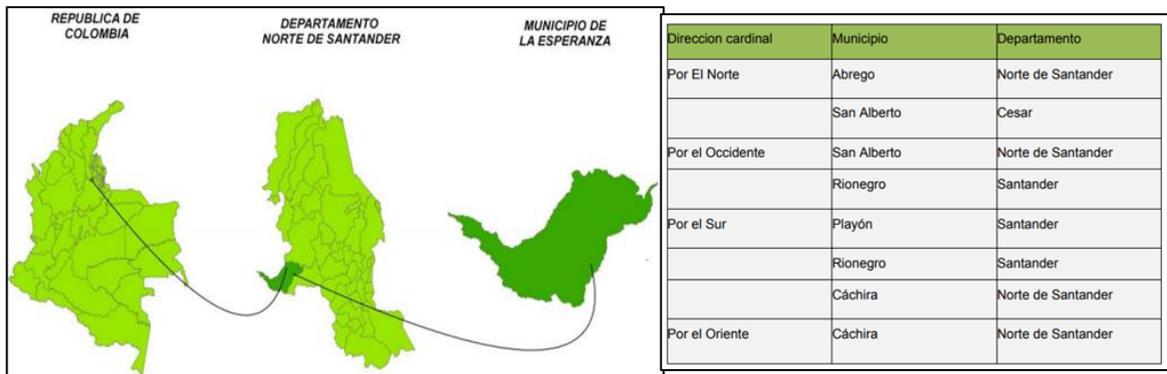
En el Municipio de La Esperanza Departamento de Norte de Santander, existen minas que están produciendo carbones bituminosos de una características especiales y que hoy se están exportando a los Estados Unidos de América, los cuales se considera viable mejorar con tecnologías llegadas al país que evidencian mejoras en la reducción de emisiones contaminantes como material particulado y gases.

Por ello en esta monografía se busca caracterizar dicho carbón y que mediante una mezcla básica inicial, verificar la viabilidad en procesos de combustión de que este bioaditivo logre reducir los contaminantes.

2. MARCO TEÓRICO

La cabecera del municipio de La Esperanza está localizada a los 07° 38' 21" de latitud norte y 73° 20' 09" de longitud oeste. Altura sobre el nivel del mar: 180 m. Dista de Cúcuta 300 km por la vía de Bucaramanga, el cual es el medio más fácil de acceso a la capital del departamento. Su área municipal es de 649,443672 Km². En la Figura 1 se presenta la localización geográfica y los límites del Municipio de la Esperanza.

Figura 1. Localización Geográfica y límites del Municipio La Esperanza.



Fuente: CONSEJO MUNICIPAL DE GESTION DEL RIESGO DE DESASTRES. Plan municipal para la gestión del riesgo de desastres. Municipio de la Esperanza. 2012. Disponible en http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/18596/La%20Esperanza_Norte%20de%20Santander.pdf?sequence=1&isAllowed=y

La economía del municipio de La Esperanza se basa principalmente en la agricultura, el sector pecuario, la industria, el comercio y por último la minería gracias a la explotación de los yacimientos petrolíferos y a la explotación de manera artesanal de una mina de Carbón Natural en la verdea La Ciénaga, lugar de donde fue extraído el mineral utilizado para la realización de este proyecto.

3. TÉCNICAS UTILIZADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN

La realización de la presente monografía se basa en la caracterización de los materiales a validar ambientalmente, para ello es necesario presentar las técnicas a desarrollar así:

3.1 ANÁLISIS ELEMENTAL

El análisis elemental es una técnica instrumental que proporciona el contenido de carbono, nitrógeno, hidrógeno y azufre presente en una muestra homogénea. Esta técnica se basa en la oxidación completa de la muestra, que tiene lugar a 1000 °C en oxígeno puro. Los productos que resultan de la combustión son separados y analizados de diferente manera según el equipo empleado. El resultado final es la cantidad de C, H, N y S que contiene la muestra expresada en porcentaje respecto a su peso total.

3.2 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

La espectroscopía infrarroja (IR) es una técnica basada en las vibraciones de los átomos de una molécula. Un espectro IR se obtiene comúnmente pasando radiación IR a través de una muestra y determinando qué fracción de la radiación incidente se absorbe en una energía particular. La energía a la cual cualquier pico en un espectro de absorción aparece corresponde a la frecuencia de una vibración de una parte de la molécula.

Para que una molécula muestre sus absorciones, debe poseer ciertas características específicas como son:

- Un momento dipolar eléctrico de la molécula debe cambiar durante el movimiento.

- Las interacciones de la radiación IR con la materia se pueden entender en términos de cambios en dipolos moleculares asociados con vibraciones y rotaciones.
- Los átomos en las moléculas pueden moverse uno respecto del otro, es decir, las longitudes de enlace pueden variar o un átomo puede moverse fuera de su plano actual. Esta es una descripción de los movimientos de estiramiento y flexión que colectivamente se conocen como vibraciones.
- Las vibraciones pueden involucrar ya sea un cambio en la longitud de la unión (estiramiento) o ángulo de unión (flexión).
- Algunos bonos pueden estirar en fase (estiramiento simétrico) o fuera de fase (asimétrica extensión).
- Existen muchas vibraciones diferentes incluso para moléculas bastante simples.

La complejidad de un espectro IR surge del acoplamiento de vibraciones sobre un gran parte de o sobre la molécula completa y se llaman vibraciones esqueléticas. Las bandas asociadas con vibraciones esqueléticas probablemente se ajusten a un patrón o huella digital de la molécula como un todo, en lugar de un grupo específico dentro de la molécula [5] [6].

3.3 ANÁLISIS DEL PODER CALORÍFICO

El valor calorífico es definido como la cantidad de calor que se obtiene mediante la combustión completa de la unidad de masa o de volumen de un combustible, quedando los productos de la combustión a la temperatura a la que se encontraban inicialmente el combustible y el comburente, es decir que el poder calorífico es el calor de reacción de combustión realizada a temperatura constante. Al producirse la combustión se produce una transformación de energía química del combustible en energía térmica, dicha energía térmica puede transferirse en forma de calor al medio si la combustión se realiza en un recinto no adiabático o bien

puede incorporarse como energía interna térmica a los productos de la combustión si se realiza en un ambiente adiabático [7].

