

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

“Obtención de carbón activado a partir del cuesco de palma africana como propuesta de utilización de residuo en la industria aceitera. Un caso de economía circular”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Carlos Daniel Robalino Jara

Luis Alfonso Zambrano Chilibingua

Tutor(a):

Fernando Morante Carballo, Ph.D

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a:

A mi padre, Carlos Robalino Hidalgo, cuya experiencia en el sector petrolero y naval ha levantado mi vocación por la ingeniería, además de ser ejemplo de valores como la responsabilidad, respeto y a enfocarme en continuar mis metas.

A mi madre, Valentina Jara Sanipatín, por su apoyo incondicional en mi desarrollo personal y académico, por enseñarme a no rendirme ni desistir cuando las situaciones estén complicadas y a idear formas de resolución de conflictos, dignos de una máster en mediación y practicante del derecho.

A mis hermanos, Laura y Jarod, que sepan que siempre estaré ahí para apoyarles.

Carlos Daniel Robalino Jara

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a:

A mi madre, quién siempre ha estado apoyándome en todo, su esfuerzo y dedicación son un ejemplo además de los valores que me ha enseñado desde pequeño, me han hecho la persona que soy ahora.

A mi hermano y mi familia, quienes me han enseñado a ser una persona fuerte y a siempre dar lo mejor de mí.

Luis Alfonso Zambrano
Chiliquinga

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, le agradecemos a Dios por brindarnos salud, protección y sabiduría en este proceso arduo de titulación universitaria.

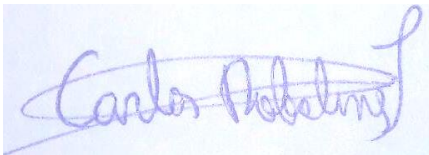
A nuestras familias que siempre estuvieron inspirándonos y apoyándonos en todo momento durante nuestro paso por esta institución.

A nuestros profesores y técnicos docentes que nos han enseñado y formado como profesionales. A nuestro tutor el Ph.D Fernando Morante por guiarnos en la elaboración de la tesis con su experiencia en redacción científica.

A los Ing. Tyrone Alcívar y Ing. Luis Vaca, por su apoyo durante la etapa experimental de nuestro proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Carlos Daniel Robalino Jara* y *Luis Alfonso Zambrano Chiliquinga* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Carlos Daniel
Robalino Jara



Luis Alfonso
Zambrano Chiliquinga

EVALUADORES

.....
Nadia Flores Manrique, M.Sc.

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Fernando Morante Carballo, Ph.D.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente proyecto está basado en la elaboración de carbón activado a partir del cuesco de palma africana. El cuesco es parte del desecho que queda luego de la cosecha de la palma y la posterior extracción del aceite. De cada kg de aceite se generan 4kg de biomasa lo cual genera impacto ambiental debido a la contaminación por escorrentía, lixiviación además de focos de plagas. El cuesco por su composición lignocelulósica es ideal para la producción de carbón, su posterior activación depende del tipo de metodología llevada a cabo. Se pretende evaluar la calidad del carbón activado a partir del cuesco de palma comparándolo con carbones comerciales para la revalorización de este residuo. Con esto se quiere realizar una actividad de economía circular aprovechando los desechos generados por la industria aceitera y además se disminuye la contaminación que estos generan. Se realizó el correspondiente pretratamiento de la materia prima y su posterior activación química con H_3PO_4 a diferentes concentraciones 20% y 40%. La carbonización se realizó a 500°C de tal manera que se favorezca la correcta formación de poros. Se realizó su respectiva caracterización según las normas de calidad del INEN. Se obtuvo un rendimiento entre el 30%-40%. El contenido de humedad, cenizas totales y densidad aparente se encontraron dentro de los rangos permisibles. Se realizaron pruebas de adsorción de ácido acético, adsorción de azul de metileno y poder decolorante obteniendo productos altamente competitivos con los que se encuentran en el mercado. Se realizó un análisis económico obteniendo un costo de 3.038\$/kg y un precio al mercado de 4.50\$/kg de carbón con lo cual su producción a gran escala es viable comercialmente.

Palabras Clave: Carbonización, activación química, activación física, capacidad de adsorción, economía circular, biomasa.

ABSTRACT

The present project is based on the elaboration of activated carbon from the African palm shell. The shell is part of the residue that remains after the harvest of the palm and the subsequent extraction of the oil. From each kg of oil, 4 kg of biomass are generated, which generates an environmental impact due to contamination by runoff, leaching, as well as sources of pests. Due to its lignocellulosic composition, the palm shell is ideal to produce charcoal, its subsequent activation depends on the type of methodology carried out. It is intended to evaluate the quality of activated carbon from the palm shell by comparing it with commercial carbon for the revaluation of this residue. With this, we want to carry out a circular economy activity, taking advantage of the waste generated by the oil industry and reducing the pollution that these generate. With the activated carbon produced, a high-quality product equivalent to or better than the one imported and marketed in the Ecuadorian market was obtained. The corresponding pretreatment of the raw material was carried out and its subsequent chemical activation with H_3PO_4 at different concentrations 20% and 40%. The carbonization was carried out at $500^\circ C$ in such a way that the correct formation of pores is favored. Their respective characterization was carried out according to the INEN quality standards. A yield between 30%-40% was obtained. The moisture content, total ash and bulk density were within the permissible ranges. Acetic acid adsorption, methylene blue adsorption and bleaching power tests were carried out, obtaining highly competitive products with those found on the market. An economic analysis was carried out, obtaining a cost of \$3.038/kg and a market price of \$4.50/kg of activated carbon, with which its large-scale production is commercially viable.

Keywords: *Carbonization, chemical activation, physical activation, adsorption capacity, circular economy, biomass.*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	6
RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE PLANOS	XI
CAPÍTULO 1	13
1. Introducción.....	13
1.1 Descripción del problema	14
1.2 Justificación del problema	16
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo General	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 Marco teórico	17
1.4.1 Palma Africana en Ecuador	17
1.4.2 Carbón activado.....	19

1.4.3	Métodos de preparación de carbón activado	20
1.4.4	Variables de proceso	22
1.4.5	Aplicaciones	22
1.4.6	Propiedades y caracterizaciones del carbón activado.....	24
1.4.7	Economía circular.....	27
CAPÍTULO 2		30
2.	Metodología.....	30
2.1	Revisión y análisis bibliográfico.....	31
2.2	Recepción de materia prima.....	31
2.3	Pretratamiento del cuesco	31
2.4	Tratamiento Químico	32
2.5	Rendimiento	32
2.6	Pruebas de calidad.....	32
CAPÍTULO 3		43
3.	Resultados y análisis.....	43
3.1	Pretratamiento del cuesco	43
3.2	Activación química	43
3.3	Contenido de humedad	46
3.4	Contenido de cenizas	48
3.5	Densidad Aparente.....	49

3.6	Adsorción de azul de metileno.....	50
3.7	Isoterma de adsorción	56
3.8	Numero de Yodo.....	64
3.9	Poder decolorante.....	64
3.10	Análisis económico.....	67
CAPÍTULO 4		71
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	71
4.1	Conclusiones	71
4.2	Recomendaciones.....	72
BIBLIOGRAFÍA		75
APÉNDICES		80

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
BET	Brunauer, Emmett y Teller
CP 20	Carbón activado de palma al 20% de ácido fosfórico
CP 40	Carbón activado de palma al 20% de ácido fosfórico
CA	Carbón activado
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
INEC	Instituto ecuatoriano de estadísticas y censos
PID	Sistema de control Proporcional, Integral y Derivativo
PBP	Periodo de recuperación
ROI	Retorno de inversión
SI	Área de numero de yodo
TM	Tonelada métrica
TIR	Tasa interna de retorno
UAB	Universidad Autónoma de Barcelona
UV	Ultravioleta
USD	dólares estadounidenses
VAN	Valor actual neto

SIMBOLOGÍA

ml	Mililitros
mg	Miligramo
pH	Potencial de Hidrógeno
ppm	Partes por millón
M	Molar
N	Normalidad
nm	Nanómetro
μm	Micrómetro
MJ/kg	Mega joule por kilogramo
%p/p	Porcentaje peso
H ₂	Hidrógeno molecular
H ₃ PO ₄	Ácido fosfórico
CH ₄	Metano
NaOH	Hidróxido de sodio
KOH	Hidróxido de potasio

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Plantación de palma (Mingorance et al., 2004).....	17
Figura 1.2 Ubicación y organización de la industria aceitera. (Potter, 2011)	18
Figura 1.3 Formas de carbón activado (Kwiatkowski, 2012).....	20
Figura 1.4 Filtro para tratamiento de agua. (Sevilla, 2009).....	23
Figura 1.5 Diluciones azul de metileno (Castellar et al., 2013)	26
Figura 2.1 Diagrama de proceso de activación química.....	30
Figura 3.1 Recta de calibración azul de metilo	51
Figura 3.2 Concentración de Azul de metilo CP40	52
Figura 3.3 Concentración de Azul de metilo CP20	53
Figura 3.4 Concentración de Azul de metilo C1	54
Figura 3.5 Concentración de Azul de metilo C2	55
Figura 3.6 Relación q vs C: Comercial 1.....	56
Figura 3.7 Isoterma Langmuir: Comercial 1	57
Figura 3.8 Relación q vs C: Comercial 2.....	58
Figura 3.9 Isoterma Langmuir: Comercial 2	59
Figura 3.10 Relación q vs C: Carbón palma 40%	60
Figura 3.11 Isoterma Langmuir: Carbón Palma 40%	61
Figura 3.12 Relación q vs C: Carbón palma 20%	62
Figura 3.13 Isoterma Langmuir: Carbón Palma 20%.....	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Soluciones preparadas de azul de metilo	35
Tabla. 2.2 Soluciones preparadas ácido acético	36
Tabla 2.3 Comparación de la máxima capacidad de adsorción para el MB	40
Tabla. 2.4 Reactivos y equipos utilizados	41
Tabla 3.1 Resultados del Pretratamiento	43
Tabla 3.2 Resultados de las activaciones químicas	43
Tabla 3.3 Resultados Humedad CA comercial 1	46
Tabla 3.4 Resultados Humedad CA comercial 2	46
Tabla 3.5 Resultados Humedad CA 20%	47
Tabla 3.6 Resultados Humedad CA 40%	47
Tabla 3.7 Resultados de cenizas totales	48
Tabla 3.8 Resultados de densidad aparente	49
Tabla 3.9 Absorbancias y concentraciones	50
Tabla 3.10 Absorbancias del carbón activado 40%	51
Tabla 3.11 Absorbancias del carbón activado 20%	52
Tabla 3.12 Absorbancias del carbón comercial 1	53
Tabla 3.13 Absorbancias del carbón comercial 2	54
Tabla 3.14 Resultados Comercial 1	56
Tabla 3.15 Linealización Isoterma Langmuir Comercial 1	57
Tabla 3.16 Constante de Langmuir y área superficial para Carbón Comercial 1	57
Tabla 3.17 Resultados Comercial 2	58
Tabla 3.18 Linealización Isoterma Langmuir Comercial 2	59

Tabla 3.19 Constante de Langmuir y área superficial para Carbón Comercial 2.....	59
Tabla 3.20 Resultados Carbón Palma 40%.....	60
Tabla 3.21 Linealización Isoterma Langmuir Carbón Palma 40%.....	61
Tabla 3.22 Constante de Langmuir y área superficial para Carbón de Palma al 40% ..	61
Tabla 3.23 Resultados Carbón Palma 20%.....	62
Tabla 3.24 Linealización Isoterma Langmuir Carbón Palma 20%.....	63
Tabla 3.25 Constante de Langmuir y área superficial para Carbón de Palma al 20% ..	63
Tabla 3.26 Resultados de Número de Yodo	64
Tabla 3.27 Poder decolorante y concentración final	65
Tabla 3.28 Demanda de carbón activado en el Ecuador.....	67
Tabla 3.29 Resumen de costos de CA de cuesco de palma africana	68

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 **Ubicación y organización de la industria aceitera. (Potter, 2011)**

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la palma es muy importante debido a la gran variedad de productos y subproductos que se elaboran con su aceite y la cantidad de puestos de trabajo que genera en las distintas industrias, papel, alimentos, ganadera, maderera, entre otras. Aun así, el sector genera gran cantidad de desechos pues de cada kg de aceite se generan 4kg de biomasa, lo cual genera impacto ambiental debido a la contaminación por escorrentía y lixiviación. Entre los desechos generados se encuentra el cuesco de palma africana que conforma el cascaron que recubre la pulpa y queda luego de la cosecha de la palma y la posterior extracción del aceite. Con esto se pretende darle un uso alternativo al cuesco transformándolo en carbón activado para evaluar los parámetros de calidad según la normativa correspondiente además de realizar un análisis económico para la determinación de su viabilidad comercial. Los carbones activados se pueden elaborar a partir de métodos físicos, químicos y fisicoquímicos y se pueden usar gran variedad de precursores siendo los más interesantes los de origen agroindustrial. Además, de que tienen amplias aplicaciones en todas las industrias. Es por esto que el tema sigue siendo de relevancia en la actualidad e interés investigativo ya que diferentes metodologías para su mejoramiento surgen cada año. Se obtienen productos de alta calidad competitivos con los carbones comerciales que generalmente están hechos de residuos de coco u otros materiales como zeolita. Se investiga esta temática debido a que se quiere evaluar la efectividad del carbón activado de palma, ya que representaría una alternativa de economía circular para las empresas, debido a que le darían un uso a un residuo que se les hace difícil gestionarlo, además que se generaría un valor agregado a la producción de palma africana, considerando que el carbón activado es un producto importado. El cuesco por su composición lignocelulósica y al ser alto en lignina es ideal para la producción de carbón. Se realizó el correspondiente pretratamiento

de la materia prima y su posterior activación química con H_3PO_4 a diferentes concentraciones 20% y 40%. La carbonización se realizó a 500°C de tal manera que se favorezca la correcta formación de poros. Se realizó un balance de masa con lo cual se evidenció los diferentes productos en que se pierde material. Además, se realizó su respectiva caracterización según las normas de calidad del INEN como rendimiento, granulometría, contenido de humedad, densidad aparente, cenizas totales, pH, número de yodo e índice azul de metileno, obteniendo un carbón activado dentro de los rangos y además por su poder de adsorción según las pruebas de Yodo y del Azul de metileno altamente competitivo respecto a 2 carbones comerciales que también fueron caracterizados.

1.1 Descripción del problema

El residuo de palma africana es un desecho que se produce en grandes cantidades en las zonas rurales de las provincias de Guayas, Los Ríos y Esmeraldas. La palma se siembra en vastas extensiones de terreno debido a su interés comercial, pues el aceite de cocina en gran parte proviene de este cultivo (Potter, 2011).

Luego de que la palma es cosechada a los 4 años, sus frutos se trituran y se muelen extrayendo su aceite y dejando desechos como el cuesco, racimos vacíos, ramas entre otros restos de palma. Estos desechos son causantes de contaminación debido a que los sólidos y los lixiviados pueden filtrarse y llegar a fuentes de agua. Estos restos quedan luego de la cosecha en el suelo provocando la proliferación de insectos y plagas.

Además, la actividad en sí del cultivo de palma degrada el suelo. Un árbol de palma de aceite tiene una vida productiva de 25 a 30 años, y sus frutos empiezan a producir al tercer año de sembrado (Gro Intelligence, 2016). Además, a medida que se degrada la plantación, a los

21 años de vida, la calidad del suelo disminuye. Una medida que se implementa es frenar la producción y luego extraer las plantaciones para proceder con la recuperación del suelo. Esta operación es costosa, por lo que se prefiere preparar un nuevo suelo de cultivo lo que ocasiona deforestación (UAB, 2017).

Desde la perspectiva medioambiental, la palma africana es una especie introducida que se adapta a climas tropicales cuyo monocultivo contribuye en la pérdida de biodiversidad al reemplazar a las especies nativas. Sin embargo, durante su vida útil, la plantación propicia el crecimiento de otras vegetaciones en las zonas bajas, llevando equilibrio al ambiente (Choy Er et al., 2015).

Al final de la cadena productiva del cultivo de palma, el desecho que queda en el suelo por lo general es reutilizado de forma empírica por la comunidad como parte de la dieta de los animales de granja o incluso como compostaje. Aun así, mucho de este residuo queda en el suelo y no se aprovecha, generando un residuo que contamina el ambiente (Salman, 2014). Además del aspecto ambiental, otro problema es que el carbón activado que se usa en el Ecuador es importado, por lo tanto, sería una buena alternativa evaluar la viabilidad del residuo de palma como sustituto para la elaboración de carbón activado a nivel nacional (Hidalgo & Rivera, 2017).

