

**EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE ACEITE Y LA OBTENCIÓN DE UN
SUBPRODUCTO A PARTIR DE LAS CENIZAS DE BORRAS DE HIDROCARBUROS**

**SANTIAGO CASAS CERON
MANUEL EMILIO GONZALEZ GONZALEZ**

**Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**Director
NELSON FERNÁNDEZ BARRERO
Ingeniero Químico y de Petróleos**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ, D.C.
2024**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ingeniero Nelson Fernández Barrero

Bogotá D.C., junio de 2024

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luís Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica

Dra. Maria Fernanda Vega de Mendoza

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ramiro Augusto Forero Corzo

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decana Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora Departamento de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Química

Dra. Nubia Liliana Becerra Ospina

Directora Departamento de Ingeniería de Petróleos (E)

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

A Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida, colmarme de sabiduría, paciencia y fortaleza. A mi mamá, papá y hermana por su compañía incondicional, por su cariño, amor y esfuerzo que han puesto en darme las capacidades para poder realizar todo.

A Emilio porque gracias a él pude realizar todo esto, le deseo lo mejor y ojalá cumpla todos sus sueños y metas que tiene.

Finalmente, le agradezco a todas las personas que me acompañaron durante esta etapa de mi vida, familia, profesores y amigos que me contribuyeron y formaron como la persona que soy.

Santiago Casas Cerón

Agradezco profundamente a todas las personas que hicieron posible este logro. A mis abuelos, por su sabiduría y amor incondicional; a mi madre, por su cariño, apoyo y esfuerzo en mis metas propuestas. A mis hermanos, por su ejemplo de perseverancia.

A Santiago Casas, por su colaboración incansable. A mis mentores de prácticas especialmente a Lis, su apoyo incansable y los sabios consejos fueron fundamentales para alcanzar este logro. A mis profesores, por compartir su conocimiento y motivarme a superar mis límites.

A Dios, por darme la fuerza y sabiduría para enfrentar cada desafío. Y finalmente, a mí mismo, por no rendirme y trabajar con dedicación para alcanzar cada objetivo. Un agradecimiento especial también a mis fieles mascotas, quienes han sido una fuente constante de alegría y compañía en este viaje.

Manuel Emilio González González

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a:

Al ingeniero Nelson Fernández Barrero por su acompañamiento y apoyo continuo, por siempre atender nuestras inquietudes con la mejor disposición y por colaborarnos durante el desarrollo de todo el proyecto.

A la empresa X transportadora de Hidrocarburo juntos con los trabajadores por proporcionarnos toda su disposición y ayuda en la búsqueda de borras, por medio de los cuales se logró realizar y culminar este proyecto de grado.

A los encargados de los laboratorios de la Universidad de América por permitirnos experimentar el proyecto, logrando buenos resultados. Igualmente agradezco a la universidad por guiar nuestra formación profesional, junto con todos los profesores que nos brindaron su conocimiento para culminar la carrera con buenas bases para el futuro profesional.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS	18
1.1 Objetivo general	18
1.2 Objetivos específicos	18
2. MARCO REFERENCIAL	19
2.1 Marco conceptual	19
<i>2.1.1 Borrás de crudo</i>	19
<i>2.1.2 Tipos de borras de crudo</i>	19
<i>2.1.3 Métodos de Disposición Definitiva de las Borrás</i>	20
<i>2.1.4 Proceso de Secado</i>	22
2.2 Marco legal	22
<i>2.2.1 Ley 99 de 1993</i>	22
<i>2.2.2 Ley 885 DE 2004</i>	23
<i>2.2.3 Decreto 4741 de diciembre 30 de 2005- Resolución del Ministerio de Ambiente 1402 de 2006</i>	23
2.3 Marco teórico	23
<i>2.3.1 Pirólisis</i>	23
<i>2.3.2 Tipos de pirólisis</i>	23
<i>2.3.3 Desorción térmica</i>	24
<i>2.3.4 Adsorción</i>	25
3. METODOLOGÍA	27

3.1	Fase inicial	28
3.1.1	<i>Caracterización bibliográfica de las especies estudiadas</i>	28
3.1.2	<i>Desorción térmica-Retorta</i>	29
3.2	Fase experimentación	30
3.2.1	<i>Pruebas aceite</i>	31
3.2.2	<i>Pruebas cenizas</i>	33
3.3	Fase final	36
4.	CARACTERIZACIÓN MATERIA PRIMA	38
4.1	Caracterización de las materias primas	38
4.1.1	<i>Caracterización borras</i>	38
4.2	Caracterización del sitio de obtención	41
4.2.1	<i>Características línea oleoducto</i>	41
4.2.2	<i>Localización</i>	42
4.3	Pruebas Borrás	42
5.	LABORATORIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
5.1	Desorción térmica	44
5.2	Aceite	52
5.2.1	<i>Acondicionamiento</i>	52
5.2.2	<i>Densidad aparente y gravedad Api</i>	53
5.2.3	<i>Viscosidad</i>	56
5.2.4	<i>Flash point y Fire point</i>	57
5.3	Cenizas	58
5.3.1	<i>Tratamientos</i>	58
5.4	Generalidades del diseño	60

5.4.1	<i>Diseño para prueba de adsorción</i>	61
5.4.2	<i>Diseño para número de Yodo</i>	61
5.5	Pruebas de laboratorio carbón	63
5.5.1	<i>Análisis elemental</i>	63
5.5.2	<i>Densidad Aparente</i>	64
5.5.3	<i>Número de Yodo</i>	66
5.5.4	<i>Adsorción</i>	69
5.5.5	<i>Isotermas de adsorción</i>	75
5	ANÁLISIS DE COSTOS	81
6	ALCANCE	85
7	CONCLUSIONES	87
	REFERENCIAS	89

LISTA DE FIGURAS

	pág.
<i>Figura 1. Representación de la metodología global del proyecto</i>	27
<i>Figura 2. Representación fase inicial</i>	29
<i>Figura 3. Parte experimental borras</i>	30
<i>Figura 4. Representación de la parte experimental</i>	31
<i>Figura 5. Procedimiento Densidad aparente y gravedad Api</i>	32
<i>Figura 6. Procedimiento Viscosidad</i>	32
<i>Figura 7. Flash Point y Fire point</i>	33
<i>Figura 8. Número de Yodo</i>	34
<i>Figura 9. Densidad aparente por picnómetro</i>	35
<i>Figura 10. Proceso de adsorción azul de metileno</i>	36
<i>Figura 11. Representación del análisis de resultados</i>	37
<i>Figura 12. Toma muestra 1</i>	38
<i>Figura 13. Resultados obtenidos de la muestra #1 con el equipo de laboratorio Retorta.</i>	39
<i>Figura 14. Obtención muestra 2</i>	40
<i>Figura 15. Muestra 2</i>	40
<i>Figura 16. Mapa departamento del Meta</i>	42
<i>Figura 17. Porcentaje de solido, prueba de laboratorio retorta</i>	49
<i>Figura 18. Porcentaje de agua, prueba de laboratorio retorta</i>	49
<i>Figura 19. Porcentaje de aceite recuperado, prueba de laboratorio retorta</i>	50
<i>Figura 20. Centrifugación</i>	52
<i>Figura 21. Embudo de separación</i>	53
<i>Figura 22. Viscosímetro Brookfield</i>	56
<i>Figura 23. Flash point</i>	57
<i>Figura 24. Tratamiento térmico</i>	59
<i>Figura 25. Tratamiento químico</i>	59
<i>Figura 26. Estructura carbón activado</i>	62
<i>Figura 27. Número de Yodo</i>	67
<i>Figura 28. Comparación adsorción</i>	70

<i>Figura 29. Comparación eficiencias adsorción</i>	71
<i>Figura 30. Diagrama de barras resultados</i>	74
<i>Figura 31. Isotherma Carbón sin aditivos Langmuir</i>	76
<i>Figura 32. Isotherma Carbón con aditivos Langmuir</i>	77
<i>Figura 33. Isotherma Carbón sin aditivos Freundlich</i>	79
<i>Figura 34. Isotherma Carbón con aditivos Freundlich</i>	80

LISTA DE TABLAS

	pág.
<i>Tabla 1. Parámetros calidad promedio de los campos petroleros ubicados en el departamento del Meta.</i>	41
<i>Tabla 2. Datos Retorta</i>	45
<i>Tabla 3. Cuantificación retorta</i>	47
<i>Tabla 4. Masas totales retortas</i>	50
<i>Tabla 5. Datos densidad aparente</i>	53
<i>Tabla 6. Caracterización del crudo por gravedad API</i>	55
<i>Tabla 7. Medición viscosidad</i>	56
<i>Tabla 8. Flash y fire point</i>	58
<i>Tabla 9. Materia prima</i>	60
<i>Tabla 10. Pruebas de adsorción y desorción</i>	61
<i>Tabla 11. Diseño Número de Yodo</i>	62
<i>Tabla 12. Contenido de azufre</i>	64
<i>Tabla 13. Datos densidad aparente carbón</i>	65
<i>Tabla 14. número de Yodo</i>	67
<i>Tabla 15. Análisis número de Yodo</i>	68
<i>Tabla 16. Concentraciones prueba adsorción</i>	69
<i>Tabla 17. Cantidad adsorbida</i>	71
<i>Tabla 18. Resultados Adsorción azul de metileno</i>	71
<i>Tabla 19. Análisis adsorción</i>	72
<i>Tabla 20. Cálculo isothermas</i>	75
<i>Tabla 21. Isotherma Langmuir</i>	76
<i>Tabla 22. Isotherma Freundlich</i>	79
<i>Tabla 23. Costos generales del proyecto</i>	81

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
<i>Ecuación 1. Contenido de humedad</i>	43
<i>Ecuación 2. Sólidos inertes</i>	43
<i>Ecuación 3. Cuantificación retorta</i>	47
<i>Ecuación 4. Volumen aceite</i>	51
<i>Ecuación 5. Volumen agua</i>	51
<i>Ecuación 6. Densidad aparente</i>	54
<i>Ecuación 7. Gravedad específica</i>	54
<i>Ecuación 8. Determinación gravedad API</i>	54
<i>Ecuación 9. Contenido de material Volátil</i>	63
<i>Ecuación 10. Densidad aparente carbón</i>	65
<i>Ecuación 11. Cálculo número de Yodo</i>	66
<i>Ecuación 12. Cálculo Concentraciones</i>	69
<i>Ecuación 13. Cantidad adsorbida</i>	70
<i>Ecuación 14. Isotherma Langmuir</i>	75
<i>Ecuación 15. Isotherma Langmuir organizada</i>	76
<i>Ecuación 16. Línea recta</i>	76
<i>Ecuación 17. Isotherma Freundlich</i>	78
<i>Ecuación 18. Isotherma Freundlich organizada</i>	78

ABREVIATURAS

°	Grados
γ	Densidad relativa o gravedad específica
°API	Gravedad API
°API _{CO}	Gravedad API corregida por ecuación
°API _{tablas}	Gravedad API corregida por tablas
°API _{Ob}	Gravedad API observada.
ASTM	Sociedad americana para pruebas y materiales (American Society for Testing and Materials).
Bbls	Barriles
BS&W	Contenido de agua y sedimentos que contiene el crudo
°C	Grados Celsius
H ₂ O	Agua.
K ₂ CR ₂ O ₇	Dicromato de Potasio
KI	Yoduro de potasio
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
HCl	Ácido clorhídrico
HC	Hidrocarburo
KOH	Hidróxido de potasio
m _{pic+crudo}	Masa picnómetros más muestra de crudo
m _{pic+Agua}	Masa picnómetros más agua
m _{pic}	Masa picnómetro vacío
N	Normalidad
Na ₂ S ₂ O ₃	Tiosulfato
ZnCl ₂	Cloruro de zinc

RESUMEN

La industria petrolera en estos tiempos es una de las causantes de los efectos del cambio climático, señalando a sus emisiones y residuos como causas fundamentales de la crisis ambiental. Uno de ellos son las borras o lodos aceitosos, que se generan y se acumulan en tanques y tuberías durante las etapas de perforación, producción, transporte y refinación. Aunque existen métodos convencionales para tratarlos, como la incineración y la oxidación, en esta investigación se buscó una técnica alternativa y ecológica: la desorción térmica.

El estudio se realizó con muestras de borra de crudo pesado ubicadas en el noroccidente del Departamento Meta, Colombia, pertenecientes a la empresa Transportadora X, durante un periodo de 4 meses. El objetivo principal fue evaluar la recuperación del aceite y la obtención de un subproducto útil. Para ello, se llevó a cabo una caracterización teórica de la materia prima y del proceso de desorción térmica, seguida de la recopilación y tratamiento de las borras de petróleo. La experimentación en laboratorio se realizó utilizando la Retorta de perforación del laboratorio de lodos de la Universidad de América, optimizando el proceso mediante un diseño experimental adecuado. Finalmente se evaluaron las propiedades de las cenizas y del aceite recuperado mediante diversas pruebas de laboratorio.

Los resultados mostraron que se recuperó el 56% del aceite, se obtuvieron 20% de residuos sólidos y 24% de agua. Se analizaron dos tipos de cenizas: una convencional y otra tratada con hidróxido de potasio y cloruro de zinc. La muestra tratada (M2) mostró mejores propiedades adsorbentes en términos de densidad aparente, menor contenido de material volátil y mayor capacidad de adsorción de yodo y azul de metileno en comparación con la muestra sin adición (M1).

En conclusión, la desorción térmica es una técnica eficiente para la recuperación de aceite de borras de hidrocarburos, con una recuperación del 56%. Además, la generación de subproductos a partir de las cenizas tratadas muestra un potencial significativo para aplicaciones industriales de carbón activado, promoviendo una economía circular y reduciendo el impacto ambiental de los residuos de hidrocarburos.

PALABRAS CLAVE: Disposición final, Borras de hidrocarburos, lodos aceitosos, método termoquímico, desorción térmica, carbón activado, recuperación de aceite, Hidróxido de potasio, Cloruro de Zinc, activación química

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe una gran preocupación global por los efectos del cambio climático señalando a los combustibles no renovables y sus emisiones como causas fundamentales de la crisis ambiental, derivando un enfoque importante en la gestión adecuada de los residuos y subproductos de la industria de hidrocarburos, una necesidad primordial para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenibles (ODS) establecidos por las Naciones Unidas, específicamente entre otros, ODS#12 “Producción y consumo responsable”. Esto se debe a la necesidad de reducir, reciclar y reutilizar los desechos, impulsando prácticas que minimicen el impacto ambiental, dentro de las cuales está la gestión adecuada de las borras de tanques petroleros que contribuyen significativamente a mitigar el tiempo ambiental derivado de la industria “Oil and gas”. [8]

En la industria de hidrocarburos, la acumulación de residuos conocidos como borras o lodos aceitosos en tanques y tuberías ha emergido como un desafío ambiental crítico. Estos residuos, generadores a lo largo de procesos como perforación, producción, transporte y refinación del petróleo, contienen componentes que amenazan tanto el medio ambiente como la salud humana con sustancias químicas que han demostrado ser inmunotoxinas y causantes de cáncer, la gestión inadecuada de estas borras puede resultar en la contaminación del agua y del suelo, afectaciones a la salud, pérdida de valor de los residuos y en consecuencias legales y económicas [9][10].

En respuesta a este desafío ambiental, es crucial explorar más enfoques sostenibles y eficaces para el tratamiento de los lodos aceitosos, como la incineración y la oxidación, aunque presentan desventajas en términos de sostenibilidad, costos y eficiencia, lo que subraya la necesidad de enfoques más ecológicos y eficaces. [4][11] Sumado a que este residuo se utiliza como materiales de construcción como cemento o cal; en la fabricación de asfalto para carreteras y vías o como combustible alternativo en plantas de energía, hornos industriales y cementeras después de un tratamiento para reducir su contenido de agua y mejorar su poder calorífico, generando un impacto mayor. [12][13]

Este proyecto de grado tiene como objetivo principal evaluar la viabilidad de un método termoquímico que permita la recuperación de aceite y la generación de un subproducto a partir de las cenizas resultantes. Se va a emplear la desorción térmica, un proceso que implica el calentamiento para eliminar los compuestos orgánicos y el agua de los sólidos presentes en las borras. [14].

Los antecedentes de este proyecto están respaldados en investigaciones previas que exploran la conversión de las borras en productos de valor añadido, como el carbón activado. Diferentes estudios, como el Li et al. (2019), han demostrado la síntesis exitosa de adsorbentes de carbón activado a partir de residuos de lodos de petróleo, ofreciendo soluciones prácticas y sostenibles para problemas ambientales relacionados con la contaminación industrial de aguas [15].

La metodología propuesta inicia con la obtención y pretratamiento de las borras, seguido por un proceso de desorción térmica se aplicará a las muestras para obtener unos subproductos resultantes (aceites y cenizas) los cuales se someterán a pruebas de laboratorio. La activación química de las cenizas mejorará la porosidad del polvo de carbón obtenido, que será posteriormente analizado para su posible aplicación en diversas industrias.

Este estudio no solo aborda la gestión sostenible de los residuos de la industria petrolera, sino que también se enmarca en la contribución a la economía circular al convertir desechos en productos valiosos con un enfoque en la eficiencia, rentabilidad y respeto al medio ambiente, este proyecto busca aportar soluciones prácticas y sostenibles con los residuos en la industria de hidrocarburos y, al mismo tiempo contribuir al logro de los objetivos de desarrollo sostenible a nivel global

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Evaluar la recuperación de aceite y la obtención de un subproducto a partir de las cenizas de borras de hidrocarburos.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la borra para su uso en la recuperación de aceite mediante la desorción térmica.
- Analizar la calidad del aceite mediante pruebas de laboratorio para su disposición final.
- Generar un subproducto a partir de las cenizas de hidrocarburos mediante pruebas de laboratorio.
- Validar la calidad del subproducto a partir de pruebas de laboratorio.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 Marco conceptual

Para el desarrollo del anteproyecto, se tendrán en cuenta los siguientes conceptos y antecedentes que servirán de modelo para el entendimiento del proyecto, pues darán soporte a la información presentada a lo largo del trabajo y por lo tanto le darán sentido a este.

2.1.1 *Borras de crudo*

Las borras en la industria del petróleo son residuos que se originan a lo largo de extensos períodos debido a la acumulación y conglomeración de compuestos hidrocarbonados, especialmente cadenas más largas presentes en el petróleo. Estas borras contienen una mezcla de sólidos, sedimentos como rocas, arena, lodos de perforación y otros materiales orgánicos e inorgánicos, así como agua.[4]

La formación de agregados de hidrocarburos conduce a la emulsión del agua en el petróleo crudo y a la retención de sedimentos en dicha emulsión. Esto provoca una disminución significativa en los grados API, llegando en algunos casos a valores por debajo de 10 °API. Como resultado, se generan masas densas y viscosas que son difíciles de bombear, lo que puede causar la acumulación en el fondo de los tanques, disminuyendo su capacidad o causando obstrucciones en las tuberías.[16]

2.1.2 *Tipos de borras de crudo*

La clasificación de las borras está estrechamente vinculada al tipo de crudo almacenado en el tanque, y a su vez, el tipo de crudo se determina por su composición. En términos generales, según las especificaciones de la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, es necesario saber las características del crudo del cual provienen las borras debido a que influye en las técnicas y tecnologías necesarias para su procesamiento y disposición.

Los crudos de petróleo se clasifican generalmente se clasifican de acuerdo con sus propiedades físicas y químicas, como contenido de metales, sales, azufre, entre otros. Siguiendo estas pautas, se puede clasificar el crudo en los siguientes tipos, basados en su composición:

2.1.2.a Crudos Parafínicos. Estos crudos se caracterizan por contener principalmente hidrocarburos saturados de bajo peso molecular, lo que les confiere una alta fluidez. Poseen una densidad de alrededor de 0.85 kg/L y superan los 31° API. Estos crudos son altamente valorados

en términos comerciales debido a su facilidad de procesamiento y la alta calidad de los productos derivados. Son conocidos por generar una mayor proporción de parafinas, naftas (solventes y gasolinas) y bases para aceites lubricantes en comparación con otros tipos de crudos. [17]

2.1.2.b Crudos Nafténicos. Estos crudos están compuestos principalmente por naftenos e hidrocarburos aromáticos. Tienen un mayor peso molecular que los crudos parafínicos y una densidad en torno a 0.95 kg/L. Poseen grados API que oscilan entre 10 y 22°, lo que los hace altamente viscosos y de coloración oscura. Estos crudos tienden a generar una cantidad significativa de residuos en los procesos de destilación, particularmente asfalto.[14]

2.1.2.c Crudos Mixtos. Estos crudos se componen de una variedad de hidrocarburos, incluyendo parafinas, naftenos, hidrocarburos saturados, insaturados y aromáticos, entre otros. Su densidad se sitúa en alrededor de 0.9 kg/L, y sus grados API varían entre 22° y 31°. [17]

2.1.2.d Crudos Dulces. Estos crudos tienen un contenido de azufre inferior al 0.5%, lo que resulta en costos menores en su proceso de refinación para producir gasolina.[17]

2.1.2.e Crudos Agrios. En contraste, los crudos agrios presentan un contenido de azufre superior al 1%, lo que requiere una inversión significativamente mayor en su procesamiento para eliminar este contaminante.[14]

2.1.3 Métodos de Disposición Definitiva de las Borrás

Entre las alternativas más empleadas por las compañías en los distritos petroleros que colaboraron proporcionando muestras, se destacan dos métodos principales para la disposición definitiva de las borrás: la biorremediación y la incineración. A continuación, se presenta una breve descripción de ambos métodos de disposición final.