El valor calorífico es determinado con la ayuda de una bomba calorimétrica la cual está conformada por un material resistente a la corrosión con cierre auto sellante. Una línea de oxígeno es conducida en el calorímetro, otra línea extrae los gases presentes en la bomba después de la incineración y hay una conexión aislada para el cable de encendido. También hay un soporte para el crisol y una salida para la corriente de encendido. Adicional a esto una pantalla de metal se puede unir por encima del lugar de incineración para reflejar el calor radiante [8]. El valor calorimétrico de las muestras se calculó usando la siguiente ecuación:

$$H_o = \frac{C \cdot \Delta T - Q}{m}$$

Dónde: m= Peso inicial del material espécimen [g]

Q= cantidad de calor generada por la cápsula de gelatina y el cable de encendido [J]

ΔT = aumento de temperatura en el calorímetro [°C]

C = capacidad calorífica del calorímetro a partir de las mediciones de calibración [J / K]

3.4 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA)

El Análisis por Termo Gravimetría (Thermo Gravimetric Analysis TGA) se define como la técnica en que se mide el porcentaje del peso de una muestra frente al tiempo o a la temperatura mientras se somete a un programa de temperatura controlado en una atmósfera específica. Lo habitual es que se produzca una pérdida de peso, sin embargo también es posible que haya una ganancia de peso en algunos casos [9]

La atmósfera puede ser estática o dinámica con un caudal determinado (también se emplean condiciones de presión reducida) y los gases más habituales son N₂, aire, Ar, CO₂. También se usan H₂, Cl₂, o SO₂.

Una característica fundamental de la técnica TGA es que sólo permite detectar procesos en los que se produce una variación de peso tales como descomposiciones, sublimaciones, reducción, desorción, absorción, mientras que no permite estudiar procesos como fusiones, transiciones de fase [9].

3.5 CROMATOGRAFÍA DE GASES

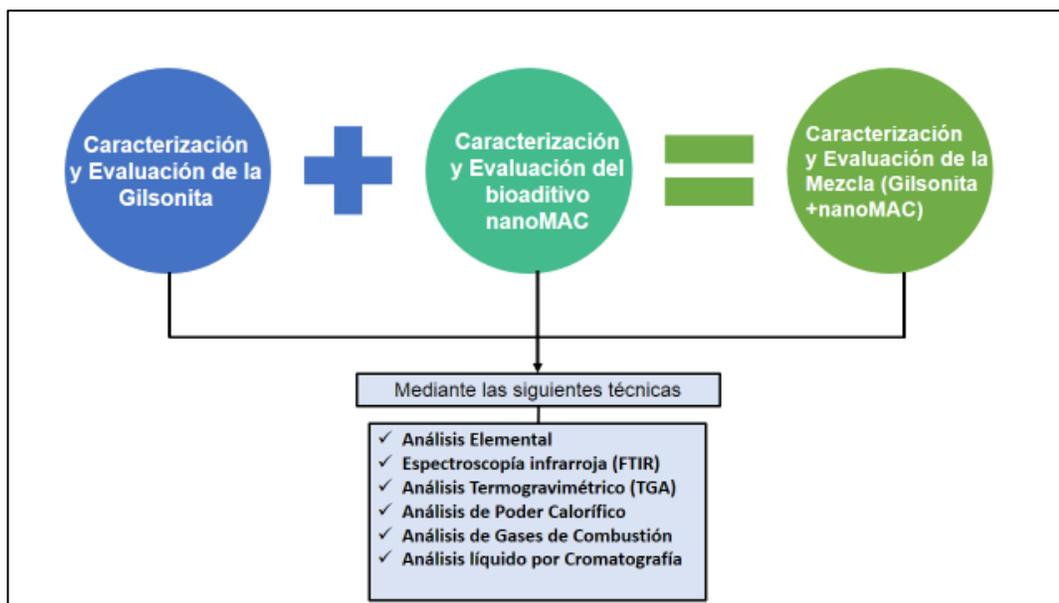
La cromatografía de gases es una técnica utilizada para separar los componentes de una mezcla. Consiste en una fase estacionaria no polar (columna) y una fase móvil. La fase estacionaria es sílica que se ha tratado con RMe₂SiCl. La fase móvil actúa de portador de la muestra. La muestra en solución es inyectada en la fase móvil. Los componentes de la solución emigran de acuerdo a las interacciones no-covalentes de los compuestos con la columna. Estas interacciones químicas, determinan la separación de los contenidos en la muestra. La utilización de los diferentes detectores dependerá de la naturaleza de los compuestos a determinar [10].

La metodología de análisis por cromatografía de gases permite conocer la distribución estereo específica de los ácidos grasos, utiliza mono y diglicéridos como sustrato de análisis, en donde estos glicéridos parciales se obtienen tras la hidrólisis de los triglicéridos [11]. Como consecuencia, en este proyecto se usará dicha técnica para conocer los compuestos de la muestra de interés.

4. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

En la Figura 1 se muestra el diagrama de la metodología empleada durante la realización del presente proyecto.

Figura 2. Diagrama de la metodología empleada en el proyecto



4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA GILSONITA, EL BIOADITIVO VEGETAL Y LA MEZCLA

4.1.1 Análisis Elemental. Con la finalidad de determinar la clase de elementos químicos y la proporción de la cual están constituidas las muestras de Gilsonita sólida y la mezcla de Gilsonita + Bioaditivo nanoMAC se realizó un análisis elemental utilizando el Analizador Elemental de Carbono, Nitrógeno, Hidrógeno, Azufre y Oxígeno llamado *Vario El Cube* el cual cuenta con detector de termoconductividad (TCD). El cual fue facilitado por el Laboratorio Instrumental de Análisis Químico de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander.

4.1.2 Espectroscopia Infrarroja. Para determinar la composición química de la Gilsonita, el Bioaditivo nanoMAC y la mezcla (compuesta por 1ml de Bioaditivo nanoMAC y 1g de Gilsonita) las muestras fueron analizadas mediante espectroscopia infrarroja utilizando el equipo Infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) *marca Shimadzu modelo IRTracer-100* con software de adquisición de espectros LabSolutions IR, base de datos Shimadzu Corporation y rango de espectro de $500-4000\text{ cm}^{-1}$, el cual fue facilitado por la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, UIS.