1.2 Justificación del problema

La elaboración de carbón activado desde fuentes no convencionales daría un valor agregado a los productos que el país cosecha, al usar los residuos para elaboración de insumos usados en laboratorios para la purificación y extracción de componentes orgánicos. El carbón activado, usado como relleno en filtros de agua potable, es la nueva tendencia en purificación de agua. Obtener un carbón activado de producción nacional representaría un impacto positivo a la economía, pues el capitalizar este insumo reduciría la dependencia en la importación de carbón activado comercial y mejoraría la calidad del agua en las localidades rurales del país.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la calidad del carbón activado como residuo de la palma africana, comparándolos con carbones activados comerciales, para la revalorización de este desecho.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Obtener carbón activado mediante carbonización y activación química del cuesco de palma africana.
2. Evaluar los parámetros de calidad del producto obtenido según la normativa para la identificación de sus posibles aplicaciones.
3. Realizar un análisis económico del carbón activado del cuesco de palma para la determinación de su viabilidad comercial.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Palma Africana en Ecuador

La palma africana es una especie vegetal monocotiledónea proveniente de países africanos cuya naturaleza de cultivo oleaginosa con mayor cantidad de aceite por superficie hacen de esta planta atractiva para la exportación y producción local de aceite (Mingorance et al., 2004) .



Figura 1.1 Plantación de palma (Mingorance et al., 2004)

Ecuador es el segundo país de Latinoamérica en producción de palma, debajo de Colombia y las regiones donde se introdujo desde 1954 corresponden a Santo Domingo, La Concordia, Quinindé y Quevedo (figura 1.2), sin embargo, esta actividad agrícola ha desencadenado la proliferación de mosquitos, contaminación de ríos y el deterioro de los suelos ocupados, provocando la búsqueda de nuevas tierras de cultivo estando estas en bosques tropicales (Potter, 2011).

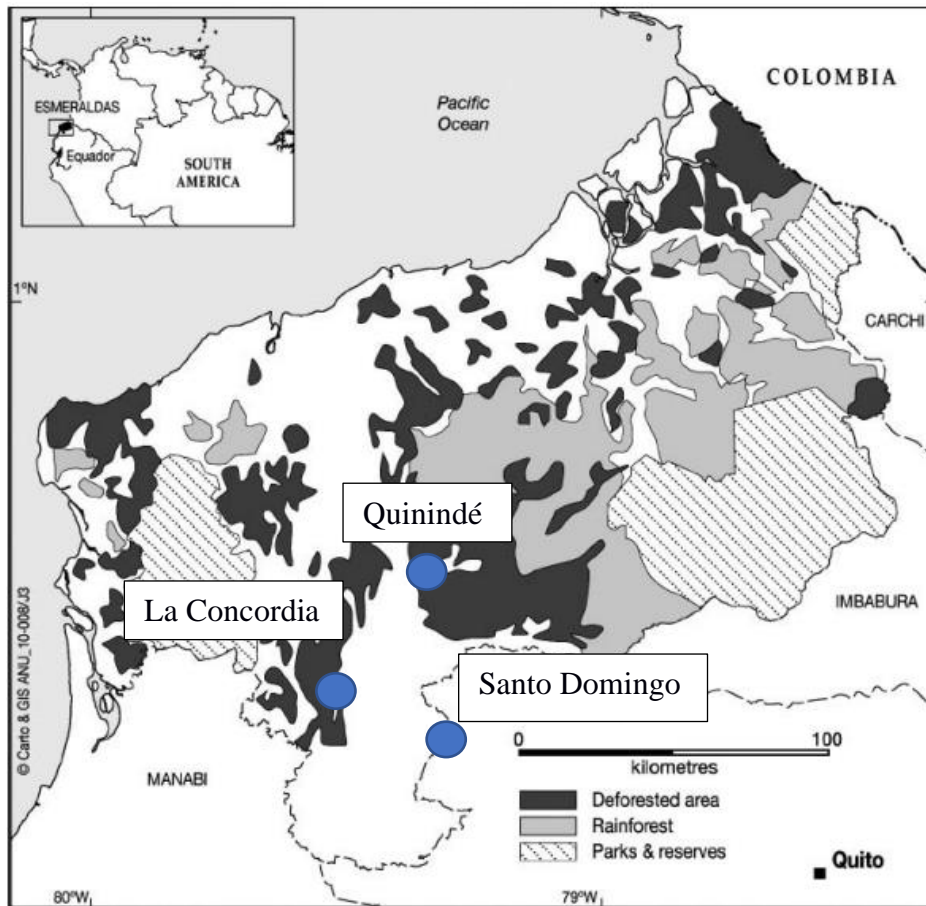


Figura 1.2 Ubicación y organización de la industria aceitera. (Potter, 2011)

- Caracterización del cuesco de palma

El cuesco de la palma africana corresponde a la cascara que recubre la almendra y las semillas luego del prensado de la fruta. Su análisis experimental ha determinado un poder calorífico inferior y superior de 21.1 y 22.2 MJ/kg y representa el 10% del peso del racimo, lo que la ha hecho útil como material combustible sin embargo la cantidad de cuesco sobrante aun es significativa (Pérez Valencia, 2020).

Un análisis efectuado por el Instituto Nacional de Energías Renovables y Eficiencia Energética concluyó que el cuesco de la palma africana como biomasa está caracterizada como: 1.8% (p/p) cenizas, 51.60% (p/p) carbono, 7.21% (p/p) hidrógenos expresados en base seca.

Su composición biológica corresponde a un 42.97wt% lignina, 35.64wt% celulosa y 21.36% hemicelulosa (García et al., 2018).

1.4.2 Carbón activado

El carbón activado es un miembro de la familia del carbono desde el carbón negro, fibras de carbono hasta grafitos. Todos estos carbonos provienen de fuentes orgánicas, pero con diferentes procesos de carbonización y manufactura. Se lo emplea para múltiples aplicaciones como la purificación de gases, la separación de mezclas gaseosas, el tratamiento de gases, almacenamiento de energía entre otros. Los diferentes tipos de carbón activado se identifican por las isothermas que miden distancia en tamaños de poro y contenido en el poro (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).

- **Clasificación de carbón activado**

Existen varias presentaciones de carbón activado dependiendo del tipo de aplicación que se le quiera dar, puede ser granulado o en polvo. El carbón activado granulado se caracteriza por formas irregulares y comúnmente se usan en columnas de filtración para gases o líquidos. Según (Rashidi & Yusup, 2017), el tamaño de partícula para este tipo de presentación debe ser entre 0.2 – 5mm. Estos se usan para tratamiento de aguas, desodorización y separación de componentes, además que se pueden regenerar luego de su uso. Según (Kwiatkowski, 2012), la asociación norteamericana de obras hidráulicas utiliza el tamiz número 50 (0.297mm) como el tamaño mínimo para carbón activado granulado.

El carbón activado en polvo debe tener un tamaño de partícula menor a 0.18mm con un diámetro promedio entre 0.15-0.25mm. Esto se realiza mediante el uso de tamices (Rashidi &

Yusup, 2017). Para que se considere polvo el 95% del material debe pasar el tamiz. Normalmente el carbón en polvo se mezcla con el líquido a tratarse y luego se desecha. A continuación, se muestran las formas del carbón activado: a) pulverizado, b) pellets, c) extruido, d) y e) granulado.



Figura 1.3 Formas de carbón activado (Kwiatkowski, 2012)

1.4.3 Métodos de preparación de carbón activado

- Pretratamiento de la materia prima

La preparación de carbón activado consiste en el tratamiento de la materia prima y el tipo de activación. La materia prima ideal es aquella con alto contenido de carbono, es decir, los desechos orgánicos de la agroindustria son atractivos para su elaboración. El pretratamiento de la materia prima es importante ya que preparar carbón activado implica favorecer la formación de poros en la superficie de ésta. Para esto se requiere minimizar los compuestos volátiles, suciedad e impurezas de la superficie lo cual se realiza mediante múltiples lavados y secados.

- Activación química

La activación puede ser física, química o fisicoquímica. La activación química consiste en el uso de ácidos que impregnen la superficie para deshidratar la materia y descomponer los compuestos lignocelulósicos de tal forma que se minimice la resistencia mecánica y se favorezca la formación de poros (Zaid et al., 2013). Los ácidos más utilizados son KOH, K_2CO_3 , H_3PO_4 , H_2SO_4 , $ZnCl_2$, entre otros. Dependiendo del tipo de activador, la reacción con el precursor será diferente, lo que influirá en el comportamiento de la adsorción.

- Activación física

La activación física implica la carbonización del material y su activación con un agente activador, que son gases oxidantes como CO_2 , aire o vapor a altas temperaturas alrededor de $900^\circ C$ o más. La carbonización se realiza en una atmosfera inerte para romper las largas cadenas de carbono y poder tener estructuras simples que permitan formar poros. Ocurre una reacción de gasificación entre el agente gaseoso y la superficie carbonosa de tal forma que se van formando los poros. Esta reacción es endotérmica (Kwiatkowski, 2012).

- Activación fisicoquímica

La práctica común que se ha aplicado en la producción de carbones activados mediante activación fisicoquímica es a través de un tratamiento químico posterior a la carbonización, en el que las carbonizaciones se impregnan con un agente químico antes de la activación con vapor o CO_2 . Es significativo la ruta por la que se da el tratamiento físico químico, antes o después de la carbonización, ya que las muestras tratadas químicamente previas a la carbonización dan como resultado una mayor área superficial.

La activación fisicoquímica produce carbón activado con diferentes propiedades de textura en comparación con los carbones activados que se activan únicamente bajo un solo enfoque químico o físico (Kwiatkowski, 2012).

1.4.4 Variables de proceso

La elaboración de carbón activado tiene variables de proceso que deben tenerse en cuenta durante su proceso de elaboración. El flujo volumétrico del gas oxidante es relevante ya que este debe envolver todo el material carbonoso al momento de la activación lo cual puede afectar la formación de poros. La temperatura de carbonización también debe considerarse ya que valores muy elevados pueden favorecer la formación de otros productos que disminuyan el rendimiento del sólido carbonoso e incluso agrandar los poros formados. Los tiempos de activación e impregnación también son de importancia ya que esto permite un mayor tiempo de contacto entre la superficie carbonosa y el agente activante lo que influye en la formación de poros (Kwiatkowski, 2012).

1.4.5 Aplicaciones

Desde el punto de vista sanitario, el carbón activado se emplea en sistemas de tratamiento de agua, específicamente en filtros que eliminan la turbidez de cuerpos acuáticos, originada por sedimentos, aceites, grasas, jabón, agua gris, aguas negras, desechos agrícolas como fertilizantes, pesticidas y composta que causan mal olor (Hidalgo & Rivera, 2017).

En el tratamiento de aguas (figura 1.4), también se encarga de la eliminación y catálisis de agentes oxidantes como cloro libre y ozono, así como de agentes cancerígenos y trihalometanos, producto de dicho tratamiento. En la industria alimentaria sirve para decolorar vinos, zumos y vinagres. Respecto a los aceites vegetales, elimina los hidrocarburos

policíclicos aromáticos que además de dañar la calidad del aceite, pueden provocar cáncer (Sevilla, 2009).



Figura 1.4 Filtro para tratamiento de agua. (Sevilla, 2009)

En el sector industrial, el carbón activado se emplea como filtro de limpieza de gases, se adhieren en los ductos de ventilación y eliminan los contaminantes reduciendo las emisiones atmosféricas. La ventaja del sistema de filtros es que con retro lavado de agua y sal se pueden retirar los contaminantes y volver a usar los filtros.

En medicina, este insumo se emplea como antídoto en casos de intoxicación con algún veneno, desde 1830 se emplea en el tratamiento de envenenamiento dado su habilidad de adsorber drogas. Se ha demostrado la efectividad de eliminar toxinas renales del cuerpo como urea y ácido úrico en terapias de diálisis a pacientes con insuficiencia renal crónica.

En estudios medioambientales, se emplea en la remoción de metales pesados en el agua como níquel, cadmio y zinc, siendo una medida económica y eficiente frente a tratamientos

como la precipitación, filtración de membrana e intercambio iónico (Alkhatib & al Zailaey, 2015).

1.4.6 Propiedades y caracterizaciones del carbón activado.

Las caracterizaciones que se realizan en carbón activado son de cenizas totales, contenido de humedad, densidad aparente, dureza, ignición, pH, azul de metileno, número de yodo, rendimiento, granulometría, entre otras. (Zaid et al., 2013). La caracterización del carbón permitirá evaluar su potencial aplicación y usos.

1.4.6.1 Contenido de Cenizas

Esta caracterización busca identificar el porcentaje de cenizas de una muestra de carbón activado seco, sometiendo la muestra a oxidación en una mufla a 650°. La diferencia entre masas iniciales y finales de los crisoles con muestra da como resultado el contenido de cenizas. (INEN, 2013a).

1.4.6.2 Contenido de humedad

Es el porcentaje de agua contenida en la superficie del carbón activado, este ensayo consiste en el secado con estufa a 130°C de una muestra de carbón activado. Mediante la diferencia entre masas de ensayo inicial y final, se conoce el agua perdida por calentamiento. (INEN, 1995).

1.4.6.3 Densidad Aparente

Es el peso en gramos de un volumen determinado en cm³ de carbón en aire. Este valor asociado a la humedad, cuya relación inversa con la porosidad, es empleado para determinar la calidad del carbón activado, a mayor porosidad, mayor capacidad de adsorción. (INEN, 2013b).

1.4.6.4 Dureza o Resistencia Mecánica

La dureza o resistencia mecánica es la capacidad que tiene el carbón activado para resistir el desgaste o abrasión según los diferentes ambientes a los que se ve expuesto como aire, agua o en contacto con diferentes sustancias. (INEN, 2013)

1.4.6.5 Prueba de ignición

La ignición sirve para determinar la inflamabilidad de una especie desconocida, mediante la incineración. Este ensayo cualitativo permite analizar la naturaleza de la llama y como el combustible se inflama, observando la fusión del sólido, los gases-vapores desprendidos y los residuos que se puedan generar. (Castillo & Illescas, 2015).

1.4.6.6 pH

Muestra el grado de acidez o alcalinidad de una solución, en el caso del carbón activado, se emplea para determinar si el producto contiene trazas del agente activante. Para activación química en medio ácido, se verifica que el pH se encuentre neutro. En caso de que sea ácido, la capacidad de adsorción se ve afectada.

1.4.6.7 Adsorción de Azul de Metileno

El azul de metileno es un compuesto colorante que se emplea como indicador en análisis de remoción de contaminantes a través de un espectroscopio (UV). Este parámetro que depende del tamaño de molécula (>1.5 nm) muestra la capacidad de remoción de carbón en distintas soluciones preparadas a partir de una solución base de azul de metileno (figura 1.5). (Castellar et al., 2013).



Figura 1.5 Diluciones azul de metileno (Castellar et al., 2013)

1.4.6.8 Isoterma de Langmuir

Es una prueba que mide la capacidad de adsorción del carbón activado, a partir del análisis volumétrico de una muestra de ácido actico como contaminante y de alguna base como hidróxido de sodio como titulante (Morad et al., 2014). Similar a la prueba de azul de metileno, desde una solución inicial conocida de ácido, se preparan diluciones, donde estas son los puntos iniciales de la gráfica. La diferencia entre concentraciones iniciales y finales de ácido acético, son puntos para la construcción de la curva de la isoterma. (Adewumi, 2009).

1.4.6.9 Superficie BET

La superficie específica Brunauer, Emmett y Teller conocida como BET, es el área superficial total y externa que evalúa la cantidad de nitrógeno adsorbido a la misma temperatura que el nitrógeno líquido a diferentes presiones parciales del gas. Para ello se construye un sistema presurizado que permita modificar el caudal de gas con un manómetro (INEN, 2013e).

El análisis del área BET emplea nitrógeno debido a su alta pureza y fuerte interacción entre gas y sólidos, haciendo que el gas se enfríe con nitrógeno líquido obteniendo cantidades disponibles de adsorción procurando que el gas no se condense, y graficando las isothermas se obtiene información para hallar el área (Raja & Barron, 2022).

El área superficial también se la puede obtener mediante la capacidad de adsorción de un soluto, en este caso ácido acético, asociando al número de Avogadro con el área en angstroms de una molécula de ácido acético y la concentración de adsorbato obtenida por la isoterma de Langmuir (Morad et al., 2014).

1.4.6.10 Número de Yodo

Se define como la masa en miligramos de yodo adsorbido por 1 g de carbón activo, cuando la concentración de yodo filtrado restante es 0.02 N. Este análisis sirve para cuantificar la porosidad por la adsorción de yodo, siendo dicha porosidad indicador del grado de activación de carbón. (INEN, 2013d).

1.4.7 Economía circular

La economía circular es uno de los temas más discutidos en la actualidad por la academia. Hace referencia a la utilización eficiente de los recursos; que las materias primas no pasen a ser residuos desechados y que la economía se transforme desde un modelo de tomar-

hacer-desechar a un modelo de mejor eficiencia, en la que se dé un ciclo cerrado en la cadena de producción, de tal manera que todos los recursos se aprovechen (Geisendorf & Pietrulla, 2018). La ventaja de la economía circular es que permite la creación de modelos de negocios disruptivos, se crea empleo y al mismo tiempo se protege al medio ambiente (Geisendorf & Pietrulla, 2018).