2.1.3.a Biorremediación. La biorremediación se enfoca en la eliminación de contaminantes mediante la acción de microorganismos. Este proceso es altamente complejo y debe considerar diversos factores, incluyendo la naturaleza y cantidad de los contaminantes, las condiciones locales y la composición de la comunidad microbiana autóctona. La biorremediación puede llevarse a cabo tanto in situ (en el mismo lugar de contaminación) como en biorreactores.[18]

En el caso de los hidrocarburos, la biorremediación del suelo, también conocida como "tratamiento de tierras" (landtreatment o landfarming), se presenta como una opción económicamente eficiente. No obstante, su aplicación requiere una cuidadosa preparación para evitar la propagación de

contaminantes a través de la escorrentía y la lixiviación. Durante este proceso, se aplican los hidrocarburos al suelo de manera que se alcance una concentración cercana al 5% en los 15-20 cm superiores de la tierra. Es importante mencionar que concentraciones superiores al 10% pueden inhibir la biodegradación. Los límites de concentración indican que, aproximadamente, se necesita una hectárea de tierra por cada 100,000 litros de hidrocarburos. Además, se ajusta el pH del suelo mediante la aplicación de caliza para mantenerlo en un rango de 7 a 8. Se incorporan abonos que aporten nitrógeno y fósforo en una relación específica de Nitrógeno=200:1 y Fósforo=800:1. Es importante mencionar que este proceso puede generar emisiones de compuestos volátiles a la atmósfera. Sin embargo, no todos los hidrocarburos se degradan con la misma velocidad o eficacia. En particular, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PHA, por sus siglas en inglés), que a menudo se encuentran en crudos extrapesados similares a las borras, suelen ser resistentes a la degradación, potencialmente bioacumulables y altamente carcinogénicos, lo que implica que su eliminación a través de la biorremediación debe llevarse a cabo con precaución.[19]

2.1.3.b Incineración. La incineración, uno de los métodos más antiguos de tratamiento de residuos, implica la combustión controlada de los mismos, transformándolos en materiales que no son combustibles, sin olor, homogéneos e inertes. En este proceso, se logra la oxidación exotérmica rápida de los compuestos combustibles. A pesar de reducir el volumen de los residuos, este proceso genera emisiones. Los costos asociados, que comprenden el capital, la operación y el mantenimiento, son significativamente elevados. La operación requiere personal altamente calificado y la regulación de emisiones gaseosas. Las temperaturas en los incineradores pueden llegar a aproximadamente 800°C. La inyección de oxígeno es necesaria para lograr una combustión completa, lo que, a su vez, requiere el análisis elemental de la composición de los residuos para estimar los requisitos teóricos de aire y oxígeno. Entre los tipos de incineradores, el más comúnmente utilizado es el incinerador de pisos múltiples debido a su durabilidad, operación sencilla y capacidad para manejar cargas de cantidad y calidad variables. Otro tipo de incinerador que se encuentra en uso es el de lecho fluidizado, que consiste en un depósito vertical cilíndrico de acero revestido con material refractario, que contiene un lecho de arena y orificios para inyectar aire, lo cual permite mantener la combustión de manera continua.[19][20]

2.1.4 Proceso de Secado

El secado se define como una operación que tiene como propósito eliminar la humedad presente en un material sólido para obtener un producto seco. Durante este proceso, se produce tanto la evaporación de la humedad superficial como la migración de la humedad interna hacia la superficie del material sólido. El secado tiene como finalidad disminuir la cantidad de agua en el material sólido, utilizando métodos naturales como la exposición al ambiente (radiación solar) y técnicas convectivas en equipos especializados de secado. [21]

2.1.4.a Secadores directos o por convección. Estos secadores logran la transferencia de calor al establecer un contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes, lo que resulta en la evaporación del líquido presente en los sólidos gracias a la influencia de los gases calientes. [21]

2.1.4.b Secadores indirectos o por conducción. En esta modalidad, el calor necesario para evaporar el agua no depende de los gases utilizados para transportar la humedad. En cambio, se obtiene mediante la conducción a través de una pared metálica que entra en contacto con los sólidos y, al mismo tiempo, con una sustancia caliente.[21]

2.2 Marco legal

Para este proyecto se tendrán en cuenta las diferentes resoluciones, normas, leyes, decretos y normativas relacionadas con nuestro tema de interés, para un desarrollo efectivo y correcto con el cumplimiento de lo decretado por las autoridades y expertos

2.2.1 Ley 99 de 1993

Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones. En su artículo 49 consagró la obligatoriedad de la licencia ambiental para la ejecución de obras, el establecimiento de industrias o el desarrollo de cualquier actividad, que, de acuerdo con la ley y los reglamentos, pueda producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje. Que así mismo, los artículos 50 y 51 de la citada ley consagraron que se entiende por licencia ambiental la autorización que otorga la autoridad ambiental competente para la ejecución de una obra o actividad. [22]

2.2.2 Ley 885 DE 2004

Convenio internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos, 1990. Las Partes se comprometen, conjunta o individualmente, a tomar todas las medidas adecuadas, de conformidad con las disposiciones del presente convenio, para prepararse y luchar contra sucesos de contaminación por hidrocarburos. Se establecen políticas sobre planes de emergencia, notificación, sistemas de lucha contra la contaminación, cooperación, manejo a nivel bilateral y multilateral de eventos por derrame de hidrocarburos. [23]

2.2.3 Decreto 4741 de diciembre 30 de 2005- Resolución del Ministerio de Ambiente 1402 de 2006

Reglamenta la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. En dicho decreto se presentan en sus anexos 1 y 2 el listado de residuos que en a nivel nacional son considerados como residuos peligrosos, encontrándose que son residuos peligrosos las mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua o de hidrocarburos y agua con el fin de proteger la salud humana y el ambiente [24]

2.3 Marco teórico

2.3.1 Pirólisis

La pirólisis se caracteriza por ser un proceso endotérmico que involucra la descomposición térmica de la materia orgánica y/o sus componentes poliméricos en condiciones de ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo, a través de la elevación de temperaturas que oscilan entre 300 y 800 °C. Los subproductos generados pueden variar considerablemente en función de diversos factores, tales como la presión, los flujos, la carga de materia prima, la velocidad de calentamiento, el tamaño de las partículas, el tiempo de exposición, entre otros. En el conjunto de subproductos resultantes de la pirólisis se incluyen gases condensables, hidrocarburos líquidos y material sólido, como el negro de humo. [25][26]

2.3.2 Tipos de pirólisis

2.3.2.a Pirólisis Rápida. Conocida también como pirólisis flash debido a su velocidad, este proceso continuo se enfoca en la producción de combustible líquido a partir de biomasa. Durante esta pirólisis, la biomasa se descompone generando vapores, aerosoles y una cierta cantidad de coque. Luego, se realiza el enfriamiento y la condensación para obtener un líquido de color marrón oscuro llamado bioaceite, que tiene un valor calórico equivalente al 50% del diesel. Este proceso se lleva

a cabo en reactores especiales con una atmósfera sin oxígeno y temperaturas que oscilan entre 475 y 550°C. Además de la cinética, se deben considerar los procesos de transferencia de calor, los fenómenos de cambio de fase y otros parámetros. Se trata de un proceso avanzado en el cual se controlan cuidadosamente varios factores para lograr altos rendimientos (superiores al 75%) del producto líquido, junto con subproductos de gas y coque, que pueden ser utilizados para proporcionar el calor requerido en el proceso. [27]

2.3.2.b Pirólisis Intermedia. Esta variante se lleva a cabo a temperaturas entre 300 y 500°C. Las reacciones químicas son fáciles de controlar debido a las condiciones de operación, y se pueden obtener rendimientos de hasta el 55%. Aunque ofrece un rendimiento menor que la pirólisis flash, esta categoría permite la alimentación de materiales con tamaños de partícula grandes, ya sean gruesos, triturados o troceados.[27]

2.3.2.c Pirólisis Lenta. La pirólisis lenta se realiza a temperaturas que van desde 300 hasta 700°C, con velocidades de calentamiento lentas y tiempos de reacción que pueden durar desde horas hasta días. Este proceso permite la obtención de productos gaseosos, líquidos y sólidos, pero su principal objetivo es la producción de combustible sólido mediante la carbonización. Además, este proceso permite el tratamiento de materiales con altos contenidos de humedad en la alimentación.[27]

2.3.2.d Torrefacción. La torrefacción es un proceso lento que se realiza a temperaturas entre 225 y 300°C. Su objetivo es aumentar la densidad de energía y las propiedades de la biomasa. El producto final es un material sólido, seco y oscurecido que carece de sustancias volátiles debido a la liberación de agua contenida en la biomasa y la descomposición parcial de los biopolímeros.[27]

2.3.2.e Hidropirólisis. La hidropirólisis es un proceso que se encuentra en fase de estudio. En este proceso, las reacciones ocurren bajo presión de hidrógeno, lo que dificulta la formación de radicales libres y reduce la cantidad de hidrocarburos insaturados, mejorando la calidad del bioaceite producido.[27]

2.3.3 Desorción térmica

La desorción térmica representa un procedimiento que puede emplear intercambio de calor, ya sea de manera directa o indirecta, con el objetivo de elevar la temperatura de los contaminantes orgánicos a un nivel lo suficientemente alto para provocar su volatilización y, por ende, su separación del medio sólido contaminado. En este proceso, el aire, un gas de combustión o un gas

inerte se utiliza como medio de transferencia para los componentes vaporizados. Los sistemas de desorción térmica actúan como procesos de separación física, facilitando la transferencia de contaminantes de una fase a otra. Aunque no están diseñados para lograr una destrucción completa de compuestos orgánicos, las elevadas temperaturas en algunos sistemas pueden ocasionar oxidaciones localizadas o pirolisis. Es importante destacar que la desorción térmica no se asemeja a la incineración, donde la destrucción total de contaminantes orgánicos no es el resultado deseado. Las temperaturas y los tiempos de residencia utilizados por los sistemas de desorción térmica se centran en la volatilización de los contaminantes deseados, sin embargo, por lo general, no conducen a su oxidación o destrucción. La eficiencia del sistema se evalúa comúnmente mediante la comparación de los niveles de contaminantes en los sólidos no tratados con los niveles correspondientes en los sólidos tratados. Por lo general, el medio contaminante se calienta en un rango de 150 a 540 °C, dependiendo del sistema de desorción térmica seleccionado.[28]

2.3.4 Adsorción

La adsorción representa otra opción alternativa eficaz para disminuir el contenido de ácidos grasos libres (FFA, por sus siglas en inglés) en el aceite. Este método se caracteriza por su simplicidad y puede llevarse a cabo a bajas temperaturas. Además, no requiere el uso de catalizadores ácidos, como el ácido sulfúrico necesario en la reacción de esterificación, ni la incorporación de reactivos adicionales como el alcohol. Por ende, se logra una reducción en los costos de las materias primas. [29]

2.3.4.a Tipos de adsorción.

2.3.4.a.i Adsorción física. La adsorción física ocurre cuando la interacción entre el adsorbato y el adsorbente está principalmente gobernadas por las fuerzas de Van de Waals, que representan una atracción débil entre las moléculas de ambos. En este contexto, también pueden surgir fuerzas electrostáticas, ya que el desplazamiento parcial de las cargas en ciertos momentos puede dar lugar a la formación de dipolos inducidos que mantienen unidas a las moléculas. Debido a la naturaleza de esta interacción, es posible la formación de múltiples capas, especialmente a temperaturas bajas. Este proceso es reversible y permite la desorción de las moléculas adsorbidas. [30]

2.3.4.a.ii Adsorción química. La adsorción mediante intercambio iónico es un procedimiento en el cual los adsorbatos son trasladados de manera selectiva desde la fase fluida hacia la superficie de partículas rígidas insolubles, las cuales están suspendidas en un recipiente o dispuestas en una

columna. En este contexto de adsorción, se lleva a cabo un intercambio iónico entre las moléculas del adsorbente y aquellas de la fase que se busca separar, conocida como adsorción química. En este tipo de adsorción, solo es posible la formación de una monocapa, ya que, una vez ocupada la zona interfacial, no quedan moléculas de adsorbente libres para intercambiar iones. Esta interacción se favorece a temperaturas elevadas y no es un proceso reversible debido al cambio en la naturaleza del adsorbente.[30]

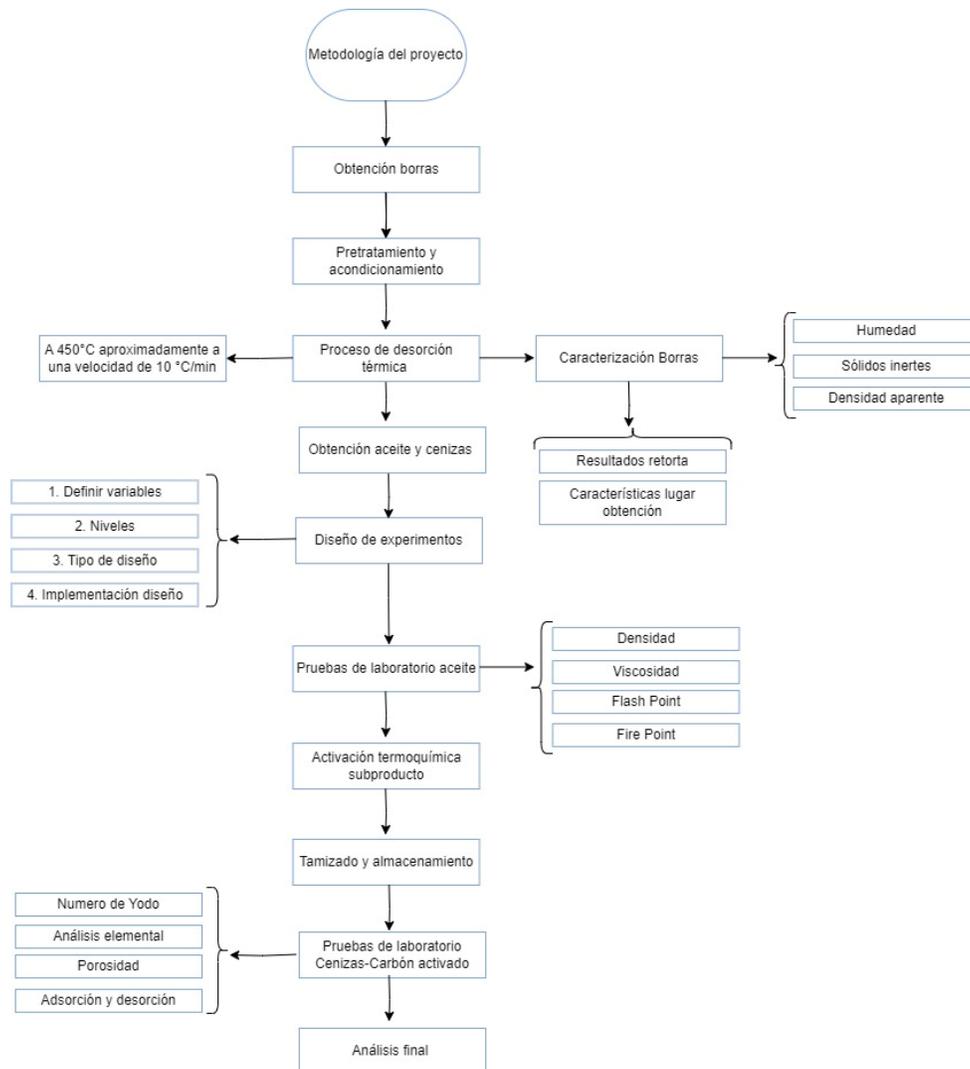
2.3.4.a.iii Adsorción por afinidad. La adsorción por afinidad es donde los adsorbentes por afinidad se diseñan al inmovilizar ligandos en la superficie del soporte, estableciendo interacciones específicas con las macromoléculas de interés. Este enfoque especializado permite una mayor selectividad y eficacia en la captura de las sustancias objetivo, ampliando así las aplicaciones potenciales de la adsorción en diversos campos, desde la purificación de productos hasta la separación de compuestos específicos en procesos industriales.[30]

3. METODOLOGÍA

Con el fin de cumplir los objetivos planteados para el proyecto, se va a seguir la metodología ilustrada en la **Figura 1**, la cual se divide en tres fases. Estas serán la fase primaria en la que se hace una caracterización teórica, la obtención de la materia prima y la desorción térmica; La fase dos del proyecto la cual comprenderá la experimentación con las muestras, evaluación y análisis de resultados; Por último, se llegará a la fase final del proyecto, la cual comprenderá los análisis finales de costos y eficiencias de los productos obtenidos.

Figura 1.

Representación de la metodología global del proyecto



Nota. La figura representa el paso a seguir del proyecto

A continuación, se observa detalladamente las fases establecidas para la consecución del proyecto:

3.1 Fase inicial

En primera medida se realiza una investigación de las propiedades de la materia prima empleada para el desarrollo de la investigación y el proceso termoquímico que se va a realizar para obtener los productos deseados (desorción térmica), resaltando las características necesarias para la implementación del proyecto.

Luego de hacer las investigaciones teóricas se procedió a la obtención y pretratamiento de las borras de petróleo (materia prima), bajo las condiciones requeridas para realizar el proceso. Estos lodos aceitosos, constituyen residuos generados a lo largo de extensos periodos debido a la acumulación y conglomeración de compuestos hidrocarburoados, especialmente cadenas más largas presentes en el petróleo, que contienen una mezcla de sólidos, sedimentos como rocas, arenas, lodos de perforación y otros materiales orgánicos e inorgánicos. Cabe aclarar que se encuentran en el fondo de los tanques de almacenamiento de las estaciones de las empresas encargadas del transporte de hidrocarburos o productos refinados.

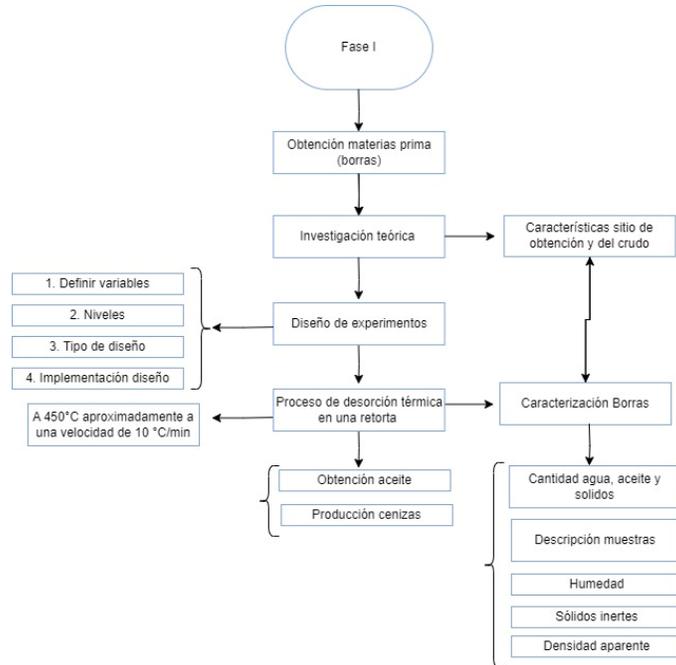
3.1.1 Caracterización bibliográfica de las especies estudiadas

Como se puede ver la **Figura 2** muestra la metodología a seguir para la consecución de los objetivos 1 y 2 donde es necesario realizar:

1. Búsqueda de propiedades del sitio de obtención de las borras: Humedad, condiciones climáticas, temperatura, entre otros.
2. Búsqueda de métodos de obtención de un subproducto: Se realizó una búsqueda bibliográfica para conocer las diferentes alternativas para obtener un subproducto de mejor calidad, seleccionando posteriormente la que mejor se acomodara a las condiciones de laboratorio de la Universidad América.
3. Estudio de las condiciones de la borra y otras propiedades: Con el fin de caracterizar de manera idónea las borras obtenidas además de realizar la desorción térmica se realizó una búsqueda bibliográfica de las condiciones del crudo de la zona

Figura 2.

Representación fase inicial



Nota. La figura representa la metodología para lograr el objetivo 1.

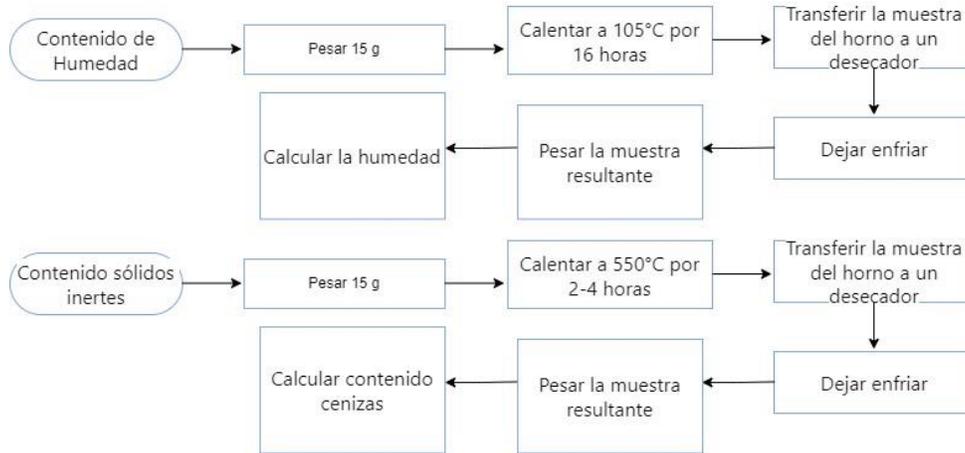
3.1.2 Desorción térmica-Retorta

Se creó un ambiente con poca presencia de oxígeno con un calentamiento inicial a 200 °C, luego la temperatura se aumentará a 450 °C a una velocidad de 10 °C/min, manteniéndola constante durante 1 h para realizar el proceso de desorción térmica en una retorta en los laboratorios de la Universidad América para su separación de su parte líquida y sólida, donde se podrán obtener características de las borras como humedad Norma ASTM D 2867-99 y sólidos inertes ASTM D 2866-94 (**Figura 3**) [31][32]. Luego se enfriará la temperatura del horno hasta la temperatura ambiente a una velocidad de 10°C/min obteniendo un aceite recuperado y unas cenizas que deben ser trituradas utilizando un mortero de porcelana.

Continuamente se realizó un diseño de experimentos con el fin de seguir la ruta de experimentación más conveniente para el desarrollo del proyecto, teniendo como punto de partida los parámetros de las cenizas a trabajar, el cual se va a explicar más adelante.

Figura 3.

Parte experimental borras



Nota. La figura representa la metodología para lograr los objetivos 2 y 3.