4.1.3 Análisis Termogravimétrico (TGA). Mediante el equipo de Balanza *Termogravimétrica Discovery tga5500*, marca TA instruments con software de análisis Trios v4.2.1 se establecieron las propiedades térmicas de las muestras, realizando un registro continuo de la pérdida de masa presentada a temperaturas determinadas. Las muestras de Gilsonita, Bioaditivo NanomAC y la Mezcla presentaron un peso inicial de (5,107 mg; 17,97 mg y 3,272 mg respectivamente). Para las tres muestras se empleó una rampa de 30°C de temperatura inicial en atmósfera de Nitrógeno(N_2) con paso de $30^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$ y temperatura final de 750°C en atmósfera de Aire a razón de $50\text{ml}/\text{minuto}$. Este equipo fue facilitado por la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, UIS.

4.1.4 Análisis De Poder Calorífico. Para conocer la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión de las muestras Gisonita, Bioaditivo nanoMAC y mezcla con un peso inicial de (0,962 g, 1,802g y 1,146g respectivamente). Se realizó el análisis de poder calorífico a través de la *Bomba calorimétrica modelo C200*, Marca P.A. Hilton Ltd. A presión de 23 psi para la combustión y 33 psi para el poder calorífico. Este equipo fué facilitado por la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, UIS.

4.1.5 Análisis De Gases De Combustión. Con la finalidad de conocer y cuantificar los gases emitidos en el proceso de combustión para la Gilsonita sólida

y la mezcla (G+N) se utilizó el Sistema Integrado de Emisiones *Enerac modelo 700* el cual cuenta con sensores para la detección y la determinación del Óxido Nítrico (NO), Dióxido de Nitrógeno (NO₂) e Hidrocarburos como el Dióxido de Carbono (CO₂) y el Monóxido de Carbono (CO) utilizando 1g para la Gilsonita sólida y 1g para la mezcla (G+N). Este procedimiento se realizó por triplicado.

4.1.6 Análisis Por Cromatografía de gases. Para analizar las muestras líquidas de Bioaditivo Nanomac y mezcla de Gilsonita con éste, se usó el *Cromatografo de gases 7890A* bajo las siguientes condiciones:

- Detector de triple cuadrupolo 5975C.
- Rampa de calentamiento 50°C a velocidad de 5°C/min hasta 80°C, con isoterma a 1 minuto 2°C/min hasta 160°C.
- Columna DB-WAX con flujo de 1 mL/min, y modo de inyección splitless. (El software usado fue Mass Hunter).

La preparación de las muestras se realizó de la siguiente manera:

- Muestra de Bioaditivo: se utilizaron 2ml de Bioaditivo nanoMAC líquida, con inyección de hexano (estas muestras se realizaron por duplicado)
- Para la mezcla de Gilsonita con NanoMAC: se usaron 10 mg los cuales se filtraron con 3,5 ml de hexano (estas muestras se realizaron por duplicado)

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS ELEMENTAL

El análisis elemental (EA) da acceso a los contenidos de carbono, hidrógeno, azufre, oxígeno y nitrógeno de una determinada muestra. En la Tabla 1 Se presenta la composición química de la Gilsonita la cual presenta moléculas compuestas predominantemente de Carbono e Hidrógeno y en menor proporción se evidencia la presencia de Nitrógeno, Azufre y Oxígeno.

Tabla 1. Composición química de la Gilsonita

Gilsonita	
Sustancia	Composición (%)
C	84,33
N	1,64
H	9,67
S	4,06
O	0,29

Fuente: ESCUELA DE QUÍMICA. Información tomada del Análisis Elemental. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 2018

En la Tabla 2. Se presenta la composición química de la mezcla (Gilsonita + Bioaditivo nanoMAC) en donde se evidencia una disminución de los elementos Carbono, Nitrógeno y Azufre y un aumento en la composición de Hidrógeno y Oxígeno. En el proceso de combustión para el caso de la mezcla (G+N) fue favorable el aumento de Hidrógeno y Carbono ya que eliminó reacciones secundarias para la generación de CO y NO.

Tabla 2. Composición química de la mezcla (G+N)

Mezcla de Gilsonita con Bioaditivo	
Sustancia	Composición (%)
C	78,19
N	0,77
H	10,03
S	1,81
O	9,17

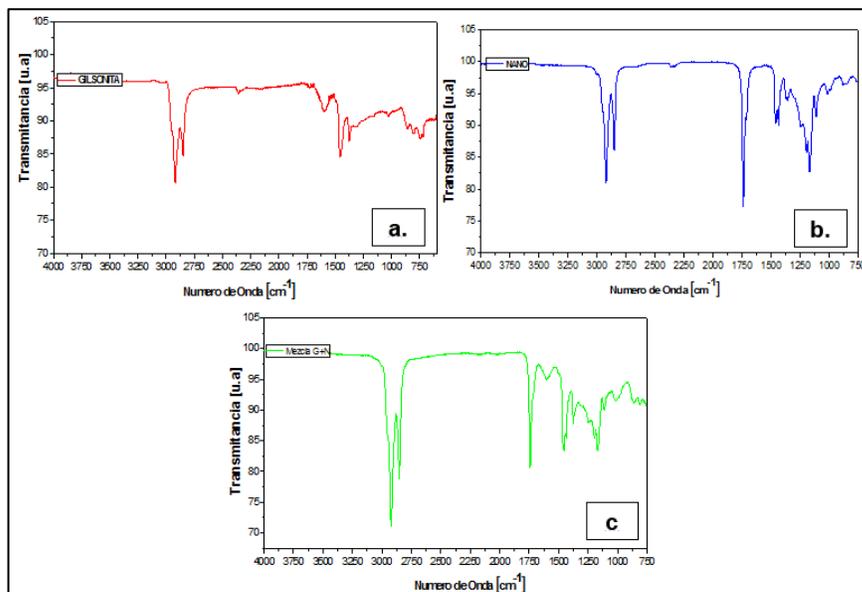
Fuente: ESCUELA DE QUÍMICA. Información tomada del Análisis Elemental. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 2018

5.2 ANÁLISIS INFRARROJO

En la Figura 3 se presenta el análisis FTIR de las tres muestras. Para el caso de la Gilsonita Figura 3(a) se evidencia la aparición de las bandas 2920 cm⁻¹ y 2850 cm⁻¹ relacionadas con el estiramiento simétrico y asimétrico del grupo C-H. La intensidad del pico en 2920 cm⁻¹ es mayor que el pico a 2850 cm⁻¹ para muestras de betunes e indica la presencia de cadenas alifáticas largas en Gilsonita. El carácter alifático pronunciado está relacionado con su idoneidad para la licuefacción [12]. Por otra parte la aparición de la banda 1598 cm⁻¹ está relacionada con las vibraciones C = C en el plano de los anillos aromático [13].

