

Síntesis de carbón activado a partir de cáscara de nuez de palma africana para la remoción de dodecibencenosulfonato de sodio (SDBS) en aguas de producción de un campo de petróleo colombiano

Sindy Carolina Morales Becerra y Andrea Carolina Prada Velasquez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Adan Yovani León Bermúdez

Doctor en Ingeniería Química

Codirectores

Sandra Judith García Vergara

Doctor en Ingeniería Metalúrgica

Sergio Fernando Castellano Amador

Magister en Ingeniería de Petróleos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A Dios por permitirme llegar hasta este punto de mi vida

A mis padres, por su incondicional apoyo durante toda mi carrera

A mis hermanos, por ser mi apoyo en medio del caos

A mi abuela Sol, por siempre creer en mí y demostrarme lo orgullosa que esta de mi

A Sindy, por ser mi compañera de tesis y apoyo en todas las adversidades

A Alejita, por ser mi compañera a mitad de la carrera y un buen complemento en nuestras clases

A mi familia por darme el apoyo de seguir

Andrea Prada

Dedicatoria

A Dios porque siempre estuvo a mi lado guiándome

A mi papá porque fue mi motivo día a día para continuar

A mis hermanos y a mi madre, por su amor incondicional y por siempre creer en mí

A Cheche, Isa y Sarita, por su apoyo, por creer en mí y por estar a mi lado en cada paso

A Andrea, porque decidió recorrer este camino a mi lado y ser mi apoyo incondicional

A la Doctora Elcida porque fue la luz que me guio y siempre tuvo un abrazo en el momento
necesario.

A mis hijas, Alaska y Nala, por acompañarme siempre, llenarme de fuerza y recordarme que
todo esfuerzo vale la pena.

Sindy Morales

Agradecimientos

El autor de este trabajo expresa agradecimientos a:

- La Universidad Industrial de Santander.
- La Escuela de Ingeniería de Petróleos.
- El Grupo de investigaciones en corrosión.
- El Centro de investigaciones en catálisis.
- El doctor Adan León, Michell Andrey Jiménez y Julián Sanabria por su colaboración y apoyo en este proyecto.

• Los autores agradecen a la Universidad Industrial de Santander (UIS, Colombia) por su apoyo a través del proyecto 4241, y al “Ministerio de Ciencia y Tecnología (Minciencias)” y a la “Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH)” a través del proyecto 1102-1035-92931 contrato 036 2023.

Tabla de contenido

Introducción	14
1 Objetivos	16
1.1 Objetivo general.....	16
1.2 Objetivos específicos	16
2 Estado del arte.....	17
2.1 Carbones activados de cuesco de palma	17
2.1.1 Carbón activado.....	17
2.2 Adsorción de surfactantes con carbones activados	19
2.3 Importancia del tratamiento de aguas residuales en la industria petrolera	21
2.3.1 Aguas de producción CEOR SDBS	21
2.4 Fenómenos de sorción.....	23
2.4.1 Adsorción	23
2.4.2 Absorción	24
2.4.3 Desorción	24
2.5 Isotermas de adsorción.....	24
2.5.1 Análisis de adsorción por método BET.....	25
2.5.1.1 Modelo de Langmuir	27
2.5.1.2 Modelo de Freundlich.....	28

2.5.1.3	Modelo de Temkin.....	29
2.6	Factores que afectan la capacidad de adsorción	30
2.7	Cáscara de nuez de palma africana como materia prima	31
2.7.1	Composición y estructura de la cáscara de nuez de palma africana.....	31
2.7.2	Propiedades y características de la cáscara de nuez de palma africana	31
2.8	Antecedentes históricos del uso del agua de producción contaminada con SDBS.	32
2.8.1	Tratamiento de aguas	32
2.8.2	Transformación de ABS a LAS (1930-1960)	34
2.8.3	Consolidación y primeras evaluaciones toxicológicas (finales 1960-1980)	35
2.8.4	Finalidad ambiental y sorción (1990-2000)	35
2.8.5	Caracterización integral del agua de producción y tratamiento (2004-2010)	35
2.8.6	Reutilización del agua de producción y control de surfactantes (2010-2020)	36
2.8.7	Avances actuales (2021-2025): emulsiones, floculación y naturaleza basada en s soluciones	36
2.9	Aplicaciones en la industria petrolera colombiana	36
2.9.1	Tratamiento de aguas de producción.....	36
2.9.2	Mejora de la calidad del agua.....	37
2.9.3	Cumplimiento de regulaciones ambientales.....	37
2.10	Fenómenos de adsorción	37

3	Diseño metodológico	38
3.1	Síntesis de carbones activados a partir de la cáscara de nuez de palma africana ...	38
3.1.1	Diseño experimental.....	40
3.1.2	Proceso y equipo	40
3.1.3	Procedimiento.....	42
3.1.3.1	Impregnación	43
3.1.3.2	Activación.....	43
3.1.3.3	Lavado	46
3.2	Evaluar la eficiencia de adsorción de los carbones activados sobre la remoción de SDBS presente en muestras de aguas de producción de un campo de petróleo colombiano mediante espectroscopia UV-Vis	47
3.2.1	Equipo	47
3.2.2	Procedimiento.....	48
3.2.2.1	Preparación de la solución salina sintética (Salmuera).	48
3.2.2.2	Preparación de la solución madre de SDBS.	49
3.2.2.3	Construcción de la curva de calibración UV-VIS.	49
3.2.2.4	Ensayos de adsorción por lote (batch).	49
3.2.2.5	Separación sólido-líquido y análisis por UV-VIS.	49
4	Análisis de Resultados	50
4.1	Síntesis y caracterización del carbón	50

4.2	Análisis estadístico.....	52
4.2.1	Análisis del porcentaje de carbón activado obtenido	52
4.2.2	Análisis de la remoción del SDBS	56
4.3	Caracterización BET.....	60
4.4	Análisis de adsorción	63
4.4.1	Adsorción del carbón activado con isothermas de adsorción	64
4.4.2	Adsorción del carbón activado a diferentes tiempos.....	66
4.5	Análisis General de Resultados	68
4.5.1	Optimización de la Síntesis y Desarrollo Textural.....	69
4.5.2	Eficiencia en la Remoción del Surfactante (SDBS).....	69
4.5.3	Mecanismo de Adsorción y Modelado	70
5	Conclusiones	71
6	Recomendaciones	72
	Referencias Bibliográficas	73
	Apéndices.....	80

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Esquema diseño experimental</i>	40
Figura 2. <i>Partes del pirolizador: a) Tapa del reactor, b) Cuerpo del reactor, c) Vaso recolector, d) Pirolizador.</i>	42
Figura 3. <i>Rampa de temperatura a 300°C y 400°C</i>	44
Figura 4. <i>Espectrofotómetro Ultravioleta Visible</i>	48
Figura 5. <i>Diagrama de Pareto rendimiento CA</i>	53
Figura 6. <i>Diagrama de efectos principales del rendimiento CA</i>	54
Figura 7. <i>Diagrama de interacción para rendimiento CA</i>	55
Figura 8. <i>Diagrama de Pareto estandarizada para rendimiento SDBS</i>	57
Figura 9. <i>Diagrama de efectos principales del rendimiento SDBS</i>	58
Figura 10. <i>Diagrama de interacción para rendimiento SDBS</i>	59
Figura 11. <i>Curvas de adsorción/desorción de N₂ de los carbones activados.</i>	61
Figura 12. <i>Curva de calibración</i>	63
Figura 13. <i>Espectros de adsorbancia UV-Vis de carbón activado.</i>	64
Figura 14. <i>Porcentaje de adsorción a diferentes tiempos</i>	67