El carbón activado es un producto de valor agregado que se fabrica a partir de biomasa. La biomasa generada por los sectores agrícolas, agropecuarios o agroindustriales representa una potencial fuente de materia prima para desarrollar nuevos productos que contribuyan a la economía verde. La biomasa puede utilizarse para generar distintas fuentes de energía limpia, extraer compuestos químicos de valor agregado, polímeros o también productos para el tratamiento de aguas (Lai & Ngu, 2022).

El cuesco de la palma africana es un tipo de biomasa prometedora para la elaboración de productos de alto valor agregado. El cuesco son las partículas lignocelulósicas con aspecto de madera, duras y compactas, que rodean las almendras de los frutos de la palma africana. Es un residuo de la industria aceitera que genera impacto ambiental. Su disposición es complicada ya que se genera en grandes cantidades, se degradan lentamente y generan focos de insectos. A pesar de esto, es un desecho que tiene el potencial para ser transformado en diferentes productos como aditivo liviano para cemento, como material combustible, bio-crudos, carbón activado y a la vez. El carbón activado tiene un sinnúmero de aplicaciones encontrándose entre las nuevas tendencias suplemento alimenticio en bovinos para la producción de carne y leche (Van-Dam J, 2016).

Según (Ojeda, 2009) se logran fabricar adoquines con aditivo de cuesco de palma que cumplen con la norma correspondiente, en este caso NTC ICONTEC. Según (Nizamuddin et al., 2016) y (Torres Pérez & Quintero Lopez, 2019), por las características termoquímicas del

cuesco y alto poder calorífico, se utiliza como material combustible en calderas permitiendo obtener una eficiencia superior al 86%. Con respecto al carbón activado se ha encontrado que éste aplicado como suplemento bovino podría representar un método prometedor para reducir gases de efecto invernadero y emisiones de CH_4 (Al-Azzawi et al., 2021). Además, permite mejorar parámetros como ganancia de peso, tasa de conversión de alimento e ingesta de nutrientes.

El mercado internacional de la palma lo domina Asia, pues Indonesia y Malasia se encuentran entre los primeros productores mundiales de aceite de palma africana y China e India entre los mayores consumidores de carbón activado. El mercado del carbón activado en 2012 fue una demanda aproximadamente de \$2 billones USD y se incrementó en 2022 a \$4.98 billones USD (Lai & Ngu, 2022). Según (Rashidi & Yusup, 2017) hasta el 2012 el cultivo de coco (materia prima más utilizada) presentó una tendencia decreciente del 5% al 1.4%. Por el contrario, la palma ha presentado una tendencia creciente del 25.7% al 64.5%.

En Ecuador se importó \$7.13 millones USD de carbón activado en el año 2020. Tomando como referencia la corteza de coco, esto es equivalente a aproximadamente 2,263,492 kg de carbón activado. Según (Sol, 2021), el país exportó en 2019 187,494 TM de aceite de palma. Por cada kg de aceite se generan 4kg de residuos o biomasa y solo se transforman en productos de valor el 10% de los desechos (Rashidi & Yusup, 2017).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para realizar la metodología de este proyecto, se siguió el diagrama de flujo de la figura (2.1), adaptado de la literatura de (Hidalgo & Rivera, 2017) y (Rashidi & Yusup, 2017).

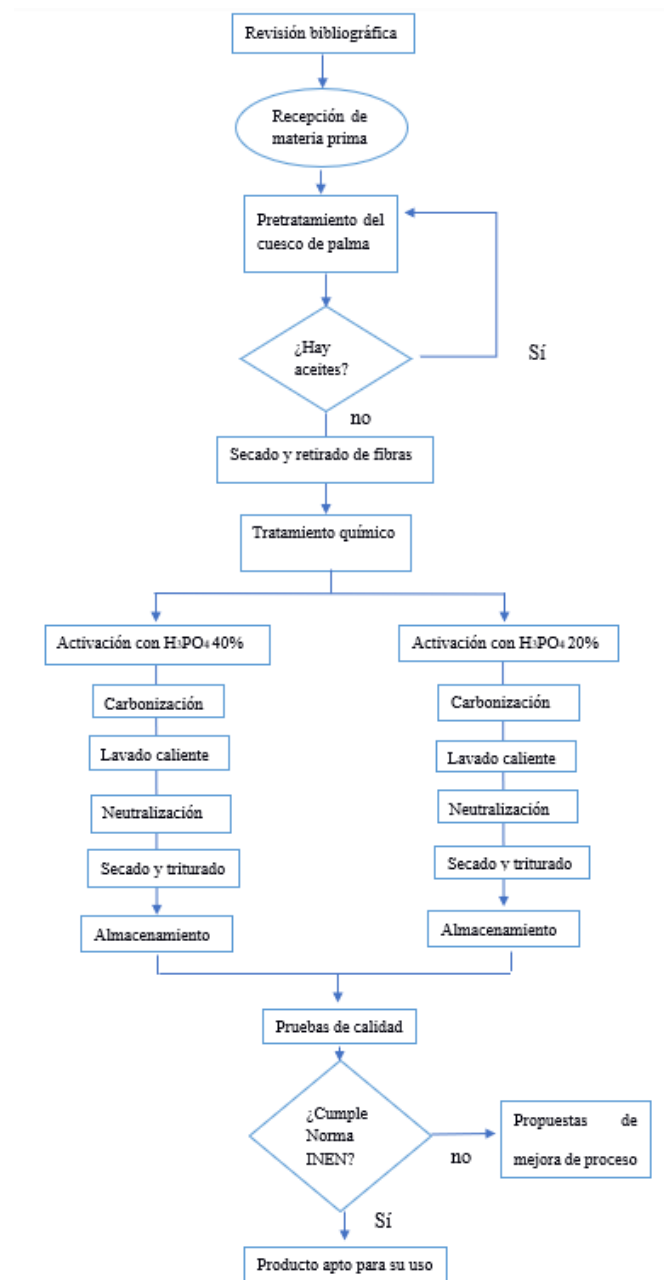


Figura 2.1 Diagrama de proceso de activación química

2.1 Revisión y análisis bibliográfico

La metodología que se siguió en este proyecto integrador se basó en una búsqueda y recopilación de varias fuentes bibliográficas que se adaptaron a nuestras necesidades y recursos. Se revisaron artículos científicos, libros de investigación e ingeniería, libros de economía aplicada a las plantas industriales. Se realizaron pruebas de laboratorio para caracterizar el carbón activado de cuesco de palma africana y determinar si es apto para su uso. Se buscó estadística sobre el carbón activado a nivel mundial y en el contexto ecuatoriano. Así se pudo plantear la idea del uso del cuesco de palma dentro de una economía circular para disminuir los impactos ambientales causados por la industria aceitera.

2.2 Recepción de materia prima

Para la obtención del carbón activado se utilizaron 500gr de cuesco de palma obtenidos en la planta extractora “SIEXPAL” ubicada en la vía a la concordia, en Santo Domingo de los Colorados.

2.3 Pretratamiento del cuesco

El pretratamiento del cuesco empieza con múltiples lavados con la finalidad de eliminar impurezas de la superficie como suciedad, tierra, impurezas, aceite residual etc. También se separó mediante un colador la fibra que viene con el cuesco. El lavado se realizó con agua de grifo a temperatura ambiente. Esto con la finalidad de minimizar la cantidad de cenizas que podrían generarse. Se procede con el secado de materia prima, esta se realizó en 2 etapas, al sol por 72h y posteriormente en la estufa del laboratorio de Hidrocarburos de la FCNM. La literatura sugiere un rango de 105- 110 °C. Para la tesis se utilizó una temperatura de 110°C.

2.4 Tratamiento Químico

Se procedió con el tratamiento y activación química de la materia prima la cual consiste en la impregnación de ácido. Se utilizó H_3PO_4 a diferentes concentraciones, 40% y 20%. La tasa de impregnación para el carbón al 40% fue de 2.54 y de 2.22 para el carbón al 20%. El tiempo de impregnación fue de 24h y 48h. Posteriormente se procedió con carbonización. La literatura sugiere un rango de 400-500°C. Se utilizó una temperatura de 500°C. Luego se procedió con varios lavados para eliminar el ácido residual, se secó el material humedecido y finalmente se trituró para llevarlo a un rango de tamaño correspondiente a carbón granulado.

2.5 Rendimiento

Es la relación porcentual entre la masa de materia prima que entró por proceso y la masa de producto terminado previo a los análisis de calidad, mediante la ecuación:

$$\%R = \frac{\text{masa carbon activado}}{\text{masa cuesco de Palma}} \times 100 \quad (2.1)$$

2.6 Pruebas de calidad

Las pruebas de calidad se efectuaron con equipos presentes en el Laboratorio de Hidrocarburos, las soluciones requeridas en los análisis se solicitaron en laboratorio de servicios generales y los cálculos se basaron en la literatura.

2.6.1.1 Contenido de cenizas.

Basado en la normativa INEN 1983:2013. Inicialmente se calcina un crisol en una mufla a 650°C por 1 hora, se enfría en el desecador y se procede a pesar. En una cápsula, se pesó 10 g de muestra carbón, se secó en estufa a 150°C y enfrió en el desecador. A partir de la

muestra, con una balanza analítica se pesó 1 g de carbón seco. Finalmente se llevó el crisol a una mufla a 650°C por 4 horas con el fin de incinerar el carbón, se colocó en el desecador hasta que alcance temperatura ambiente y pesó. Se repitió este proceso hasta que la masa del crisol se mantenga constante. El contenido de cenizas se calculó aplicando la formula:

$$\%C = \frac{m_1 - m_c}{m} \times 100 \quad (2.2)$$

Donde:

$\%C$ = contenido de cenizas totales

m = masa de muestra (g)

m_1 = masa de crisol con cenizas (g)

m_c = masa de crisol vacío. (g)

2.6.1.2 Contenido de humedad

Basado en la Norma INEN 1986:2013, se utilizaron 3 crisoles rotulados, estos se secaron en una estufa a 110°C por 2 horas, se los dejó en el desecador por 1 h y pesó para conocer la masa de los crisoles secos. Se agregó 2 g de carbón activado, secó en estufa a 130°C por 1 hora y se llevó al desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente. El contenido de humedad se determinó usando la ecuación:

$$\%H = \frac{P_i - (P_f - P_c)}{P_i} \times 100 \quad (2.3)$$

Donde:

P_i = peso inicial de carbón activo

P_f = peso de crisol con carbón final

P_c = peso de crisol seco.

2.6.1.3 Densidad Aparente

Basado en la Norma INEN 1986:2013. Esta prueba parte del contenido de humedad. Con este valor obtenido, se procedió a pesar una probeta aforada de 10 ml, encerró la balanza y se pesa una muestra de carbón activo hasta que la muestra ocupe el volumen rotulado de la probeta. La densidad se la calculo empleando la ecuación:

$$\rho_{aparente} = \frac{m*(100-\%H)}{V*100} \quad (2.4)$$

Donde:

m = masa de muestra en gramos

$\%H$ = contenido de humedad

V = volumen de la probeta en cm^3

2.6.1.4 pH

Según (Hidalgo & Rivera, 2017), se pesó 4 g de carbón activo en un vaso de precipitación con 100 ml de agua destilada y se llevó a ebullición por 10 minutos en una plancha calentadora. Pasado la ebullición se filtró el agua y dejó reposar hasta que la temperatura disminuya al ambiente. Finalmente, se midió el pH con un pH -metro digital de sonda.

2.6.1.5 Absorción de Azul de Metileno

Se preparo la solución de azul de metileno 100 ppm, pesando 0.1 g de azul de metileno en agua destilada y aforado a 1 litro. (Castellar et al., 2013) Se diseñó la recta de calibración que relaciona la concentración y la absorbancia, para ello con 6 tubos de ensayo se preparó distintas soluciones de azul de metilo a partir de la tabla 2.1:

Tabla 2.1 Soluciones preparadas de azul de metilo

Tubo de ensayo	1	2	3	4	5	6	B
Volumen agua destilada (ml)	0	2.5	3	3.5	4	4.5	5
Volumen azul de metileno (ml)	5	2.5	2	1.5	1	0.5	0
Concentración (ppm)	100	50	40	30	20	10	0

Con las soluciones preparadas se realizó la medición de la adsorbancia, al insertar en las celdas del espectrofotómetro UV del Laboratorio de Química Analítica, estas celdas se deben de ubicar de menor a mayor concentración y entre cada medida, se insertó el blanco para no descalibrar el equipo.

En la ejecución de la prueba de absorción, se construyó una columna con una bureta de 250 ml, un empaque que contendrá el absorbente, sea esta lana de vidrio o un sobre de té descontaminado que contenga el carbón y permita que se lo pueda retirar sin que caiga por la llave de la bureta.

Se pesó 3 g de carbón activo y se lo depositó en un sobre de té rotulado y se lo añadió a la bureta. Al agregar 50 ml de azul de metileno 100 ppm y dejar reposar por 16 horas, se tomó muestras cada 4 ml para medir la adsorbancia y calculó concentraciones con la recta de calibración.

2.6.1.6 Adsorción de ácido acético

De acuerdo con (Hidalgo & Rivera, 2017), se tomaron 6 matraces Erlenmeyer con tapa, se preparó diferentes soluciones a partir de ácido acético 0.5 M, tal como indica la tabla 2.2.

Posterior se agrega 2 g de carbón activado y se tapó los matraces para llevar a un sistema de agitación mecánica múltiple.

Tabla. 2.2 Soluciones preparadas ácido acético

Matraz	1	2	3	4	5	6
Volumen agua destilada (ml)	0	2.5	3	3.5	4	4.5
Volumen ácido acético 0.5 M (ml)	5	2.5	2	1.5	1	0.5

Luego de 15 minutos de agitación y reposo, se alcanzó el equilibrio de adsorción, tomando alícuotas de 10 ml y añadiendo 3 gotas de indicador fenolftaleína, se titularon las soluciones con NaOH 0.1 N hasta que el color de la muestra cambie a rosa claro, llegando a equilibrio volumétrico. Se registró el volumen de titulante consumido y calculó la molaridad de ácido acético por matraz. Este paso se repitió por cada muestra de carbón activado.

Con las concentraciones de ácido acético y de carbón activado en equilibrio se construyó en Excel la respectiva gráfica de la isoterma de adsorción.

La forma lineal de la isoterma de Langmuir proviene del despeje de la ecuación:

$$q = \frac{q_0 c}{K+c} \rightarrow \frac{1}{q} = \frac{K}{q_0} \frac{1}{c} + \frac{1}{q_0} \quad (2.5)$$

Donde se aplicó Excel a la gráfica 1/q y 1/c obteniendo los valores de los coeficientes de Langmuir.

2.6.1.7 Superficie BET

El área superficial del carbón activado se la determina a partir del valor máximo determinado por la constante de la recta linealizada de Langmuir. (Hidalgo & Rivera, 2017)

Este valor revela la relación máxima entre los moles de ácido adsorbido y de gramos de carbón activado, se calculó empleando el área molecular del ácido acético $\sigma = 2.1 \times 10^{-19} m^2$ por molécula adsorbida.

El área superficial se calculó en base a la fórmula:

$$A = \sigma * N_A * \left(\frac{x}{m}\right)_{Max} \quad (2.6)$$

Donde:

A = Área superficial en m^2/g

N_A = Número de Avogadro $\left(\frac{6.022 \times 10^{23} \text{molécula}}{\text{mol}}\right)$

$\left(\frac{x}{m}\right)_{Max}$ = constante máxima

2.6.1.8 Número de Yodo

Basado en la norma INEN 1988:2013, este método se fundamenta en la adsorción de yodo. Para esto se requiere prepararon previamente 4 soluciones, de ácido clorhídrico al 5%, solución estandarizada 0.1N de tiosulfato de sodio ($Na_2S_2O_3 * 5H_2O$), una solución estandarizada 0.1N de yodo y una solución de almidón. Una vez preparadas las soluciones el primer paso consistió en moler una muestra significativa de carbón activado que pasó por un tamiz de 45 μ m, luego que se disminuyó el tamaño de partícula de la muestra, se secó en una estufa por 2h a 140°C. Una vez secada la muestra se tomó una submuestra; el procedimiento sugiere que esté en el rango de [1-1.6g]. Esta masa se agregó a un matraz Erlenmeyer, se agregó 10ml de ácido clorhídrico 5% y se agitó hasta humedecer toda la masa. Posteriormente se llevó la mezcla a ebullición y se dejó así por 30s, luego se dejó enfriar hasta temperatura ambiente. Se utilizó baño maría para que el enfriamiento ocurra en menos tiempo. Se agregaron 100ml de solución

de yodo a la mezcla y se agitó por 30s. Se armó un sistema para titular y filtrar. Se filtraron los primeros 25ml de la mezcla y se descartaron. El filtrado residual se recogió en un matraz y se tomó una alícuota de 50ml los cuales se titularon con el tiosulfato. Cuando la mezcla esclareció se agregó aproximadamente 1ml de solución de almidón y se continuó titulando hasta que la mezcla se volvió incolora por completo. Se registró el volumen consumido de tiosulfato y se calculó el número de yodo.

$$\text{número de yodo} = \frac{V}{m} \cdot f \quad (2.7)$$

$$\frac{V}{m} = \frac{A - (2.2 * B * V_t)}{m} \quad (2.8)$$

$$C = \frac{N_2 * V_t}{50} \quad (2.9)$$

$$A = N_1 * 12693 \quad (2.10)$$

$$B = N_2 * 126.93 \quad (2.11)$$

Donde:

v/m = mg de yodo adsorbidos por gr de carbón activado

C = normalidad del filtrado residual

f = factor de corrección

V_t = volumen consumido de tiosulfato 0.1N

N_2 = normalidad de la solución estándar de tiosulfato de sodio 0.1N

N_1 = normalidad de la solución estándar de yodo 0.1N

Es importante mencionar que C debe estar en el rango $0.0080N \leq C \leq 0.0334N$. Si esto no se cumple se sugiere repetir el procedimiento con una cantidad de muestra diferente.