La aparición de las bandas a 1455 cm⁻¹ y 1375 cm⁻¹ se deben a frecuencias de flexión del enlace asimétrico C-CH₃ y / o metileno (1455 cm⁻¹) y del enlace simétrico C-CH₃ (1375 cm⁻¹). De igual forma se evidenció la aparición de la banda 1029 cm⁻¹ la cual es atribuida a los enlaces C-O en estructuras de betún [13]. En el rango de bajas frecuencias se evidencia la aparición de la banda 858 cm⁻¹ la cual está relacionada a los enlaces (C=S) en la gilsonita [14].

Figura 3. Espectros FT-IR de las tres muestras a) Gilsonita ; b) Bioaditivo nanoMAC; c) Mezcla (G+N).

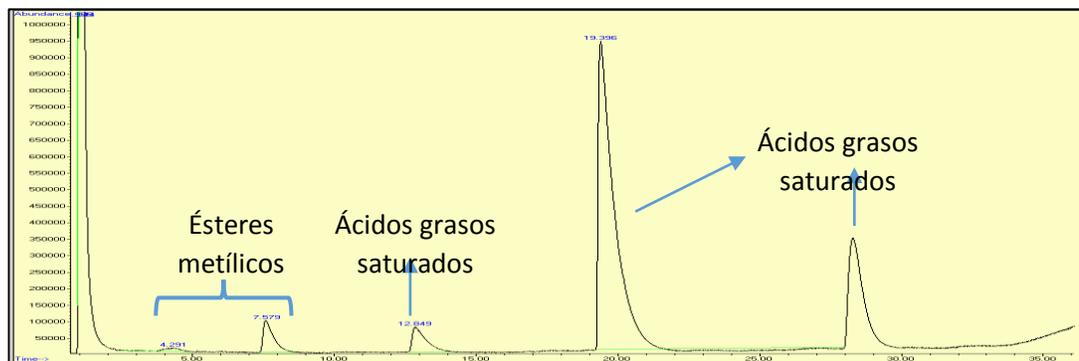


En la Figura 3(b) se presenta el análisis FTIR para el Bioaditivo nanoMac en donde es posible evidenciar a altas frecuencias la aparición de las bandas 2922 cm⁻¹ y 2852 cm⁻¹ las cuales están relacionadas con el estiramiento asimétrico y simétrico del grupo metileno -CH₂. De igual manera se presentan bandas a 1741 cm⁻¹ y al 1463 cm⁻¹ relacionadas con el estiramiento axial de la unión C=O de éster alifático y con la deformación asimétrica del C-H en -CH₂- respectivamente [15,16]. La aparición de la banda a 1435 cm⁻¹ puede ser atribuida a la presencia del caprilato de potasio el cual actúa como surfactante y reduce la tensión superficial del líquido [17] y la banda a 1246 cm⁻¹ es atribuida al estiramiento del grupo C-O-C [18]. Para el caso de las bandas 1195 cm⁻¹ y 1168 cm⁻¹ corresponden a las vibraciones de un grupo alcano cuaternario tipo CH₃-C-CH₃, por otro lado a bajas frecuencias hacia 852 cm⁻¹ aparecen señales de estiramiento de C=C de flexión del grupo C-H y hacia 721 cm⁻¹ aparece la vibración relacionada con el estiramiento asimétrico del Bióxido de Carbono O=C=O [19].

Adicional a esto, se pueden observar otros picos que sobresalen, como lo son el 2- metilbutano (pico 9,563), pentano (pico 10,049), 2-metilpentano (pico 9,865), hexano (pico 10,388), metilciclopentano (pico 10,785), los cuales representan a los hidrocarburos alifáticos saturados que se obtienen a partir del petróleo o del gas natural mediante destilación fraccionada [21] presentando insolubilidad en agua pero solubilidad en disolventes orgánicos tales como el éter, benceno o sulfuro de carbono, presentan alta estabilidad y generan gran energía dentro de su combustión.

En la Figura 5 se muestra el espectrómetro de masas para la mezcla Gilsonita con el Bioaditivo Nanomac, en él se observan varios picos característicos dentro de los que sobresalen el octanoato de metilo (pico 7,579), correspondiente a un éster metílico o alquil éster. Se ha encontrado que éstos, generan estabilidad compuesto, y poseen características de lubricidad superiores cuando se trata como aditivo para mejorar los combustibles derivados del petróleo, ya que mejora la longitud de la cadena de carbono y el grado de insaturación [22]

Figura 5. Cromatograma de la mezcla (G+N)



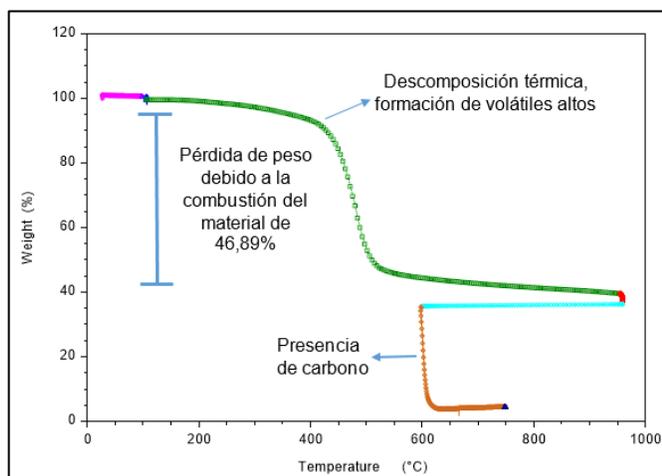
Adicional a esto, se encontró la presencia de ácidos grasos como lo son el ácido decanóico (pico 12,849) y ácido dodecanóico (pico 19,396), los cuales, tienen alta estabilidad contra la oxidación, poseen menor tamaño y mayor solubilidad lo que facilita su transporte por otros compuestos. [23]

5.4 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA)

A cada una de las muestras se le realizó el análisis termogravimétrico para conocer las reacciones de descomposición y volatilización de estos compuestos a determinada temperatura. A continuación, se describirán las curvas termogravimétrico para cada sustancia, donde se puede observar en cada uno de los gráficos la variación del peso vs temperatura, así como los porcentajes de pérdida de peso en cada intervalo señalado.