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Casos de tratamiento de aguas de producción</i>	22
Tabla 2. <i>Isotermas de fisisorción</i>	25
Tabla 3. <i>Compuestos disueltos en agua de producción</i>	32
Tabla 4. <i>Pesos iniciales de muestra y elementos asociados al proceso de pirólisis</i>	45
Tabla 5. <i>Pesos finales de muestra y elementos asociados al proceso de pirólisis.</i>	45
Tabla 6. <i>Condiciones de preparación y porcentaje de rendimientos de las muestras de carbón activado</i>	50
Tabla 7. <i>Condiciones óptimas para obtener un mayor rendimiento de Carbón Activado</i>	55
Tabla 8. <i>Condición optima SDBS</i>	59
Tabla 9. <i>Caracterización BET de los carbones activados sintetizados</i>	60
Tabla 10. <i>Parámetros de las isotermas de adsorción CA (1.8% - 400°C - 60min)</i>	65

Lista de Apéndices

Apéndice A. <i>Parámetros para la isoterma del modelo de Langmuir en la adsorción del SDBS.</i>	80
Apéndice B. <i>Isotermas de adsorción según el modelo matemático de Langmuir</i>	81
Apéndice C. <i>Parámetros para la isoterma del modelo de Freundlich en la adsorción del SDBS</i>	82
Apéndice D. <i>Isotermas de adsorción según el modelo matemático de Freundlich</i>	83
Apéndice E. <i>Parámetros para la isoterma del modelo de Temkin en la adsorción del SDBS</i>	84
Apéndice F. <i>Isotermas de adsorción según el modelo matemático de Temkin</i>	85

Resumen

Título: Síntesis de carbón activado a partir de cáscara de nuez de palma africana para la remoción de dodecilsulfonato de sodio (SDBS) en aguas de producción de un campo de petróleo colombiano*

Autores: Sindy Carolina Morales Becerra y Andrea Carolina Prada Velasquez**

Palabras Clave: Carbón activado, Cuesco de palma africana, Adsorción, Análisis BET, SDBS (dodecilsulfonato de sodio), Aguas de producción petrolera.

Descripción:

En el presente trabajo se desarrolló una investigación orientada a la síntesis y caracterización de carbón activado a partir de cáscara de nuez de palma africana para la remoción del surfactante aniónico dodecilsulfonato de sodio (SDBS) en aguas de producción del sector petrolero, abordando una problemática ambiental relevante en la industria de los hidrocarburos en Colombia. Se plantea el aprovechamiento de un residuo agroindustrial abundante como materia prima económica y sostenible para producir carbones activados con alta área superficial y estructura porosa, mediante procesos de impregnación con ácido fosfórico y pirólisis controlado, seguido de la caracterización textural del material mediante análisis BET. Posteriormente, se evaluó la eficiencia de adsorción del material sintetizado en soluciones salinas contaminadas con SDBS, empleando espectroscopía UV-Vis y modelos de isothermas de adsorción (Langmuir, Freundlich y Temkin) para describir el comportamiento del sistema. Los resultados evidenciaron que las condiciones de activación a 400 °C, 60 minutos y una relación de impregnación de 1,8% permiten obtener carbones activados con mayor desarrollo textural y capacidad de adsorción. El ajuste experimental mostró que la isoterma de Langmuir presentó el mejor coeficiente de determinación ($R^2 = 0,967$), confirmando un proceso de adsorción en monocapa con sitios activos homogéneos. Estos hallazgos no solo confirman la viabilidad técnica del cuesco de palma africana como precursor para la producción de carbones activados de alto desempeño, sino que también lo posicionan como una alternativa eficaz y ambientalmente sostenible para la remoción de surfactantes aniónicos como el SDBS, favoreciendo procesos de reúso y mitigación de impactos ambientales.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Adán Yovani León Bermúdez Doctor en Ingeniería Química. Codirector: Sandra Judith García Vergara Magister en Ingeniería Metalúrgica., Sergio Fernando Castellano Amador Magister en Ingeniería de petróleoos.

Abstract

Title: Synthesis of activated carbon from African palm nut shells for the removal of sodium dodecylbenzenesulfonate (SDBS) in production water from a Colombian oil field*

Author: Sindy Carolina Morales Becerra y Andrea Carolina Prada Velasquez**

Key Words: Activated carbon, African palm kernel, Adsorption, BET analysis, SDBS (sodium dodecylbenzenesulphonate), Oil production water.

Description: This study developed research aimed at the synthesis and characterization of activated carbon from African palm nut shells for the removal of the anionic surfactant sodium dodecylbenzenesulfonate (SDBS) in production water from the oil sector, addressing a significant environmental problem in the hydrocarbon industry in Colombia. The study proposes the use of an abundant agro-industrial waste product as an economical and sustainable raw material for producing activated carbons with a high surface area and porous structure, through impregnation with phosphoric acid and controlled pyrolysis, followed by textural characterization of the material using BET analysis. Subsequently, the adsorption efficiency of the synthesized material was evaluated in SDBS-contaminated saline solutions, using UV-Vis spectroscopy and adsorption isotherm models (Langmuir, Freundlich, and Temkin) to describe the behavior of the system. The results showed that activation conditions at 400 °C for 60 minutes and an impregnation ratio of 1.8% yielded activated carbons with greater textural development and adsorption capacity. The experimental adjustment showed that the Langmuir isotherm presented the best coefficient of determination ($R^2 = 0.967$), confirming a monolayer adsorption process with homogeneous active sites. These findings not only confirm the technical viability of African palm kernel shells as. The results showed that activation conditions at 400 °C, 60 minutes, and an impregnation ratio of 1.8% yield activated carbons with greater textural development and adsorption capacity. The experimental adjustment showed that the Langmuir isotherm presented the best coefficient of determination ($R^2 = 0.967$), confirming a monolayer adsorption process with homogeneous active sites. These findings not only confirm the technical viability of African palm kernel as a precursor for the production of high-performance activated carbons, but also position it as an effective and environmentally sustainable alternative for the removal of anionic surfactants such as SDBS, favoring reuse processes and mitigation of environmental impacts.

* Thesis study

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Adán Yovani León Bermúdez Doctor en Ingeniería Química. Codirector: Sandra Judith García Vergara Magister en Ingeniería Metalúrgica., Sergio Fernando Castellano Amador Magister en Ingeniería de petróleoos.

Introducción

El uso de carbón activado como agente adsorbente para la remoción de contaminantes se deriva de residuos agrícolas, en donde la cáscara de nuez de palma africana ha venido mostrando un gran interés como alternativa sostenible y viable para la remoción de especies orgánicas e inorgánicas en aguas de producción de campos petroleros colombianos.