3.2 Fase experimentación

Una vez utilizada la retorta para la desorción térmica se logra obtener un aceite recuperado y unas cenizas o subproducto de valor agregado, el cual requiere una activación termoquímica basadas en la literatura

A partir de la información obtenida por las investigaciones y de la selección del diseño experimental más apropiado, como se puede observar en la **Figura 4**, se procedió a realizar la experimentación en los laboratorios de la Universidad de América, iniciando con el líquido recuperado que será evaluado mediante Densidad, viscosidad, flash point y fire point.

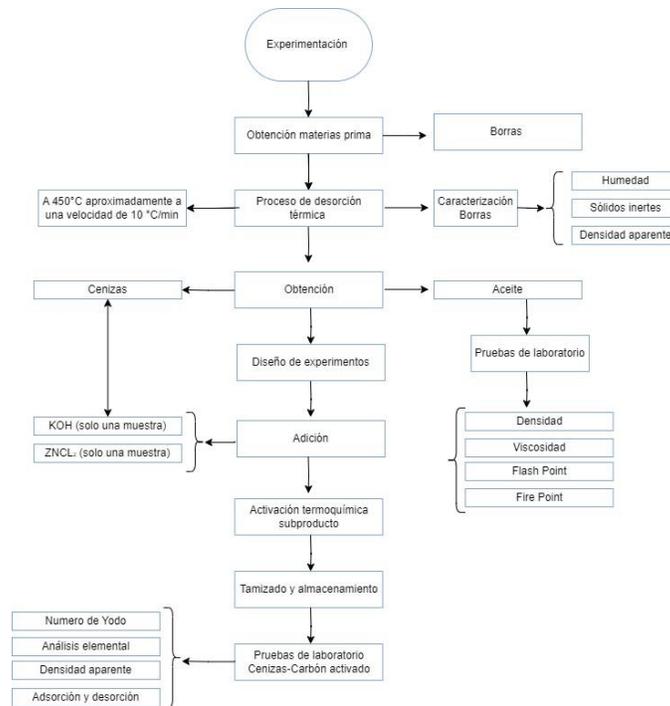
Así mismo, para las cenizas se desarrollaron cálculos de densidad aparente según la Norma ASTM D 2854-96, la determinación del número de yodo mediante la Norma ASTM D 4607-94, un análisis elemental, una técnica analítica empleada para determinar el material volátil y porcentaje de azufre, y la prueba de adsorción de azul de metileno para determinar su calidad.

Es válido aclarar que para cada prueba se hicieron 2 réplicas de los ensayos, reportando más adelante en el documento promedios como valores representativos

Adicionalmente, al carbón obtenido se tamiza para obtener partículas de tamaño uniforme, si es necesario, se almacena y se utiliza en diversas aplicaciones, como la purificación de agua o la eliminación de contaminantes en gases residuales.

Figura 4.

Representación de la parte experimental



Nota. La figura representa la realización, observación y análisis de las pruebas de laboratorio.

3.2.1 Pruebas aceite

Con la intención de analizar si el aceite resultante se puede adicionar al crudo producido en la zona de obtención de materia prima o si es necesario un acondicionamiento adicional se realizaron las siguientes pruebas:

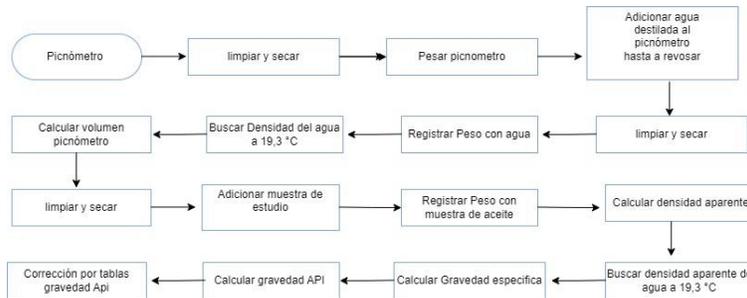
3.2.2.a Densidad y gravedad API:

Para la determinación de estas propiedades, se tendrán en cuenta las normas ASTM D70- 18a Técnica con picnómetro, y ASTM D1250-08 Tablas específicas. Por medio de esta técnica se busca determinar la densidad relativa o gravedad específica de la muestra, como una relación de la diferencia de peso de un volumen de muestra de crudo y el peso de un volumen de agua,

parámetro el cual, es un factor para calcular la gravedad API. Se siguió el procedimiento a continuación: [33][34]

Figura 5.

Procedimiento Densidad aparente y gravedad Api



Nota. La figura representa el procedimiento de la densidad aparente

3.2.2.b Viscosidad

La medición de la viscosidad se realizó utilizando un viscosímetro Brookfield. Este método mide la resistencia del fluido al flujo, proporcionando datos sobre su viscosidad a diferentes velocidades de cizallamiento y con el siguiente paso a paso: [35]

Figura 6.

Procedimiento Viscosidad



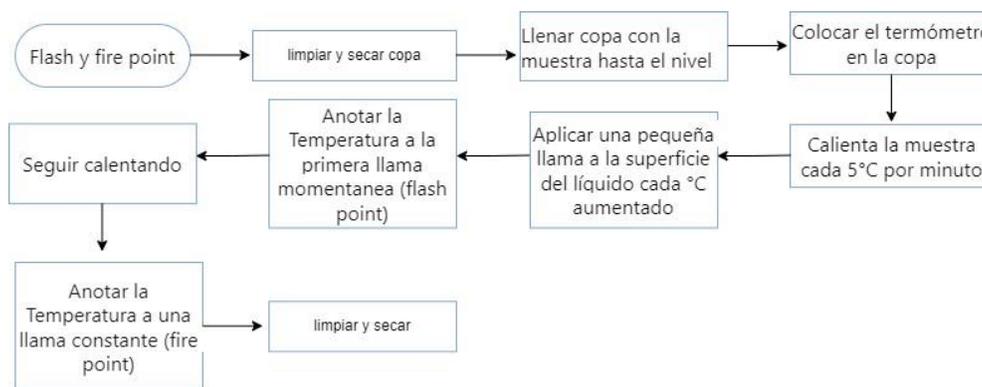
Nota. La figura representa el procedimiento de la viscosidad

3.2.2.c Flash Point y Fire point

La determinación de los puntos de inflamación e ignición de la muestra se realizó los productos en una copa abierta utilizando el aparato de Cleveland. EL primero mide la tendencia a formar una mezcla inflamable con el aire (la primera chispa), mientras que el punto de ignición indica la tendencia a una combustión sostenida. [36]

Figura 7.

Flash Point y Fire point



Nota. La figura representa el procedimiento del Flash Point y Fire point

3.2.2 Pruebas cenizas

Para mejorar la porosidad superficial del polvo de carbón obtenido se realiza la activación termoquímica de las cenizas basados en Anyi Ramirez y su grupo de investigación en el artículo “Preparación de carbón activado a partir de residuos de palma de aceite y su aplicación para la remoción de colorantes” donde obtuvieron buenos resultados con el siguiente procedimiento:

Se dejó secar un contenido de borras durante 1 hora, tras lo cual se añadirá una cantidad específica de hidróxido de potasio (KOH) en una proporción de peso de 1:1 entre los lodos de depuradora y KOH. Posteriormente se disuelven 40 g de polvo de cloruro de zinc ($ZnCl_2$) en 200 ml de agua destilada y se le agregan 20 g de materiales carbonizados. La mezcla obtenida se coloca en un agitador magnético a una temperatura de 70°C durante 2 h. Luego, el sistema saturado se coloca en una mufla a una temperatura de 600°C durante 1 h. [37]

Al subproducto obtenido se le realizan las siguientes pruebas de laboratorio en las instalaciones de la Universidad de América:

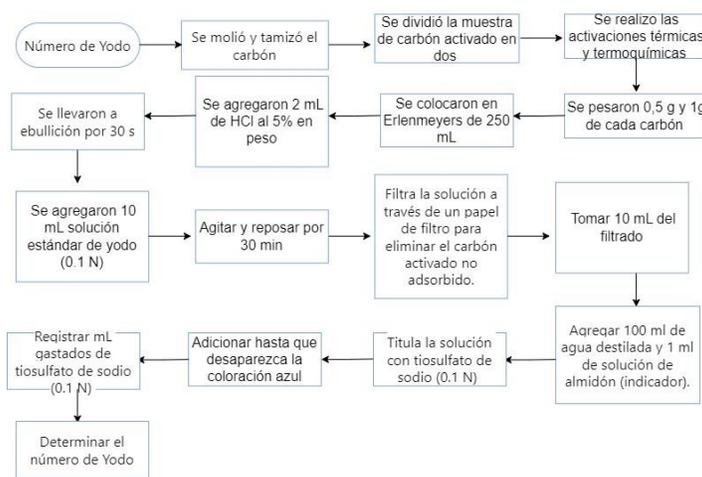
3.2.3.a Numero de Yodo

Este método se basa en la norma internacional ASTM D4607: “Determination of iodine number of activated carbón” y es utilizado para determinar el número de yodo, que se define como la capacidad tiene 1 gramo de carbón activado para adsorber una cantidad en mililitros de yodo, este número de yodo también determina el área superficial que puede tener el carbón que se estudió ya que el yodo se adsorbe en una monocapa en donde alberga microporos en cual se representa como un valor semejante al del área superficial (m^2 /g). [38][39][40]

Se realiza el procedimiento ilustrado en la **Figura 8**:

Figura 8.

Número de Yodo



Nota. La figura representa el procedimiento del Flash

Point y Fire point

3.2.3.b Análisis elemental

Para la determinación del contenido de carbón de acuerdo con los recursos disponibles se decidió usar el método de Pérdida por Ignición (LOI), que es un método mide la pérdida de masa que ocurre cuando una muestra se calienta a altas temperaturas, lo que provoca la combustión de la materia orgánica y la liberación de compuestos volátiles.

Este procedimiento inicia con la preparación de la muestra, que se seca en un horno a 105 °C para eliminar la humedad superficial. Luego, se pesa la muestra seca (W1) y se coloca en un recipiente resistente al calor; se calienta en un horno de mufla a una temperatura entre 550 y 950 °C durante aproximadamente 2 horas para oxidar el carbono orgánico. Tras la combustión, el crisol se enfría en un desecador y se pesa nuevamente (W2). [41]

En cuanto al contenido de azufre se usó, se usó el procedimiento 1154 del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), que tiene por objeto establecer los métodos para determinar el contenido de azufre total en fertilizantes, solidos o líquidos.

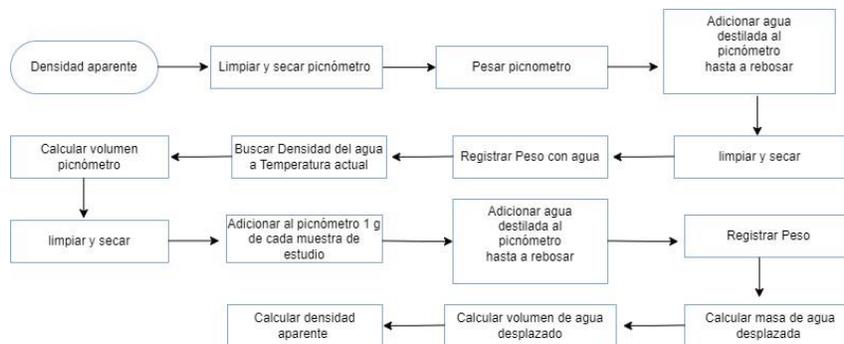
Este procedimiento inicia con la preparación de la muestra en un vaso precipitado y se añaden 200 ml de agua y 15 ml de ácido clorhídrico (HCl). Se calienta hasta alcanzar el punto de ebullición. Posteriormente se mantiene en ebullición durante 10 minutos, se enfría y se filtra en fibra de vidrio. Se calienta nuevamente a 60°C y se agrega 15 ml de cloruro de Bario (BaCl₂) al 10%, se filtra el precipitado, se deja secar en estufa por una hora y por último se pesa. [42]

3.2.3.c Densidad aparente

La densidad aparente mide la masa de un material por unidad de volumen, incluyendo los espacios vacíos entre las partículas. Para el carbón activado, la densidad aparente es un parámetro clave debido a que influye el rendimiento de adsorción. Para calcularlo se hace de la siguiente manera: [43]

Figura 9.

Densidad aparente por picnómetro



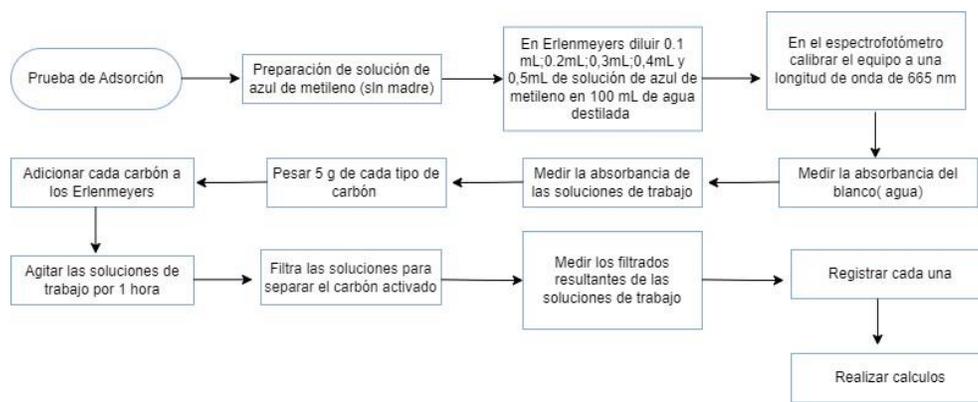
Nota. La figura representa el procedimiento densidad aparente

3.2.3.d Adsorción

La determinación de la capacidad de adsorción de azul de metileno en carbón activado es un método usual utilizado para evaluar la eficacia del carbón activado en la adsorción de compuestos orgánicos. Se presenta a continuación el procedimiento detallado para llevar a cabo esta determinación [44][45]

Figura 10.

Proceso de adsorción azul de metileno



Nota. La figura representa el procedimiento adsorción

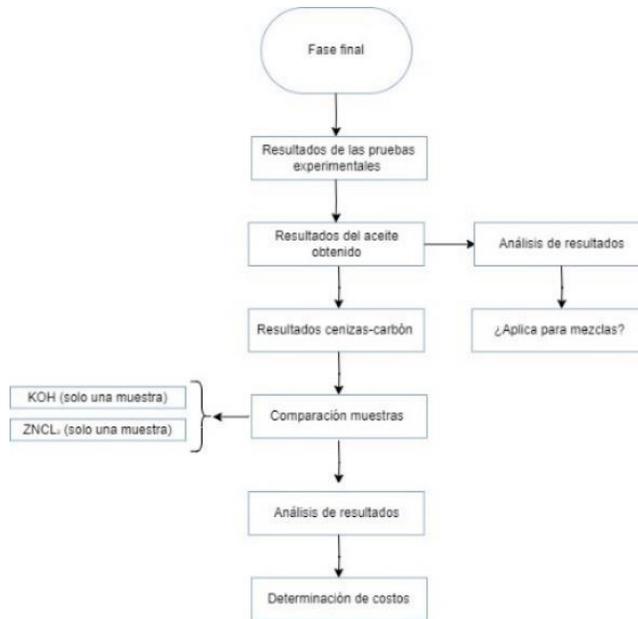
3.3 Fase final

Finalmente se hizo un análisis fundamental de costos para evaluar la viabilidad económica del proyecto, con una evaluación del consumo de agua y los costos relacionados con las materias primas utilizadas a lo largo de la investigación. Los datos obtenidos de este estudio ofrecerán una visión clara sobre la sostenibilidad financiera del proyecto, desempeñando un papel crucial en la toma de decisiones informada en todas las etapas del trabajo investigativo

Igualmente se hace un análisis de los resultados finales, basados en lo soportado por la experimentación previamente realizada y lo expuesto por algunas de las normativas existentes. A continuación, la **Figura 11** resume la metodología final:

Figura 11.

Representación del análisis de resultados



Nota. La figura representa el análisis de costos y resultado

4. CARACTERIZACIÓN MATERIA PRIMA

Este capítulo es de tipo cuantitativa y cualitativo con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados. En primera medida se procedió a hacer una caracterización de la materia prima. Luego se continuo con el acondicionamiento de la borra, seguido por la desorción térmica.

4.1 Caracterización de las materias primas

4.1.1 Caracterización borras

4.1.1.1 Selección de muestras de Petróleo.

Para la selección de la materia prima se realizó una reunión con la empresa X de transporte de hidrocarburos donde ellos nos brindaron dos muestras en dos diferentes momentos y de lugares de transporte de hidrocarburos distintos, uno proveniente de una piscina de desechos y otra de un tanque de separación, por lo que variaron en gran medida en sus composiciones, características y aspectos.

4.1.1.1.a Muestra 1

La muestra #1 proviene de una piscina de oxidación como se aprecia en la **Figura 12**, contiene un gran porcentaje de agua, baja viscosidad, tiene una contextura blanda con una tonalidad opaca, emane un olor a agua residual, ilustra bajo porcentaje de trazas de hidrocarburo y presenta alto contenido de solidos provenientes de la naturaleza como presencia de lodos, arcillas y materiales orgánicos.

Figura 12.

Toma muestra 1



Nota. La figura representa la obtención de la materia prima

A esta muestra se le realizó una prueba de retorta generando como resultados, 70% líquido y 30 % sólidos, al fluido resultante se le paso por dos procesos diferentes: El primero de ellos fue el de agua libre que consiste en una separación físicamente por medio de centrifugación o filtración inicial, pero con una concentración significativamente de contaminantes como sólidos suspendidos, materia orgánica y metales pesados como se observa en la **Figura 13** con el frasco transparente que se encuentra al lado del frasco rojo. El segundo proceso fue el de agua tratada que es un tratamiento que incluye procesos tanto físicos como químicos y biológicos para reducir sus contaminantes produciendo un agua de color verde.

Figura 13.

*Resultados obtenidos de la muestra #1
con el equipo de laboratorio*



Nota. La figura pruebas de laboratorio muestra inicial con retorta

4.1.1.1.b Muestra 2

La muestra #2 proveniente de un tanque de separación como se ilustra en la **Figura 14** mostró mayor viscosidad respecto a la anterior, una textura pegajosa con consistencia semilíquida gelatinosa; una tonalidad muy opaca de color negra intensa, brillante, un olor intenso, fuerte y característico, al crudo, con baja cantidad de agua presente y poco contenido de sólidos. No presentó residuos de desechos como ramas, piedras, animales y demás como se aprecia en la **Figura 15**.

Figura 14.

Obtención muestra 2



Nota. La figura representa la obtención de la muestra en el tanque de separación

Figura 15.

Muestra 2



Nota. La figura representa la calidad de la muestra #2

4.2 Caracterización del sitio de obtención

4.2.1 Características línea oleoducto

La estación A está diseñada para manejar crudo pesado y extrapesado, con características específicas que incluyen una gravedad API entre 9° a 17,79° y una viscosidad de hasta 10.000 cSt. La estación recibe y transporta el crudo producido en varios campos petroleros, incluyendo los campos A, B, C y D, que son algunos de los más importantes en la región. El crudo es almacenado y bombeado a través de oleoductos hacia los puntos de refinación y exportación. La gestión eficiente del crudo en esta estación también implica la separación y tratamiento de borras, los cuales son sedimentos y residuos que se acumulan durante el almacenamiento y transporte, asegurando así la calidad del crudo y la continuidad operativa.[46]

Tabla 1.

Parámetros calidad promedio de los campos petroleros ubicados en el departamento del Meta.

PARAMETRO	VALOR PROMEDIO
Gravedad API (°)	14,77
Azufre (%)	2,155
Níquel (ppm)	63,43
Vanadio (ppm)	290
Saturados (%)	47,65
Aromáticos (%)	27,89
Resinas + Asfáltenos (%)	24,46

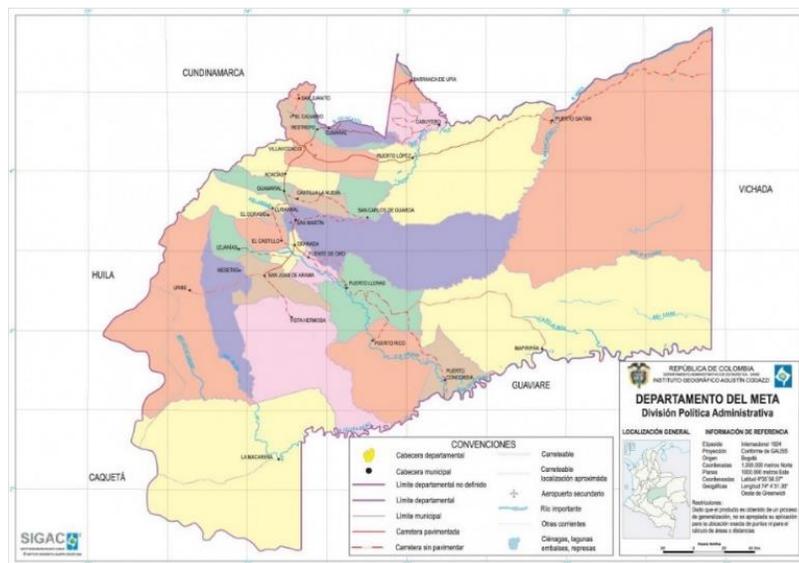
Nota. Parámetros de las características de los campos de la zona de interés. Tomado de: V. Martínez Ocampo, “Evaluación de distribución de la calidad de los crudos por unidad geológica en la cuenca Llanos Orientales, Colombia”, resumen extendido de Trabajo de grado - Pregrado, Univ. EIA, Envigado, 2020. [En línea]. Disponible: <https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/f872ac0e-fe9f-4a78-8343-b8b7f5a196b9/content>. Accedido el 26 de mayo de 2024.

4.2.2 Localización

La estación de bombeo X se encuentra ubicada en el departamento del Meta, Colombia, aproximadamente entre las coordenadas $01^{\circ}36'29''$ y $04^{\circ}54'24''$ de latitud norte y $71^{\circ}04'42''$ y $74^{\circ}54'09''$ de longitud oeste, presenta un clima tropical húmedo o de sabana con estaciones secas y húmedas con una temperatura promedio de $24,4^{\circ}\text{C}$ y una altitud de 418 msnm. Esta instalación es fundamental para el transporte del crudo en la región y abarca un área de aproximadamente 20 kilómetros cuadrados.[47]

Figura 16.