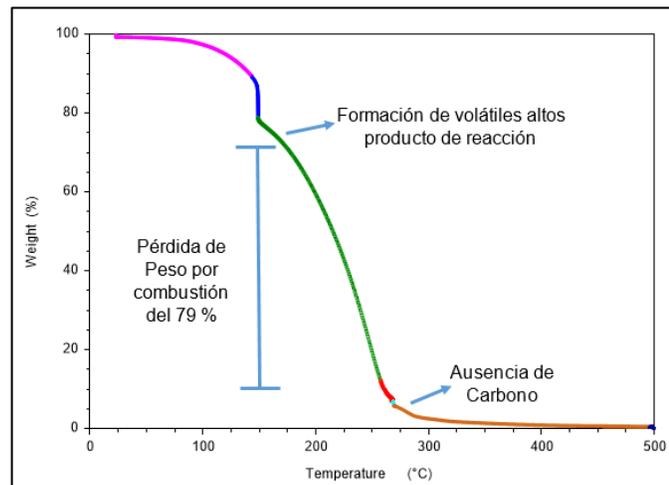
5.4.1 Análisis TGA para la muestra Gilsonita. En la Figura 6, se observa la pérdida inicial por descomposición térmica con formación de componentes volátiles altos, la cual se da por el proceso de combustión o reacción química, ésta ocurre entre 100°C y 400 °C [24], después inicia su pérdida de peso por descomposición del material a medida que aumenta la temperatura hasta 530 °C generando una pérdida del 46,89 % de la muestra, aquí se realiza la combustión de hollín durante el cambio de gas. Sólo después de los 900°C el material se descompone totalmente.

Figura 6. Termograma para la muestra Gilsonita



5.4.2 Análisis TGA para la muestra de Bioaditivo Nanomac. En la Figura 7, se observa una pérdida inicial de materias volátiles de las muestras a temperatura inferior de 130 °C, donde tiene lugar la evaporación de la humedad y liberación de CO, CO₂, y materiales extractables. También se denota algún proceso de secado (algunos compuestos con menos punto de ebullición se evaporaron rápidamente), luego quedan los de mayor peso molecular y punto de ebullición (mono, di y triglicéridos), en concordancia con la baja conversión a metilésteres, dando una pérdida de peso del 79%. Seguido a esto, se observa que después de los 250°C empieza la descomposición total de las moléculas de metil o etil ésteres, dando lugar a la no presencia de carbonos en la muestra [25]. Se concluye que esta muestra presenta gran cantidad de material volátil, debido a la rapidez de pérdida de peso inicial a baja temperatura.

Figura 7. Termograma para la muestra de Nanomac

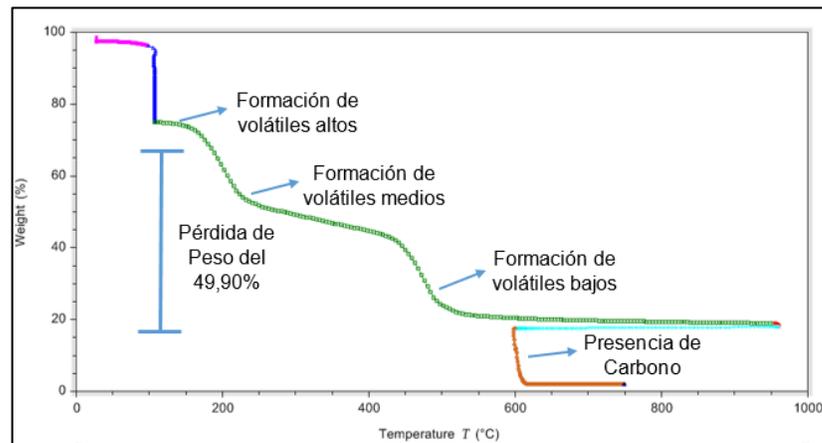


5.4.3 Análisis TGA para la muestra de la mezcla Gilsonita – Bioaditivo Nanomac. En la figura 8 se observa el termograma de la mezcla de gilsonita con el bioaditivo, se puede evidenciar que al aplicarle el compuesto nanoestructurado la velocidad de descomposición por temperatura con respecto a la pérdida de peso, la cual es del 49,90%, se realiza de manera más controlada mejorando la estabilidad del compuesto a medida que la temperatura aumenta [26]. Además se

observa la aparición de nuevos compuestos al mezclar la Gilsonita con el Bioaditivo nanoMAC ya que hay presencia de volátiles altos, medios y bajos, desde un rango de temperatura entre 150 °C y 500 °C favoreciendo la combustión completa del material [26], en comparación con el termograma de la Gilsonita, donde todo el material volátil reacciona inmediatamente originando así reacciones parciales.

A continuación se describe el termograma donde como ya se había mencionado antes, la combustión de la mezcla empieza desde los 150 °C hasta los 500 °C, cada rampa indica la descomposición de volátiles por la reacción del hollín a gas, se evidencia también la existencia de contenido de carbono. Por otro lado, después de los 600 °C la mezcla se descompone totalmente [24].