Con el número de Yodo, también se puede hallar el área superficial del carbón activado, sea la superficie BET y la superficie de adsorción de yodo S_I , determinadas ambas por las ecuaciones: (Mianowski, Owczarek, & Marecka, 2007)

$$S_I = \frac{IN \cdot 10^{-3}}{M_I} * N_A * w_I \quad (2.12)$$

$$S_{BET} = 0.9946 * IN - 4.91 \quad (2.13)$$

Donde:

IN = Número de yodo en mg/g

$w_I = 0.2096 * 10^{-18} m^2$ = iodine Surface area

$M_I = 126.92 \frac{g}{mol}$ = masa molar del Yodo

2.6.1.9 Poder decolorante

Según (Kwiatkowski, 2012), se disolvió 0.15 g de azul de metileno en 1000 ml de agua. Se pesó 0.1 g de carbón activado pulverizado y se añadió a un matraz de 50 ml con tapa. Se agregó 10 ml de solución y se agitó por 5 minutos. Apenas se decolore los 10 ml iniciales, se tituló azul de metileno a razón de 1 ml/tiempo y se agitó la solución hasta que el color no desaparezca por 5 minutos. El poder decolorante se expresa como mg de azul de metilo adsorbido por 1 g de carbón activo y su fórmula es:

$$Decolorizing\ Power = \frac{15}{10} * \frac{V_2}{M} \quad (2.14)$$

Donde:

V_2 = volumen de azul de metileno consumido

M = masa de carbón activado pulverizado

La capacidad de adsorción para el azul de metileno depende del origen del carbón activado y del adsorbente empleado, tal como lo muestra la tabla 2.3 (Vargas et al., 2011).

Tabla 2.3 Comparación de la máxima capacidad de adsorción para el MB

Comparison of maximum adsorption capacity (Q_m) for MB with others adsorbents.

Adsorbent	Q_m (mg g ⁻¹)	Reference
Activated carbon from bituminous coal	580 ^a	[3]
Clay	58.20 ^a	[4]
Neem (<i>Azadirachta indica</i>) leaf powder	30.66 ^a	[2]
Jute fiber carbon	225.64 ^b	[7]
Abu-Tartour phosphate rock	101.13 ^b	[8]
Black stones cherries	321.75 ^b	[9]
Jordanian diatomite	143.3 ^a	[6]
Bamboo-based activated carbon	454.20 ^b	[11]
Coir pith carbon	5.87 ^b	[12]
Activated carbon from Egyptian rice hull	60.10 ^a	[13]
Vetiver roots activated carbon	423 ^b	[14]
Garlic peel	142.86 ^b	[17]
Rattan sawdust	294.12 ^b	[15]
Activated carbon from oil palm wood	90.9 ^b	[16]
Montmorillonite clay	300.3 ^b	[18]
AC _{op} from flamboyant pods	874.68 ^a -890 ^b	This work

2.6.1.10 Materiales y Equipos

Para la realización de este proyecto, se emplearon los siguientes reactivos, materiales y equipos dentro de los Laboratorios de Hidrocarburos, Ambiente y Química Analítica del Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales (DCQA) de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas (FCNM), tal como se muestra en la tabla 2.4.

Tabla. 2.4 Reactivos y equipos utilizados

Equipos	Materiales	Reactivos	Cantidad
Balanza analítica con cuatro decimales de precisión Marca: Sartorius. Estufa eléctrica Marca: Memmert Mufla, Marca: Thermolyne Plancha de Calentamiento con Agitador, Marca: MTOPE Espectrofotómetro UV, Marca: Science	Tubos de ensayo PYREX	H_3PO_4 20% 40%	353ml 84%
	Probeta de 10,100 ± 0.1 ml. Marca: Glassco.	Cuesco de palma	500gr
	Cronómetro Espátula Gradilla	NaOH 0.1N	2000 ml
	Matraz aforado de 500 ± 0.1 ml, Marca LMS	<i>Agua destilada</i>	8 L
	Matraz Volumétrico 250 ± 0.1 ml, Marca Glassco	CH_3COOH 0.5 M	1500 ml
	Matraz de Erlenmeyer 250ml	$NaOH_{(s)}$	43 g
	Bureta de 50 ± 0.1 ml, Marca Pyrex.	<i>Azul de Metileno</i>	0.1 g-1lt
	Tiras de pH, Marca: MN Agitador de vidrio	I_2 (s)	12.gr
		KI	34.1 gr
		HCl (37%)	18ml

Equipos	Materiales	Reactivos	Cantidad
Desecador Mortero Tamiz #325 45um, Marca: Retsch pH-metro marca: OAKTON Crisoles	.	$Na_2S_2O_2 * 5H_2O$	24.82gr
	Papel filtro	$K_2Cr_2O_7$	0.2gr
	Papel absorbente		
	Vaso de precipitación 250ml, 1000ml, Marca: MARIENFELD	almidón	2.5gr
	Piseta	Ac. Salicílico	1.25gr
	Bandeja de aluminio		
Colador	Ácido acético Glacial	43 ml	

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Pretratamiento del cuesco

Para el pretratamiento del cuesco se consideró la masa de cuesco inicial, seco y pretratado con el fin de analizar el contenido de humedad y fibras útiles, como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Resultados del Pretratamiento

Parámetros	Cuesco inicial	Cuesco Seco	Cuesco Pretratado
Peso (g)	5000	3500	3310
Humedad (%)	30	-	-
Fibra útil (%)	-	5.42	-

3.2 Activación química

En la activación química se efectuó la impregnación de ácido fosfórico al 20% y 40% con el fin de determinar el rendimiento del proceso, tasa de impregnación y el volumen de agua de lavado (tabla 3.2).

Tabla 3.2 Resultados de las activaciones químicas

Activación Química	H ₃ PO ₄ al 20%	H ₃ PO ₄ al 40%
Masa inicial del bagazo (g)	250.02	250.13
Volumen del ácido (ml)	500.00	500.00
Masa del ácido (g)	556.00	635.60
Densidad de la solución ácida (g/ml)	1.11	1.27
Volumen de agua destilada para lavado (ml)	3000	5000
Volumen de NaOH 0,1N para lavado (ml)	300	300
pH de agua de lavado	7	7

Masa del carbón activado seco (g)	102.89	78.36
Tasa de impregnación (R)	2.22	2.54
Rendimiento (%)	41.15	31.33

A partir de la bibliografía, se determinó una tasa de impregnación de ácido y materia orgánica de 2:1, estableciendo que para una muestra de 250g se requiere 500 ml de solución ácida. A partir de la dilución de ácido fosfórico y la masa de solución ácida obtenida, se calculó la tasa de impregnación experimental de 2.22 y 2.54 empleando soluciones al 20% y 40% respectivamente. Esta tasa varía en función de la masa de cuesco que se activa y de la masa de ácido utilizada. Para la solución al 40% se usó 24h y la del 20% 48h, esto debido a que la concentración es menor por lo tanto se dejó más tiempo para que el ácido actúe. Se ha observado que, en la impregnación, la solubilidad entre el cuesco incrementó con la concentración de ácido. El vaso que contenía los 250.13 g en ácido al 40% es más soluble facilitando la agitación mecánica y la muestra de 250.02 g en ácido al 20% dificulta la agitación, esto se debe a la descomposición del material lignocelulósico promovido por el ataque del ácido disminuyendo la resistencia mecánica, por eso el material menos concentrado se dificultaba la agitación.

El rendimiento del proceso, denotado por la relación másica de entrada y salida, nos presentó una ruta de pérdida de masa, donde en la activación química al 40% se partió de 250.13 g y se tuvo 78.36 g; mientras que la activación química al 20% desde 250.02 g se tuvo 102.89 g.

Las principales fuentes de pérdida de masa se encuentran en: la calcinación en mufla, donde la evaporación de compuestos orgánicos volátiles a temperaturas inferiores a 500°C junto al flujo de ácido impregnado en la superficie del cuesco, terminó debilitando la superficie y reduciendo considerablemente la masa; la trituración, sea empleando el mortero o con una trituradora de rodillos, la masa se esparce por las paredes o superficie del equipo, fomentando la pulverización y dispersión como material particulado; el lavado, este proceso que se enfocó en la neutralización

del carbón activado, los múltiples enjuagues con agua caliente e hidróxido de sodio y la filtración, retuvieron la masa en el papel filtro y en el pulverizado.

Con esta información, se obtuvo un rendimiento de 31.33% y 41.15% para las activaciones químicas al 40% y 20%. Esto ocurre debido a cambios en la ejecución de la trituración y el lavado, la muestra al 40% se trituró en su totalidad posterior a la calcinación, es decir, previamente al lavado, en cambio la muestra del 20% solo se trituró la masa que se iba a separar para los ensayos de control de calidad, esto se hizo previamente al lavado.

Específicamente la etapa del lavado, posterior a la activación, fue una etapa crucial en la eliminación del ácido de la superficie porosa del carbón, para esta etapa se requirió 8 litros de agua destilada, repartida en intervalos de lavado con agua caliente donde se adicionó hidróxido de sodio para neutralizar la solución; consumiéndose por cada activación 300 ml de solución básica, así como el agua ácida proveniente del filtrado, donde el pH se buscó incrementar desde 3 hasta 6-8. La medición del pH del carbón se midió cuando el agua acida, se depositó al filtro y la mezcla húmeda de carbón precipitada al fondo del vaso de 1 L, ahí al sumergirse la tira de pH se midió el pH, obteniendo un incremento desde 3, 5, 6 y 7. La medición de pH por tiras consiste en una variable cuasi cuantitativa por ello se comprobó el pH usando un pH-metro de sonda del Laboratorio de Físicoquímica, comprobándose que el pH fue de 8.00 y 7.52 para el carbón al 40% y 20%, consiguiendo así la variable cuantitativa deseada por los parámetros del INEN.

Se pudo verificar como finalizado el lavado, cuando toda la masa de carbón activado precipita al fondo, denotando una superficie de agua cristalina y un fondo insoluble color oscuro, esto reveló la hidrofobicidad del carbón activado y la afinidad que tiene hacia materia orgánica que se pueda encontrar en el agua, por ello la turbidez del agua se vio reducida.

El ajuste del pH de agua residual de lavado se realizó con agua e hidróxido de sodio hasta neutralizarla hasta 7, con el fin de que al desechar esa agua contaminada no vaya a afectar el

sistema de desagüe del laboratorio, debido a que los productos y subproductos químicos ácidos no se pueden desechar a menos que se les haga un tratamiento adecuado y como tal es la neutralización.

3.3 Contenido de humedad

Para el contenido de humedad se efectuó un análisis gravimétrico por triplicado en cada uno de los carbones activados con el fin de calcular la masa de muestra seca. (Tabla 3.3 a 3.6)

Tabla 3.3 Resultados Humedad CA comercial 1

Crisol	Peso de crisol (g)	Peso de la muestra (g)	Peso de la muestra seca + crisol (g)	Peso de la muestra a seca (g)	Humedad (%)
1	29.1617	2.0847	30.9730	1.8113	13.11
2	29.1617	2.0847	30.9776	1.8159	12.89
3	28.7575	2.0287	30.5050	1.7475	13.86
				prom	13.28%

Tabla 3.4 Resultados Humedad CA comercial 2

Crisol	Peso de crisol (g)	Peso de la muestra (g)	Peso de la muestra seca + crisol (g)	Peso de la muestra a seca (g)	Humedad (%)
1	29.1624	2.0018	30.9548	1.7924	10.46
2	29.1721	2.0278	30.9604	1.7883	11.81
3	28.7580	2.0333	30.5667	1.8087	11.05
				prom	11.11%

Tabla 3.5 Resultados Humedad CA 20%

Crisol	Peso de crisol (g)	Peso de la muestra (g)	Peso de la muestra seca + crisol (g)	Peso de la muestra a seca (g)	Humedad (%)
1	29.1611	2.0769	31.0189	1.8578	10.55
2	29.1684	2.0039	30.9739	1.8055	9.90
3	28.7550	2.0044	30.5543	1.7993	10.23
				prom	10.23%

Tabla 3.6 Resultados Humedad CA 40%

Crisol	Peso de crisol (g)	Peso de la muestra (g)	Peso de la muestra seca + crisol (g)	Peso de la muestra a seca (g)	Humedad (%)
1	29.1715	2.0120	31.0348	1.8633	7.39
2	29.1715	2.0120	31.0297	1.8582	7.64
3	19.5127	2.0002	21.3598	1.8471	7.65
				prom	7.56%

Los parámetros del INEN respecto a humedad, cenizas y densidad aparente resultaron satisfactorios para los carbones activados obtenidos, de hecho, comparándolos con los 2 carbones comerciales, resultan competitivos entre sí. El contenido de humedad obtenido en los carbones activados de cuesco de palma al 40 y 20% fueron de 7.56% y 10.23% y los comerciales fueron de 13.28% y 11.11%, cuando la norma INEN 1985 indica para carbón granular un máximo de 12%.

Esta humedad reducida se debe a que el carbón obtenido fue insoluble al agua, es decir el agua que se pudo encontrar en la superficie se eliminó con facilidad en un calentamiento de estufa a 130°C. Un factor que redujo la humedad del carbón fue la evaporación a 110°C del agua de lavado, con el fin de remover las pocas trazas de hidróxido y ácidos que se puedan encontrar, esto

se consiguió con una plancha de calentamiento y tapando el vaso con papel aluminio o una toalla de cocina, con el fin de no permitir el ingreso de aire y que, en la ebullición, el sólido no vaya a salpicar y ensuciar las paredes del Laboratorio. Apenas se evaporó el agua, el sólido restante, se depositó en recipientes plásticos con tapa rotulados y solo se los abrió cuando se quería pesarlos y efectuar los respectivos ensayos de humedad y cenizas.

3.4 Contenido de cenizas

Para el contenido de cenizas totales, un análisis gravimétrico determinó la diferencia de masa inicial y final del crisol con la muestra de carbón estudiada. (Tabla 3.7)

Tabla 3.7 Resultados de cenizas totales

Crisol (Tipo de carbón)	Peso de crisol (g)	Peso de la muestra (g)	Peso de cenizas + crisol (g)	Peso de cenizas (g)	Cenizas (%)
1: C1	34.7746	1.0019	34.7772	0.0026	0.26
2: C2	37.1533	1.0021	37.1705	0.0172	1.72
3: CP40	35.2893	1.0009	35.3683	0.0790	7.89
1: CP20	34.7746	1.0149	34.8168	0.0422	4.15

Para el ensayo de cenizas totales, la normativa INEN 1987 indica que estas no deban exceder del 12%, obteniéndose para cada activación al 40% y 20%, un contenido de 7.89% y 4.15%, se encuentran menores al rango, pero son mayores al 0.26% y 1.72% de los carbones comerciales, esto se debe a que en el proceso de lavado y triturado, las formas granulares irregulares han fomentado la formación de cenizas con las trazas de carbón pulverizado, incidiendo esto en la medición, además este ensayo se detuvo apenas la masa de crisol se mantenga constante, es decir que tras 4 horas de operación en mufla y la hora se desecado, se debió volver a pesar hasta

comprobar la masa, como tras 3 repeticiones de este proceso, las cenizas totales en el carbón elaborado, se mantuvieron constantes.

La principal limitación de este ensayo radica en el tiempo de operación que se tiene que llevar por análisis, esto depende del tamaño de la mufla y del número de crisoles que pueda contener, además el tiempo en el desecador es un factor importante dado que la temperatura debe reducirse a la temperatura ambiente, lo cual lleva tiempo. Pesarse en caliente descalibraría la balanza además de que los datos registrados no serían los correctos. Otro detalle que se debe tomar en cuenta en el contenido de cenizas es el pretratamiento inicial a la materia prima, el cuesco de palma, en un inicio viene cargado de aceites, fibras, polvo y tierra del campo, esta además de ser cargada de humedad, viene con sólidos disueltos y compuestos volátiles que se remueven mediante lavado con agua fría y filtrado con coladores de cocina o nylon para remover el material particulado. Si no se lavara la materia prima, la carbonización del cuesco formaría más cenizas lo cual disminuiría la formación de poros.