El carbón activado se caracteriza por tener cavidades o poros en su estructura, y estas características contribuyen a sus propiedades texturales. Dichas propiedades, a su vez, determinan la superficie específica del material y su capacidad para adsorber sustancias, es decir, los carbones activados derivados de materiales orgánicos con alto contenido de carbono son los más comúnmente sintetizados para este propósito (León et al. 2021).

Este estudio plantea la síntesis de carbón activado a partir de cáscaras de nuez de palma africana mediante técnicas de pirólisis y activación química, en presencia de nitrógeno. Este material es una biomasa residual agrícola abundante en Colombia que brinda una materia prima de bajo costo y disponible para la producción de carbón activado. La pirólisis controlada de la cáscara de nuez de palma con activación química utilizando agentes oxidantes como el ácido fosfórico, seguida de temperaturas reguladas, da como resultado un material poroso con una alta área superficial y una estructura adecuada para la adsorción de diferentes compuestos.

El carbón activado se evaluó para su eficacia en la remoción de dodecilsulfonato de sodio (SDBS) en aguas de producción de campos petroleros colombianos. El SDBS es un surfactante aniónico biodegradable comúnmente utilizado en la industria petrolera y puede representar un riesgo ambiental significativo si se libera en aguas superficiales o subterráneas.

La capacidad de adsorción del carbón activado se determinó mediante experimentos de equilibrio de adsorción y espectroscopia UV-Vis. Además, se estudiaron los factores que afectan la eficiencia de adsorción, la concentración inicial de SDBS y la temperatura.

Los resultados obtenidos en este estudio proporcionaron información sobre la viabilidad de utilizar carbón activado derivado de cáscaras de nuez de palma africana para la remoción de SDBS en aguas de producción de campos petroleros colombianos. Aportando una alternativa de tratamiento que combina bajo costo, disponibilidad de materia prima y sostenibilidad ambiental. Por lo tanto, el presente trabajo busca no solo demostrar la viabilidad técnica del material, sino también fomentar el aprovechamiento de residuos agrícolas en la mitigación de problemáticas ambientales asociadas a la industria petrolera en Colombia.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Sintetizar carbón activado a partir de cáscara de nuez de palma africana para la remoción de dodecilsulfonato de sodio (SDBS) en aguas de producción de un campo de petróleo colombiano.

1.2 Objetivos específicos

Sintetizar carbones activados a partir de la cáscara de nuez de palma africana bajo la sensibilización de temperatura de pirólisis, relación de impregnación ácida y tamaño de partícula.

Evaluar la eficiencia de adsorción de los carbones activados sobre la remoción de SDBS presente en muestras de aguas de producción de un campo de petróleo colombiano mediante espectroscopia UV-Vis.

Elaborar las isotermas de adsorción de los carbones activados de cáscara de nuez para la remoción de SDBS a partir de la información obtenida en pruebas experimentales.

2 Estado del arte

2.1 Carbones activados de cuesco de palma

El cuesco de palma, también conocido como cascara de nuez de palma o cáscara de palmiste, es un subproducto sólido obtenido en grandes cantidades del procesamiento del aceite de palma, del cual se extrae el fruto y el aceite. En Colombia, la producción de aceite de palma durante 2024 alcanzó 1,72 millones de toneladas, lo que representó una disminución del 6,6 % respecto a los 1,84 millones de toneladas registradas en 2023 (Forbes, 2025). Este se consideraba un desecho de difícil disposición, a través del tiempo ha cobrado interés por su alta dureza, contenido de carbono, baja cantidad de ceniza, compuesto principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, esto lo convierte en objeto principal para la producción de carbón activado. Este material presenta una alternativa sostenible para el aprovechamiento de residuos agroindustriales y aplicaciones en tratamientos de aguas ayudando a la remoción de contaminantes.

2.1.1 Carbón activado

“El carbón activado es un material con una amplia variación de área superficial, estructura microporosa, sencilla regeneración y una química de superficie que permite la formación de una capa de partículas, debido a la presencia de grupos carboxílicos, fenólicos, cetonas, quinonas, hidroquinonas y aldehídos que le dan la característica de material adsorbente” (Asimbaya et al. 2015). Las propiedades del carbón activado están estrechamente relacionadas con el material del que se obtiene, y su estructura puede variar significativamente según la materia prima utilizada. Este material versátil encuentra una amplia gama de aplicaciones industriales, destacando su papel

en el tratamiento de efluentes. Cuando se combina con técnicas adicionales como la rizofiltración y la precipitación química, el carbón activado contribuye a alcanzar los estándares permitidos para diversos contaminantes presentes en aguas residuales.

(León et al., 2022) sintetizaron carbón activado a partir de cáscara de cacao para evaluar su capacidad como adsorbente de sales, específicamente azul de metileno y cloruro férrico, en solución acuosa, el cuesco se tamizó por mallas de distinto tamaño (8 – 20, 40 -60 y 80 – 120), a partir de los tamaños seleccionados se produjo carbones activados mediante un proceso termoquímico controlado. Se elaboró un diseño experimental 2^3 , teniendo el área superficial como variable de respuesta y la temperatura (420 – 480 °C), la relación de impregnación de 1 – 1.5 y el tiempo de reacción (30 -120 min) como variables independientes, los resultados obtenidos mediante absorción UV-Vis arrojó que la eficiencia en la eliminación de azul de metileno (89.8% al 97.1%) y cloruro férrico (82.3% al 94.4%) es mayor en carbones con un área superficial.

(Mohammed et al., 2015) prepararon y caracterizaron hojas, tallo y cascara de piña para la obtención de carbón activado impregnados con $ZnCl_2$ y sometidos a pirólisis (500 °C, 1 h), teniendo así un carbón activado con un área superficial de 914.67 m^2/g y una capacidad máxima de adsorción de 288.34 mg/g para azul de metileno, ajustado al modelo de Langmuir con un $R^2=0.969$. Estos resultados evidenciaron el potencial de los residuos de la piña como materia prima de bajo costo y alta eficiencia para la remoción de colorantes en aguas residuales.

(Siaw et al., 2021) obtuvieron carbones activados a partir de cuesco de palma africana, los cuales presentaron una eficiencia máxima de remoción de Rodamina B de 96.43% con PKSAC- $ZnCl_2$ (0.5g) y de 99.54% con PKSAC- H_2SO_4 (1.0 g). Asimismo, la relación 1.5 g:10 ppm alcanzó

un 99.88% de eliminación a los 180 minutos, mientras que el ajuste cinético evidenció que el proceso seguía un modelo de pseudo segundo orden.

(Jun et al., 2021) evidenciaron que el carbón activado de palma modificado con óxido de hierro (Fe/PKS-AC) mostró la mayor eficiencia de remoción de color (93,2%), mientras que el material zeolita -Fe/PKS-AC reportó una mayor eficiencia de degradación (62,6%) y conservó su capacidad de adsorción durante cinco ciclos con una disminución mínima del 5,6%.