Figura 8. Termograma para la muestra de Gilsonita con Bioaditivo Nanomac



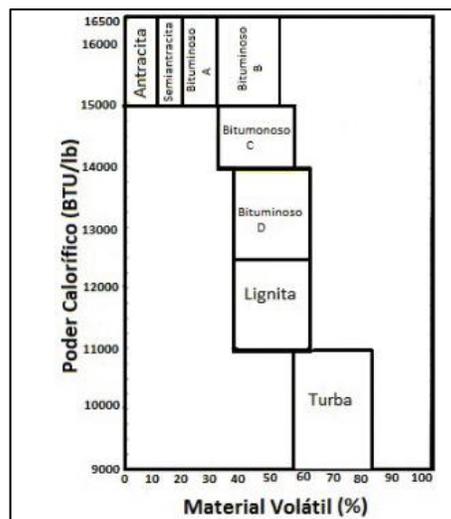
5.5 ANÁLISIS DE PODER CALORÍFICO

En Estados Unidos y Canadá, la ASTM (American Society for Testing and Materials) desarrolló un método de clasificación de carbones basado en parámetros obtenidos mediante ensayos normalizados. La norma busca que las propiedades utilizadas para la clasificación sean lo suficientemente sencillas de determinar mediante el análisis próximo y el poder calorífico [27]. Para el caso de

Colombia el instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, adopta en su totalidad los lineamientos expuestos en la Norma Americana ASTM D388-12, para la clasificación de los carbones, según su rango y se dispone de la norma NTC 4196 [28]

Existen Otras formas típicas para la clasificación de carbones fundamentados en métodos gráficos como el diagrama de Van Krevelen [29] y el método gráfico de Parr el cual propone ocho categorías para los carbones según sus contenidos de humedad, material volátil, carbono fijo, cenizas, azufre y poder calorífico [30]. En la Figura 9 es presentado el gráfico de Parr para la clasificación de los carbones el cual contiene en el eje de la abscisa el contenido de material volátil (%) y en la ordenada presenta el poder calorífico (BTU/lbm). A partir de estos parámetros se realizó la clasificación de la Gilsonita de acuerdo a su material Volátil (46%) y su poder calorífico presentado en la Tabla 3 quedando ubicada en la zona de carbón Bituminoso alto en volátiles tipo B.

Figura 9. Gráfico de Parr para la clasificación de los carbones



Fuente: BARRERA ZAPATA, Rolando; PEREZ BAYER, Juan F and SALAZAR JIMENEZ, Carlos. Carbones colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas. Rev. ion [online]. 2014, vol.27, n.2 [cited 2018-06-15], pp.43-54. Available from: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-100X2014000200005&lng=en&nrm=iso>. ISSN 0120-100X.

En la Tabla 3 Se presentan los valores del poder calorífico (BTU/lbm) de las tres muestras los cuales fueron obtenidos a través del ensayo de poder calorífico. Es posible apreciar que la mezcla (G+N) presenta mayor poder calorífico que la Gilsonita lo cual indica que en el caso de la mezcla hay una mayor cantidad de energía desprendida al producirse la reacción. Esto puede ocurrir debido al aumento del contenido de material volátil en la Mezcla ya que a mayor cantidad de volátiles los carbones son más reactivos debido a la liberación de esos volátiles a menores temperaturas y mayores velocidades de reacción incrementando así la capacidad de transformación de la mezcla (G+N) en procesos termoquímicos [31].

Tabla 3. Poder Calorífico (BTU/lbm) de las tres muestras

TIPO DE MUESTRA	PODER CALORÍFICO [BTU/lbm]
Gilsonita	16427,01
Aceite Vegetal	16195,44
Mezcla (Gilsonita + Aceite Vegetal)	16490,97

Fuente: ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL. Información tomada del Análisis de poder calorífico. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 2018

5.6 ANÁLISIS DE EMISIONES

En la Tabla 4 se evidencian las emisiones generadas por el proceso de combustión para cada uno de los compuestos a evaluar, se encontró que el porcentaje de emisiones para la mezcla disminuye considerablemente al aplicarle el Bioaditivo nanoMAC para el caso de compuestos como CO₂, CO, HC, NO_x y NO₂.

Tabla 4. Emisiones para la Gilsonita y la Mezcla (G+N)

Compuesto	Emisiones de contaminantes					
	CO2 [%]	CO [mg/m3]	HC [ppm]	NOX [mg/m3]	NO2 [mg/m3]	NO [mg/m3]
Gilsonita	28,1	13	2	498,8	452,3	44,55
Mezcla (Gilsonita + Bioaditivo Nanomac)	26,7	0	0	369,05	285,3	54,9

Fuente: ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL. Información tomada del Análisis de Emisiones. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 2018

La combustión de un material se da cuando el carbón se pone en contacto con el oxígeno (O₂) a una temperatura tal, que el carbono se convierta en carbono fijo y volátil. Para formar una combustión completa es necesario que haya un buen suministro de aire, así como un buen contacto entre ambos materiales, ya que sin esto, ocurrirán reacciones secundarias o combustiones incompletas, dejando material sin reaccionar, además de producir otras sustancias que se derivan de dichas reacciones [32]. Dado lo anterior, se puede observar que en la Gilsonita, existe generación de CO el cual es generado por la combustión incompleta del carbono a CO₂.

Con los datos obtenidos, se quiere encontrar un comparativo de emisión con la ley Colombiana, para esto se escogió la emisión producida por la combustión externa de materiales y la combustión de los hornos de la industria cementera pues estos son los procesos que más se asemeja a la combustión de carbón.

Según la resolución 909 de 2008 establece que la actividad industrial que cuente con equipos de combustión externa con calentamiento indirecto, deben cumplir con los estándares de emisión admisibles, el cual es para el NOX de 350 mg/m³ y para el CO es de 100 mg/m³ [33]. Se concluye que para la mezcla Gilsonita con el Bioaditivo, se cumple con los estándares de emisión, pues ésta se encuentra por debajo del límite admisible.

6. RECOMENDACIONES

Realizar un estudio variando la relación de la Gilsonita con el Bioaditivo Nanomac con la finalidad de conocer el efecto de las emisiones a diferentes concentraciones.

Realizar el proceso de combustión de la Gisonita con el Bioaditivo Nanomac a mayor escala (chimenea) realizando la medición de las emisiones de gases y de material particulado, con el fin de verificar el cumplimiento con las normas establecidas.