3.5 Densidad Aparente

En la densidad aparente se determinó la masa de carbón activado necesaria para que alcance la capacidad volumétrica rotulada, con el fin de determinar su porosidad. (Tabla 3.8)

Tabla 3.8 Resultados de densidad aparente

Carbón	Masa probeta (g)	Masa probeta + carbón (g)	Masa carbón (g)	Humedad (%)	Volumen (ml)	Densidad aparente (g/ml)
Comercial 1	32.7955	39.5326	6.7371	13.28	10	0.5833
Comercial 2	32.7955	38.5900	5.7945	11.11	10	0.5150
Palma 40%	32.7955	38.3150	5.5195	7.56	10	0.5104

Palma 20%	32.7955	38.5600	5.7648	10.23	10	0.5167
------------------	---------	---------	--------	-------	----	--------

La densidad aparente se calculó para las muestras obteniéndose semejanzas con el carbón activo comercial 2 cuya densidad de 0.515 g/cm^3 se compara con la obtenidas por activación química 40 y 20% de 0.5104 g/cm^3 y 0.5167 g/cm^3 , respecto a la densidad del comercial 1 de 0.5833 g/cm^3 , se puede decir que estas mediciones se encuentran en el rango permitido por la INEN 1986 donde el mínimo para carbón granular es 0.2 g/cm^3 . La densidad aparente es inversamente proporcional a la porosidad, por lo tanto, se puede decir que los carbones activados al 40%, 20%, comercial 2 tiene porosidad similar, siendo el comercial 1 el de menor porosidad ya que su densidad aparente es mayor al resto de los carbones.

3.6 Adsorción de azul de metileno

La absorbancia se midió ajustando el espectrofotómetro UV a soluciones diluidas de azul de metileno (Tabla 3.9) con el fin de hallar la recta de calibración (figura 3.1).

Tabla 3.9 Absorbancias y concentraciones

Tubo de Ensayo	Concentración (ppm)	Absorbancia
1	100	2.19
2	50	1.09
3	40	0.929
4	30	0.585
5	20	0.458
6	10	0.203
7	0	0

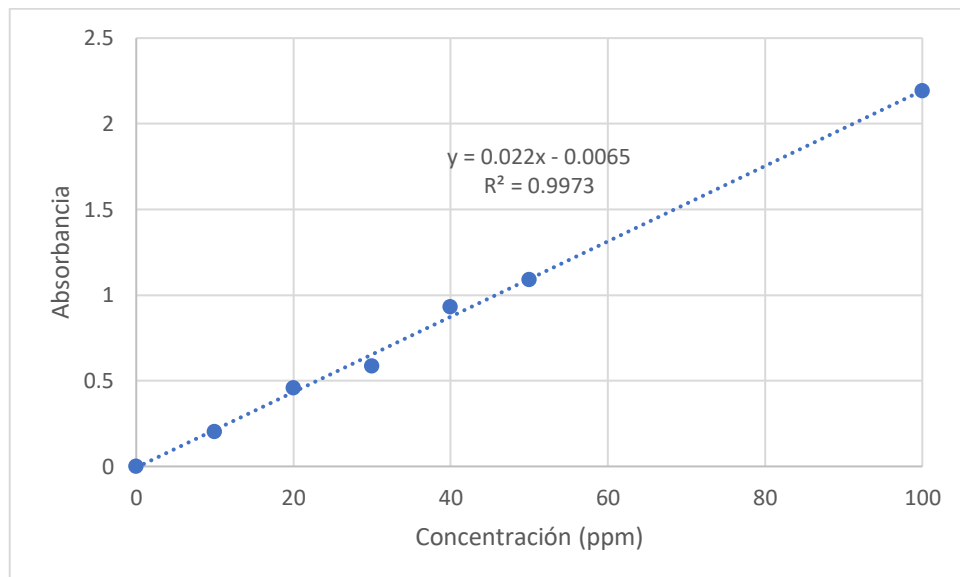


Figura 3.1 Recta de calibración azul de metilo

Con el espectrofotómetro UV se determinó la absorbancia experimental de una alícuota de 4ml con el fin de hallar la concentración y graficar los perfiles de concentración de absorbancia. (ver tablas 3.10 a 3.13 y figuras 3.2 a 3.5)

Tabla 3.10 Absorbancias del carbón activado 40%

Muestra	Volumen (ml)	Absorbancia	Concentración (ppm)
1	4	0.053	2.705
2	4	0.162	7.659
3	4	0.192	9.023
4	4	0.198	9.295
5	4	0.22	10.295
6	4	0.252	11.750
7	4	0.255	11.886
8	4	0.283	13.159
9	4	0.292	13.568

10	4	0.293	13.614
-----------	---	-------	--------

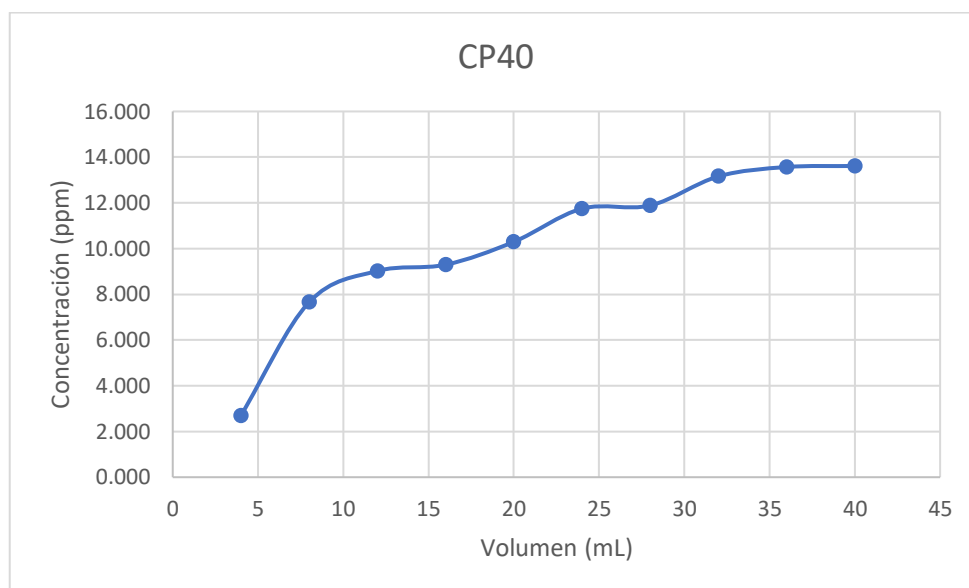


Figura 3.2 Concentración de Azul de metilo CP40

Tabla 3.11 Absorbancias del carbón activado 20%

Muestra	Volumen (ml)	Absorbancia	Concentración (ppm)
1	4	0.047	2.432
2	4	0.060	3.023
3	4	0.067	3.341
4	4	0.223	10.432
5	4	0.229	10.705
6	4	0.258	12.023
7	4	0.266	12.386
8	4	0.287	13.341
9	4	0.337	15.614
10	4	0.346	16.023

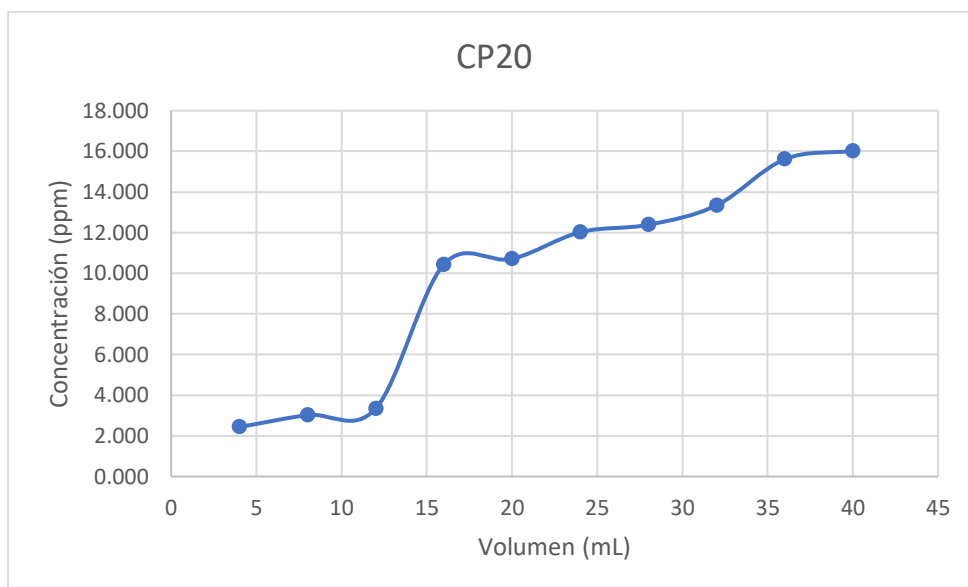


Figura 3.3 Concentración de Azul de metilo CP20

Tabla 3.12 Absorbancias del carbón comercial 1

Muestra	Volumen (ml)	Absorbancia	Concentración (ppm)
1	4	0.096	4.659
2	4	0.182	8.568
3	4	0.299	13.886
4	4	0.309	14.341
5	4	0.310	14.386
6	4	0.311	14.432
7	4	0.312	14.477
8	4	0.325	15.068
9	4	0.371	17.159
10	4	0.420	19.386

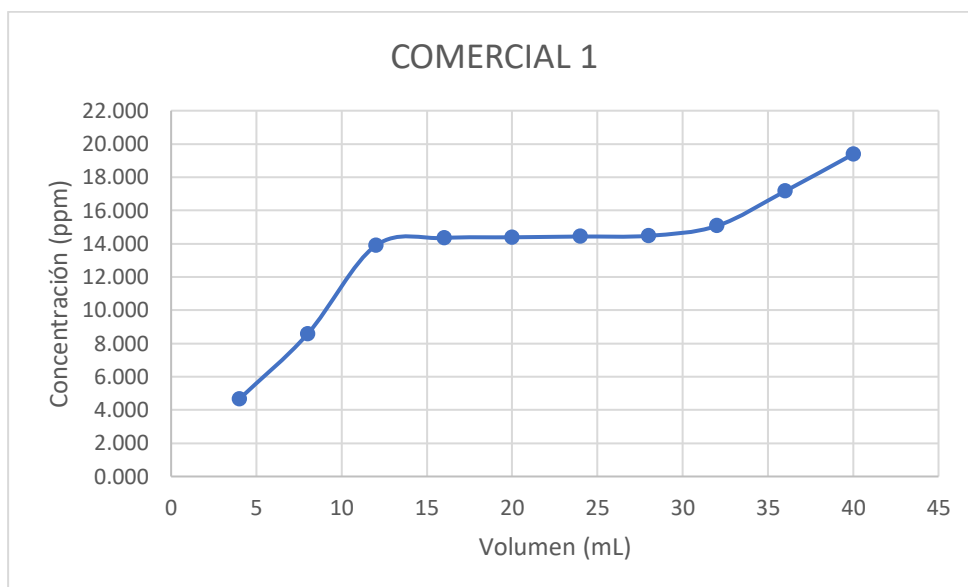


Figura 3.4 Concentración de Azul de metilo C1

Tabla 3.13 Absorbancias del carbón comercial 2

Muestra	Volumen (ml)	Absorbancia	Concentración (ppm)
1	4	0.028	1.568
2	4	0.028	1.568
3	4	0.029	1.614
4	4	0.074	3.659
5	4	0.087	4.250
6	4	0.120	5.750
7	4	0.137	6.523
8	4	0.142	6.750
9	4	0.149	7.068
10	4	0.215	10.068

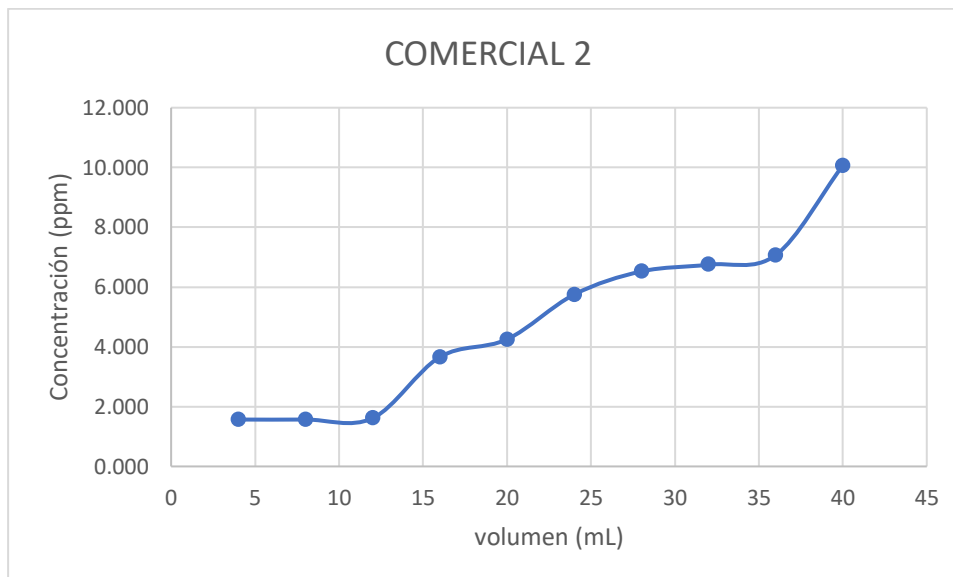


Figura 3.5 Concentración de Azul de metilo C2

El análisis con azul de metileno se efectuó con el espectrofotómetro que, ajustado a una longitud de onda de 660 nm, se determinó 4 curvas que indican la medida en que se consume la solución en la columna de adsorción, la absorbancia y por ende la concentración incremental. Estas curvas de concentración denotan la forma de como incrementa la concentración de azul de metileno en el volumen de la alícuota. Se partió inicialmente con una concentración de 100 ppm y esta disminuyó por cada carbón activado: el carbón de palma al 40% ácido obtuvo una concentración mínimo y máximo de 2.705 ppm y 13.614 ppm; carbón de palma 20% sus valores fueron 2.432 ppm y 16.023 ppm; comercial 1, 4.659 ppm y 19.386 ppm; comercial 2, 1.568 ppm y 10.068 ppm. Se puede ver en todas las curvas que, al aumentar el volumen de adsorbato o contaminante, mayor es su concentración luego de estar en contacto con el adsorbente, lo cual significa que el carbón se satura y pierde capacidad de adsorción. Vemos que el carbón activado de casco de palma al 40% y el comercial 2 son los que más adsorben AM.

3.7 Isoterma de adsorción

Para la isoterma de adsorción, se determinó a partir de análisis volumétricos la concentración de ácido acético en equilibrio y la relación adsorbato-adsorbente (tablas 3.14 a 3.15) con el fin de construir la isoterma de Langmuir (figura 3.6) y su linealizada (figura 3.7).