Mapa departamento del Meta



Nota. Ubicación de las zonas donde se encuentran los campos petroleros y la estación A, donde se tomó la muestra de borra de crudo. Tomado de: Imágenes Totales. "Mapa del Meta, Colombia | Departamento con Municipios y Ciudades". [En línea]. Disponible en: <https://imagenestotales.com/mapa-meta-municipios-colombia/> [Accessed May 30, 2024].

4.3 Pruebas Borrás

Las mediciones del contenido de humedad y de sólidos inertes en las borras generan información vital para el control de calidad, la optimización de procesos, la evaluación de recursos y la gestión

ambiental. Son herramientas esenciales para asegurar la eficiencia y la sostenibilidad en diversas aplicaciones industriales y ambientales, minimizando el uso de energía y optimizando la toma de decisiones

Particularmente el contenido de humedad se determinó con la **Ecuación 1**:

Ecuación 1. *Contenido de humedad*

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Muestra inicial} - \text{Muestra seca}}{\text{Muestra inicial}} * 100$$

$$\% \text{ Humedad} = \frac{20 \text{ g} - 12,78}{20 \text{ g}} * 100$$

$$\% \text{ Humedad} = 36,1 \%$$

Por otro lado, el contenido de solidos inertes se determina con la **Ecuación 2**:

Ecuación 2. *Sólidos inertes*

$$\% \text{ sólidos inertes} = \frac{\text{Muestra inertes}}{\text{Muestra inicial}} * 100$$

$$\% \text{ sólidos inertes} = \frac{3,19}{20} * 100$$

$$\% \text{ sólidos inertes} = 15,95 \%$$

De acuerdo con los resultados obtenidos por las **Ecuaciones 1 y 2** para la borra de estudio la proveniente de un tanque de separación, se mostró un porcentaje de humedad del 36,1 % y de solidos inertes del 15,95%, lo que significa que la muestra no contiene tanto contenido de agua mejorando la estabilidad de la mezcla y reduciendo costos de transporte y gasto energético de separación. En cuanto a los sólidos muestra un valor bajo, favoreciendo su valor nutritivo o adsorbente. Un valor alto no contribuye activamente en estos procesos.

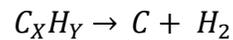
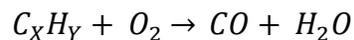
Se prefieren materiales con baja humedad y bajo contenido de solidos debido a que el agua puede ocupar los poros, afectando la adsorción [48]

5. LABORATORIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Desorción térmica

Los instrumentos de retorta son unidades con una capacidad de 10, 20 o 50 cm³, con camisas externas de calentamiento donde el fluido se coloca en un contenedor de acero y se calienta hasta que se evaporen los componentes líquidos. Los vapores pasan a través de un condensador y se recogen en un cilindro graduado. [49] Sin embargo, algunos de ellos pueden liberarse por medio de una pequeña válvula de alivio que tiene el equipo y no condensarse completamente; se estima que algunos de estos compuestos pueden ser Hidrocarburos Volátiles (VOCs) como el metano (CH₄) o Benceno (C₆H₆), óxidos de nitrógeno (NOXs), vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂) y monóxido de carbono (CO) debido a que son los gases de efecto invernadero asociados a la incineración de desechos y/o a la pirolisis con la gasificación [50][51]

Reacciones 1. *Algunas posibles reacciones implicadas en la desorción*



Usualmente estos equipos se emplean para determinar la cantidad de líquidos y sólidos en un fluido de perforación, sin embargo, para esta investigación se decidió usar una muestra de crudo o borra (muestra #2), en este caso 410 gramos obtenidos de la estación A del tanque de separación API y se realizaron 47 pruebas que se muestra a continuación en la **Tabla 2.** con sus respectivos porcentaje de sólido, aceite y agua.

Tabla 2.*Datos Retorta*

PRUEBA	Sólido (%)	Aceite (%)	Agua (%)
1	19	56	26
2	23	53	25
3	25	51	25
4	20	58	23
5	15	62	23
6	22	54	25
7	13	68	24
8	17	61	27
9	24	50	27
10	10	75	24
11	14	68	17
12	28	39	26
13	12	68	30
14	20	56	25
15	17	60	25
16	27	43	25
17	15	66	25
18	20	58	23
19	21	52	28
20	15	66	23
21	19	64	26
22	23	48	27
23	22	54	25
24	21	54	26
25	25	48	21
26	16	64	24
27	19	59	23

Tabla 2. Continuación

PRUEBA	Sólido (%)	Aceite (%)	Agua (%)
28	24	47	24
29	22	54	23
30	13	72	17
31	27	43	22
32	27	43	22
33	23	54	21
34	21	53	27
35	15	62	23
36	16	66	21
37	24	47	26
38	19	62	20
39	26	41	28
40	23	49	25
41	21	56	24
42	16	62	25
43	25	45	24
44	22	53	22
44	16	63	21
45	21	58	22
46	20	54	26
47	24	48	22

Nota. La tabla representa las 47 pruebas de la retorta realizadas en la Universidad América a la muestra #2

Cada prueba se realizo con un aproximado de 8,75 gramos de materia prima, logrando los datos de la **Tabla 2**. Para poder cuantificar la masa se aplica la **Ecuación 3** y se obtuvo el siguiente resultado :

Ecuación 3. Cuantificación retorta

$$\text{Solido (g)} = \text{Masa borra contenedor} * \% \text{solido}$$

$$\text{Agua (g)} = \text{Masa borra contenedor} * \% \text{ Agua}$$

$$\text{Aceite (g)} = \text{Masa borra contenedor} * \% \text{ Aceite}$$

Tabla 3.

Cuantificación retorta

PRUEBA	Sólido (%)	Aceite (%)	Agua (%)	Sólido (g)	Aceite (g)	Agua (g)
1	19	56	26	1,6	4,8	2,2
2	23	53	25	1,9	4,5	2,1
3	25	51	25	2,1	4,4	2,1
4	20	58	23	1,7	5,0	2,0
5	15	62	23	1,3	5,3	2,0
6	22	54	25	1,8	4,6	2,1
7	13	68	24	1,1	5,8	2,0
8	17	61	27	1,5	5,2	2,3
9	24	50	27	2,0	4,3	2,3
10	10	75	24	0,9	6,4	2,0
11	14	68	17	1,2	5,8	1,5
12	28	39	26	2,4	3,3	2,2
13	12	68	30	1,1	5,8	2,6
14	20	56	25	1,7	4,8	2,1
15	17	60	25	1,5	5,1	2,1
16	27	43	25	2,3	3,7	2,1
17	15	66	25	1,3	5,6	2,1
18	20	58	23	1,7	5,0	2,0
19	21	52	28	1,8	4,5	2,4
20	15	66	23	1,3	5,6	2,0
21	19	64	26	1,6	5,5	2,2

Tabla 3. Continuación

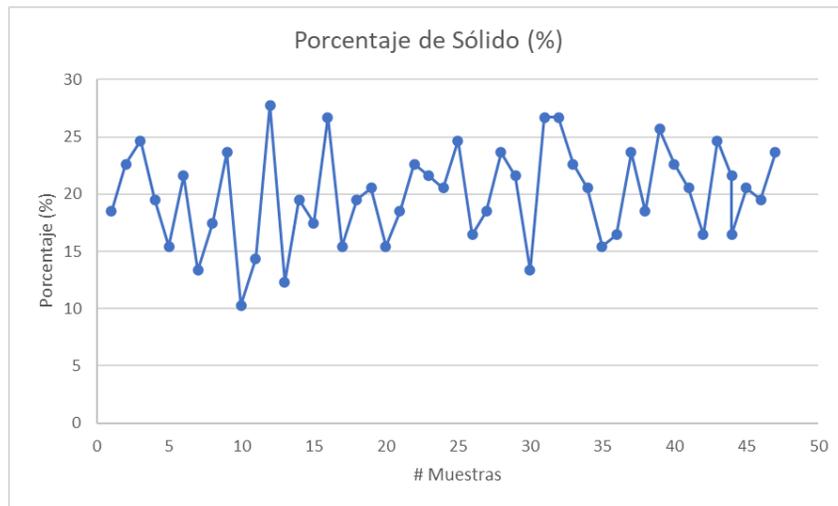
PRUEBA	Sólido (%)	Aceite (%)	Agua (%)	Sólido (g)	Aceite (g)	Agua (g)
22	23	48	27	1,9	4,1	2,3
23	22	54	25	1,8	4,6	2,1
24	21	54	26	1,8	4,6	2,2
25	25	48	21	2,1	4,1	1,8
26	16	64	24	1,4	5,5	2,0
27	19	59	23	1,6	5,0	2,0
28	24	47	24	2,0	4,0	2,0
29	22	54	23	1,8	4,6	2,0
30	13	72	17	1,1	6,2	1,5
31	27	43	22	2,3	3,7	1,9
32	27	43	22	2,3	3,7	1,9
33	23	54	21	1,9	4,6	1,8
34	21	53	27	1,8	4,5	2,3
35	15	62	23	1,3	5,3	2,0
36	16	66	21	1,4	5,6	1,8
37	24	47	26	2,0	4,0	2,2
38	19	62	20	1,6	5,3	1,7
39	26	41	28	2,2	3,5	2,4
40	23	49	25	1,9	4,2	2,1
41	21	56	24	1,8	4,8	2,0
42	16	62	25	1,4	5,3	2,1
43	25	45	24	2,1	3,9	2,0
44	22	53	22	1,8	4,5	1,9
44	16	63	21	1,4	5,4	1,8
45	21	58	22	1,8	5,0	1,9
46	20	54	26	1,7	4,6	2,2
47	24	48	22	2,0	4,1	1,9

Nota. La tabla representa la cuantificación de las 47 pruebas de la retorta realizadas en los laboratorios de la Universidad América a la muestra #2

A continuación, se realizaron las siguientes graficas basadas en los 47 experimentos de retorta de 10 mL.

Figura 17.

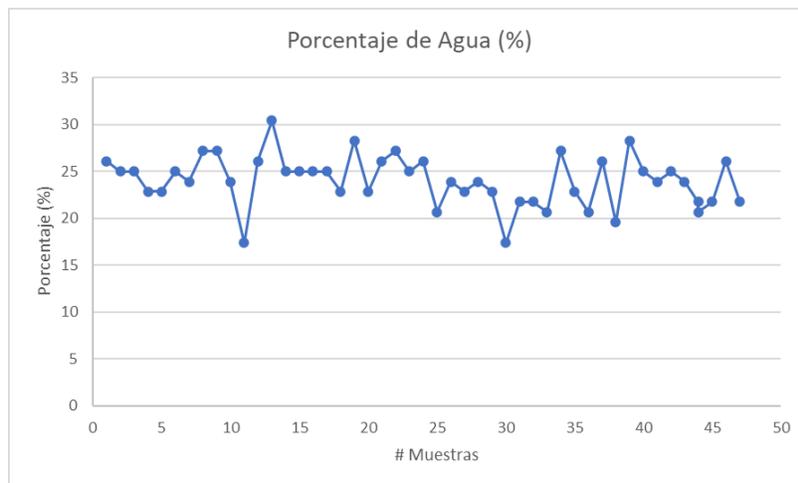
Porcentaje de solido, prueba de laboratorio retorta



Nota. La figura representa la cantidad de sólidos en porcentaje

Figura 18.

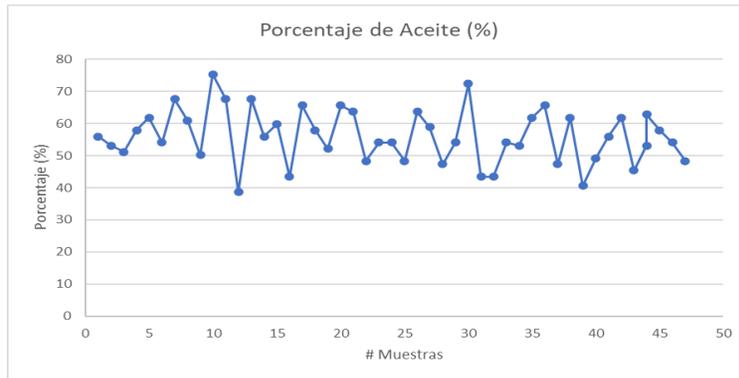
Porcentaje de agua, prueba de laboratorio retorta



Nota. La figura representa la cantidad de agua en porcentaje a lo largo de las muestras

Figura 19.

Porcentaje de aceite recuperado, prueba de laboratorio retorta



Nota. La figura representa la cantidad de aceite en porcentaje a lo largo de las muestras

Se pudo observar en la **Figura 17** valores de % de sólidos que oscilan entre 13% y 27 % aproximadamente. Para la **Figura 18** se generaron valores entre 18 y 27% de agua y finalmente para el aceite entre 42 % y 67 % (**Figura 19**). Por otro lado, las gráficas ilustran picos altos y bajos uno tras del otro, evidenciando mucha dispersión de datos, atribuyendo a errores humanos en las mediciones de lectura o de registro, calibración de equipos, ambientales, entre otros. Sumado a que para realizar la prueba se usaron 4 retortas disponibles en el laboratorio de la universidad cada una con desempeño distinto

Por otro lado, gracias a los datos de la **Tabla 3**. Se obtienen los siguientes resultados totales para los componentes de la muestra analizada:

Tabla 4.

Masas totales retortas

	Sólido	Aceite	Agua	Total
Gramos (g)	82,02	229,827	98,496	410
Porcentaje (%)	20%	56%	24%	100

Nota. La figura representa la cantidad de masa de cada subproducto

Se encontró como se puede ver en la **Tabla 4** valores de 56% de aceite, 20% sólidos y 24% de agua, mostrando correlación el contenido de agua con el porcentaje de humedad de la borra hallada en el capítulo 4.3. Es necesario contemplar esas composiciones para la toma de decisiones del tratamiento más adecuado, debido a que, al contener alta cantidad de aceite, lo más viable es buscar una manera de recuperarlo, como se realizó en esta investigación. Así mismo si tuviera alto % de agua se buscaría la manera de tratarla o en su defecto se gastaría mayor energía, tiempo y costos para eliminar esa humedad.

Igualmente se pudo determinar que las borras al exponerlas a la desorción térmica no contienen gran cantidad de sólidos, pero estos pueden ser partículas de sedimentos, materia orgánica o cualquier otra sustancia que esté presente en la muestra, favoreciendo o afectando su uso como carbón activado.

Es válido aclarar una vez finalizadas todas las 47 pruebas y con base a los resultados de la anterior tabla se obtuvieron 350 mL de fluido resultante como se puede ver a continuación en el siguiente calculo, que se procedió a pasar el aceite y el agua de gramos a volumen de acuerdo a la densidad aparente del aceite y a densidad específica del agua a 19,3 °C. [52]

Ecuación 4. Volumen aceite

$$\text{Volumen del aceite} = \frac{\text{Masa del aceite}}{\text{Densidad aparente del aceite}}$$

$$\text{Volumen del aceite} = \frac{229,824 \text{ g}}{0,922 \text{ g/ml}}$$

$$\text{Volumen del aceite} = 250 \text{ ml}$$

Ecuación 5. Volumen agua

$$\text{Volumen del agua} = \frac{\text{Masa del agua}}{\text{Densidad del agua a } 19,3^{\circ}\text{C}}$$

$$\text{Volumen del agua} = \frac{98,49 \text{ g}}{0,99841 \text{ g/ml}}$$

$$\text{Volumen del agua} = 99 \text{ ml}$$

Una vez realizada la desorción y obteniendo los subproductos de interés se procede al análisis de laboratorio del líquido recuperado; para las cenizas se definió los niveles de cada variable a trabajar

y por lo tanto la selección experimental. Por último, se realizó el análisis de laboratorio y de los resultados obtenidos de ese carbón resultante

5.2 Aceite

5.2.1 Acondicionamiento

Para el líquido resultante que tenía agua y aceite se almacenó y se dejó reposar observando una decantación en los días posteriores; fue necesario realizar una separación con centrifuga con 4 gotas de rompedor durante 5 minutos como se muestra en la **Figura 20** y un embudo de separación, sacando el remante de agua y dejando el aceite resultante. Se repitió este procedimiento con el líquido acuoso para separar las partículas que fueron desechadas con el objetivo de lograr tener 250 mL de aceite y 99 de agua, observando una proporción de 2,5 a 1 de aceite respecto al agua y 3 a 1 respecto a los sólidos.

Figura 20.

Centrifugación



Nota. La figura representa la cantidad de aceite en porcentaje a lo largo de las muestras

Figura 21.

Embudo de separación



Nota. Para mirar cambio completo ver **Anexos 3.**

5.2.2 Densidad aparente y gravedad Api

Para determinar la densidad aparente y la gravedad Api del aceite obtenido se determinó mediante un picnómetro (ver **Anexos 3**) generando los siguientes resultados:

Tabla 5.

Datos densidad aparente

Medición	Valor
Picnómetro vacío	16,5309
Picnómetro lleno	39,6049
Volumen Picnómetro	25 mL
Temperatura	19,3 °C

Nota. La tabla representa los datos experimentales para determinación de la densidad aparente

De acuerdo con los datos de la **Tabla 5.** y usando la **Ecuación 6** se determinó la densidad aparente.

Ecuación 6. Densidad aparente

$$\rho = \frac{\text{Picnómetro lleno} - \text{Picnómetro vacío}}{\text{Volumen Picnómetro}}$$
$$\rho = \frac{39.6049 - 16,5309 \text{ g}}{25 \text{ mL}}$$
$$\rho = 0,92296 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

Posteriormente se buscó en tablas el valor de densidad del agua a 19,3 °C [52] dando un valor de 0,99841 g/mL y usándolo en la **Ecuación 7**

Ecuación 7. Gravedad específica

$$GE = \frac{\rho \text{ crudo}}{\rho \text{ agua}}$$

$$GE = \frac{0,92296}{0,99841}$$

$$GE = 0,9244$$

Para determinar la gravedad Api que es una escala de gravedad específica para medir la densidad relativa de los crudos desarrollada por el Instituto Estadounidense del Petróleo (American Petroleum Institute, API) se usó la siguiente ecuación: [34]

Ecuación 8. Determinación gravedad API

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{G.E} - 131,5$$

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{0,9244} - 131,5$$

$$^{\circ}API = 21,572$$

Este valor obtenido es contrastado con la siguiente tabla para mirar el tipo de crudo al que pertenece debido a que varía mucho en sus propiedades uno a otro

Tabla 6.

Caracterización del crudo por gravedad API

Tipo de crudo	° API
Extra Pesados	<9,9
Pesados	10 – 21,9
Medianos	22- 29,9
Livianos	>30

Nota. Esta tabla muestra la caracterización de la gravedad API. Tomado de. PARIS DE FERRER, Magdalena. Fundamentos de ingeniería de yacimientos. Maracaibo, Venezuela.: 2009, p, 11.

Según la **Tabla 6** el crudo que se va a utilizar se puede clasificar como **pesado-mediano** por estar en los límites de la clasificación API (Instituto Americano del Petróleo). Cuantos más grados API tenga un petróleo, menos refinación se requiere para obtener de él los productos más costosos, que son los llamados “blancos”, es decir un valor más alto de esta corresponde a un petróleo más ligero, lo que implica menores costos de refinación para obtener de él los productos más costosos, como la gasolina.[54]

Un crudo que tiene características pesadas dificulta su extracción, manejo y transporte debido a sus propiedades fisicoquímicas, principalmente su alta densidad y viscosidad, baja gravedad API, y alto contenido de hidrocarburos pesados. Por lo general poseen un gran porcentaje de componentes pesados como resinas, asfáltenos, sales, ácidos orgánicos, residuos de carbono, sulfuros, metales y contenido de nitrógeno los cuales reducen la gravedad API° y aumentan drásticamente la viscosidad del crudo conllevando a mayores exigencias por parte de los equipos y dispositivos que inciden en su desplazamiento. Generando inconvenientes en las líneas de flujo e instalaciones de superficie, por cambios de presiones de flujo, obstrucciones en las líneas y reduciendo la eficiencia de los elementos que condicionan su transporte, promoviendo el uso de métodos y tratamientos especiales como: Calentamiento, coreannular flow, dispersión, dilución, entre otros [55]

Un API de 21,572 sugiere que este petróleo crudo es relativamente pesado, pero muestra mejores valores que el crudo original del cual se extrajo como remanente (viene de un crudo pesado)

5.2.3 Viscosidad

Para determinar la viscosidad del aceite se usó el viscosímetro Brookfield, equipo especializado en este tipo de mediciones a unos rpm específicos; se utilizó la spindle #2 (aguja de medición) por sus características de gravedad Api y densidad aparente halladas previamente, dando los siguientes resultados:

Figura 22.

Viscosímetro Brookfield



Nota. La figura representa el equipo utilizado en la determinación de la viscosidad disponible en la Universidad América

Tabla 7.

Medición viscosidad

RPM	Viscosidad (cP)
30	8-9
60	26

Nota. Esta tabla muestra un promedio de los datos obtenidos experimentalmente de la viscosidad

La viscosidad es la propiedad que consiste en la resistencia a fluir, para este caso se observa que a mayor cantidad de revoluciones este parámetro aumenta presentando valores dentro de lo permitido por la norma colombiana, que según la clasificación de la viscosidad (Wally J., 2012), los crudos medianos a pesado tienen viscosidades entre 100 cP a 10 cP, lo cual ayuda a diferenciar de los crudos de bitúmenes y favorecen, el transporte de crudo por los oleoductos en Colombia, debido a que no deben superar los 300 Centistokes a temperatura ambiente y la gravedad API mínima sea de 18°. [55]

5.2.4 Flash point y Fire point

Para la determinación del punto de chispa y el punto de ignición se utilizó la copa abierta del equipo Cleveland que consiste en calentar la muestra e ir pasándole un Mechero Bunsen cada grado centígrado de aumento (°C) hasta lograr apreciar la primera chispa y una llama constante como se ilustra en la **Figura 23** y dando los datos de la **Tabla 8**.

Figura 23.

Flash point



Nota. Esta figura representa la medición del punto de ignición de la muestra experimentalmente

Tabla 8.