Realizar la medición del contenido de SO₂ emitido en el proceso de combustión a la Gilsonita y a la mezcla para determinar la influencia de la aplicación de este Bioaditivo sobre este compuesto de gran importancia para el medio ambiente y la salud humana.

7. CONCLUSIONES

La adición del Bioaditivo nanoMac contribuyó a la disminución en las proporciones de los elementos Carbono, Nitrógeno y Azufre y el aumento del contenido de Hidrógeno y Oxígeno favoreciendo a la combustión completa.

Se observó una disminución de emisiones contaminantes al agregar el Bioaditivo nanoMAC al compuesto Gilsonita, siendo éste, un aditivo que eventualmente ayudaría a la conservación del medio ambiente, en el uso de este carbón en procesos de combustión, reduciendo las concentraciones de gases tóxicos a la atmósfera como lo son el CO₂, CO, HC, NOX, NO₂ causales del efecto invernadero.

En la mezcla de Gilsonita con Bioaditivo nanoMAC se encontró la presencia de metilésteres los cuales son compuestos que ayudan a mejorar el transporte o flujo cuando se tratan como aditivos en combustibles, ya que aumentan las cadenas de carbonos, las cuales modifican su viscosidad.

Al agregar el Bioaditivo nanoMAC, se mejoró la estabilidad de la mezcla ya que su pérdida de peso disminuyó de manera progresiva, en comparación con el termograma de pérdida de peso de la Gilsonita sólida sin aditivo.

La mezcla de Gilsonita con Bioaditivo Nanomac favoreció al aumento del poder calorífico gracias al aumento del material volátil el cual hace que la Gilsonita sea más reactiva aumentando su capacidad de transformación en procesos termoquímicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TACIAS PASCACIO, Veymar Guadalupe .Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiesel. Instituto Tecnológico de Veracruz. 2015
- [2] Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC). Emisiones. S.f. Sitio web del SIAC: <http://www.siac.gov.co/emisionesaire>
- [3] GÓMEZ MARÍN Miryam. Evaluación del impacto en la concentración del PM 2.5 a partir del mejoramiento del combustible en los vehículos. Universidad de Antioquia. 2011.
- [4] Carbón bituminoso Características y aplicaciones en energía. Disponible en: <https://es.routestofinance.com/bituminous-coal-characteristics-and-applications-in-energy>.
- [5] Morcillo, J. (1981). Espectroscopía infrarroja. *Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico*.
- [6] Faraldos, M., & Goberna, C. (Eds.). (2011). *Técnicas de análisis y caracterización de materiales*. Editorial CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- [7] Martina, P., Aeberhard, R., Corace, J., García Solá, E., & Bucki Wasserman, B. (2011). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALORÍMETRO DE JUNKERS PARA DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DEL BIOGÁS.
- [8] Endres, H. J., & Siebert-Raths, A. (2011). Engineering biopolymers. *Eng. Biopolym*, 71148.
- [9] GRANADOS, Yenny. Importancia De Los Ensayos TGA y DSC en el Estudio de las Propiedades Térmicas de Mezclas Asfálticas. Universidad distrital Francisco José de Caldas. Ingeniería en Topografía. 2015.

- [10] PINÉ QUTRANTES, Rosa. Técnicas de análisis de aceite de oliva. Capítulo 9.
- [11] PERONA, Javier S. La cromatografía líquida de alta eficacia en la separación de triglicéridos de grasas animales complejas. Instituto de la Grasa (CSIC). Sevilla.
- [12] Nciri, N., Song, S., Kim, N., & Cho, N. (2014). Chemical characterization of gilsonite bitumen. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 5(5), 1.
- [13] Wang, F. C., Feve, M., Lam, T. M., & Pascault, J. P. (1994). FTIR analysis of hydrogen bonding in amorphous linear aromatic polyurethanes. I. Influence of temperature. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 32(8), 1305-1313.
- [14] Wiles, D. M., Gingras, B. A., & Suprunchuk, T. (1967). The C= S stretching vibration in the infrared spectra of some thiosemicarbazones. *Canadian Journal of Chemistry*, 45(5), 469-473.
- [15] Análise exploratória aplicada a espectros de reflexão total atenuada no infravermelho com transformada de fourier (atr-ftir) de blendas de biodiesel/diesel
- [16] Faix, O., & Beinhoff, O. (1988). FTIR spectra of milled wood lignins and lignin polymer models (DHP's) with enhanced resolution obtained by deconvolution. *Journal of wood chemistry and technology*, 8(4), 505-522.
- [17] Shukla, N., Liu, C., Jones, P. M., & Weller, D. (2003). FTIR study of surfactant bonding to FePt nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic materials*, 266(1-2), 178-184.
- [18] Singh, P. S., Joshi, S. V., Trivedi, J. J., Devmurari, C. V., Rao, A. P., & Ghosh, P. K. (2006). Probing the structural variations of thin film composite RO membranes obtained by coating polyamide over polysulfone membranes of different pore dimensions. *Journal of membrane science*, 278(1-2), 19-25.

- [19] Avella, E. (1997). Tablas de correlación de espectroscopía infrarroja. *Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Bogotá.*
- [20] MURCIA ORDOÑEZ, Betselene. Caracterización de biodiesel obtenido de aceite residual de cocina. *Revista Colombiana de Biotecnología*. Vol. XV No. 1. Julio 2013 61-70
- [21] HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS SATURADOS. CONCEPTO Y PROPIEDADES. Disponible en: <http://www.hiru.eus/es/quimica/hidrocarburos-alifaticos-saturados-concepto-y-propiedades>.
- [22] BENJUMEA HERNÁNDEZ, Pedro Nel. Libro Biodiésel: Producción, calidad y caracterización. Editorial Universidad de Antioquia. Primera edición. 2009
- [23] MORA GIL, Olga Lucía. Ácido láurico: componente bioactivo del aceite de palmiste. *Cenipalma. Revista PALMAS-Vol. 24 No. 1.2003.*
- [24] WIDMANN, Georg. Información para los usuarios de los sistemas de termoanálisis METTER TOLEDO. UserCom.2000
- [25] MORALES, Water. Termogravimetría y espectroscopía De infrarrojo para el control del rendimiento en la obtención de aquil esteres. Universidad Tecnológica Nacional.
- [26] PRIETO, Ismael. La combustión. Disponible en: http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/1002/mod_resource/content/1/1C_C12757_0910/04_GT04_La_combustion_en_las_centrales_termicas.pdf.
- [27] ASTM. American Society for Testing and Materials, Standard Classification of Coals by Rank. 2012.
- [28] NTC. Norma Técnica Colombiana. NTC4196, Clasificación del carbón por rango. 2003.
- [29] Spliethoff H. Power Generation from solid fuels. Power systems. New York, USA: Springer Publishing; 2010.
- [30] Parr S. The coal clasification. Issue 180 of Bulletin, University of Illinois, 1928.