Tabla 3.14 Resultados Comercial 1

Volumen NaOH (ml)	Volumen AA (ml)	Co (mol/L)	C equilibrio (mol/L)	Masa carbón activado (g)	C $\left(\frac{\text{kg adsorbato}}{\text{m}^3}\right)$	q $\left(\frac{\text{kg adsorbato}}{\text{kg adsorbente}}\right)$
46.4	100	0.50	0.464	2.0013	27.84	1.391
37.9	80	0.40	0.379	2.0097	22.74	1.132
27.8	60	0.30	0.278	2.0032	16.68	0.833
19	40	0.20	0.19	2.0014	11.4	0.570
8.9	20	0.10	0.089	2.0046	5.34	0.266
3.7	10	0.05	0.037	2.0048	2.22	0.111

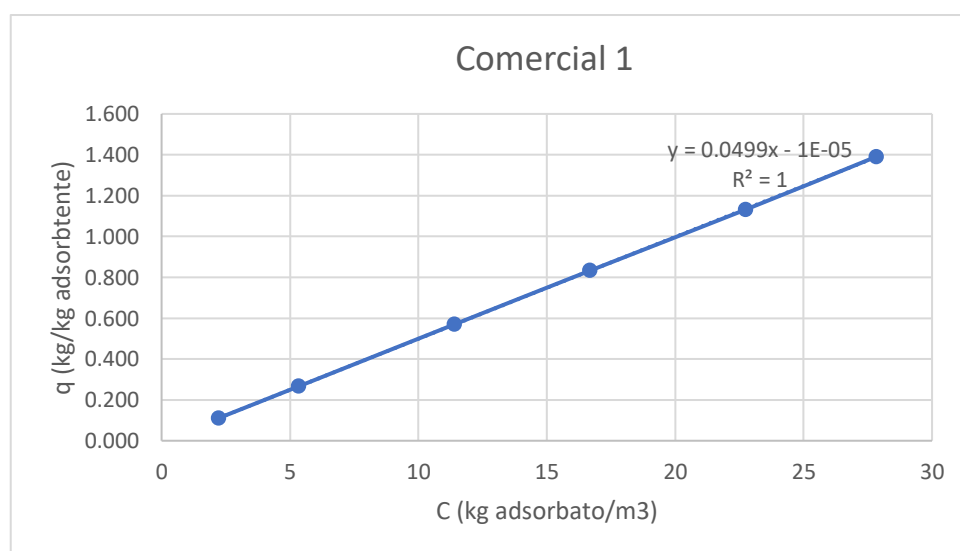


Figura 3.6 Relación q vs C: Comercial 1

Tabla 3.15 Linealización Isoterma Langmuir Comercial 1

$1/c$	$1/q$
0.036	0.719
0.044	0.884
0.060	1.201
0.088	1.756
0.187	3.754
0.450	9.031

A continuación, se muestra como resumen del carbón comercial 1, la constante de Langmuir calculada y las respectivas áreas superficiales obtenidas, por la isoterma y por el método BET. (Tabla 3.16)

Tabla 3.16 Constante de Langmuir y área superficial para Carbón Comercial 1

Constante Langmuir $\left(\frac{x}{m}\right)_{Max}$	$\sigma(m^2)$	Área superficial $\left(\frac{m^2}{g}\right)$	SBET $\left(\frac{m^2}{g}\right)$
0.0045	2.1×10^{-19}	569.08	568.29

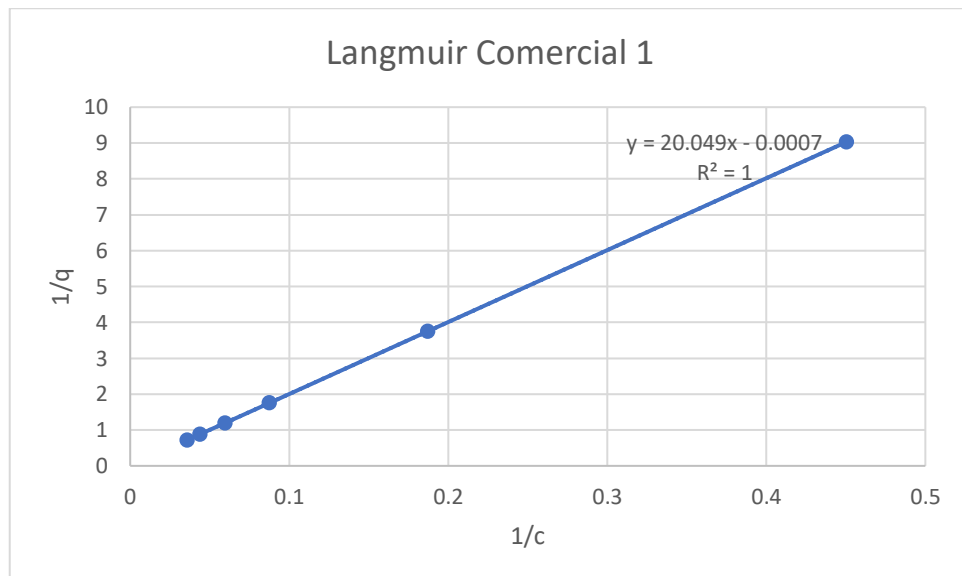


Figura 3.7 Isoterma Langmuir: Comercial 1

De la misma manera se procede con los demás tipos de carbón activado con los resultados de titulación (tablas 3.17 a 3.23), isoterma (figura 3.8 a 3.12) y su linealizada (figura 3.9 a 3.13).

Tabla 3.17 Resultados Comercial 2

Volumen NaOH (ml)	Volumen AA (ml)	Co (mol/L)	C equilibrio (mol/L)	Masa carbón activado (g)	C $\left(\frac{kg \text{ adsorbato}}{m^3}\right)$	q $\left(\frac{kg \text{ adsorbato}}{kg \text{ adsorbente}}\right)$
44.6	100	0.50	0.446	2.0209	26.76	1.324
36.7	80	0.40	0.367	2.0804	22.02	1.058
27.9	60	0.30	0.279	2.0435	16.74	0.819
19.3	40	0.20	0.193	2.0317	11.58	0.570
8.7	20	0.10	0.087	2.0157	5.22	0.259
3.4	10	0.05	0.034	2.0229	2.04	0.101

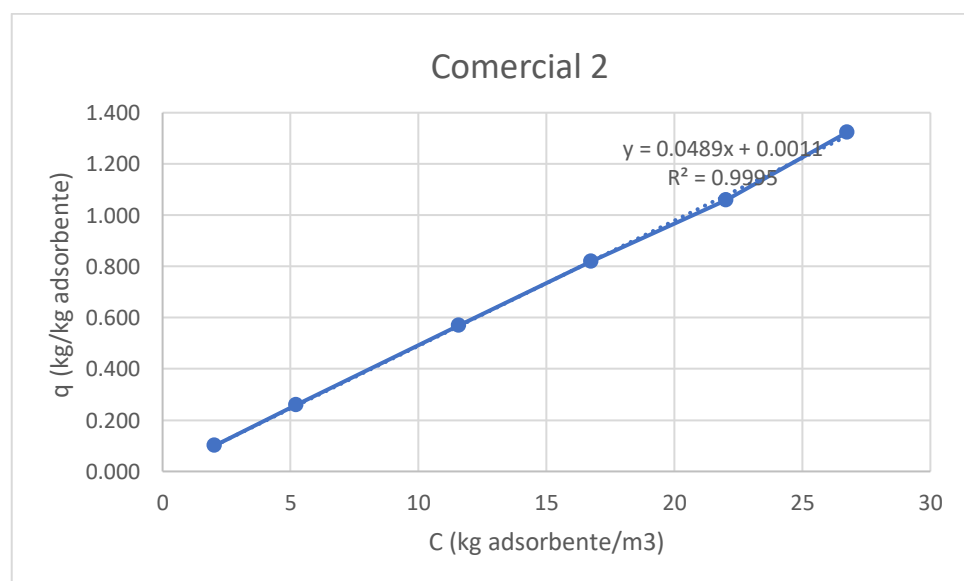


Figura 3.8 Relación q vs C: Comercial 2

Tabla 3.18 Linealización Isoterma Langmuir Comercial 2

$1/c$	$1/q$
0.037	0.755
0.045	0.945
0.060	1.221
0.086	1.754
0.192	3.861
0.490	9.916

A continuación, se muestra como resumen del Carbón comercial 2 la constante de Langmuir calculada y las respectivas áreas superficiales obtenidas, por la isoterma y por el método BET. (tabla 3.19)

Tabla 3.19 Constante de Langmuir y área superficial para Carbón Comercial 2

Constante Langmuir $\left(\frac{x}{m}\right)_{Max}$	$\sigma(m^2)$	Área superficial $\left(\frac{m^2}{g}\right)$	SBET $\left(\frac{m^2}{g}\right)$
0.0043	2.1×10^{-19}	543.79	531.18

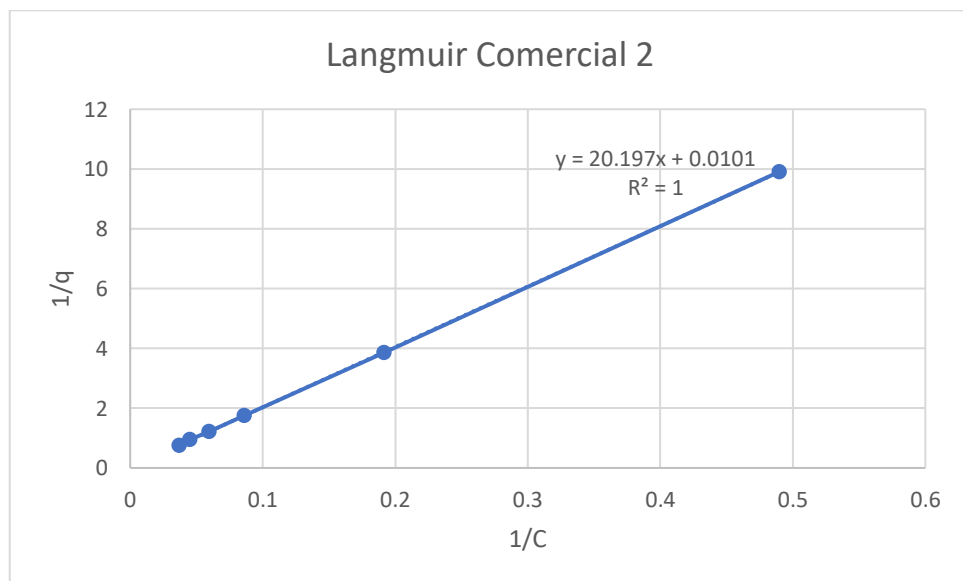


Figura 3.9 Isoterma Langmuir: Comercial 2

Tabla 3.20 Resultados Carbón Palma 40%

Volumen NaOH (ml)	Volumen AA (ml)	Co (mol/L)	C equilibrio (mol/L)	Masa carbón activado (g)	C $\left(\frac{\text{kg adsorbato}}{\text{m}^3}\right)$	q $\left(\frac{\text{kg adsorbato}}{\text{kg adsorbente}}\right)$
45.4	100	0.50	0.454	2.0072	27.24	1.357
36.3	80	0.40	0.363	2.0384	21.78	1.068
26.1	60	0.30	0.261	2.0559	15.66	0.762
18	40	0.20	0.18	1.9936	10.8	0.542
8.5	20	0.10	0.085	2.0091	5.1	0.254
3.9	10	0.05	0.039	2.0416	2.34	0.115

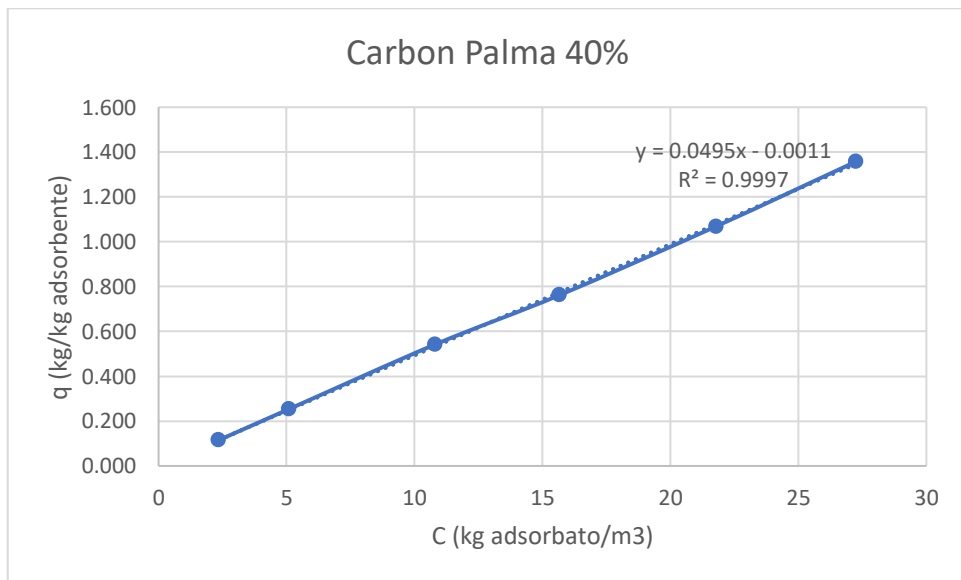


Figura 3.10 Relación q vs C: Carbón palma 40%

Tabla 3.21 Linealización Isoterma Langmuir Carbón Palma 40%

1/c	1/q
0.037	0.737
0.046	0.936
0.064	1.313
0.093	1.846
0.196	3.939
0.427	8.725

A continuación, se muestra como resumen del Carbón de palma al 40% de ácido, la constante de Langmuir calculada y las respectivas áreas superficiales obtenidas, por la isoterma y por el método BET. (tabla 3.22)

Tabla 3.22 Constante de Langmuir y área superficial para Carbón de Palma al 40%

Constante Langmuir $\left(\frac{x}{m}\right)_{Max}$	$\sigma(m^2)$	Área superficial $\left(\frac{m^2}{g}\right)$	SBET $\left(\frac{m^2}{g}\right)$
0.0033	2.1×10^{-19}	417.32	339.22

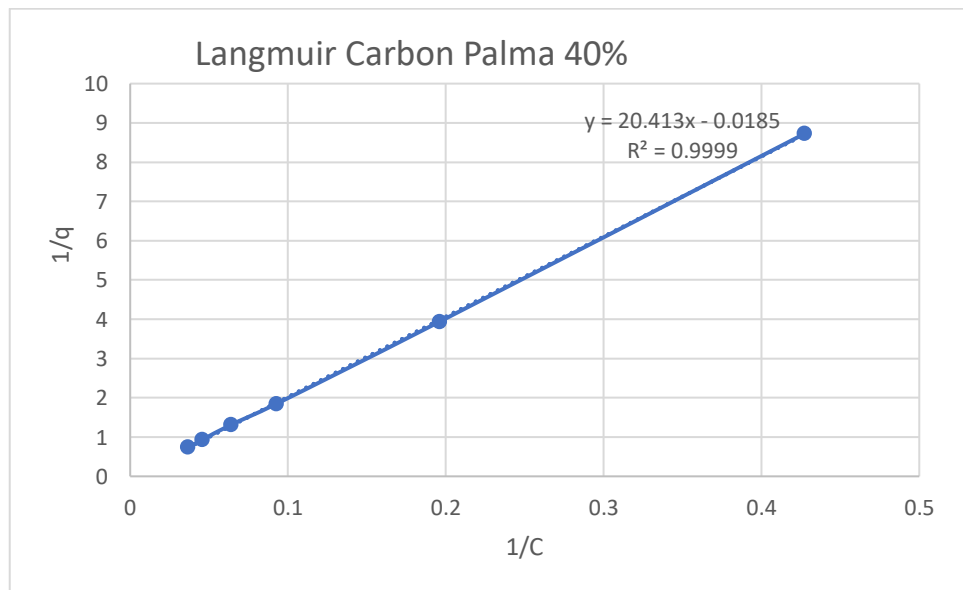


Figura 3.11 Isoterma Langmuir: Carbón Palma 40%

Tabla 3.23 Resultados Carbón Palma 20%

Volumen NaOH (ml)	Volumen AA (ml)	Co (mol/L)	C equilibrio (mol/L)	Masa carbón activado (g)	C $\left(\frac{kg \text{ adsorbato}}{m^3}\right)$	q $\left(\frac{kg \text{ adsorbato}}{kg \text{ adsorbente}}\right)$
45.6	100	0.50	0.456	2.0072	27.36	1.361
38.8	80	0.40	0.388	2.0384	23.28	1.160
28.6	60	0.30	0.286	2.0559	17.16	0.856
19.5	40	0.20	0.195	1.9936	11.7	0.584
9.3	20	0.10	0.093	2.0091	5.58	0.279
4.1	10	0.05	0.041	2.0416	2.46	0.123

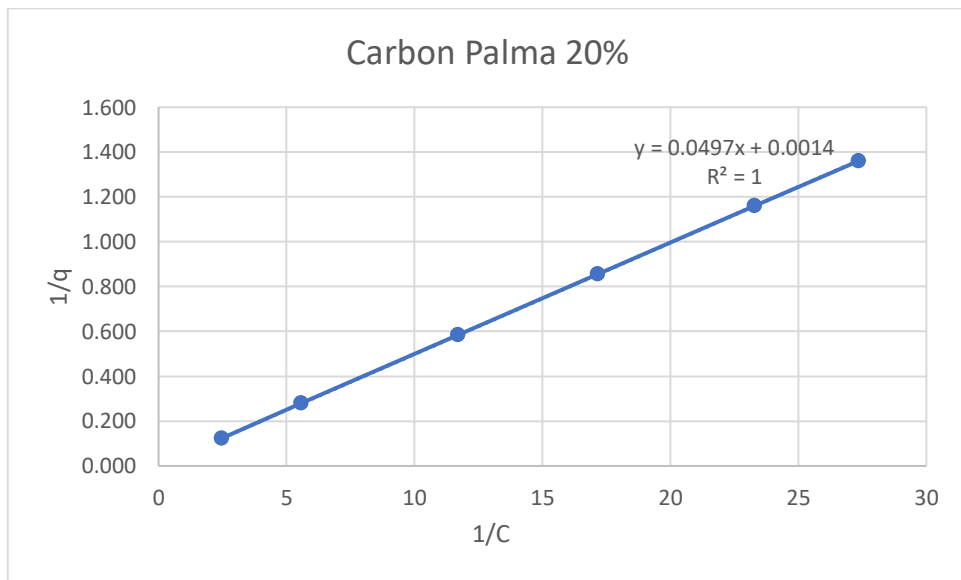


Figura 3.12 Relación q vs C: Carbón palma 20%

Tabla 3.24 Linealización Isoterma Langmuir Carbón Palma 20%

1/c	1/q
0.037	0.735
0.043	0.862
0.058	1.168
0.085	1.713
0.179	3.587
0.407	8.141

A continuación, se muestra como resumen del Carbón de palma al 20% de ácido, la constante de Langmuir calculada y las respectivas áreas superficiales obtenidas, por la isoterma y por el método BET. (tabla 3.25)