Flash y fire point

Prueba	Valor °C
Flash point	74
Fire point	84

Nota. Esta tabla muestra un promedio de los datos obtenidos experimentalmente de los puntos de ignición e inflamación con dos mediciones

La determinación de los puntos de inflamación e ignición de la muestra mide la tendencia a formar una mezcla inflamable con el aire (la primera chispa) y la tendencia a una combustión sostenida. [36]

Valores muy bajos de estas propiedades indican un peligro para la seguridad, transporte y refinación de los fluidos debido a que a un incremento de la temperatura puede generar un desastre.

El líquido combustible obtenido se puede definir como aquel que tienen un flash point superior a 37,8 °C y particularmente de Clase IIIA: Es decir cualquier líquido que tiene un flash point igual o superior a 60 °C, pero inferior a 93 °C. Posee valores más altos que la gasolina (-30 a -40 °C), ACPM (54,4 °C) y del crudo convencional (61 °C) [56] mostrando que no es fácilmente inflamable, lo que mejora su perfil de seguridad para el almacenamiento y transporte.

5.3 Cenizas

5.3.1 Tratamientos

Una vez obtenidas las cenizas producidas en la retorta se procedió a la molienda, trituración y tamizado de ellas, seleccionando las partículas adecuadas para el uso como carbón activado y retirando los residuos no deseados.

Posteriormente se procede a realizar los tratamientos térmicos y termoquímicos con la intención de mejorar las propiedades adsorbentes del “carbón”, característica clave en aplicaciones industriales

5.3.1.a Térmico. Este proceso conlleva el calentamiento del carbón a temperaturas alrededor de 600 °C, produciendo una red de poros y aumentando la superficie específica del carbón, lo que mejora su capacidad adsorbente por la eliminación de compuestos volátiles

Figura 24.

Tratamiento térmico



Nota. La figura representa el equipo utilizado para el tratamiento térmico disponible en la Universidad América

5.3.1.b Químico. Las cenizas obtenidas se dividieron en 2, una de ellas se añadió una cantidad específica de hidróxido de potasio (KOH) en una proporción de peso de 1:1, es decir se le adicionaron 40 g de carbón con 40 g de hidróxido. Se puso a agitar y se le adicionaron 40 g de Cloruro de Zinc en 200 mL de agua destilada.[37]

Figura 25.

Tratamiento químico



Nota. La figura representa el proceso termoquímico realizado en la universidad América

5.4 Generalidades del diseño

Con el objetivo de optimizar la ejecución del proyecto, se llevará a cabo un diseño de experimentos utilizada para planificar, realizar, analizar e interpretar experimentos controlados de manera eficiente y efectiva.

La selección del diseño experimental más adecuado se basó en la información recopilada durante las investigaciones preliminares, asegurando así una metodología robusta y eficiente.

Para ello fue necesario definir el factor de trabajo, el cual fue la Producción de carbón activado con/sin aditivos para mirar si se puede obtener mejores resultados con los químicos añadidos, por lo que se dividió la muestra de cenizas en 2:

Tabla 9.

Materia prima

Tipo de muestra	
Muestra #1	Muestra #2
100% Borra de petróleo sin adicionar nada	100% Borra de petróleo con adición de KOH y ZnCl ₂

Nota. Esta tabla contiene el factor del diseño de experimentos representado en dos niveles o muestras

Luego de definir el factor a estudiar se definieron las variables respuesta, esas variables respuesta fueron seleccionadas debido a que son las pruebas de laboratorio que se plantean hacer para evaluar la calidad del carbón obtenido. La primera variable respuesta es la prueba de adsorción medida en la que átomos, iones o moléculas se adhieren y se desprenden de la superficie de un sólido poroso, en este caso, el carbón activado. Este proceso puede ser útil en la eliminación de contaminantes del agua, el aire y otros fluidos, ya que las impurezas se adhieren a la superficie del carbón activado. La segunda variable seleccionada fue el número de yodo que determina su eficacia en aplicaciones de adsorción, purificación y filtración. La importancia radica en cómo afecta la capacidad del carbón activado para adsorber moléculas, gases y contaminantes.

Como variables fijas o constantes, se tienen variables tales como, la profundidad a la que fue tomada la muestra (parte media baja tanque de separación API), tipo de borra, condiciones ambientales durante el experimento, longitud de onda (665 nm), duración, así como la masa de esta muestra y la cantidad de petróleo contaminante en la muestra. El área en donde se hizo el

proyecto fue topográficamente plana, con una temperatura que oscila entre 12 – 25 °C, con condiciones de humedad relativa de aproximadamente 79% (HR Bogotá D.C). y en las instalaciones de la Universidad América

5.4.1 Diseño para prueba de adsorción

El estudio de la calidad del carbón obtenido se hace basado en los valores de las pruebas de adsorción por azul de metileno, por lo que se plantea una opción con adición de hidróxido de potasio (KOH) y de Cloruro de zinc (ZnCl₂) y otra sin estos aditivos químicos para observar la muestra que mejor realiza la adsorción y desorción de un compuesto contaminante como se puede evidenciar en la **Tabla 10**.

Tabla 10.

Pruebas de adsorción y desorción

Pruebas Absorbancia	Inicial	Sin adición aditivos	Con adición aditivos
1: 0,01 M	1,150	0,221	0,110
2: 0,02 M	2,558	0,615	0,539
3: 0,03 M	2,886	2,381	0,685
4: 0,04 M	3,048	2,761	1,8
5: 0,05 M	3,109	2,978	2,114

Nota: Esta tabla ilustra la descripción de los datos de adsorción y desorción obtenidos de la experimentación.

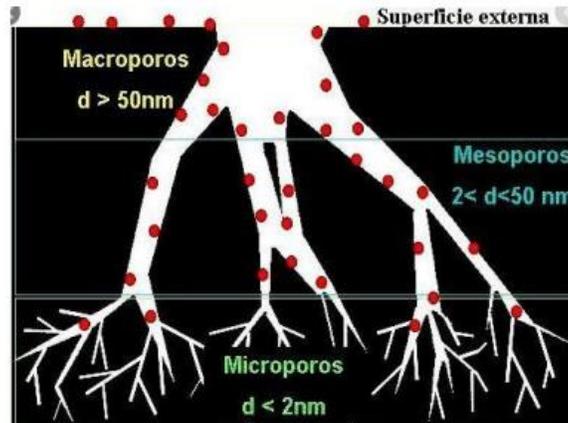
5.4.2 Diseño para número de Yodo

El número de Yodo es otro factor clave en la investigación debido a que influye en la efectividad del carbón debido a que indica mayor número de microporos adsorbentes. Este parámetro es clave para predecir la efectividad de adsorción de contaminantes en purificación de agua, aire y en procesos industriales como solventes e industria farmacéutica.

A continuación, se puede observar en la **Figura 26** como es la estructura microscópica de un carbón activado y como este factor puede afectar o beneficiar de acuerdo como este su red macro y micro ramificada:

Figura 26.

Estructura carbón activado



Nota. Esta figura muestra la microestructura del carbón. Tomado de. Tubón Rengel, Katherine Abigail. (2021). Adsorción de plomo sobre carbón activado obtenido de residuos de frutos de Crescentia Cujete. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba.

El porcentaje final denota más que todo las diferencias en los tipos de carbón se usaron, entre más alto sea el valor mayor capacidad de adsorción como se aprecia en la **Tabla 11**:

Tabla 11.

Diseño Número de Yodo

Pruebas Numero de Yodo	Tipo de muestra	
	M #1 mL Tiosulfato	M #2 mL Tiosulfato
0,25	12,3	13,4
0,5	23,32	24,5

Nota. Esta tabla muestra el diseño de experimentos de una de las variables respuestas como es el número de yodo con los dos niveles o muestras con/sin aditivos a dos diferentes concentraciones

5.5 Pruebas de laboratorio carbón

Este proyecto se va a realizar en un laboratorio dentro de las instalaciones de la Fundación Universidad América que se encuentra en el centro de la ciudad de Bogotá Latitud Norte: 4° 35'56" y Longitud Oeste de Greenwich: 74°04'51"

La zona donde se realizó la experimentación se ubica en la localidad de La Candelaria y tiene una altura cercana a los 3.600 msnm, con condiciones climáticas frías y localizada sobre la cordillera oriental.

A continuación, se explica en que consiste cada prueba que se realizó:

5.5.1 Análisis elemental

5.5.1.a Contenido de carbón. Para determinar el contenido de carbón de las muestras se realizó el “Procedimiento de Pérdida por Ignición (LOI)” el cual consiste en elevar la temperatura de una cantidad de materia prima disponible para determinar la cantidad de material volátil (generalmente orgánico) que se pierde cuando una muestra se somete a altas temperaturas. Es esencial realizar esta técnica debido a que un bajo contenido de volátiles suele ser deseable en el carbón activado, debido a que muestra una mayor pureza y proporción de carbono fijo. Particularmente se determinó con la **Ecuación 9**:

Ecuación 9. *Contenido de material Volátil*

$$\% \text{ Material Volatil} = \frac{\text{Peso Muestra inicial} - \text{Peso Muestra final}}{\text{Peso Muestra final}} * 100$$

$$\% \text{ Material Volatil} = \frac{50g - 46,786g}{50g} * 100\%$$

$$\% \text{ Carbón modificado} = 6,42 \%$$

$$\% \text{ Material Volatil} = \frac{50g - 35,11g}{50g} * 100\%$$

$$\% \text{ Material Volatil} = 29,78 \%$$

Existe una gran diferencia en cantidad superior para M1 con un 29,78%, respecto a M2, con un 6,42%. La muestra sin aditivos indica que contiene más compuestos orgánicos y/o inorgánicos que se descomponen a altas temperaturas, es decir que es menos estable térmicamente perdiendo gases y vapores al calentarse. Esto sugiere que M1 tiene una mayor cantidad de compuestos que se

descomponen a altas temperatura, causado por la no adición de químicos que generan estabilidad [57]

5.5.1.b Contenido de azufre. Para la determinación del contenido de azufre se usó el método Icontec 1154: “Determinación azufre en suelos por gravimetría” el cual consistió en pesar las muestras, adicionarles ácido clorhídrico y agua destilada, calentarlas y filtrarlas para obtener una solución que se calienta a 60 °C para adicionarle BaCl₂ al 10%; finalmente se filtra y se obtiene un precipitado para hallar la ganancia en peso (**Anexos 4 y 5**)

Esta prueba fue realizada en las instalaciones de IMA SAS (Ingeniería Medio Ambiental) por el ingeniero Nelson Fernández generando los siguientes resultados:

Tabla 12.

Contenido de azufre

Muestra	% Azufre
1: Carbón Convencional	1,91
2: Carbón Modificado	1,71

Nota. Esta tabla muestra los resultados obtenidos en la prueba del contenido de azufre realizada en un laboratorio externo IMA SAS (Ingeniería Medio Ambiental)

Ambas muestran resultados similares con 1,91 % y 1,71% respectivamente; el valor es relativamente bajo lo cual es favorable para evitar la formación de SO₂ durante la combustión, lo cual es un contaminante regulado. Un mayor contenido de azufre puede llevar a la liberación de gases sulfurosos durante el uso, lo que puede tener implicaciones medioambientales negativas. [58][59]

5.5.2 Densidad Aparente

El método tradicional de determinación de densidad aparente en laboratorio es por medio del método del picnómetro, donde se registra el peso inicial vacío del recipiente, después lleno con agua y finalmente lleno con muestra y agua como se ilustra en seguida:

Tabla 13.*Datos densidad aparente carbón*

Medición	Valor
Picnómetro vacío	18,08
Picnómetro Agua	44,0228
Picnómetro Agua + muestra1	44,87
Picnómetro Agua + muestra2	44,6812
Volumen Picnómetro	25 mL
Temperatura	19,3 °C
Densidad Agua a 19,3 °C g/mL	0,99841

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos experimentalmente para la determinación de la densidad aparente por picnómetro en la Universidad América

De acuerdo con los datos de la **Tabla 13.** y usando la **Ecuación 10** se determinó la densidad aparente.

Ecuación 10. *Densidad aparente carbón*

$$\rho = \frac{\text{Peso muestra}}{\text{Volumen muestra}}$$

Donde:

$$W_{\text{carbon}} = 0,5 \text{ g}$$

$$W_{\text{agua}} = 44,0228 \text{ g} - 18,08 = 25,9428 \text{ g}$$

$$W_{\text{agua}} + M1 = 44,87 \text{ g} - 18,08 = 26,79 \text{ g}$$

$$W_{\text{agua}} + M2 = 44,6812 \text{ g} - 18,08 = 26,6012 \text{ g}$$

$$W_{\text{agua desplazada 1}} = 26,79 \text{ g} - 25,942 = 0,8472 \text{ g}$$

$$W_{\text{agua desplazada 2}} = 26,601 \text{ g} - 25,942 = 0,6584 \text{ g}$$

$$V_{\text{desplazada 1}} = \frac{W_{\text{agua desplazada}}}{\rho_{\text{agua}}}$$

$$V \text{ desplazada } 1 = \frac{0,8472 \text{ g}}{0,99841 \frac{\text{g}}{\text{mL}}} = 0,8486 \text{ mL}$$

$$V \text{ desplazada } 2 = \frac{0,6584 \text{ g}}{0,99841 \frac{\text{g}}{\text{mL}}} = 0,6592 \text{ mL}$$

$$\rho 1 = \frac{0,5}{0,8486} = 0,589 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

$$\rho 2 = \frac{0,5}{0,6592} = 0,759 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

De acuerdo con los valores de la densidad aparente de cada muestra se puede ver que la muestra 2 presenta mayor valor esta generado por mayor cantidad de material en un mismo volumen, lo cual puede ser beneficioso en aplicaciones donde el espacio es limitado y se requiere maximizar la cantidad de adsorbente. Esto es consecuencia de la modificación química que se le realizó al carbón con la adición de hidróxido de potasio y cloruro de zinc alterando los microporos del carbón confiriéndolo de una mayor área superficial y una mayor retención de moléculas, mientras que los Macroporos y mesoporos tienden a retener partículas de gran tamaño como coloides o colorantes. [60]

Por otro lado, al tener menor densidad M1 indica mayor porosidad por lo que tendría más espacio para poder adsorber moléculas grandes, teniendo en cuenta la formación de canales preferenciales en sistemas de adsorción en columna.[61]

5.5.3 Número de Yodo

Para la determinación de este factor se preparó una solución de Yodo 0,1 N, con la que se agitó junto al carbón para posteriormente titularla con Tiosulfato de sodio y una solución de almidón como indicador generando los resultados de la **Tabla 11.**; se usó la **Ecuación 11** para determinar el número de Yodo:

Ecuación 11. *Cálculo número de Yodo*

$$\text{Número de Yodo} = \frac{N * V * M_{\text{yodo}}}{W_{\text{carbón}}}$$

$$\text{Número de Yodo} = \frac{0,1 \text{ N} * 12,3 \text{ mL} * 126,93 \text{ mg/mmol}}{0,25 \text{ g}}$$

$$\text{Número de Yodo} = 624,49 \text{ mg/g}$$

Donde:

$$N = \text{Normalidad} = \frac{\text{equivalentes}}{\text{litros}} = \frac{\text{mmol}}{\text{mL}}$$

V= Volumen Tiosulfato gastado

M yodo= 126,93 mg/mmol

Tabla 14.

Número de Yodo

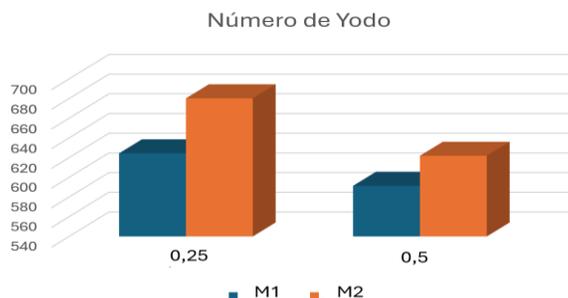
Pruebas Numero de Yodo	Tipo de muestra	
	Número de Yodo M1 (mg/g)	Número de Yodo M2 (mg/g)
0,25	624,4956	680,35
0,5	591,49	621,957

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos experimentalmente para la determinación del número de Yodo en la Universidad América (Anexos 4)

El número de Yodo es una medida clave para evaluar la capacidad adsorbente de materiales porosos como el carbón activado, reflejó mejores resultados para el carbón 2, a pesar de que el carbón 1 presenta menor variabilidad en los valores del número de yodo, lo que sugiere una estructura porosa más homogénea. Esto se puede apreciar con más detalle a continuación:

Figura 27.

Número de Yodo



Nota. Esta figura muestra los datos obtenidos en un grafica en la determinación del número de Yodo, donde M1 es la muestra sin aditivos y M2 con

Teniendo en cuenta los resultados de la gráfica anterior podemos analizar que:

Tabla 15.

Análisis número de Yodo

	Muestra #1	Muestra #2
Influencia de masa	En las muestras, se puede evidenciar que una menor masa permite una mejor adsorción del carbón activado en la solución de yodo, ya que pueden acceder fácilmente a los microporos, tienen mayor exposición de contacto y pueden alcanzar su punto de equilibrio más rápido, mientras en las muestras de mayor masa, tienen una mayor aglomeración en las partículas de carbón y causan bloqueos en los microporos.	
Adsorción	En esta muestra, indica una buena capacidad de adsorción en bajas cantidades de masa debido a su mejor dispersión y accesibilidad mientras que a mayor masa, la adsorción disminuye.	En esta muestra, indica una excelente capacidad de adsorción a bajas cantidades de masa por su efectividad de la activación química en la creación de más microporos, además que con mayor masa sigue teniendo una alta eficiencia de adsorción.
Aplicación en la industria según la norma ASTM D4607	Esta muestra puede ser utilizada en la industria de contaminante orgánicos volátiles y en la recuperación de solventes por su buena capacidad de adsorción.	Esta muestra puede ser utilizada en la industria de purificación del agua, eliminación de metales pesados, eliminación de gases de escapes, industria farmacéutica y recuperación de solventes por su mayor capacidad de adsorción, resistencia a la humedad, su mayor superficie activa y porosidad.

Nota. Esta tabla ilustra un análisis realizado basado en los datos obtenidos del número de Yodo. Tomado de. D4607 – 14, ‘Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon,’ ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, [En línea]. Disponible: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/2943ab71-82d8-42ad-94a5-6bb2d3c58267/astm-d4607-141>. [Accedido: 04-Jun-2024].”

5.5.4 Adsorción

Para calcular la cantidad de azul de metileno adsorbida por el carbón activado en las pruebas proporcionadas, es necesario convertir las absorbancias obtenidas experimentalmente en concentraciones utilizando una curva de calibración de acuerdo con la **Tabla 10** del diseño de experimentos enunciada previamente y con la siguiente ecuación:

Ecuación 12. Cálculo Concentraciones

$$C = \frac{A}{C \text{ muestra}}$$

$$C_{o 1} = \frac{1,150}{0,01} = 115 \frac{mg}{L}$$

$$C \text{ sin sin } 1 = \frac{0,221}{0,01} = 22,1 \frac{mg}{L}$$

$$C \text{ con con } 1 = \frac{0,110}{0,01} = 11,0 \frac{mg}{L}$$

Donde A: Absorbancia medida

C: Concentración

Generando la siguiente tabla:

Tabla 16.

Concentraciones prueba adsorción

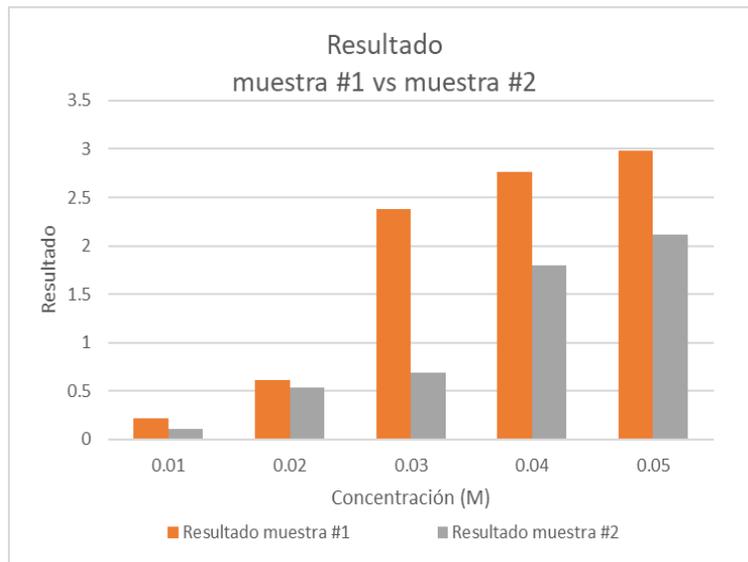
Pruebas Absorbancia	Co (mg/L)	Cf sin (mg/L)	Cf con (mg/L)
1: 0,01 M	115	22,1	11
2: 0,02 M	255,8	61,5	53,9
3: 0,03 M	288,6	238,1	68,5
4: 0,04 M	304,8	276,1	180
5: 0,05 M	310,9	297,8	211,4

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos experimentalmente con el Espectrofotómetro en la Universidad América y convertidos con la **Ecuación 12** para la determinación de la adsorción por azul de metileno

Igualmente se puede apreciar mejor con la siguiente gráfica el aumento de la concentración final al tener una muestra más concentrada

Figura 28.

Comparación adsorción



Nota. Esta figura ilustra de manera grafica las concentraciones finales obtenidas de los datos obtenidos experimentalmente con el Espectrofotómetro en la Universidad América y convertidos con la **Ecuación 12** para la determinación de la adsorción por azul de metileno

Posteriormente la cantidad adsorbida se puede calcular mediante:

Ecuación 13. *Cantidad adsorbida*

$$q = \frac{C_0 - C_f}{m} V$$

Donde: m= 0,5 g

V= 0,1 L=100 mL (solución)

Genera la siguiente tabla con las cantidades adsorbidas:

Tabla 17.

Cantidad adsorbida

Pruebas Absorbancia	q f sin (mg/g)	q f con (mg/g)
1: 0,01 M	18,58	20,8
2: 0,02 M	38,86	40,38
3: 0,03 M	10,10	44,02
4: 0,04 M	5,74	24,96
5: 0,05 M	2,62	19,9

Nota. Esta tabla ilustra la cantidad adsorbida por el carbón activado de azul de metileno a las diferentes concentraciones obtenidas con la **Ecuación 13**

La muestra #2 mostró una mayor capacidad de adsorción de azul de metileno promedio con 30, 02 mg/g en comparación con M1 con 15,18 mg/g, lo que puede estar relacionado con una mayor área superficial o una mejor estructura porosa. Esto se puede verificar en la siguiente tabla y figura de rendimientos:

Tabla 18.