- [31] Barrera Zapata, R., Pérez Bayer, J. F., & Salazar Jiménez, C. (2014). Carbones colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas. *Revista ION*, 27(2).
- [32] LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN. Textos Científicos. Disponible en: <https://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/combustion-carbon>
- [33] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 909 de 5 de Junio de 2008. República de Colombia.

BIBLIOGRAFIA

Análise exploratória aplicada a espectros de reflexão total atenuada no infravermelho com transformada de fourier (atr-ftir) de blendas de biodiesel/diesel

ASTM. American Society for Testing and Materials, Standard Classification of Coals by Rank. 2012.

AVELLA, E. Tablas de correlación de espectroscopía infrarroja. *Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Bogotá*. 1997

BARRERA, R., PÉREZ, J. F., & SALAZAR, C. Carbones colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas. *Revista ION*, 27(2). 2014.

BENJUMEA HERNÁNDEZ, Pedro Nel. Libro Biodiésel: Producción, calidad y caracterización. Editorial Universidad de Antioquia. Primera edición. 2009

Carbón bituminoso Características y aplicaciones en energía. Disponible en: <https://es.routestofinance.com/bituminous-coal-characteristics-and-applications-in-energy>.

ENDRES, H. J., & SIEBERT-RATHS, A. Engineering biopolymers. *Eng. Biopolym*, 71148. 2011.

FAIX, O., & BEINHOFF, O. FTIR spectra of milled wood lignins and lignin polymer models (DHP's) with enhanced resolution obtained by deconvolution. *Journal of wood chemistry and technology*, 8(4), 505-522. 1988.

FARALDOS, M., & GOBERNA, C. (Eds.). *Técnicas de análisis y caracterización de materiales*. Editorial CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 2011.

GÓMEZ, M. Evaluación del impacto en la concentración del PM 2.5 a partir del mejoramiento del combustible en los vehículos. Universidad de Antioquia. 2011.

GRANADOS, Y. Importancia De Los Ensayos TGA y DSC en el Estudio de las Propiedades Térmicas de Mezclas Asfálticas. Universidad distrital Francisco José de Caldas. Ingeniería en Topografía. 2015.

Hidrocarburos Alifáticos Saturados. Concepto y propiedades. Disponible en: <http://www.hiru.eus/es/quimica/hidrocarburos-alifaticos-saturados-concepto-y-propiedades>.

Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC). Emisiones. S.f. Sitio web del SIAC: <http://www.siac.gov.co/emisionesaire>

La combustión del carbón. Textos Científicos. Disponible en: <https://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/combustion-carbon>

MARTINA, P., AEBERHARD, R., CORACE, J., GARCÍA SOLÁ, E., & BUCKI WASSERMAN, B. Diseño y construcción de un calorímetro de Junkers para determinación del poder calorífico del biogás. 2011.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial. Resolución 909 de 5 de Junio de 2008. República de Colombia.

MORA, O. Ácido láurico: componente bioactivo del aceite de palmiste. Cenipalma. Revista PALMAS-Vol. 24 No. 1. 2003.

MORALES, W. Termogravimetría y espectroscopía De infrarrojo para el control del rendimiento en la obtención de aquil esterres. Universidad Tecnológica Nacional.

Morcillo, J. Espectroscopía infrarroja. *Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico*. 1981.

MURCIA ORDOÑEZ, Betselene. Caracterización de biodiesel obtenido de aceite residual de cocina. *Revista Colombiana de Biotecnología*. Vol. XV No. 1. Julio 2013 61-70

NCIRI, N., SONG, S., KIM, N., & CHO, N. Chemical characterization of gilsonite bitumen. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 5(5), 1. 2014.

NTC. Norma Técnica Colombiana. NTC4196, Clasificación del carbón por rango. 2003.

PARR, S. The coal clasification. Issue 180 of Bulletin, University of Illinois, 1928.

PERONA, J. La cromatografía líquida de alta eficacia en la separación de triglicéridos de grasas animales complejas. Instituto de la Grasa (CSIC).Sevilla.

PINÉ, R. Técnicas de análisis de aceite de oliva. Capítulo 9.

PRIETO, I. La combustión. Disponible en:
http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/1002/mod_resource/content/1/1C_C12757_0910/04_GT04_La_combustion_en_las_centrales_termicas.pdf.

SHUKLA, N. LIU, C., JONES, P. M., & WELLER, D. FTIR study of surfactant bonding to FePt nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic materials*, 266(1-2), 2003. 178-184.

SINGH, P., JOSHI, S., TRIVEDI, J., DEVMURARI, C., RAO, A., & GHOSH, P. Probing the structural variations of thin film composite RO membranes obtained by coating polyamide over polysulfone membranes of different pore dimensions. *Journal of membrane science*, 278(1-2), 2006. 19-25.

SPLIETHOFF H. Power Generation from solid fuels. Power systems. New York, USA: Springer Publishing; 2010.

TACIAS, V. Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiesel. Instituto Tecnológico de Veracruz. 2015

WANG, F. C., FEVE, M., LAM, T. M., & PASCAULT, J. P. FTIR analysis of hydrogen bonding in amorphous linear aromatic polyurethanes. I. Influence of temperature. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 32(8), 1994. 1305-1313.

WIDMANN, G. Información para los usuarios de los sistemas de termoanálisis METTER TOLEDO. UserCom.2000

WILES, D., GINGRAS, B., & SUPRUNCHUK, T. The C= S stretching vibration in the infrared spectra of some thiosemicarbazones. *Canadian Journal of Chemistry*, 45(5), 1967. 469-473.