Tabla 3.25 Constante de Langmuir y área superficial para Carbón de Palma al 20%

Constante Langmuir $\left(\frac{x}{m}\right)_{Max}$	$\sigma(m^2)$	Área superficial $\left(\frac{m^2}{g}\right)$	SBET $\left(\frac{m^2}{g}\right)$
0.0032	2.1×10^{-19}	404.68	432.84

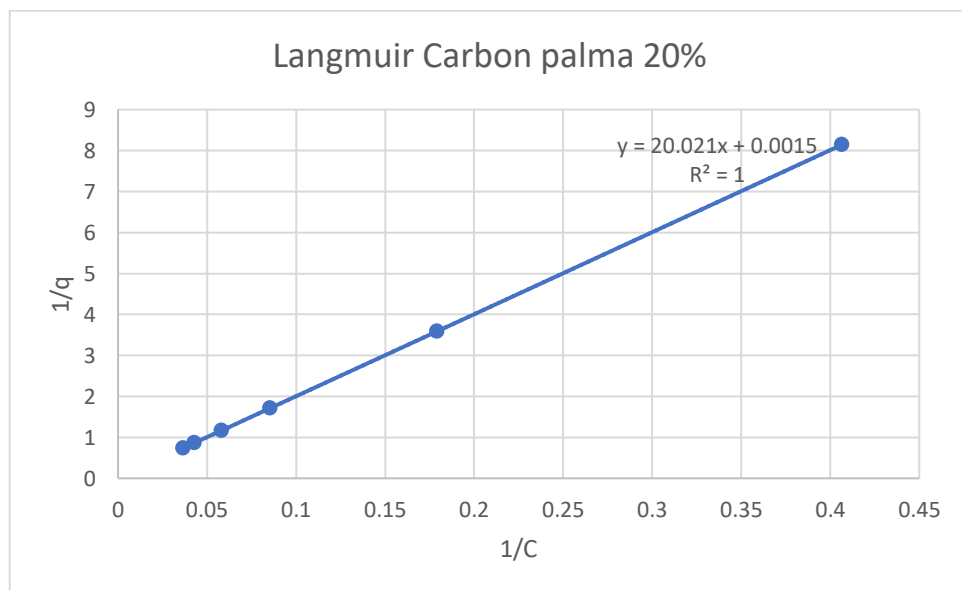


Figura 3.13 Isoterma Langmuir: Carbón Palma 20%

La principal limitación de este ensayo consistió en determinar la concentración en equilibrio de ácido acético mediante titulación de hidróxido de sodio 0.1 N, para ello el indicador de fenolftaleína, así como la solución titulante deben estar bien preparadas y estandarizadas para obtener valores precisos de volumen consumido y que la concentración final deba ser menor a la inicial, como prueba de que el carbón activado preparado pueda adsorber el contaminante.

3.8 Numero de Yodo

Para la determinación del número de yodo, se registró el volumen consumido de tiosulfato de sodio 0.1 N con el fin de calcular la capacidad de adsorción de yodo por masa de carbón activado y el área superficial asociado al número de yodo (ver tabla 3.26).

Tabla 3.26 Resultados de Número de Yodo

Carbón Activado	Peso de la muestra (g)	Volumen consumido (ml)	Yodo adsorbido (Mg/g)	Área yodo SI (m²/g)
CA comercial 2	1.6075	18	539	536.03
CA comercial 1	1.6039	14	576.31	573.14
CP 20%	1.6045	26	383	380.89
CP 20%	1.2012	28.7	440.13	437.71
CP 40%	2.0024	23.5	346	344.09

3.9 Poder decolorante

En la determinación del poder decolorante de azul de metileno, se tituló la solución de colorante hasta llegar a la saturación, con el fin de determinar la capacidad de adsorción del carbón activado y la concentración de la solución final. (ver tabla 3.27)

Tabla 3.27 Poder decolorante y concentración final

Tipo	M carbón polvo (g)	V1 (ml) AM inicial	V2 (ml) AM titulado	DP $\left(\frac{mg\ A.\ M}{g\ C.\ A}\right)$	Concentración (ppm)
Comercial 1	0.1015	10	22.1	326.60	0.795
Comercial 2	0.1012	10	13.5	200.09	2.485
Palma 40%	0.1035	10	18.5	270.97	1.295
Palma 20%	0.1011	10	17	252.23	2.477

El poder decolorante se determinó en base a titulaciones de solución de azul de metileno 15 ppm, donde se requirió saturar la solución hasta el punto en que esta no se decolore por 5-10 minutos seguidos, esto se debe a que la masa de carbón activado pulverizado a 45 μm pudo absorber una masa de azul de metileno, cuando mayor es la masa de azul de metileno absorbida por carbón activado, más efectivo es este carbón en el tratamiento de efluentes contaminadas por colorantes.

El carbón activado comercial 1 tuvo un poder decolorante de 326.6 mg/g, destacándose como el más efectivo al limpiar soluciones, seguido de los carbones de palma preparados con ácido fosfórico al 40 y 20% al con 270.97 mg/g y 252.23 mg/g respectivamente. Finalmente el menos efectivo fue el comercial 2 con 200.09 mg/g. Posteriormente con un espectrofotómetro se determinó la absorbancia y posterior concentración de cada una de las soluciones y se encontró que, desde una concentración inicial de 15 ppm, la concentración disminuyó hasta 0.795 ppm (comercial 1), 2.485 ppm (comercial 2), 1.295 ppm (carbón de palma al 40% de ácido) y 2.477 ppm (carbón de palma al 20% de ácido), denotando de nuevo al carbón comercial 1 como el mejor y consiguiendo competencia entre el carbón de palma 40% con el comercial 2.

Esta capacidad de absorción de contaminantes del carbón está relacionada con la porosidad y densidad aparente. La capacidad en la remoción de contaminantes se determinó además con los análisis de área superficial del carbón activado, donde aplicando los métodos BET, superficie de yodo y la constante de adsorción de la isoterma de Langmuir se encontró que: el carbón activado de mayor área superficial fue el comercial 1 con 569.08 m²/g (Langmuir), 573.14 m²/g (Yodo) y 568.28 m²/g (BET); posterior fue el comercial 2 con 543.79 m²/g (Langmuir), 536.03 m²/g (Yodo) y 531.17 m²/g (BET); el carbón activado de cuesco de palma con activación química presenta un valor próximo al área superficial requerido por la normativa de 500 m²/g, obteniéndose áreas para el carbón al 40% de 417.32 m²/g (Langmuir), 344.09 m²/g (Yodo) y 339.22 m²/g (BET), y para el carbón al 20% de 404.68 m²/g (Langmuir), 437.71 m²/g (Yodo) y 432.84 m²/g (BET).

La principal limitación en este ensayo fue que el reactivo requerido, yodo sólido, era difícil de conseguir por lo tanto se utilizó un reactivo que ya tenía bastante tiempo almacenado y por consecuente se obtuvieron resultados fuera de rango para los carbones utilizados.

Estos valores variables de área superficial los vuelven menos efectivos en la remoción de contaminantes de gran tamaño de partícula, sin embargo, se lo puede emplear en la remoción de tintes y colorantes dado su gran poder decolorante tal como se demostró en la tabla 3.27.

Una forma de incrementar el área superficial de carbón es incrementando las condiciones de temperatura, concentración de ácido y tiempo de operación del sistema de impregnación ácida y en la evaporación hasta los 500°C de la mezcla acidificada, todo esto a condiciones de agitación constante o con la inyección de un agente oxidante como dióxido de carbono y vapor de agua a la mufla de calcinación para que los gases de entrada desgasten la superficie del carbón y faciliten la adsorción de vapores contaminante de un flujo de gases.

A escala de laboratorio la obtención de carbón activado de cuesco de palma, requiere de pocos reactivos para su preparación como ácido fosfórico e hidróxido de sodio, sin embargo las pruebas de calidad requieren de soluciones estandarizadas que faciliten la cuantificación de los parámetros de calidad en base a la normativa vigente, para ello se necesita experiencia previa en la preparación y estandarización de soluciones, así como en técnicas de análisis estequiométrico por titulación mediante equipos que se encuentren disponibles y operativos.

A escala industrial se considera parámetros de dimensionamiento de equipos, costo de insumos y reactivos, planilla eléctrica y un análisis de la dinámica del mercado de carbón activado en el contexto local e internacional, mismos que se exponen en el análisis de costos.

3.10 Análisis económico

Para tener la opción de aprovechar este desecho como un recurso comercialmente rentable, promover la economía circular y contribuir a la disminución de la contaminación ambiental, se realizó un análisis económico empleando la base de datos de Excel, datos del BCE e INEC. (ver tabla 3.28 y 3.29)

POBLACIÓN Y DEMANDA	
ACEITE DE PALMA EXPORTADO DE ECUADOR 2019	187,494,000 kg
BIOMASA TOTAL GENERADA	749,976,000 kg
CUESCO GENERADO	56,248,200 kg
% CUESCO UTILIZADO	5.68
CONSUMO DE CARBÓN ACTIVADO 2020	2,263,492 Kg/año

Tabla 3.28 Demanda de carbón activado en el Ecuador

ESTADO DE RESULTADOS	
COSTO DE EQUIPOS	\$3,259,070.74
COSTO DE CAPITAL	\$1,393,000.00
INVERSIÓN TOTAL DE CAPITAL FIJO	\$4,652,070.74
COSTO OPERATIVO ANUAL TOTAL	\$2,916,460.00
PRODUCCIÓN ANUAL ESTIMADA DE CARBÓN ACTIVADO	960,000.00 kg
COSTO ESTIMADO DE CARBÓN ACTIVADO DE CUESCO DE PALMA	3.038 \$/kg
PRECIO SUGERIDO	4.50 \$/kg
VAN (VALOR ACTUAL NETO)	\$ 1,232,231.53
TIR (TASA INTERNA DE RETORNO)	28%
RETORNO DE INVERSIÓN (ROI)	3.02%
PAYBACK PERIOD (PBP)	1.5951 años

Tabla 3.29 Resumen de costos de CA de cuesco de palma africana

- **Análisis de Costos:**

Para realizar el análisis de costos se tomó como referencia una planta industrial de carbón activado para cáscara de nuez, basado en las experiencias de (Lai & Ngu, 2022) y en los enfoques de evaluación de costos establecidos en el texto publicado por (Peters & Timmerhaus, 2000). Esta contaba con 15 equipos fácilmente escalables a partir del proceso de elaboración de carbón activado en laboratorio, ya que son operaciones unitarias básicas como secado, trituración, remojo en ácido, carbonización, lavado y tamizado. También se tomó información correspondiente a estadística de la palma africana en el Ecuador y se la adaptó al análisis. Se tomó como referencia 320 días laborales del año. Según la superintendencia de compañías existen una variedad de empresas registradas que abarcan los sectores de agricultura, manufactura, construcción, comercio e inmobiliaria. Todos estos sectores se relacionan con el carbón activado de forma directa e indirecta. Al análisis se le incluyó el costo de equipos de laboratorio utilizados en el proyecto integrador, incluyendo los insumos y materiales. Se asumió una alimentación de materia prima a la planta de 10000 kg/día. Ésta se tritura para posteriormente ser remojada en ácido fosfórico al

40%. En esta etapa se pierde alrededor de 8% de materia prima. Luego de la impregnación con ácido fosfórico por 24h, se seca el material y se procede con la carbonización en los hornos. Finalmente, se lava y se seca el material para eliminar el ácido residual y se lleva a los tamices para obtener el tamaño granular deseado.

Se tomó como referencia un costo por tonelada de cuesco de 72\$. El estudio tomó como referencia el índice de costos de Marshall & Swift para determinar el precio de los equipos. En laboratorio se obtuvo una conversión del cuesco a carbón activado entre el 30%-40%, por lo cual se asumió una conversión en la planta del 30%. Por lo tanto, de los 10,000kg alim/día se obtienen 3000 kg CA/día o 960,000kg CA/año (960 TM/año). La planta propuesta cuenta con una recirculación del ácido usado, por lo cual se asumió 1/3 de ácido fosfórico fresco por cada 2/3 de ácido usado. Se asumió también una vida útil de la planta de 10 años. Con estas consideraciones se obtuvo una inversión total de capital fijo de \$4,652,070.74 y un costo operativo anual de \$2,916,460.00. Con esto se calculó el costo por kg de carbón activado, obteniendo un valor de \$3.038. Tomando un precio de venta de \$4.50 /kg CA producido con el 32.5% de margen utilidad, donde se obtuvo un retorno de inversión del 3.02%, lo cual significa que se tiene una rentabilidad neta de \$140,492.54 por año.

Se obtuvo un periodo de retorno de 1.6 años que es el tiempo desde que empieza a operar la planta hasta recuperar la inversión de capital fijo. Se obtuvo un VAN de \$1,232,231.53 que al ser un valor positivo significa que el proyecto será rentable y debería aceptarse, es importante mencionar que el VAN es más significativo cuando se tienen múltiples proyectos ya que ahí se decide de acuerdo con el mayor VAN positivo. Se obtuvo un TIR de 28% lo que también quiere decir que el proyecto es rentable. El carbón activado comercial derivado de la cáscara de coco

tiene un precio internacional entre los 1.75\$ y 3.15\$. Los precios de los carbones comerciales que se distribuyen a nivel nacional se encuentran entre 3.8\$/kg y 7\$/kg. Con esto se evidenció que, el carbón activado producido en este estudio es competitivo en precio y calidad con los carbones que se comercializan en el país.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

En conclusión, se logró obtener carbón activado mediante activación química, logrando 102.89 g y 78.36 g de carbón activado granular con carbonización y activación química al 20% y 40% a partir de 500 gramos de cuesco de palma africana, con un rendimiento de proceso del 41.15% y 31.33% y conservando una tasa de impregnación precursor-activante de 2.22 y 2.54. Se pretendió obtener carbón activado mediante activación física, sin embargo, no existen los equipos adecuados para cumplir tal objetivo.

Se evaluó la calidad del carbón activado proveniente del cuesco de palma africana por activación química al 20% y 40% según la normativa INEN. Se compararon con dos tipos de carbón activado comerciales. Respecto al número de yodo se obtuvieron valores pequeños fuera de rango para los 4 carbones activados. Para el resto de las pruebas de la normativa se obtuvieron valores dentro de los rangos, además, se realizaron 3 pruebas adicionales de adsorción de ácido acético, azul de metileno y poder decolorante obteniendo resultados positivos que les permiten competir con los carbones activados comerciales, evidenciando en base a las pruebas realizadas, que este desecho revalorizado a carbón activado se lo puede aplicar a diferentes actividades industriales y productivas.

Se realizó un análisis económico de la producción de carbón activado aplicado en el Ecuador tomando como referencia los enfoques de evaluación de costos según (Lai & Ngu, 2022) y (Peters & Timmerhaus, 2000) obteniendo una inversión total de \$4,652,070.74 y un costo operativo anual de \$2,916,460 para una planta con producción de 960,000kg y un costo de producto final de 3.038\$/kg, precio sugerido de 4.50\$/kg generando una rentabilidad neta de \$140,492.54 por año. Esto solamente utilizando menos del 10% del desecho generado. Esto significa que el establecimiento de una planta de producción nacional sería altamente rentable ya que existe un amplio margen de mercado que podría cubrirse y desecho que se podría por utilizar. Se obtuvo un periodo de retorno de 1.6 años lo que significa que la planta recuperaría la inversión total de capital fijo con el costo operativo en poco tiempo. En el mercado el precio de los carbones comerciales oscila desde los 3.80\$ hasta los 7.00\$ por kg, con lo cual, el carbón activado producido en este estudio es de buena calidad y altamente competitivo comparado con los carbones activados del mercado nacional.

4.2 Recomendaciones

En la etapa de pretratamiento se requiere que el cuesco de palma sea lavado con agua fría con el fin de reducir el contenido de cenizas, y mediante colador facilitar la separación de los sólidos suspendidos totales, fibras y restos de oleos de palma. Como complemento, se podría añadir el proceso de desengrase ácido, una técnica donde se emplea ácido sulfúrico diluido como químico desengrasante, con esto se reduciría el tiempo de lavado frío.

En la etapa de activación química, mediante impregnado, se sugiere que la materia prima sea triturada con anterioridad, llegando a un tamaño de partícula de 2 mm, esto facilitaría la impregnación ácida y reduciría la formación de polvo de carbón activado que como se analizó,

reduce el rendimiento del proceso al perderse esta masa en el lavado y neutralizado del carbón. Se recomienda utilizar distintas tasas de impregnación para evaluar la calidad del carbón obtenido, por escalabilidad de la planta y costos, lo ideal sería que el carbón de mejor calidad tenga un $R=1$.