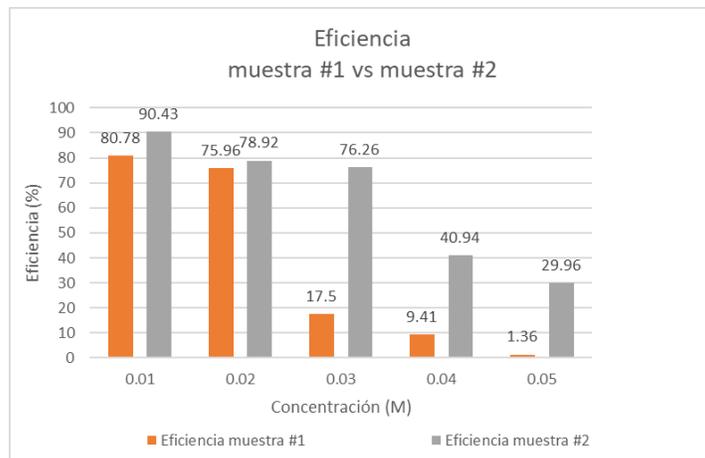
Resultados Adsorción azul de metileno

Concentración (M)	Resultado inicial	Resultado muestra #1	Resultado muestra #2	Eficiencia muestra #1	Eficiencia muestra #2
0,01	1,15	0,221	0,11	80,78	90,43
0,02	2,558	0,615	0,539	75,96	78,92
0,03	2,886	2,381	0,685	17,5	76,26
0,04	3,048	2,761	1,8	9,41	40,94
0,05	3,019	2,978	2,114	1,36	29,96

Nota. Esta tabla muestra la eficiencia obtenida de la cantidad adsorbida del carbón activado por azul de metileno

Figura 29.

Comparación eficiencias adsorción



Nota. Esta figura ilustra de manera grafica la eficiencia obtenida de la cantidad adsorbida del carbón activado por azul de metileno en cada concentración

De acuerdo con los resultados de la prueba de adsorción realizada a las dos muestras en diferentes concentraciones, podemos deducir que:

Tabla 19.

Análisis adsorción

	Muestra #1	Muestra #2
Superficie específica y Porosidad	Esta muestra, sin la activación química no tiene la misma extensión en los microporos y mesoporos ya que resulta con una menor superficie específica y de porosidad, por ende, una menor capacidad de adsorción. [62]	Con la activación química, se aumenta la superficie específica y la porosidad del carbón activado, debido a que al reaccionar produce microporos y mesoporos, aumentando el tamaño del área superficial, y la capacidad de adsorción. El ZnCl ₂ promueve la formación de una estructura más porosa al eliminar los componentes volátiles durante su activación química.[63]

Tabla 19. Continuación

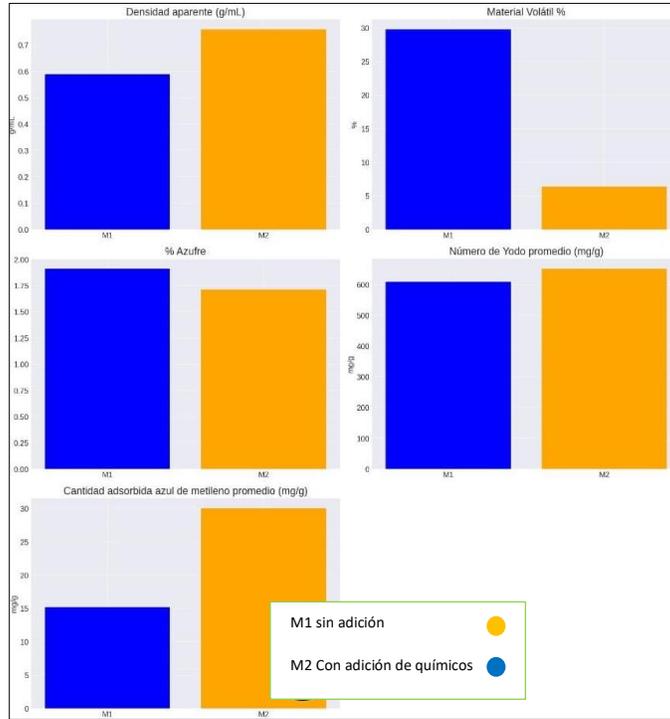
	Muestra #1	Muestra #2
Presencia de grupos funcionales	<p>Se puede inferir que esta muestra contiene:</p> <p>El grupo Hidroxilo (OH) por la oxidación que fue sometido en el proceso de carbonización.</p> <p>El grupo Alquilo (CH) como parte de su estructura base.[64]</p>	<p>Se puede inferir que esta muestra por tiende a aumentar la presencia de los siguientes grupos funcionales, tales:</p> <p>El grupo Hidroxilo (OH) por el KOH se tiende a formar en la superficie del carbón lo que aumentaría su porosidad y capacidad de adsorción.</p> <p>El grupo Carboxilo (COHH) se genera por la presencia del KOH y ZnCl₂ en la superficie del carbón.</p> <p>El grupo Ester (COOR), por la presencia de KOH y ZnCl₂ puede formar este grupo en la superficie del carbón [65]</p>
Eficiencia de adsorción	<p>Como se puede observar en la Figura 30, la eficiencia de adsorción disminuye rápidamente a medida que aumentamos la concentración del azul de metileno, se puede deducir una saturación rápida en los espacios disponibles y menor interacción con las moléculas del azul de metileno.</p>	<p>Como se puede observar en la Figura 30, la eficiencia de la adsorción de la muestra con activación química se mantiene alta incluso a mayores concentraciones del azul de metileno, indicando una mayor disponibilidad de sitios activos y una estructura porosa, causada por los aditivos químicos agregados [66]</p>

Nota. Esta tabla ilustra un análisis realizado basado en los datos obtenidos de la absorbancia por azul de metileno

Finalmente, estos fueron los resultados de las muestras estudiadas:

Figura 30.

Diagrama de barras resultados



Nota. Esta figura ilustra de manera grafica los resultados finales de la experimentación del carbón activado de las dos muestras (con/sin aditivos químicos) mediante Python

La muestra número dos, la cual fue el resultado de la aplicación de procesos termoquímicos con el aumento de temperatura en la mufla y la adición de hidróxido de potasio y cloruro de Zinc en proporción 1:1 mostró mejores resultados respecto a la otra muestra de estudio que solo se le realizó tratamiento térmico en mufla. Se evidenció una mejor capacidad adsorbente en términos de densidad aparente con un valor de 0,759 g /mL respecto a 0,589 g /mL ilustrando la alteración de los microporos del carbón confiriéndolo de una mayor área superficial y una mayor retención de moléculas. Igualmente tuvo menor contenido de material volátil 6,42 % a 29,78% por su estabilidad, y mayor capacidad de adsorción tanto de yodo como de azul de metileno en comparación con M1.

5.5.5 Isotermas de adsorción

Una vez determinado estos valores se va a hallar las isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich, modelos comúnmente usados para describir cómo las moléculas se adsorben en la superficie de un adsorbente. A continuación, se detallan los procedimientos y cálculos necesarios para obtener las isotermas de adsorción usando ambos modelos, basándose en los datos proporcionados.

5.5.5.a Isoterma Langmuir. Este modelo se describe mediante la siguiente ecuación y usando los datos de la **Tabla 20**

Tabla 20.

Cálculo isotermas

Pruebas Absorbancia	Cf sin (mg/L)	q f sin (mg/g)	Cf con (mg/L)	q f con (mg/g)
1: 0,01 M	22,1	18,58	11	20,8
2: 0,02 M	61,5	38,86	53,9	40,38
3: 0,03 M	238,1	10,10	68,5	44,02
4: 0,04 M	2,761	5,74	180	24,96
5: 0,05 M	297,8	2,62	211,4	19,9

Nota. Esta tabla ilustra los datos obtenidos previamente de la cantidad y concentración final a cada muestra de estudio en la adsorbancia por azul de metileno

Ecuación 14. Isoterma Langmuir

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{Q_{\max} K_L C_f} + \frac{1}{Q_{\max}}$$

Donde:

q: Es la cantidad adsorbida por unidad de masa del adsorbente (mg/g).

Cf: Es la concentración de equilibrio del adsorbato en la solución (mg/L).

Q max: Es la capacidad máxima de adsorción (mg/g).

K_L : Es la constante de Langmuir (L/mg).

Reordenando la ecuación se obtiene:

Ecuación 15. *Isoterma Langmuir organizada*

$$\frac{C_f}{q} = \frac{1}{Q_{\max} K_L} * C_f + \frac{1}{Q_{\max}}$$

La **Ecuación 15** se puede contrastar con la ecuación de la recta debido a su similitud en la forma de organizarse:

Ecuación 16. *Línea recta*

$$y = mx + b$$

Por último, se calculan los siguientes datos y se gráfica:

Tabla 21.

Isoterma Langmuir

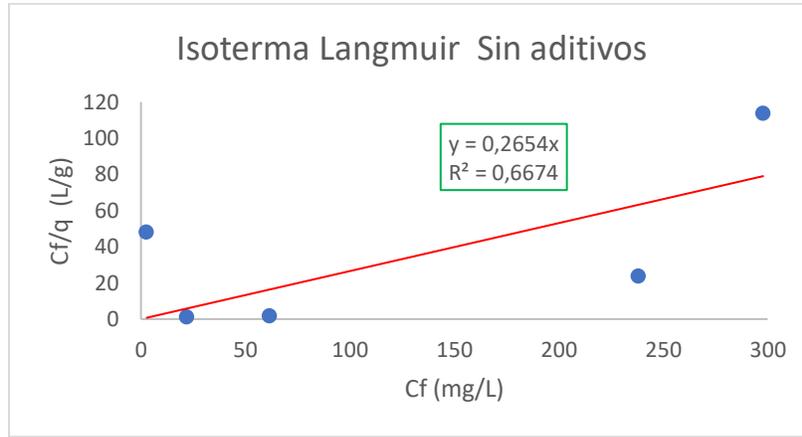
Pruebas Absorbancia	Muestra 1 Sin adición de químicos			Muestra 2 Con adición de químicos		
	Cf sin (mg/L)	q f sin (mg/g)	$\frac{C_f \text{ sin}}{q \text{ sin}}$	Cf con (mg/L)	q f con (mg/g)	$\frac{C_f \text{ con}}{q \text{ con}}$
1: 0,01 M	22,1	18,58	1,19	11	20,8	0,53
2: 0,02 M	61,5	38,86	1,58	53,9	40,38	1,33
3: 0,03 M	238,1	10,10	23,56	68,5	44,02	1,56
4: 0,04 M	2,761	5,74	48,10	180	24,96	7,21
5: 0,05 M	297,8	2,62	113,66	211,4	19,9	10,63

Nota. Esta tabla ilustra los datos necesarios para poder graficar y determinar las Isotermas de Langmuir en el estudio de la adsorbancia por azul de metileno

Se gráfica para obtener:

Figura 31.

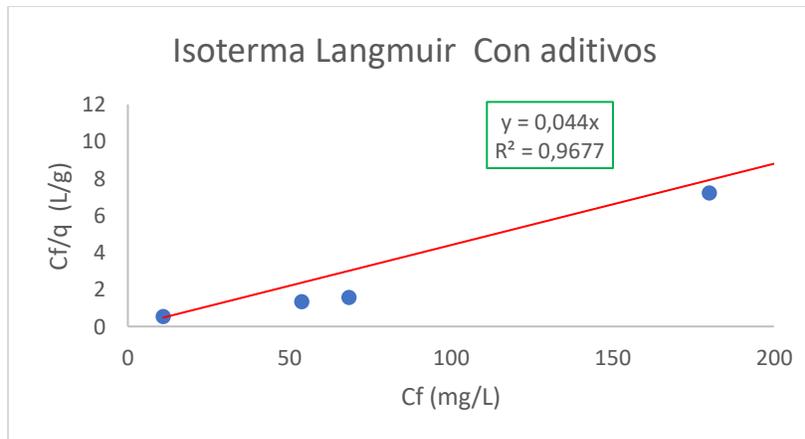
Isoterma Carbón sin aditivos Langmuir



Nota. Esta figura ilustra de manera grafica la Isoterma de Langmuir con semejanza a una recta para las muestras sin aditivos químicos a las diferentes concentraciones en la adsorbancia por azul de metileno

Figura 32.

Isoterma Carbón con aditivos Langmuir



Nota. Esta figura muestra la grafica la Isoterma de Langmuir con semejanza a una recta para las muestras con aditivos químicos a las diferentes concentraciones en la adsorbancia por azul de metileno

El modelo de Langmuir se usa para determinar la capacidad máxima de adsorción para azul de metileno, con el fin de brindar una idea clara de cuántos mg de azul de metileno pueden ser adsorbidos por gramo de carbón activado en condiciones óptimas. [67] En las gráficas se pudo apreciar un comportamiento proporcional entre la concentración final y la relación de Cf/q (concentración final respecto a la cantidad adsorbida), evidenciando aumentos a medida que lo hace la concentración final. Sin embargo, se pudo ver una dispersión de datos para el carbón activado #1 con un coeficiente de correlación de Pearson positivo-moderado (R=0,66) debido a que existe una relación lineal directa entre las dos variables, pero no es lo suficientemente fuerte como para hacer predicciones muy precisas. El modelo fue ideal para el carbón activado #2 mostrando superficies homogéneas con una capa monomolecular.

5.5.5.2 Isoterma Freundlich

Este modelo se describe mediante la siguiente ecuación y usando los datos de la **Tabla 20**

Ecuación 17. Isoterma Freundlich

$$q = K_F C^{1/n}$$

Donde:

q: Es la cantidad adsorbida por unidad de masa del adsorbente (mg/g).

Cf: Es la concentración de equilibrio del adsorbato en la solución (mg/L).

K_F: Es la constante de Freundlich-indicador de la capacidad de adsorción del adsorbente (mg/g)·(L/mg)^(1/n).

n: Es un factor empírico que indica la favorabilidad de la adsorción.

Tomando los logaritmos en ambos lados, obtenemos una relación lineal proporcional a la **Ecuación 16** para obtener:

Ecuación 18. Isoterma Freundlich organizada

$$\log q = \log K_F + \frac{1}{n} \log C$$

Por último, se obtienen los siguientes datos y se gráfica:

Tabla 22.

Isoterma Freundlich

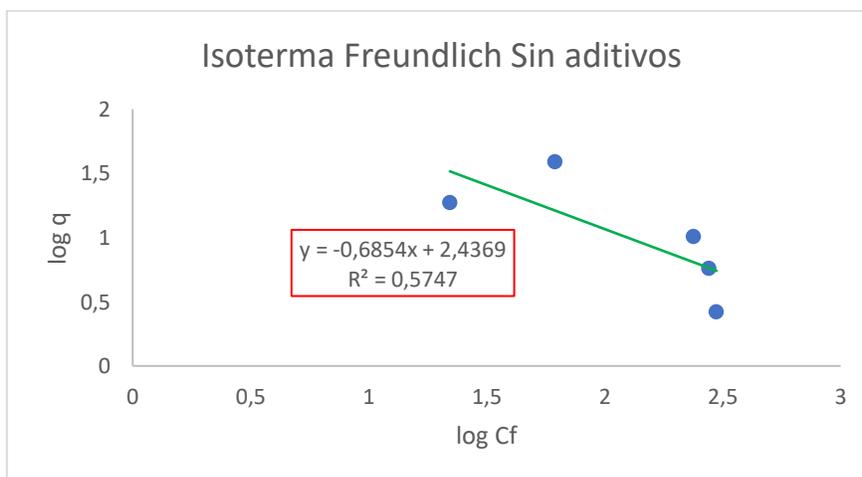
	Muestra 1 Sin adición de químicos				Muestra 2 Con adición de químicos			
Pruebas Absorbancia	Cf sin (mg/L)	log Cf sin	q f sin (mg/g)	log q sin	Cf con (mg/L)	log Cf con	q f con (mg/g)	log q con
1: 0,01 M	22,1	1,344	18,58	1,269	11	1,041	20,8	1,318
2: 0,02 M	61,5	1,789	38,86	1,59	53,9	1,731	40,38	1,606
3: 0,03 M	238,1	2,376	10,10	1,004	68,5	1,836	44,02	1,643
4: 0,04 M	2,761	2,441	5,74	0,759	180	2,255	24,96	1,397
5: 0,05 M	297,8	2,474	2,62	0,418	211,4	2,325	19,9	1,300

Nota. Esta tabla ilustra los datos necesarios para poder graficar y determinar las Isotermas de Freundlich en el estudio de la adsorbancia por azul de metileno

Se gráfica para obtener:

Figura 33.

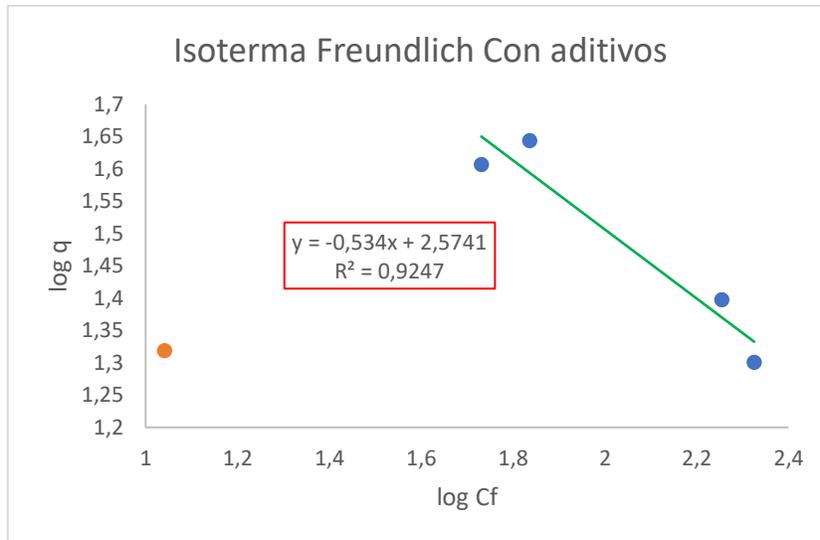
Isoterma Carbón sin aditivos Freundlich



Nota. Esta figura muestra la gráfica de la Isoterma de Freundlich con semejanza a una recta para las muestras sin aditivos químicos a las diferentes concentraciones en la adsorbancia por azul de metileno

Figura 34.

Isoterma Carbón con aditivos Freundlich



Nota. Esta figura muestra la gráfica de la Isoterma de Freundlich con semejanza a una recta para las muestras con aditivos químicos a las diferentes concentraciones en la adsorbancia por azul de metileno

El modelo de Freundlich, se usa para ajustar los datos experimentales sin suponer una capacidad máxima de adsorción. Esto es útil cuando la superficie del carbón tiene una variedad de tipos de sitios de adsorción con diferentes energías de adsorción.[67] En este modelo las gráficas mostraron un comportamiento distinto, con proporcionalidades inversamente proporcionales entre los logaritmos de la cantidad adsorbida y el logaritmo de las concentraciones finales; a mayor número de cantidad adsorbida menor es la concentración final.

Fue necesario retirar el primer valor de adsorción para la última grafica (**Figura 33**) debido a una posible mala lectura o dispersión de ese dato, mejorando el coeficiente de correlación de Pearson ($R=0,92$) con una correlación fuerte en sentido inverso debido a que existe una relación lineal directa entre las dos variables, permitiendo realizar predicciones muy precisas para cualquier valor de adsorbancia nuevo.

5 ANÁLISIS DE COSTOS

Para los costos del proyecto vamos a señalar únicamente las materias primas e insumos gastados, así como los preliminares, pruebas de laboratorio, mano de obra, talento humano, y demás costos del proyecto.

En cuanto a los costos netos del proyecto se tuvo en cuenta:

- Obtención de borras
- Insumos y alquiler de equipos
- Pruebas de laboratorio y Servicios
- Salario Investigadores
- Otros

Tabla 23.