Hay diferentes adsorbatos que pueden ser absorbidos con carbones activados de este tipo; los colorantes (Rodamina B, Azul de metileno, Naranja de metilo, Cristal violeta), metales pesados (Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{6+} , Ni^{2+} , Cu^{2+}), contaminantes orgánicos persistentes (fenoles, benceno, compuestos aromáticos, pesticidas), surfactantes y tensoactivos (SDBS, SDS), sales inorgánicas (nitratos, fosfatos, amonio) y aguas residuales completas (POME, lixiviados de vertedero, efluentes).

2.2 Adsorción de surfactantes con carbones activados

Los surfactantes han sido estudiados como adsorbatos debido a su presencia frecuente en aguas residuales industriales y domésticas. Particularmente, los aniónicos como el dodecilsulfonato de sodio (SDBS) y el dodecilsulfato de sodio (SDS), mostrando interacciones con carbones activados y materiales mesoporosos (Valizadeh et al., 2016). De igual manera, se han evaluado biochars modificados con surfactantes aniónicos, como el SDS, para potenciar la eliminación de contaminantes del agua, demostrando la versatilidad de estos compuestos como agentes de adsorción y adsorbatos (Liu & Zhu, 2024).

El uso de materiales alternativos a los carbones activados ha impulsado el desarrollo de metodologías innovadoras en la remoción de surfactantes. Un ejemplo de ello es la modificación de arcillas como la bentonita con SDBS ha demostrado mejorar su capacidad de remoción de colorantes y contaminantes orgánicos en soluciones acuosas (Wang et al., 2023). Asimismo, biochars tratados con surfactantes han demostrado resultados óptimos en la adsorción de contaminantes, reflejando la capacidad de estos materiales para adaptarse a diferentes matrices de agua (Yaseen et al., 2022).

El cuesco de palma africana (PKS) se ha consolidado como una materia prima viable para la producción de carbón activado, debido a su abundancia en regiones productoras de palma y a sus propiedades fisicoquímicas alcanzadas luego de la activación. Rashidi (2019) demostró que los carbones derivados de cáscara de palmiste poseen alta área superficial y una distribución porosa favorable para la adsorción de CO_2 de 2,13 mmol/g esto dio como resultado un rendimiento del producto del 25,15% en peso.

(Noh et al.,2020) desarrollaron nanofibras de sílice mesoporosa (MSF) como un material innovador para la separación de SDBS. Estas fueron sintetizadas mediante electrohilado, empleando ortosilicato de tetraetilo, un surfactante y un polímero plantilla. Las MSF obtenidas presentaron una alta área superficial de 875.2 m^2/g , gran volumen de poro y distribución homogénea del tamaño de poros. A su vez, los poros internos o la superficie externa fueron modificados con sales de amonio cuaternario, favoreciendo la afinidad con el agua e incrementando la interacción electrostática con el SDBS. Como resultado, el adsorbente basado en MSF mostró una capacidad de adsorción superior (158,98 mg/g) en comparación con adsorbentes convencionales.

2.3 Importancia del tratamiento de aguas residuales en la industria petrolera

El tratamiento de aguas residuales en la industria petrolera es un desafío tecnológico continuo en la búsqueda de soluciones ambientales sostenibles. En este contexto la investigación de León y compañía (2023) presenta un aporte significativo al estudiar la remoción de compuestos orgánicos mediante el uso de carbón activado a base de cáscara de cacao con nanopartículas de SiO₂. Este estudio explora la eficacia de esta combinación en el tratamiento de aguas residuales destacando su potencial para mejorar la calidad del agua y mitigar los *ón*

2.3.1 Aguas de producción CEOR SDBS

En la tabla 1, se muestra un caso estudio nacional La planta SAARA donde se procesan aguas de producción de los campos Quifa y Rubiales para acondicionarlas y destinarlas a riego agrícola (proyecto ProAgrollanos). y un caso internacional de tratamiento de aguas de producción que se llevó a cabo en la cuenca del Permian (Texas/Nuevo México), iniciativas industriales y pilotos demostraron que la combinación de pretratamiento y tecnologías de desalación por membranas puede producir permeados con TDS comparables a estándares de reúso (recuperaciones reportadas en pilotos de 80–92 %), y eliminación de O&G >90 %. Estas experiencias sirven como referencia para proyectos de reúso a escala industrial.

Tabla 1.

Casos de tratamiento de aguas de producción

Caso	Tecnología	Parámetros de mejora en calidad del agua	Valores reportados
Planta (Quifa & Rubiales) Frontera (2024).	SAARA Energy. Pretratamiento: separación de aceite libre. Tratamiento principal: Ósmosis inversa (RO). Post- tratamiento: ajuste de calidad para riego (pH y desinfección).	Reducción de sólidos totales disueltos (TDS). Eliminación de aceite y grasa. Sólidos y turbidez	En plantas RO industriales la recuperación suele estar entre 50–80 % (depende TDS y pretratamiento).
Permian Basin -EE. UU (Xu et al., 2022).	Desalinización por membranas (multietapa). Evaporación/ evaporadores de múltiple efecto.	TDS y conductividad. Remoción de O&G y sólidos.	Consiguieron recuperaciones de permeado del 80–92 % y permeados con TDS en rango de

Electrodialisis inversa, Recuperación / agua potable o
tratamiento químico rendimiento industrial tras
avanzado, recuperación tratamiento
de recursos (litio) adicional
integrada a la cadena.

2.4 Fenómenos de sorción

La sorción es el proceso mediante el cual un material poroso, como el carbón activado, capturas contaminantes presentes en fase gaseosa o líquida, esto ocurre por medio de dos mecanismos principales: adsorción y absorción.

2.4.1 Adsorción

La adsorción es un proceso en el cual átomos, iones o moléculas se fijan sobre la superficie de un sólido. De acuerdo con la teoría de Langmuir, el absorbente cuenta con un número finito de sitios activos, cada uno capaz de retener una sola molécula. Este proceso se da mediante interacciones no covalentes, como enlaces dipolares o de Van der Waals. A pesar de que las moléculas no se adhieren únicamente a puntos específicos, suelen distribuirse de manera homogénea sobre toda la superficie del sólido debido a la influencia generada por dipolos (González & Escobar, 2022).

2.4.2 Absorción

La absorción ocurre cuando el solvente penetra la estructura interna de un material, lo que puede generar posibles cambios dimensionales, variación de coloración, ingreso de microorganismos y migración de compuestos solubles, las cuales pueden comprometer la estabilidad del material Vega Quispe, N. G. (2019).

2.4.3 Desorción

La desorción es el proceso inverso a la adsorción, donde las moléculas retenidas en la superficie del material se liberan nuevamente a la fase líquida o gaseosa. Este proceso sucede cuando cambian las condiciones del sistema (temperatura, pH o concentración) y es fundamental para evaluar la fuerza de unión del adsorbato con el adsorbente, así como para regeneración y reutilización del material (Cheng et al., 2021; Alsawy et al., 2022).

2.5 Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción se establecen como una herramienta fundamental para comprender el comportamiento de los surfactantes en medios porosos. Estas curvas representan gráficamente la relación entre la cantidad de soluto adsorbido sobre la superficie sólida y la concentración del adsorbato en la fase líquida en equilibrio. A partir de su análisis es posible identificar la afinidad del surfactante hacia la superficie o interfase (Kalam et al., 2021).