Para la activación física, se recomienda diseñar un reactor pirolítico de gran capacidad con un sistema de control PID (Proporcional, Integral y Derivativo) que permita controlar y mantener estable la temperatura del horno, de manera que, no se dependa del número de crisoles o capsulas que alcancen en la mufla. Así también, mantener una chimenea de salida de vapores hacia el exterior para no liberar los gases al interior del laboratorio, ocasionando malestar y condiciones peligrosas de trabajo.

Se sugiere analizar los parámetros de diseño que permitan maximizar la conversión a escala industrial y también aprovechar los subproductos gaseosos de interés como el H_2 mediante su cuantificación por cromatografía de gases.

Ensayar otras metodologías de elaboración de carbón activado, como por ejemplo el uso de radiación de microondas, de tal forma que, se pueda incrementar su porosidad y por lo tanto producir un carbón de mejor calidad.

En los ensayos de caracterización de carbón activado, se recomienda realizar más pruebas de laboratorio como por ejemplo adsorción de fenol, fenazona, cetoxima, taninos, butano o tetracloruro de carbono, de tal forma que se puedan encontrar más aplicaciones al carbón activado de palma.

Considerando que había disponible mayor cantidad de muestra de los carbones activados comerciales, se recomienda iniciar las pruebas de calidad a los carbones comerciales para identificar puntos de mejora, ya que en este proyecto se empezó con el carbón al 40% y se perdió masa significativa durante el proceso. Se tomaron en cuenta estos puntos de mejora en este estudio, para elaborar el carbón al 20% y conseguir un mayor rendimiento.

Realizar un análisis económico a partir de nuevas tecnologías químicas que permitan la producción de carbón activado a mayor escala y a menor costo. Utilizar softwares de simulación de procesos químicos en plantas (Ej.: Aspen Plus).

Realizar un estudio de las variables termodinámicas y cinéticas que mejoren la capacidad de adsorción del carbón activado de palma para la identificación de aplicaciones en la industria nacional.

BIBLIOGRAFÍA

- Adewumi, Al-Azzawi, M., Bowtell, L., Hancock, K., & Preston, S. (2021). Addition of activated carbon into a cattle diet to mitigate GHG emissions and improve production. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(15), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su13158254>
- Geisendorf, S., & Pietrulla, F. (2018). The circular economy and circular economic concepts—a literature analysis and redefinition. *Thunderbird International Business Review*, *60*(5), 771–782. <https://doi.org/10.1002/tie.21924>
- Lai, J. Y., & Ngu, L. H. (2022). Techno-economic feasibility study for concurrent activated and modified palm kernel shell–derived activated carbon. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *0123456789*. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03520-y>
- Nizamuddin, S., Shrestha, S., Athar, S., Ali, B. S., & Siddiqui, M. A. (2016). A critical analysis on palm kernel shell from oil palm industry as a feedstock for solid char production. *Reviews in Chemical Engineering*, *32*(5), 489–505. <https://doi.org/10.1515/revce-2015-0062>
- Ojeda, J. B. (2009). Uso del Cuesco de la Palma Africana en la fabricación de Adoquines y Bloques de Mampostería. *Energy and Technology for the Americas: Education, Innovation, Technology and Practice*, 1–10.
- Peters & Timmerhaus. (2000). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (fifth). McGraw Hill. <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- Rashidi, N. A., & Yusup, S. (2017). A review on recent technological advancement in the activated carbon production from oil palm wastes. *Chemical Engineering Journal*, *314*, 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.059>
- Sol, B. (2021). *Ecuador: nueva ley de palma promueve la producción de aceite pero deja inconforme al sector ambiental*. Mongabay. <https://es.mongabay.com/2020/09/ley-de-palma-en-ecuador-promueve-aceite-genera-temor-en-comunidades/amp/>

- Torres Pérez, C. I., & Quintero Lopez, L. A. (2019). Análisis de residuos sólidos de palma africana, como alternativa de aprovechamiento de energías renovables en el departamento del Cesar. *Ingenierías USBMed*, 10(1), 8–18. <https://doi.org/10.21500/20275846.3662>
- Van-Dam J. (2016). Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa* Oil Palm By-Products as Biomass Commodities. *Palmas, Especial T*, 149–156.
- I. (2009). A simple method for the determination of surface area and activity of activated carbon. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 91(5), 955–962. <https://doi.org/10.1080/02772240802615116>
- Alkhatib, A. J., & al Zailaey, K. (2015). MEDICAL AND ENVIRONMENTAL APPLICATIONS OF ACTIVATED CHARCOAL: REVIEW ARTICLE. *European Scientific Journal*, 11(3).
- Castellar, G., Angulo, E., Zambrano, A., & Charris, D. (2013). Equilibrio de adsorción del colorante azul de metileno sobre carbón activado. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 263–271.
- Castillo, J., & Illescas, R. (2015). *Manual de prácticas de laboratorio: Química orgánica y aplicada* (División de Ciencias e Ingeniería, Ed.; 1st ed., Vol. 1). Universidad de Quintana Roo. https://www.uqroo.mx/lab_quimica/archivos/manual_qoya_uqroo.pdf
- Choy Er, A., Begum, H., A Ferdous Alam, A. S., & Er, A. C. (2015). Malaysian oil palm industry: Prospect and problem WFL Publisher Science and Technology Malaysian oil palm industry: Prospect and problem. *Agriculture & Environment*, 13(2), 143–148. <https://www.researchgate.net/publication/281275048>
- García, J. R., Sedran, U., Zaini, M. A. A., & Zakaria, Z. A. (2018). Preparation, characterization, and dye removal study of activated carbon prepared from palm kernel shell. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(6), 5076–5085. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8975-8>

- Gro Intelligence. (2016, December 7). *Palm Oil: Growth in Southeast Asia Comes with a High Price Tag*. <https://Gro-Intelligence.Com/Insights/Palm-Oil-Production-and-Demand>.
- Hidalgo, C., & Rivera, S. (2017). “*Obtención de carbón activado a partir del bagazo del café como una propuesta de utilización del residuo de una industria cafetera*” [Tesis de Grado para Ingeniero Químico, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/42515>
- INEN. (1995). *Requisitos carbón activado INEN 1995*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1991.pdf>
- INEN. (2013a). *Cenizas totales INEN 1987:2013*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1987.pdf>
- INEN. (2013b). *Densidad aparente INEN 1986:2013*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1986-1.pdf>
- INEN. (2013c). *Dureza CA INEN 1989:2013*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1989.pdf>
- INEN. (2013d). *Número de yodo INEN 1988:2013*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1988.pdf>
- INEN. (2013e). *Superficie BET INEN 1990:2013*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1990.pdf>
- Kwiatkowski, J. F. (2012). *Activated Carbon/Classifications, Properties and Applications*.
- Marsh, Harry., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated carbon*. Elsevier.
- Mingorance, F., Minelli, F., & le Du, H. (2004). *El cultivo de la palma africana en El Chocó Legalidad Ambiental, Territorial y Derechos Humanos*. https://www.raulzelik.net/images/rztextarchiv/uniseminare/Palma_africana_Choco.pdf

- Morad, Y., Hilali, M., Bazzi, L., & Chaouay, A. (2014). Adsorption of Organic Molecule (acetic acid) on Activated Carbon in Aqueous. *Moroccan Journal of Chemistry*, 2(5), 475–485.
- Perez Valencia, O. (2020). *Eficiencia de Combustión del Cuesco de Palma Africana en un quemador de tiro forzado* [Máster, Universidad Internacional SEK]. <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/3737/1/OLGER%20GUILLERMO%20P%c3%89REZ%20VALENCIA.pdf>
- Potter, L. (2011, October). Palm oil industry in Ecuador. Good business for small farmers? *Eutopia*, 39–54. <https://doi.org/https://doi.org/10.17141/eutopia.2.2010.1028>
- Raja, P., & Barron, A. (2022). BET Surface Area Analysis of Nanoparticles. In *Physical Methods in Chemistry and Nano Science*. LibreTexts Chemistry. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Physical_Methods_in_Chemistry_and_Nano_Science_\(Barron\)/02%3A_Physical_and_Thermal_Analysis/2.03%3A_BET_Surface_Area_Analysis_of_Nanoparticles](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Physical_Methods_in_Chemistry_and_Nano_Science_(Barron)/02%3A_Physical_and_Thermal_Analysis/2.03%3A_BET_Surface_Area_Analysis_of_Nanoparticles)
- Rashidi, N. A., & Yusup, S. (2017). A review on recent technological advancement in the activated carbon production from oil palm wastes. *Chemical Engineering Journal*, 314, 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.059>
- Salman, J. M. (2014). Optimization of preparation conditions for activated carbon from palm oil fronds using response surface methodology on removal of pesticides from aqueous solution. *Arabian Journal of Chemistry*, 7(1), 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.05.033>
- Sevilla. (2009). *MANUAL DEL CARBÓN ACTIVO* (1st ed.). Universidad de Sevilla: Máster en Ingeniería del Agua. www.aguapedia.net
- UAB. (2017, June 15). Las plantaciones de palma aceitera provocan la infertilidad de los suelos tropicales. <https://www.uab.cat/web/sala-de-prensa/detalle-noticia/las-plantaciones->

de-Palma-Aceitera-Provocan-La-Infertilidad-de-Los-Suelos-Tropicales-1345667994339.Html?Noticiaid=1345727879056.

Zaid, C. K., Summers, R. S., Westerhoff, G. P., Leto, B. J., Nowack, K. O., Corwin, C. J., & Passantino, L. B. (2013). *Activated Carbon*.

Dunicz, B. L. (1961). Surface Area of Activated Charcoal by Langmuir Adsorption Isotherm. *Journal of Chemical Education*, 38(7), págs. 357-358. Obtenido de <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ed038p357>

Itodo, A., Itodo, H. U., & Gafar, M. K. (enero de 2010). Estimation of Specific Surface Area using Langmuir Isotherm Method. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 14(4), págs. 141-145. doi:10.4314/jasem.v14i4.63287

Mianowski, A., Owczarek, M., & Marecka, A. (mayo de 2007). Surface Area of Activated Carbon Determined by the Iodine Adsorption Number. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 1(29), págs. 839–850. doi:10.1080/00908310500430901

Vargas, A., Cazetta, A., Kunita, M., Silva, T., & Almeida, V. (2011). Adsorption of methylene blue on activated carbon produced from flamboyant pods (*Delonix regia*): Study of adsorption isotherms and kinetic models. *Chemical Engineering Journal*, 168(2), págs. 722-730. doi:10.1016/j.cej.2011.01.067

APÉNDICES

APÉNDICE A

Estequiometria de soluciones preparadas

A.1 Ácido fosfórico para activación química.

$$\text{Impregnation Ratio: } \frac{2}{1} = \frac{500 \text{ ml sol ácido}}{250 \text{ g muestra}}$$

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$(85\%) V_1 = (20\%)(500 \text{ ml sol ácido})$$

$$V_1 = 117.65 \text{ ml } H_3PO_4$$

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$(85\%) V_1 = (40\%)(500 \text{ ml sol ácido})$$

$$V_1 = 235.29 \text{ ml } H_3PO_4$$

$$V_{Acido} = 117.65 + 235.29 = 352.94 \text{ ml}$$

A.2 Hidróxido de sodio (NaOH 0.1N) para lavado y titulación.

$$0.1 \text{ N NaOH} = \frac{0.1 \text{ eq - NaOH}}{1 \text{ L sol}} \times \frac{40 \text{ g NaOH}}{1 \text{ eq - NaOH}} \times \frac{100 \text{ g sol}}{97 \text{ g NaOH}} \times 2 \text{ L} = 8.2474 \text{ g}$$

A.3 Ácido acético 0.5 M para Isoterma de Langmuir.

$$CH_3COOH: PM = 60.052 \frac{\text{g}}{\text{mol}}; \rho = 1.05 \frac{\text{g}}{\text{ml}}; \% \frac{m}{m} = 99.8\%$$

$$1.05 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} * \frac{99.8 \text{ g } CH_3COOH}{100 \text{ g sol}} * \frac{1 \text{ mol } CH_3COOH}{60.052 \text{ g } CH_3COOH} = 17.45 \frac{\text{mol}}{\text{L}} = 17.45 \text{ M}$$

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$(17.45 M) V_1 = (0.5 M)(1500 \text{ ml sol ácido})$$

$$V_1 = 42.97 \text{ mL } CH_3COOH$$

A.4 Preparación y estandarización de tiosulfato de sodio 0.1 N

$$\frac{24.82 \text{ g } Na_2S_2O_7}{1 \text{ L}} * \frac{1 \text{ eq}}{312 \text{ g } Na_2S_2O_7} * \frac{1 \text{ Na - eq}}{1 \text{ eq}} = 0.112 \text{ N}$$

$$N_2 = 20.39 * \frac{(0.2007 \text{ g } K_2Cr_2O_7)}{36.2 \text{ ml } Na_2S_2O_7} = 0.113 \text{ N}$$

A.5 Estandarización solución indicadora de yodo 0.1 N

$$N_1 = \frac{24.9 \text{ ml } Na_2S_2O_7}{25} * (0.113 \text{ N}) = 0.1125 \text{ N}$$

A.6 Ácido clorhídrico (HCl) 5%

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$(37\%) V_1 = (5\%)(100 \text{ ml sol ácido})$$

$$V_1 = 13.51 \text{ ml HCl}$$

A.7 Azul de metileno

$$\frac{0.10 \text{ g}}{1 \text{ L sol}} * \frac{1000 \text{ mg}}{\text{g}} = 100 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 100 \text{ ppm}$$

$$\frac{0.15 \text{ g}}{1000 \text{ ml}} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} * \frac{1000 \text{ mg}}{\text{g}} = 150 \text{ ppm}$$

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$(150 \text{ ppm}) V_1 = (150 \text{ ppm})(100 \text{ ml})$$

$$V_1 = 10 \text{ ml AM}$$

APÉNDICE B

B.1 Pretratamiento de materia prima



B.2 Preparación de soluciones



B.3 Activación química

- Impregnación de ácido.

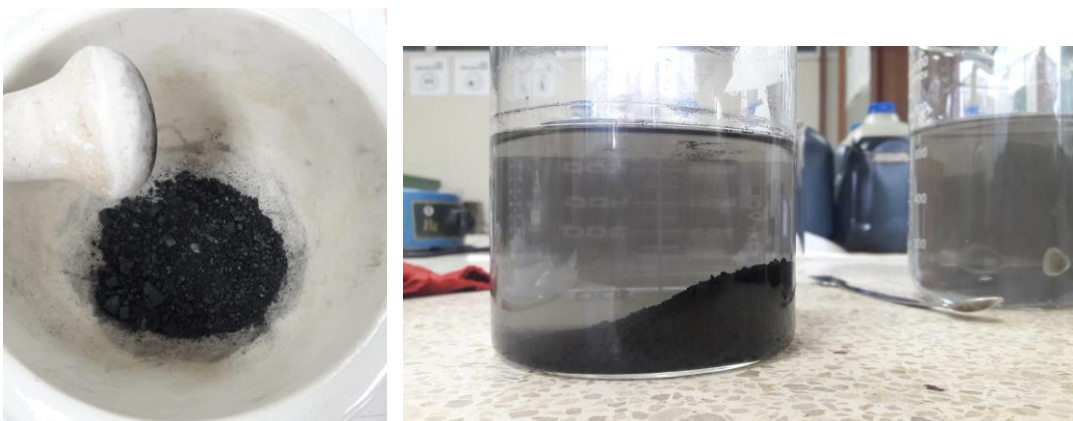




- Calcinación a 500°C



- Triturado y lavado caliente.





- Neutralización del pH del carbón.





- Evaporación del agua de lavado.



B.4 Pruebas de calidad

- Humedad



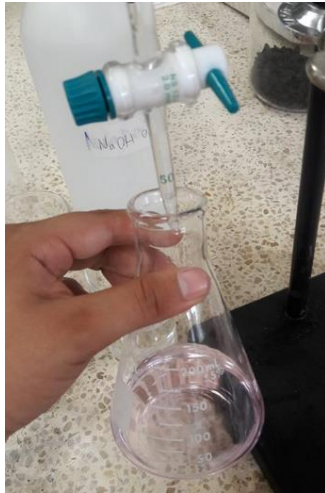
- Densidad aparente



- Cenizas totales

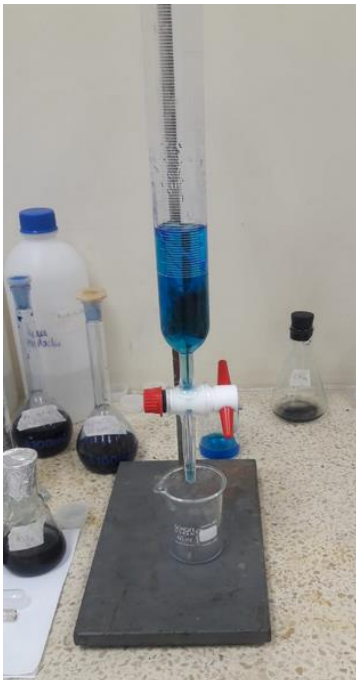


- Isoterma de Langmuir



- Absorción de azul de metileno





- Poder decolorante