Costos generales del proyecto

ITEM	DESCRIPCION	UND.	CANT.	VLR. UNITARIO	VLR. TOTAL
1.1	Insumos básicos				
1.1.0	Espátula	Und	2,0	\$ 5.900	\$ 11.800
1.1.1	Esponjillas Bon Brill	Paq	1,0	\$ 6.000	\$ 6.000
1.1.2	Toallas Scott	Paq	3,0	\$ 7.000	\$ 21.000
1.1.3	Beaker 500 ml	Und	3,0	\$ 15.000	\$ 45.000
1.1.4	Erlenmeyer 500 ml	Und	6,0	\$ 25.000	\$ 150.000
1.1.5	Embudo	Und	4,0	\$ 60.000	\$ 240.000
1.1.6	Crisol	Und	3,0	\$ 40.000	\$ 80.000
1.1.7	Pinzas de Crisol	Und	1,0	\$ 30.000	\$ 30.000
1.1.8	Barra de agitador magnético	Und	3,0	\$ 8.000	\$ 24.000
1.1.9	Bascula digital Analítica laboratorio 5000 g	Und	1,0	\$ 584.703	\$ 584.703
1.1.10	Papelería	Paq	1,0	\$ 6.000	\$ 6.000

Tabla 23. Continuación

ITEM	DESCRIPCION	UND.	CANT.	VLR. UNITARIO	VLR. TOTAL
1.2	Muestra #1				
1.2.1	Muestra #1	kg	1,0	\$ 0	\$ 0
1.2.2	Transporte	Bus	2,0	\$ 30.000	\$ 60.000
1.2.3	Nevera icopor	Und	1,0	\$ 17.100	\$ 17.100
1.3	Muestra #2				
1.3.1	Muestra #2	kg	1,0	\$ 0	\$ 0
1.3.2	Transporte	Bus	2,0	\$ 60.000	\$ 120.000
1.3.3	Nevera icopor	Und	1,0	\$ 17.100	\$ 17.100
2	Pruebas de laboratorio				
2.1	Prueba de laboratorio - Desorción térmica				
2.1.1	Equipo retorta de 20	Día	4,0	\$ 100.000	\$ 400.00
2.1.2	Grasa Loctite	Und	1,0	\$ 256.800	\$ 256.800
2.2	Prueba de laboratorio - Acondicionamiento del aceite				
2.2.1	Centrifuga con 4 gotas de rompedor	h	1,0	\$ 20.000	\$ 20.000
2.3	Prueba de laboratorio – Densidad aparente y gravedad API				
2.3.1	Picnómetro	Und	1,0	\$ 7.000	\$ 7.000
2.4	Prueba de laboratorio – Viscosidad				
2.4.1	Viscosímetro brookfield	día	1,0	\$ 150.000	\$ 150.000
2.5	Prueba de laboratorio – Flash Point and Fire point				
2.5.1	Aparato Cleveland copa abierta	día	1,0	\$ 50.000	\$ 50.000
2.6	Prueba de laboratorio – Activación química cenizas con KOH y ZnCl₂				
2.6.1	KOH	g	100	\$ 18,0	\$ 18.000
2.6.2	ZnCl ₂	g	100	\$ 5,0	\$ 5.000
2.6.4	Agitador magnético	Und	1,0	\$ 20.000	\$ 20.000
2.6.6	Mufla	Hora	1,0	\$ 10.000	\$ 10.000

Tabla 23. Continuación

ITEM	DESCRIPCION	UND.	CANT.	VLR. UNITARIO	VLR. TOTAL
2.7	Prueba de laboratorio – Número de Yodo en carbón activado				
2.7.1	HCl	ml	100	\$ 200	\$ 20.000
2.7.2	Solución estándar de Yodo	ml	100	\$ 15,0	\$ 15.000
2.7.5	Papel filtro	Und	4,0	\$ 500	\$ 2.000
2.7.6	Solución Tiosulfatos de sodio	ml	250	\$ 6,0	\$ 6.000
2.8	Prueba de laboratorio – Prueba de humedad y contenido sólidos inertes				
2.8.1	Mufla	Hora	20,0	\$ 10.000	\$ 200.000
2.9	Prueba de laboratorio – Densidad aparente carbón activado				
2.9.1	Picnómetro	Und	1,0	\$ 7.000	\$ 7.000
3.0	Prueba de laboratorio – Adsorción				
3.0.1	Azul de metileno	ml	30	\$ 200	\$ 6.000
3.0.3	Espectrofotómetro	dia	1,0	\$ 100.000	\$ 100.000
3.0.4	Agitador magnético	Und	3,0	\$ 20.000	\$ 60.000
4	Servicios				
	Agua	m ³	4	\$ 2.859	\$ 11.435
5	Talento Humano				
	Investigadores	Und	2	\$ 3.634.104	\$ 7.268.208
	Costo total				\$ 9.645.146

Nota: Las pruebas se realizaron en las instalaciones de la Universidad América, pero se tuvo en cuenta un aproximado del valor comercial según los precios del mercado.

El costo total del proyecto fue de 9.645.146 COP para fines de laboratorio como se puede evidenciar en la **Tabla 23**, teniendo en cuenta los diferentes precios unitarios en el mercado de los insumos, materiales y equipos con sus respectivas cantidades, sumado a un aproximado a las corrientes de servicio utilizadas y el costo del talento humano como investigadores.

Por otro lado, cuando se habla de costos netos de implementación, se evidencia la factibilidad económica de la desorción térmica, debido a que se logra recuperar un 56 % de aceite de la muestra original, con buenas propiedades e inmerso en un mercado con precio promedio del barril entre 70 y 80 U S. Sumado a que se produce otro residuo como es el carbón activado (20% de la borra) y con 82, 02 gramos con un precio promedio entre 20.000 y 30.000 COP el Kg.

6 ALCANCE

El propósito de este trabajo es encontrar un uso posterior a la vida útil de un residuo generado por la industria petrolera: las borras de petróleo de tanques de almacenamiento. Se llevó a cabo mediante un procedimiento termoquímico (desorción termoquímica) con el objetivo de recuperar aceite (crudo) y obtener un subproducto a partir de las cenizas generadas. La temperatura de evaluación propuesta 673–873 K (400-600 °C) aproximadamente debido a que son las ideales para tener resultados eficientes, fueron los sugeridos por diversos artículos y fueron las condiciones que puede alcanzar el equipo disponible (retorta) en las instalaciones de la Universidad América.

Por otro lado, no se realizó ninguna simulación, modelo matemático, diseño o construcción de algún equipo, balances de materia y energía, estudios de impacto, no se escaló a nivel industrial y el producto final no va a tener propiedades específicas para su aplicación en el tratamiento de aguas residuales, domésticas y de otro tipo de industria en específica.

Cabe aclarar que, al tratarse una degradación térmica por desorción, el sistema necesariamente requiere poca presencia de aire, debido a que la concentración de oxígeno en el aire puede alterar el proceso permitiendo la coexistencia de los procesos de gasificación y/o combustión por lo que es necesario conservar la hermeticidad durante el proceso.

Se pretende buscar un valor agregado a las cenizas obtenidas, en los que se va a analizar la posibilidad de lograr obtener un carbón activado y lograr recuperar un aceite que pueda ser

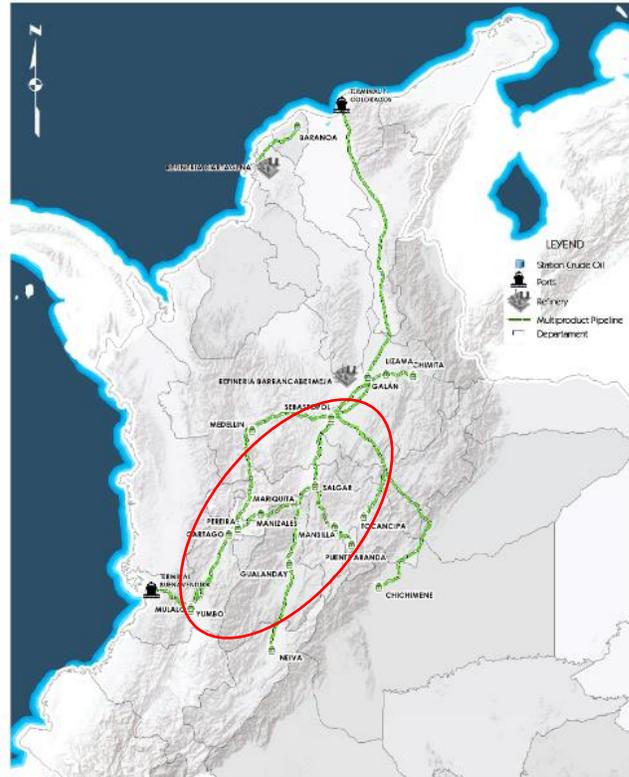
Para finalizar, se evaluarán los costos de la implementación del proyecto a pequeña escala y se analizará la basados en la bibliografía, teniendo en cuenta los costos de equipos, material de laboratorio, servicios, costo de la materia prima y el valor de la mano de obra.

6.3 Área de influencia

La materia prima de influencia para desarrollar esta técnica es obtenida de tanques de almacenamiento de poliductos y oleoductos que transportan crudo o refinados de las estaciones de una empresa X de hidrocarburos. Para este proyecto se decidieron tomar como lugares de referencia para la obtención de las borras las zonas aledañas a los municipios de Yumbo, Tocancipá, Mansilla y Sebastopol.

Figura 35.

Ubicación materia prima de estudio.



Nota: Lugar de extracción de las borras proporcionadas por la empresa X para la experimentación de esta investigación. Tomado de. <https://cenit-transporte.com/poliductos/>, elaboración propia

7 CONCLUSIONES

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó muestras de borra de crudo pesado de un tanque de separación API provenientes del Departamento del Meta, Colombia, perteneciente a la empresa Transportadora X; a la que se le realizó la desorción térmica mediante 47 pruebas de laboratorio con retorta de lodos de perforación, generando 56% de aceite, 20% de residuos sólidos y 24% de agua, es decir 82,02 gramos de cenizas y 250 mL de aceite recuperado a partir de 410 gramos de muestra inicial con una humedad de 36.1% y 15.95% en sólidos inertes, deduciendo que este tipo de borra no contiene grandes cantidades de agua, es buena en su transporte en oleoductos y reduce costos en su separación. Además de mostrar una alta eficiencia al recuperar aceite

Se encontró mediante pruebas experimentales realizadas al aceite recuperado, un API de 21,572°, lo cual lo podemos clasificar como un fluido pesado – mediano, el cual tiene mejores valores respecto a la borra de crudo original, con una viscosidad de 8-9 cP a 30 RPM y 26 cP a 60 RPM; lo que favorece en el transporte de hidrocarburos ya que no tiende a obstruirse en las facilidades y puede combinarse con crudos más pesados para mejorar su transporte, reduciendo la sedimentación y viscosidad para favorecer la vida útil de los oleoductos y necesitar menos pasos para su refinación. Además, posee un punto de chispa de 74 °C y de fuego de 84 °C mostrando que no es fácilmente inflamable, lo que mejora su perfil de seguridad para el almacenamiento y transporte. También puede emplearse en la formulación de mezclas de combustibles, aprovechando su estabilidad y propiedades favorables para mejorar la calidad de los productos finales

Se logró obtener un subproducto de valor agregado a partir de las cenizas generadas en el equipo de retorta de perforación y su activación termoquímica (1:1 hidróxido de potasio y cloruro de zinc) mostrando un potencial significativo para aplicaciones industriales de carbón activado como: contaminantes orgánicos volátiles y en la recuperación de solventes para M1; mientras para M2 en la purificación del agua, eliminación de metales pesados, eliminación de gases de escapes, industria farmacéutica y recuperación de solventes por su mayor capacidad de adsorción, resistencia a la humedad, su mayor superficie activa y porosidad, promoviendo una economía circular y reduciendo el impacto ambiental de los residuos de hidrocarburos.

Por medio de pruebas de laboratorio se pudo analizar que la muestra número dos, la cual fue el resultado de la aplicación de procesos termoquímicos con el aumento de temperatura en la mufla

y la adición de hidróxido de potasio y cloruro de Zinc en proporción 1:1 mostró mejores resultados respecto a la otra muestra de estudio de tratamiento térmico en mufla. Se evidenció una mejor capacidad adsorbente en términos de densidad aparente con un valor de 0,759 g /mL respecto a 0,589 g /mL, un menor contenido de material volátil 6,42 % a 29,78% por su estabilidad, y una mayor capacidad de adsorción tanto de yodo con valores promedio de 608 mg /g vs 651,2 mg /g; como para azul de metileno promedio con 30,02 mg/g a 15,18 mg/g, en comparación con M1.

REFERENCIAS

- [1] Arenas Piza,D., (-02-282018)."Proceso de biodegradación para el tratamiento de derrames de petróleo por medio de pseudomonas." Available: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/7130>.
- [2] ENAP, «Glosario,» ENAP, 2021. [En línea]. Available: <https://www.enap.cl/pag/232/1012>.
- [3] APA 6th - Parra Reyes, N. P. y Sterling Torres, A. S. (2020) Estandarización del tratamiento para la recuperación de crudo a partir de fluido fuera de especificaciones en la estación "A" de un campo situado en el municipio de Puerto Gaitán (Trabajo de grado). Fundación Universidad de América. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7826>
- [4] El Achkar, Jean H., Husain, Abrar Ben, Alotaibi, Nadeen, Alhaddad, Noor, Alamgir, Taiyeba, Alshamali, Husain, Alshammari, Yousef, Almuhanha, Mohammad, Albekheet,Abdullah, Alenezi, Khaled, and Mortadha T. Alsaba. "Could Petroleum Sludge be Used to Produce Biomethane as a Renewable Energy Source?." Paper presented at the ADIPEC, Abu Dhabi, UAE, October 2022. doi: <https://doi-org.ezproxy.uamerica.edu.co/10.2118/210953-MS>
- [5] Smith, R. (2016). In Chemical process design and integration (Second Edi, pp. 59–79). Wiley. https://drive.google.com/file/d/1TnsVECKoB8v56W4OxmjHNGIYUlg_qsXv/view
- [6] Rae, «oleoducto,» Rae, 2024. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/oleoducto>.
- [7] Dimian, Alexandre C. Bildea, Costin Sorin Kiss, Anton A.. (2019). Applications in Design and Simulation of Sustainable Chemical Processes - 2. Process Systems Approach in Conceptual Process Design. Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0122G4X3/applications-in-design/process-systems-approach>
- [8] Naciones Unidas (2018), La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago.<https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb30a4de-7d87-4e79-8e7a-ad5279038718/content>

- [9] M. Uyar y H. Aydın, "Production of low sulfur diesel-like fuel from crude oil wastes by pyrolytic distillation and its usage in a diesel engine", *Energy*, vol. 244, pp. 122683–122683, abril de 2022. [En línea]. Disponible: 10.1016/J.ENERGY.2021.122683
- [10] Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M. and Pennock, D. 2018. *Soil Pollution: a hidden reality*. Rome, FAO. 142 pp.
- [11] M. Uyar y H. Aydın, "Production of low sulfur diesel-like fuel from crude oil wastes by pyrolytic distillation and its usage in a diesel engine", *Energy*, vol. 244, pp. 122683–122683, abril de 2022. [En línea]. Disponible: 10.1016/J.ENERGY.2021.122683
- [12] M. E. Diaz and R. C. Brown, "Recovery of Hydrocarbons from Petroleum Sludge: A Review," *Fuel Processing Technology*, vol. 91, no. 7, pp. 802-811, 2010.
- [13] R. K. Pandey, "Thermal and Biological Treatment Methods for Oil Sludge: A Comprehensive Review," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 317, pp. 329-341, 2016.
- [14] L. J. Gómez Ocampo y M. P. Gómez Domínguez, "Métodos utilizados para el tratamiento de las borras de tanques de almacenamiento en la industria del petróleo", Tipo de documento (Artículo de revista), Universidad de San Buenaventura, Bogotá, 2015, págs. 4-6. [En línea]. Disponible: <https://bibliotecadigital.usb.edu.co/entities/publication/c886bee8-3df3-4113-9a15-fee7c6fd1dd>
- [15] X. Li, D. Han, M. Zhang, B. Li, Z. Wang, Z. Gong, P. Liu, Y. Zhang, and X. Yang, "Removal of toxic dyes from aqueous solution using new activated carbon materials developed from oil sludge waste," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 578, 2019, p. 123505, ISSN 0927-7757, doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.05.066.
- [16] L. J. Gómez Ocampo y M. P. Gómez Domínguez, "Métodos utilizados para el tratamiento de las borras de tanques de almacenamiento en la industria del petróleo", Tipo de documento (Artículo de revista), Universidad de San Buenaventura, Bogotá, 2015, págs. 4-6. [En línea]. Disponible: <https://bibliotecadigital.usb.edu.co/entities/publication/c886bee8-3df3-4113-9a15-fee7c6fd1dd>
- [17] Speight, J.G. (2014). *The Chemistry and Technology of Petroleum*. CRC Press
- [18] "Bioremediation: Principles and Practice" by Robert L. Irvine, Subhas K. Sikdar

- [19] L. M. Suárez Hernández, "Desarrollo de un método químico para recuperación de crudo a partir de las borras generadas en los procesos de mantenimiento de tanques y tuberías en distritos de producción petroleros de Colombia", Trabajo de grado - Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, 2011, págs. 5-11. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/8577/linamariasuarezhernandez.2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [20] Handbook of Incineration of Hazardous Wastes" by William S. Rickman
- [21] A. C. Andrade Gordillo y A. C. Corredor Rivera, "Análisis energético del esquema tecnológico del proceso de pirólisis rápida para la producción de bioaceites a partir de neumáticos de desecho," Trabajo de grado, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 7-feb-2019. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/20.500.11839/7369>
- [22] Secretaria del senado, «Ley 99 1993,» Secretaria del senado, 22 Diciembre 1993. [En línea]. Available: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0099_1993.html.
- [23] Secretaria del senado, «Ley 99 1993,» Secretaria del senado, 22 Diciembre 1993. [En línea]. Available: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0099_1993.html
- [24] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, "Decreto 4741," 30 de diciembre de 2005.
- [25] A. V. Bridgewater, D. Meier, and M. Radlein, "Pyrolysis: Theory and Industrial Practice," in *Progress in Biomass and Bioenergy*, vol. 8, A. Vertès, Ed. Springer, 2012, pp. 89-133.
- [26] S. Kumar, L. T. A. Hoang, and R. Balasubramanian, "Thermochemical Conversion of Biomass to Biofuels: A Review on Pyrolysis Techniques and Products," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 8, pp. 6602-6610, Aug. 2017.
- [27] D. Acosta Rubio y L. G. Castro Camacho, "Diseño del proceso de pirólisis para la producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos," Trabajo de grado, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 26-jul-2021. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8645>

- [28] M. Ramos Cedrés, "Desacidificación de aceites mediante adsorción en una columna de lecho fijo sobre carbón activado obtenido a partir de cáscaras de cultivos energéticos", 2021. [En línea]. Disponible: <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/24756>
- [29] J. K. Park, Y. D. Kim, and S. W. Kim, "Optimization of Adsorption Parameters for Free Fatty Acid Reduction in Vegetable Oils," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 109874-109883, Aug. 2020.
- [30] R. Hernández De La Cruz, "Eliminación de aceites y grasas en tratamientos de aguas residuales procedentes de una refinería mediante el uso de organoarcillas", Universitat Jaume I, 2022. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10234/196680>
- [31] ASTM International, "Standard Test Methods for Moisture in Activated Carbon," ASTM D2867-99, 1999.
- [32] ASTM International, "Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon," ASTM D2866-94, 1994.
- [33] ASTM International, "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method," ASTM D1298-12b, 2012. [Online]. Available: <https://www.astm.org/Standards/D1298.htm>. [Accessed: May 26, 2024].
- [34] ASTM International, "Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement," ASTM D792-13, 2013. [Online]. Available: <https://www.astm.org/Standards/D792.htm>. [Accessed: May 26, 2024].
- [35] Brookfield Engineering Laboratories, Inc., "Brookfield DV-E Viscometer Manual," [Online]. Available: <https://www.brookfieldengineering.com/-/media/ametektbrookfield/manuals/viscometers/laboratory-viscometers/1-Viscometers/1-Viscometer-DVE/Manual-DVE.pdf>. [Accessed: May 26, 2024].
- [36] ASTM International, "Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester," ASTM D92-18, 2018. [Online]. Available: <https://www.astm.org/Standards/D92.htm>. [Accessed: May 26, 2024].
- [37] Ramirez, Anyi P., Giraldo, Stephanie, Flórez, Elizabeth, & Acelas, Nancy. (2017). Preparación de carbón activado a partir de residuos de palma de aceite y su aplicación para la

remoción de colorantes. *Revista Colombiana de Química*, 46(1), 33-41. Retrieved July 09, 2024, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28042017000100033&lng=en&tlng=es.

- [38] Cubillos Pita, C. S. (2019) Evaluación de la obtención de carbón activado a partir de bambú de la especie *Chusquea Scandens* Kunth por activación física (Trabajo de grado). Fundación Universidad de América. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.11839/7612>
- [39] ASTM International, "Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon," ASTM D4607-94, 2006.
- [40] A. P. Gutierrez Carbón activado mediante activación química con ácido fosfórico a partir de la cascarilla de cacao para la captura de CO₂. [online]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12010/8244>.
- [41] M. W. I. Schmidt, H. Knicker, M. L. Hatcher, "A review of carbon and nitrogen analysis in the soil organic matter using LOI," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 50, no. 1, pp. 123-135, 1999.
- [42] "Fertilizantes y acondicionadores de suelos. determinación de azufre." Tienda virtual ICONTEC. Accedido el 26 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://tienda.icontec.org/gp-fertilizantes-y-acondicionadores-de-suelos-determinacion-de-azufre-ntc1154-2005.html>
- [43] ASTM International, "Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon," ASTM D2854-09. [Online]. Available: <https://www.astm.org/Standards/D2854.htm>. [Accessed: May 26, 2024].
- [44] ASTM International, "Standard Practice for Determination of Adsorptive Capacity of Activated Carbon by Aqueous Phase Adsorption," ASTM D3860. Disponible en: ASTM D3860.
- [45] Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). *Activated Carbon Adsorption*. CRC Press. Este libro proporciona una visión detallada de los métodos de adsorción y análisis de carbón activado
- [46] V. Martínez Ocampo, "Evaluación de distribución de la calidad de los crudos por unidad geológica en la cuenca Llanos Orientales, Colombia", resumen extendido de Trabajo de grado

- Pregrado, Univ. EIA, Envigado, 2020. [En línea]. Disponible: <https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/f872ac0e-fe9f-4a78-8343-b8b7f5a196b9/content>. Accedido el 26 de mayo de 2024.
- [47] Imágenes Totales. "Mapa del Meta, Colombia | Departamento con Municipios y Ciudades". [En línea]. Disponible en: <https://imagenestotales.com/mapa-meta-municipios-colombia/> [Accessed May 30, 2024].
- [48] G. Tchobanoglous, F. L. Burton, and H. D. Stensel, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4th ed. New York: Metcalf & Eddy, McGraw-Hill, 2013.
- [49] Baker Hughes INTEQ, "Fluidos," Manual de Ingeniería, 008902097S Rev. B, agosto de 1998.
- [50] Rosero Romero, María Caridad. Contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero generados por el tratamiento térmico (incineración) de desechos peligrosos contaminados con hidrocarburos en el Ecuador. Quito, 2024, 75 p. Tesis (Maestría en Cambio Climático y Negociación Ambiental). Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador. Área de Estudios Sociales y Globales.
- [51] L. D. Hansen and J. M. McCarthy, "Thermal Desorption of Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soils: Processes and Technologies," Environmental Science & Technology, vol. 38, no. 7, pp. 200-209, 2004.
- [52] U.S. Geological Survey, "Density of Water," Available: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/density-water>. [Accessed: 30-May-2024]
- [54] Ministerio de Minas y Energía, «Perfiles-Crudo,» eiticolombia, 2017. [En línea]. Available: <https://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2077/perfilesidrocarburos/perfiles-crudo/>.
- [55] Casas Cerón, S. y Pineda Roa, J. S. (2021) Evaluación de la fitorremediación de suelos contaminados con petróleo mediano por medio del pasto megathyrsus maximus, el girasol heliantbus annuus L y el trigo triticum aestivum en el campo Velásquez de mansarovar energy ubicado en Puerto Boyacá. [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América] Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8638>

- [56] Sura, C. –A. (s.f.). Centro de Información de Sustancias Químicas,. Obtenido de https://www.arlsura.com/files/materiales_inflamables.pdf
- [57] Zhang, C., Pan, J., & Zhang, H. (2019). "Characterization and Adsorption Performance of Biomass-Based Activated Carbons Prepared by Microwave-Assisted Activation." *IEEE Access*, vol. 7, pp. 143634-143641
- [58] Vassilev, S. V., & Vassileva, C. G. (2007). "A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behavior." *Fuel*, 86(10-11), 1490-1512.
- [59] ISO 351:1996: "Solid mineral fuels — Determination of total sulfur — High temperature combustion method."
- [60] Tubón Rengel, Katherine Abigail. (2021). Adsorción de plomo sobre carbón activado obtenido de residuos de frutos de Crescentia Cujete. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba.
- [61] Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). *Activated Carbon Adsorption*. CRC Press
- [62] Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). "Activated Carbon." Elsevier
- [63] Ioannidou, O., & Zabaniotou, A. (2007). "Agricultural residues as precursors for activated carbon production—A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1966-2005.
- [64] Bandosz, T. J. (2006). "Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation." Academic Press.
- [65] Teng, H., & Yeh, T. Y. (1998). "Preparation of activated carbons from bituminous coals with zinc chloride activation." *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 37(1), 58-65.
- [66] Srinivasakannan, C., & Balasubramanian, N. (2006). "Production of activated carbon from industrial solid waste." *Journal of Hazardous Materials*, 134(1-3), 257-262
- [67] Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). "Insights into the modeling of adsorption isotherm systems." *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2-10
- [68] Manual Estructuración del Trabajo de Grado. Fundación Universidad de América, 2021. [PDF].