2.5.1 Análisis de adsorción por método BET

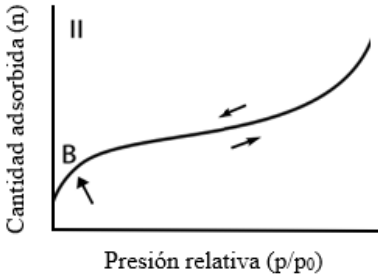
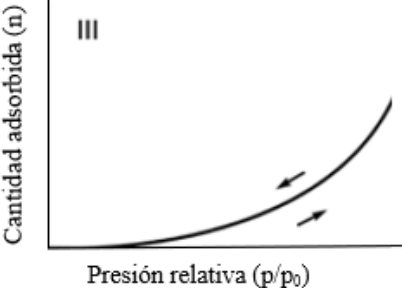
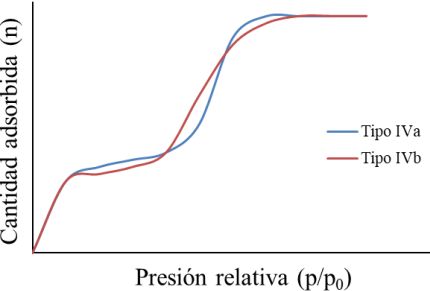
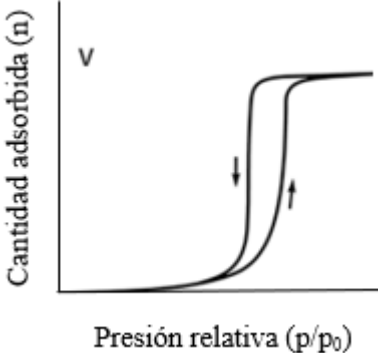
El análisis de adsorción mediante el método BET (Brunauer–Emmett–Teller, 1938) ha sido ampliamente utilizado para determinar el área superficial específica y las propiedades texturales de materiales sólidos, ya que incorpora la posibilidad de la adsorción en múltiples capas.

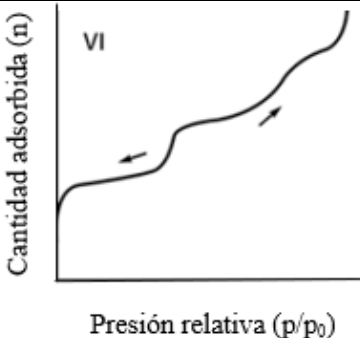
De acuerdo con la clasificación propuesta por la IUPAC (Thommes et al., 2015), las isotermas de fisisorción se agrupan en seis tipos, las cuales se resumen en la tabla 2.

Tabla 2.

Isotermas de fisisorción

Tipo de	Curva	Descripción
isoterma		
Tipo I (a y b)		<p>Característica de materiales microporosos con área externa pequeña. Presenta una curva cóncava y se alcanza un límite de adsorción controlado por el volumen de microporos.</p> <p>Ia) Se asocia con materiales que poseen microporos muy estrechos.</p> <p>Ib) Refleja la existencia de microporos más amplios.</p>

<p>Tipo II</p>		<p>Propia de sólidos no porosos o macroporosos, representa la adsorción en múltiples capas sin límite definido, con un punto B que marca la saturación de la monocapa.</p>
<p>Tipo III</p>		<p>No presenta formación visible de monocapa. Esto se debe a la debilidad de las interacciones adsorbato-adsorbente, y las moléculas tienden a agruparse en los sitios de mayor energía de la superficie.</p>
<p>Tipo IV</p>		<p>Se observa en materiales mesoporosos. La adsorción inicia como en el tipo II y seguidamente ocurre condensación capilar en los poros. Puede mostrar histéresis (IVa) o ser reversible (IVb).</p>
<p>Tipo V</p>		<p>Se observa una isoterma análoga al tipo III en el rango de bajas presiones, la subida abrupta a altas presiones es atribuible al llenado de los poros por condensación, fenómeno común en la adsorción de vapor de agua sobre materiales hidrofóbicos.</p>

Tipo VI		Presenta la adsorción escalonada capa por capa sobre superficies no porosas y muy uniformes. Cada escalón refleja la formación de una nueva capa de adsorbato.
---------	---	--

Este modelo se formula como una ampliación de la teoría de Langmuir (1916), la cual planteaba que la adsorción ocurre en una sola capa molecular; por lo que el enfoque BET resulta más representativo en sistemas reales y permite explicar de manera más precisa la interacción entre las moléculas adsorbidas y la superficie sólida (Raja & Barron, 2022).

Según Xu et al. (2021), una interpretación de las isotermas obtenidas mediante este método aporta información clave sobre el área superficial, la distribución de poros y la naturaleza de la adsorción, aspectos que inciden directamente en la eficiencia de los surfactantes y aditivos empleados en medios porosos.

2.5.1.1 Modelo de Langmuir

Este modelo establece que la adsorción ocurre mediante la formación de una monocapa de moléculas sobre la superficie del absorbente, en el cual todos los sitios disponibles son homogéneos y presentan la misma energía de adsorción, Este modelo asume que cada sitio puede ser ocupado por una sola molécula y que no existen interacciones entre las moléculas adsorbidas, de modo que la capacidad de adsorción alcanza un valor máximo definido cuando la

superficie está completamente cubierta. Este modelo esta descrito matemáticamente en la ecuación (1).

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{Q_{max}K_L} + \frac{C_e}{Q_{max}} \quad (1)$$

Donde:

C_e (mg/L) es la concentración en equilibrio del adsorbato en la fase líquida.

Q_e (mg/g) equivale a la concentración en equilibrio del adsorbato en la fase adsorbida.

Q_{max} (mg/g) es la capacidad máxima de adsorción correspondiente a la conversión completa de la monocapa.

K_L es la constante de Langmuir relacionada con la energía de adsorción y se puede calcular a partir de la pendiente de la gráfica lineal de C_e/Q_e en función de C_e .

2.5.1.2 Modelo de Freundlich

Es una de las isothermas empleadas para describir procesos de adsorción en superficies heterogéneas, puesto que considera que los sitios de adsorción poseen diferentes energías y que la capacidad de retención no se limita a la formación de una monocapa. Establece que la cantidad adsorbida aumenta con la concentración del soluto, siguiendo una relación exponencial, lo que lo hace útil para explicar la adsorción de contaminantes en fase líquida y sólida (Rangabhashiyam & Balasubramanian et al., 2021). El modelo de Freundlich se describe matemáticamente mediante la ecuación (2).

$$\text{Log } Q_e = \text{Log } K_F + \left(\frac{1}{n}\right) \text{Log } (C_e) \quad (2)$$

Donde:

Q_e (mg/g) equivale a la concentración en equilibrio del adsorbato en la fase adsorbida.

C_e (mg/L) es la concentración en equilibrio del adsorbato en la fase líquida.

K_F y n son las constantes empíricas, las cuales se pueden calcular a partir de la pendiente y la intersección de la gráfica lineal de $\log C_e$ en función del $\log Q_e$.

2.5.1.3 Modelo de Temkin

Este modelo busca describir la adsorción considerando los efectos indirectos de las interacciones entre las moléculas adsorbidas y la superficie del adsorbente, proponiendo que la energía de adsorción disminuye de manera lineal a medida que aumenta la cobertura superficial. De acuerdo con la ecuación (3) se aplican dos parámetros fundamentales: la constante de equilibrio de Temkin (K_T), que indica la afinidad del adsorbato hacia el adsorbente, y la constante n_T , relacionada con la variación de la energía en el proceso de adsorción.

$$Q_e = n_T \ln(K_T) + n_T \ln(C_e) \quad (3)$$

Estos parámetros se calculan a partir de la representación lineal de Q_e frente a $\ln(C_e)$, donde Q_e es la capacidad de adsorción en equilibrio y C_e la concentración del adsorbato en equilibrio. Así mismo, la pendiente de la recta permite calcular n_T , mientras que K_T se obtiene a

partir de la exponencial del punto de intersección. El modelo de Temkin es útil en la evaluación de procesos de adsorción que involucran interacciones heterogéneas (RSC Advances, 2023).

2.6 Factores que afectan la capacidad de adsorción

La capacidad de adsorción de un material esta influenciada por múltiples factores que determinan su eficiencia. Uno de los más fundamentales es el tamaño de partícula, ya que la disminución de este incrementa el área superficial disponible y, por consiguiente, mejora el rendimiento del proceso (Zhang et al., 2021). Asimismo, la solubilidad del soluto juega un papel importante, ya que, los compuestos con alta solubilidad en agua suelen presentar menor adsorción, debido a su mayor afinidad por la fase acuosa en comparación con la superficie del adsorbente (Nguyen et al., 2020). Otro aspecto fundamental es el peso molecular del adsorbato; a medida que este aumenta la adsorción tiende a ser más favorable por el mejor ajuste en los poros del adsorbente y la intensificación de las fuerzas de dispersión (Cheng et al., 2022).

De igual forma el pH de la solución condiciona la interacción, al afectar tanto la carga superficial del adsorbente como la especiación del adsorbato, lo que influye directamente en la eficiencia de remoción (Al-Ghouti & Da'ana, 2020). Respecto a la temperatura, en procesos de adsorción física generalmente un aumento reduce la capacidad de adsorción por su carácter exotérmico, mientras que en la adsorción química puede suceder lo contrario (Mokhtari et al., 2021). Por otra parte, la presencia de iones competidores en el medio puede ocupar sitios activos y disminuir de forma significativa la remoción del contaminante objetivo (Liu et al., 2023). Finalmente, el tiempo de contacto, puesto que, a mayor tiempo, la capacidad de adsorción aumenta hasta alcanzar el equilibrio, después del cual ya no se observa un incremento notable (Li et al., 2021).

2.7 Cáscara de nuez de palma africana como materia prima

2.7.1 Composición y estructura de la cáscara de nuez de palma africana

La cáscara de nuez de palma africana, un subproducto de la industria del aceite de palma es una biomasa disponible y económica en Colombia. La composición química de la cáscara de nuez de palma africana varía, pero generalmente consiste en una combinación de celulosa, hemicelulosa, lignina y otros componentes. Estos componentes proporcionan una estructura lignocelulósica que es adecuada para la producción de carbón activado debido a su contenido de carbono y su suficiencia para formar poros durante la pirólisis y la activación. (Moncada et al., 2016).

Los porcentajes de la composición según la literatura oscilan; el contenido de celulosa entre 30% y 50%, hemicelulosa entre el 15% y el 35%, y lignina entre el 20% y el 30%. Esta composición varía dependiendo de la madurez y la diversidad de la nuez de palma africana, así como de los métodos de procesamiento (Sunday Noah, 2022).

2.7.2 Propiedades y características de la cáscara de nuez de palma africana

Además de su composición química, esta posee propiedades físicas y estructurales que la hacen adecuada para la síntesis de carbón activado. Por ejemplo, estudios de microscopía electrónica de barrido han revelado una morfología porosa en la cáscara de nuez de palma africana, con una red de poros que se extiende a lo largo de su estructura fibrosa (Tan et al., 2009). Estos poros proporcionan una superficie específica significativa para la adsorción de contaminantes presentes en las aguas de producción de campos de petróleo.

La cáscara de nuez de palma africana también es conocida por su resistencia mecánica y su baja densidad, lo que la hace fácil de manejar y procesar durante la síntesis de carbón activado. Actualmente, Colombia cuenta con aproximadamente 600.000 a 670.000 hectáreas sembradas de palma de aceite (Fedepalma / UPRA, 2023-2024). Aunque no se dispone de un estudio reciente público que cuantifique exactamente el porcentaje de residuos agrícolas no aprovechados, este residuo podría representar una fuente de materia prima interesante para adsorbentes, carbones activados u otros productos de valor agregado y una opción atractiva desde el punto de vista económico.

2.8 Antecedentes históricos del uso del agua de producción contaminada con SDBS

2.8.1 Tratamiento de aguas

En la tabla 3, se presentan los diferentes compuestos contaminantes disueltos en las aguas de producción con sus respectivas características

Tabla 3.

Compuestos disueltos en agua de producción

Contaminante	Descripción
Materia orgánica	El contenido de carbono orgánico en aguas de producción es variable, con valores reportados desde menos de 0,1 mg/L hasta más de 1.500 mg/L de carbono orgánico total (TOC). Que en su mayoría corresponde a ácidos carboxílicos, ácido fórmico, acético, propanoico,

	<p>butanoico, pentanoico y hexanoico. Asimismo, se han detectado ácidos nafténicos en concentraciones de 10–200 mg/L, y fenoles en el rango de 0,1–23 mg/L, los cuales aportan toxicidad y persistencia en el medio acuático (Hu et al., 2022; Rajbongshi et al., 2024).</p>
Metales pesados	<p>Los metales presentes provienen tanto de la matriz geológica del yacimiento como de aditivos químicos durante las operaciones. Se reportan concentraciones de bario entre 10 y 1.000 mg/L, estroncio entre 1 y 600 mg/L, plomo entre 0,05 y 1,2 mg/L, arsénico entre 0,01 y 0,5 mg/L, y cadmio generalmente por debajo de 0,01 mg/L. Estos elementos son IMP debido a su carácter tóxico, su contribución a la incrustación y a la corrosión (Permian Basin Water Management Report, 2022).</p>
Hidrocarburo	<p>Las fracciones hidrocarbonadas solubles en agua incluyen principalmente benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), además de hidrocarburos alifáticos y aromáticos más pesados en forma emulsionada. Las concentraciones de BTEX varían entre 0,1 y 70 mg/L, con benceno reportado entre 0,01 y 35 mg/L (Rajbongshi et al., 2024; Hu et al., 2022).</p>
Sales	<p>La característica distintiva del agua de producción es su alta salinidad, la cual puede alcanzar valores de 10.000 a 300.000 mg/L, con predominio de cloruros de sodio y calcio y sulfatos en el rango de 10 a</p>

2.000 mg/L. Este elevado contenido salino condiciona la corrosividad del fluido y su impacto ambiental (Permian Basin Water Management Report, 2022).