GLOSARIO

ABSORCIÓN: características que presentan algunos fluidos para lograr retener fluidos.[1]

BIORREMEDIACIÓN: es el proceso natural por el cual los microorganismos degradan o alteran moléculas orgánicas transformándolas en moléculas más pequeñas y no tóxicas. [2]

BORRA: residuo que se genera en el almacenamiento y tratamiento de productos derivados del petróleo en tanques de almacenamiento. Se caracterizan por ser un lodo aceitoso, de compleja remoción de los tanques y por ser difícilmente aprovechable, debido a su composición que causa taponamiento e inadecuada operación de oleoductos.[3]

CENIZAS: residuo sólido inorgánico resultante de generar combustión a una sustancia orgánica.

CLORURO DE ZINC: compuesto químico inorgánico que se utiliza como catalizador en reacciones químicas. En la industria de hidrocarburos, se utiliza en la activación de cenizas para mejorar sus propiedades adsorbentes.

CRUDO: se refiere al petróleo natural, es decir, que no ha sufrido cambios como consecuencia de la extracción y conserva sus propiedades originales en el subsuelo. Término general para describir el petróleo sin refinar o petróleo líquido [1]

DESORCIÓN TÉRMICA: proceso en el cual se utiliza alta temperatura para la liberación de compuestos volátiles en un material y posteriormente la separación de sus compuestos.

GRAVEDAD API: escala de gravedad específica desarrollada por el instituto estadounidense del Petróleo (American Petroleum Institute, API) para medir la densidad relativa de diversos líquidos de petróleo expresada en grados. [4]

NORMALIDAD: se define como el número de equivalentes de soluto por litro de solución [5]

OLEODUCTO: tubería provista de bombas y otros aparatos para conducir petróleo a larga distancia en condiciones de comercialización, por su bajo contenido de agua y sedimentos [6]

PICNÓMETRO: instrumento hecho de vidrio el cual tiene un tapón de vidrio de ajuste junto con un tubo capilar que permite que el aire pase a través del aparato. Su característica principal es la de mantener un volumen fijo al colocar diferentes líquidos en su interior, esto permite comparar

las densidades de dos líquidos pesando el picnómetro con cada líquido por separado y comparando sus masas. [3]

POTENCIAL ECONÓMICO: representa la diferencia entre ingresos, obtenido mediante la venta de productos y subproductos valiosos, y gastos, que incluyen costos con materias primas, auxiliares [7]

RETORTA LODOS DE PERFORACIÓN: unidad de destilación de lodos que se utiliza para medir el contenido de agua, aceite y sólidos de un lodo de perforación. Este compuesto de un cuerpo cilíndrico que contiene un porta muestras para el lodo, un horno y un condensador de aluminio.

ANEXOS

ANEXO 1.

RECOMENDACIONES

Es vital el origen de la materia prima debido a que se generaron diferencias considerables entre la muestra de la piscina y la muestra final proveniente del tanque de separación, así como los tratamientos para cada una y la aplicabilidad de las técnicas de recuperación, con una inicial más centrada al tratamiento de agua mientras una segunda a los lineamientos de la presente investigación (recuperación de aceite y producción de un subproducto)

Se sugiere realizar el estudio con mayor número de muestras de borras, en un mayor tiempo, una experimentación de mayor cantidad de parámetros y una retorta de 50 mL.

Se recomienda hacer variaciones de concentraciones en las activaciones químicas de las cenizas generadas y probando diferentes alternativas para buscar optimizar las propiedades del carbón.

Se recomienda hacer una relación de costos y benéficos presentados por cada tipo de especie trabajada, además de tener un balance real de la aplicación del proyecto en tiempos proyectados de mes a mes.

La variabilidad en los resultados de retorta indica posibles fuentes de error, como errores de medición o condiciones ambientales, subrayando la importancia de una metodología rigurosa en futuros experimentos.

Es pertinente considerar en el desarrollo de futuros proyectos de investigación, el análisis SARA de petróleos pesados debido a que es una técnica que considera la solubilidad de diferentes especies de peso molecular dentro del mismo crudo, ayudando a realizar un análisis más profundo.

Finalmente se recomienda aplicar la metodología realizada y los productos obtenidos en industrias como en tratamientos de agua y recuperación de solventes, evaluando el desempeño en cada una de ellas.

ANEXO 2.

RESEÑA FOTOGRÁFICA TOMA DE MUESTRAS

REGISTRO FOTOGRÁFICO	ACTIVIDAD
	<p>El lunes 22 de enero de 2024 se procedió a tomar las muestras en la piscina de la estación X</p>
	<p>Muestra 1</p>
	<p>Experimentación con la muestra 1: retorta y tratamiento de agua</p>
	<p>Resultados experimentación muestra 1</p>



El lunes 26 de febrero de 2024 se procedió a tomar las muestras en los tanques de separación de la estación X



Obtención muestra #2



Muestra #2 lista para pruebas experimentales



ANEXO 3.

RESEÑA FOTOGRÁFICA DE EXPERIMENTACIÓN DE ACEITE

REGISTRO FOTOGRÁFICO	ACTIVIDAD
	<p>Desorción térmica de borras</p>
	<p>Peso recipiente borras</p>
	<p>Peso recipiente lleno</p>



Recipiente destilado



Recipiente destilado oscura



Retorta de HC



Resultado parte solida



Resultado parte liquida



Separación parte liquida



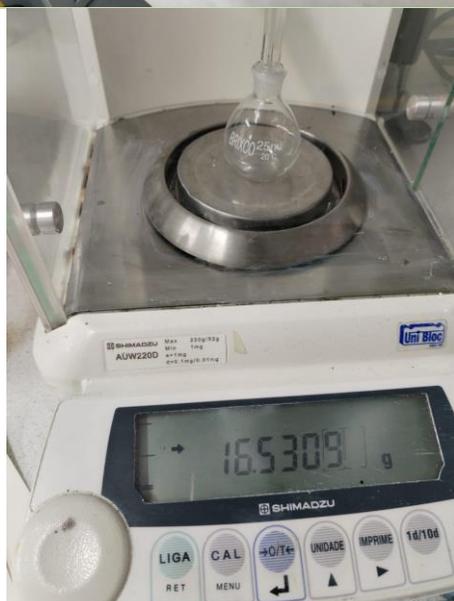
Separación centrifuga



Embudo de separación



Líquidos separados



Picnómetro vacío



Picnómetro lleno



Peso picnómetro



Viscosidad



Montaje flash y fire point



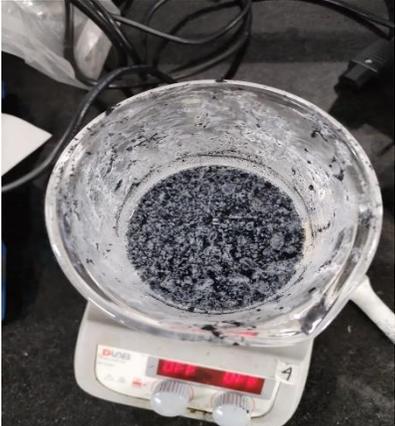
Flash y fire point



Fire point

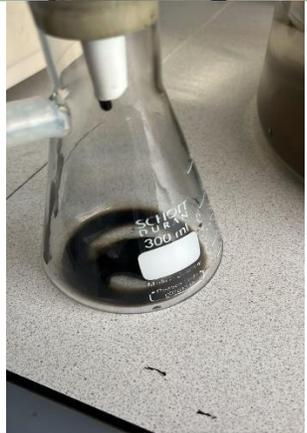
ANEXO 4.

PRUEBAS DE LABORATORIO CARBÓN

REGISTRO FOTOGRÁFICO	ACTIVIDAD
	<p>Se procedió en las instalaciones de la Universidad América a realizarse las pruebas de laboratorio</p>
  	<p>Tratamientos carbón (Térmico y termoquímico)</p>

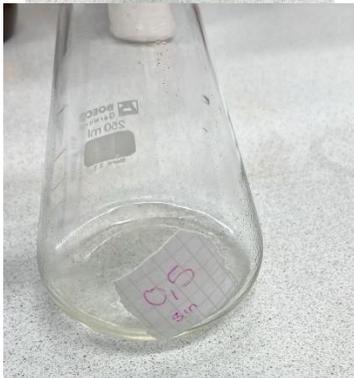
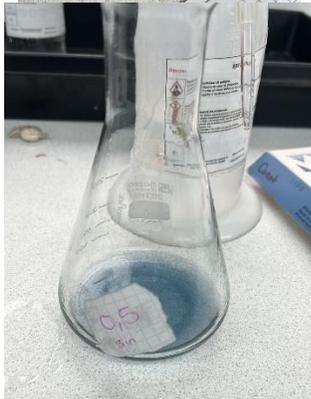
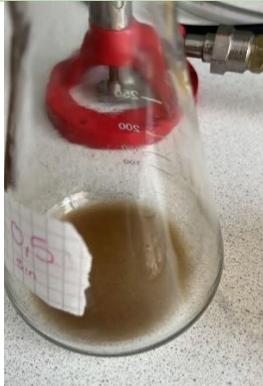


Resultado Carbón



Filtración prueba Numero de Yodo





Número de Yodo



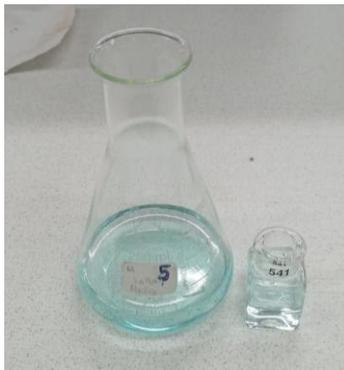
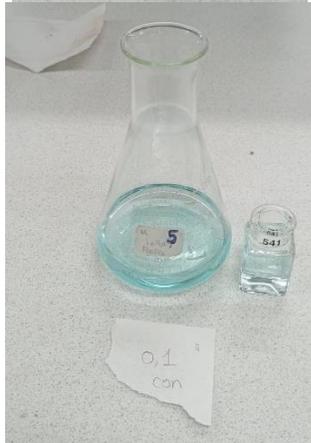
Determinación densidad aparente



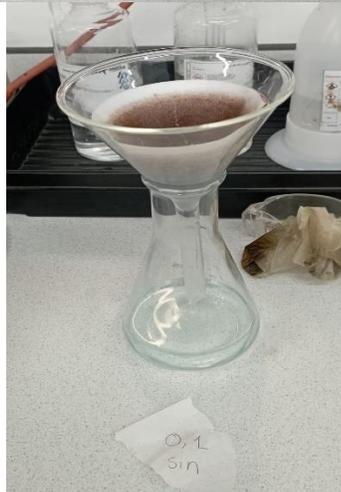
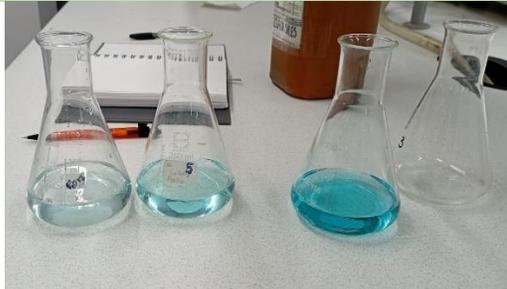
Picnómetro vacío



Agitación con solución de azul de metileno



Determinación del azul de metileno



Diferentes diluciones de azul de metileno



Datos de adsorción por
espectrofotómetro

ANEXO 5.

PRUEBAS DE LABORATORIO CONTENIDO AZUFRE



Código FLAB-08
VERSION : 7
Fecha 2011/09/28

INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO
SUELOS

INFORMACIÓN CLIENTE	
Empresa:	Universidad America
Dirección:	Av circunvalar 20-53
Nit:	860.006.806-7
Contacto:	Santiago Casas/Manuel Gonzalez
Teléfono:	3183701997
E: mail:	Santiago.casas@estudianmtes.uamerica.edu.co
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/ Bogota
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Muestra IMA No. :	5415
Matriz:	Carbon
Responsable de Muestreo:	El Cliente
Plan de Muestreo IMA No. :	N.A.
Procedimiento de Muestreo:	N.E.
Tipo de Muestreo:	Puntual
Fecha y Hora de Toma:	2024-05-30
Fecha y Hora de Recep:	2024-05-30
Lugar de Muestreo:	Carbon Convencional
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogota
Fecha de Análisis	2024-05-30 a 2024-06-03

Análisis en Suelo			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	Resultado Muestra Disponible
Azufre	Icontec 1154	%	1.91

N.A. : No Aplica, N.E. No Especifica

OBSERVACIONES:
El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.
SM Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Prohibida la reproducción total o Parcial de este documento sin autorización del Laboratorio

Nelson Fernandez Barrero

Nelson Fernandez Barrero
TP 4482 CPIQ Director laboratorio



INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO SUELOS

INFORMACIÓN CLIENTE	
Empresa:	Universidad America
Dirección:	Av circunvalar 20-53
Nit:	860.006.806-7
Contacto:	Santiago Casas/Manuel Gonzalez
Teléfono:	3183701997
E: mail:	Santiago.casas@estudianmtes.uamerica.edu.co
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/ Bogota
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Muestra IMA No. :	5414
Matriz:	Carbon
Responsable de Muestreo:	El Cliente
Plan de Muestreo IMA No. :	N.A.
Procedimiento de Muestreo:	N.E.
Tipo de Muestreo:	Puntual
Fecha y Hora de Toma:	2024-05-30
Fecha y Hora de Recep:	2024-05-30
Lugar de Muestreo:	Carbon Modificado
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogota
Fecha de Análisis	2024-05-30 a 2024-06-03

Análisis en Suelo			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	Resultado Muestra Disponible
Azufre	Icontec 1154	%	1.75

N.A. : No Aplica, N.E. No Especifica

OBSERVACIONES:
El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.
SM Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Prohibida la reproducción total o Parcial de este documento sin autorización del Laboratorio



Nelson Fernandez Barrero
TP 4482 CPIQ Director laboratorio



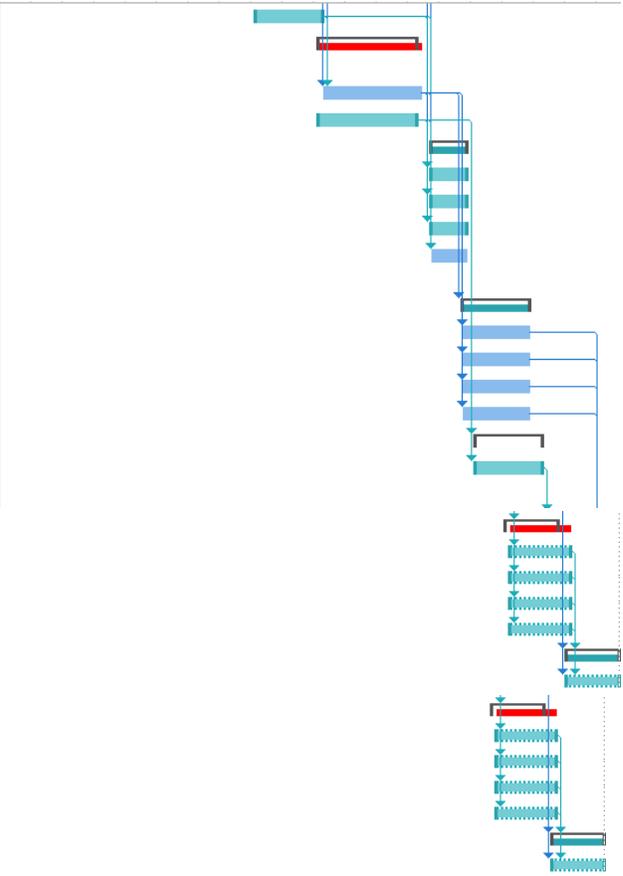
ANEXO 6.**CRONOGRAMA ESTIMADO DE ACTIVIDADES**

NOMBRE DE LA ACTIVIDAD	FECHA INICIO	FECHA FINAL
OBTENCIÓN MATERIAS PRIMAS	15/01/2024	02/02/2024
PRETRATAMIENTO YACONDICIONAMIENTO	05/02/2024	09/02/2024
CARACTERIZACIÓN DE PROCESO Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS	12/02/2024	26/02/2024
ELABORACIÓN DE MUESTRAS-ADICIÓN KOH	12/02/2024	19/02/2024
DESORCIÓN TERMOQUÍMICA PRIMER INTENTO	19/02/2024	01/03/2024
DESORCIÓN TERMOQUÍMICA SEGUNDA INTENTO	04/02/2024	18/03/2024
DESORCIÓN TERMOQUÍMICA TERCER INTENTO (OPCIONAL)	18/02/2024	08/04/2024
CARACTERIZACIÓN BORRAS	12/04/2024	19/04/2024
PRUEBAS DE LABORATORIO ACEITE (DENSIDAD, VISCOSIDAD,FLASH POINT Y FIRE POINT)	19/04/2024	03/05/2024
ACTIVACIÓN TERMOQUÍMICA	22/04/2024	06/05/2024
PRUEBAS DE LABORATORIO SUBPRODUCTO (DETERMINACIÓN DE LAHUMEDAD, MEDICIÓN DE SÓLIDOS INERTES, DENSIDAD APARENTE, NÚMERO DE YODO Y UN ANÁLISIS ELEMENTAL).	06/05/2024	17/05/2024
Pruebas adsorción	06/05/2024	17/05/2024
ANÁLISIS DE RESULTADOS	06/05/2024	20/05/2024
EVALUACIÓN CARBÓN	06/05/2024	20/05/2024
EVALUACIÓN FINANCIERA	29/04/2024	20/05/2024
ENTREGA FINAL DEL PROYECTO	20/05/2024	31/05/2024

Figura 36.

Diagrama de Gantt

Obtención cenizas	11 días?	lun 4/03/24	lun 18/03/24	
▲ Tercera Prueba Desorción Térmica (opcional)	16 días?	lun 18/03/24	lun 8/04/24	
Recuperación aceite	16 días	mar 19/03/24	mar 9/04/24	7;12;1
Obtención cenizas	16 días	lun 18/03/24	lun 8/04/24	
▲ Caracterizar Borrás	6 días?	vie 12/04/24	vie 19/04/24	
Humedad	6 días	vie 12/04/24	vie 19/04/24	9;10;1
Sólidos inertes	6 días?	vie 12/04/24	vie 19/04/24	9;10;1
Densidad aparente	6 días?	vie 12/04/24	vie 19/04/24	9;10;1
Características lugar obtención	6 días?	vie 12/04/24	vie 19/04/24	9;10;1
▲ Pruebas laboratorio aceite	11 días?	vie 19/04/24	vie 3/05/24	15
Densidad	11 días	vie 19/04/24	vie 3/05/24	15
Viscosidad	11 días	vie 19/04/24	vie 3/05/24	15
Flash point	11 días?	vie 19/04/24	vie 3/05/24	15
Fire point	11 días?	vie 19/04/24	vie 3/05/24	15
▲ Activación termoquímica	11 días	lun 22/04/24	lun 6/05/24	16
Activación termoquímica subproducto	11 días	lun 22/04/24	lun 6/05/24	16
▲ Evaluación subproducto	10 días	lun 6/05/24	vie 17/05/24	28
Número de yodo	10 días	mar 7/05/24	lun 20/05/24	28
Análisis elemental	10 días	mar 7/05/24	lun 20/05/24	28
Adsorción	10 días	mar 7/05/24	lun 20/05/24	28
Porosidad	10 días	mar 7/05/24	lun 20/05/24	28
▲ PRESENTACION FINAL	10 días	lun 20/05/24	vie 31/05/24	23;24
Presentación final	10 días	lun 20/05/24	vie 31/05/24	23;24
▲ Evaluación subproducto	10 días	lun 6/05/24	vie 17/05/24	28
Número de yodo	10 días	mar 7/05/24	lun 20/05/24	28
Análisis elemental	10 días	mar 7/05/24	lun 20/05/24	28
Adsorción	10 días	mar 7/05/24	lun 20/05/24	28
Porosidad	10 días	mar 7/05/24	lun 20/05/24	28
▲ PRESENTACION FINAL	10 días	lun 20/05/24	vie 31/05/24	23;24
Presentación final	10 días	lun 20/05/24	vie 31/05/24	23;24



Nota: La figura representa los tiempos que fueron necesarios para la consecución del proyecto