Surfactantes (LAS/SDBS y otros aniónicos)	Los surfactantes, especialmente los alquilbencenos sulfonados lineales (LAS) y el dodecilbenceno sulfonato de sodio (SDBS), ingresan al agua de producción para las operaciones de recuperación secundaria, tratamiento químico y control de emulsiones. En aguas de producción se han reportado concentraciones de 0,5 a 15 mg/L, y en campos con inyección intensiva de químicos se han alcanzado valores de hasta 50 mg/L (Xu et al., 2021).
---	---

2.8.2 Transformación de ABS a LAS (1930-1960)

Debido a su baja biodegradabilidad y formación de espuma, los alquilbencenos sulfonados (ABS) se añadieron en el 1930 como detergentes sintéticos, pasado esto a inicios de 1960 la industria parte hacia LAS (Liner alkylbenzene sulfonates), donde el SDBS es un análogo representativo. Esta transformación marca el comienzo de su presencia en los efluentes industriales reportando concentraciones de LAS entre 1- 15 mg/L en agua residuales, teniendo en cuenta su uso en operaciones petroleras, puede presentarse en el agua de producción (Hera, 2013).

2.8.3 Consolidación y primeras evaluaciones toxicológicas (finales 1960-1980)

Entre los 70-80 se realizan publicaciones de estudios ambientales y se mide la expansión del uso de LAS, instaurando su condición de tensoactivo aniónica dominante en ser consumido masivamente en la industria. Basándose en lo anterior, incrementa la posibilidad de hallar SDBS en las corrientes de agua de producción, debido a su uso en los fluidos de perforación, el control de emulsiones y formulaciones asociadas a operaciones de campo en general (Veil et al., 2004).

2.8.4 Finalidad ambiental y sorción (1990-2000)

Entre el 1990-2000 se profundiza en el destino ambiental de LAS. Se evidencia su sorción significativa en sedimentos y suelos, modulada por homologo, pH y cationes, lo que limita movilidad y biodisponibilidad, lo cual indica una base sólida para la evaluación de riesgos cuando está presente el agua de producción (Manousaki et al., 2004).

2.8.5 Caracterización integral del agua de producción y tratamiento (2004-2010)

El Argonne National Laboratory (2004) fortalece el entendimiento de composición, variabilidad y riesgos del agua de producción (incluidos aditivos químicos como surfactantes) y fundamenta bases para su gestión y tratamiento. Adicionalmente emergen tratamientos avanzados dirigidos particularmente al SDBS, como su degradación por ultrasonido reportada en Water Research (2004)

2.8.6 Reutilización del agua de producción y control de surfactantes (2010-2020)

Debido a la escasez hídrica y presión regulatoria de los pozos, el agua de producción pasa de ser un residuo a recurso potencial. Se analizan trenes combinados: coagulación-floculación, adsorción, membranas y bioprocesos; las investigaciones dan soporte a los diseños de tratamiento y muestran la evolución temporal de LAS en matrices ambientales y la necesidad de removerlo para reúso seguro. Feijtel & Tolls, 1999.

2.8.7 Avances actuales (2021-2025): emulsiones, floculación y naturaleza basada en soluciones

En la actualidad destacan:

Floculación de emulsiones salinas del agua de producción combinando dodecilmenceno sulfonato con poliacrilamida y separación por flotación por aire disuelto (DAF) (2023).

Revisión y aplicaciones de humedales construidos para tratamiento y reúso de las aguas de producción y residuales (2024-2025).

Nuevos procesos de oxidación avanzada para tensoactivos (ej., ultrasónico y variantes), que refuerzan la viabilidad de remover SDBS en matrices complejas.

2.9 Aplicaciones en la industria petrolera colombiana

2.9.1 Tratamiento de aguas de producción

El carbón activado puede utilizarse como un adsorbente para la remoción de SDBS, contribuyendo así a la reducción de la contaminación del agua de producción. (Chávez et al. 2013).

2.9.2 Mejora de la calidad del agua

El tratamiento de aguas de producción mediante la adsorción del SDBS con carbón activado puede mejorar considerablemente la calidad del agua, lo que podría tener beneficios adicionales para la protección del medio ambiente reutilizándose ya sea en cultivos agrícolas e industriales.

2.9.3 Cumplimiento de regulaciones ambientales

La eliminación de contaminantes como el SDBS es decisivo para cumplir con las regulaciones ambientales locales que establecen límites máximos para la descarga de aguas de producción. El uso de carbón activado derivado de recursos renovables como la cáscara de nuez de palma africana puede ayudar a las empresas petroleras a cumplir con estas regulaciones de manera más económica y sostenible.

2.10 Fenómenos de adsorción

Según Alaqarbeh (2021), la adsorción física, también llamada fisisorción, se caracteriza por uniones débiles de Van der Waals sin cambios en la estructura química del adsorbato o del adsorbente, es un proceso generalmente reversible y de baja entalpia (20-40 kJ/mol). Por el contrario, la adsorción química o quimisorción implica la formación de enlaces iónicos o covalentes mediante la redistribución de la densidad electrónica entre el adsorbato y el adsorbente, presenta alta especificidad, mayor energía de activación y entalpías superiores (40-300kJ/mol), siendo en la mayoría de los casos irreversible.

3 Diseño metodológico

3.1 Síntesis de carbones activados a partir de la cáscara de nuez de palma africana

El proceso de sintetizar el carbón activado de cuesco de nuez de palma africana, implicó el desarrollo de 8 experimentos que se establecieron a partir de las variables; relación de impregnación, temperatura y tiempo. Esta biomasa fue aportada por una empresa petrolera, la cual es utilizada en los filtros en el tratamiento de aguas en los campos petroleros y en las características de esta muestra utilizaron una distribución de malla entre 10 – 40 mesh.

Respecto a la relación de impregnación, en el presente estudio se tuvo en cuenta la impregnación del 0%, para así verificar experimentalmente la compatibilidad como una muestra blanco entre el Cuesco de Nuez de Palma Africana y el agente químico. Así mismo, con este blanco se pretende establecer un control experimental riguroso, permitiendo evaluar de manera precisa el efecto del tratamiento para garantizar que los resultados obtenidos sean válidos, comparables y respaldados por un análisis de todo el estudio.

En cuanto a la impregnación del 0.5%, fue implementada con el fin de analizar el efecto de una baja concentración de H_3PO_4 en el desarrollo consecutivo del carbón activado. De acuerdo con Foo y Hameed (2012), el incremento en la relación de impregnación mejora notablemente el área superficial y el volumen de poro del material, mientras que niveles bajos generan un desarrollo más limitado, pero suficiente para estudiar la influencia de esta variable en el proceso de optimización.

Teniendo en cuenta el estudio de (Díaz & Soto, 2020) el H_3PO_4 mejora la porosidad y adsorción del carbón activado ya que degrada la biomasa, pero reduce su rendimiento por la

pérdida de materia volátil. Es decir, a concentraciones más altas de ácido maximizan la porosidad, pero produce menor cantidad de masa, la relación de impregnación escogida es 1:8 para garantizar una activación química efectiva, y la formación de una estructura altamente porosa.

La elección del rango de temperatura entre 300°C y 400 °C para la activación del carbón se fundamentó en los resultados reportados por Xu et al. (2021), donde se evidenció que temperaturas entre 300°C y 450 °C favorecen una mejor formación de poros y un rendimiento adecuado del material. Así mismo, se demostró que activaciones superiores a 450°C reducen estos mismos elementos mencionados.

Otro estudio que nos brinda información sobre los rangos de temperatura más adecuados es el artículo de Rahman, Sulaiman y Abdullah (2016), quienes indicaron que el mayor rendimiento de carbón se obtuvo a 300 °C, mientras que el rendimiento máximo de líquidos pirolíticos se alcanzó a 400 °C, en lugar de disminuir su volumen.

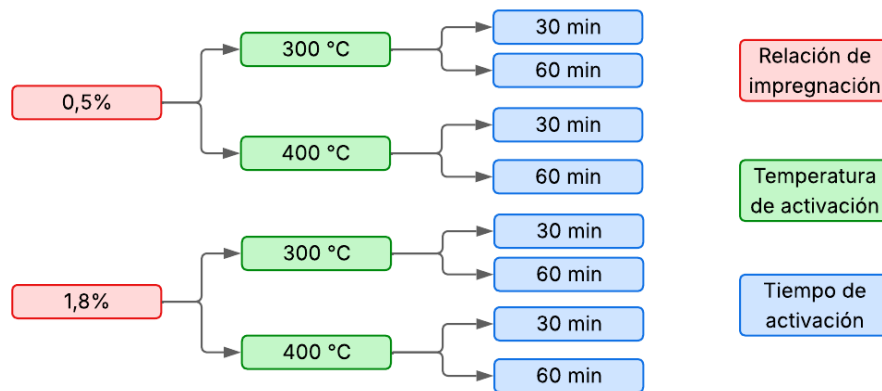
Además de la relación de impregnación y la temperatura de activación, el rango del tiempo de reacción entre 30 - 60 minutos también es una variable importante. Li et al. (2020), menciona que la mayor parte de la materia orgánica se descompone durante los primeros 30 minutos de pirólisis, cuando se extiende el tiempo hasta 60 minutos; se logra observar una disminución en el rendimiento del carbón activado y un aumento en el rendimiento de gases. Esto sugiere que, si bien el intervalo de 30-60 minutos favorece una liberación prolongada de compuestos volátiles, su impacto en el rendimiento es mínimo, destacando los primeros 30 minutos como el periodo clave para la modificación térmica del material.

3.1.1 Diseño experimental

En la figura 1 se presenta el diagrama experimental propuesto para el desarrollo de la investigación.

Figura 1.

Esquema diseño experimental



En la presente investigación se utilizaron dos factores con tres niveles (relación de impregnación; 0.5% y 1.8%, temperatura; 300 °C y 400 °C y tiempo; 30 minutos y 60 minutos). Dando así un resultado de 8 experimentos clasificado como un diseño factorial 2^3 , asimismo se evaluó el mismo diseño factorial con dos variables dependientes que fueron el rendimiento del CA y la remoción del SDBS.

3.1.2 Proceso y equipo

Pirólisis:

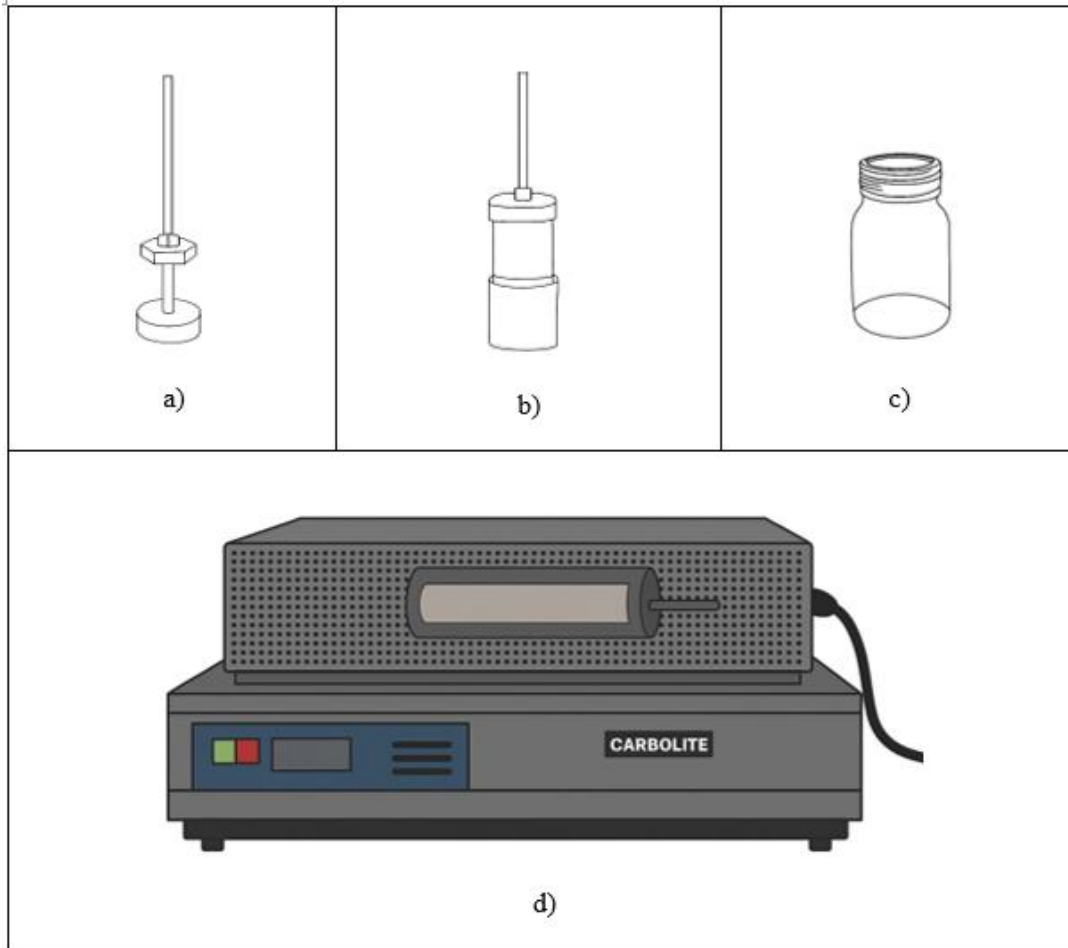
Según la Revista de Química PUCP, (2012), la pirólisis “Es un proceso de descomposición térmica que se produce sin la presencia de oxígeno. Siempre constituye el primer paso en los

procesos de combustión y gasificación, seguido de una oxidación total o parcial de los productos resultantes. Este proceso consta de tres fases: la dosificación y suministro de la materia prima, la transformación de la masa orgánica y, por último, la obtención y separación de los productos (Coque, bio-aceite y gas)”.

La figura 2 muestra las partes principales de un pirolizador, las cuales cumplen funciones específicas para garantiza el control de la temperatura, el flujo de gases y la eficiencia del proceso de activación.

Figura 2.

Partes del pirolizador: a) Tapa del reactor, b) Cuerpo del reactor, c) Vaso recolector, d) Pirolizador.

**3.1.3 Procedimiento**

El siguiente procedimiento se realizó para tres relaciones de impregnación, teniendo en cuenta dos temperaturas diferentes y variados los tiempos ya mencionados. Debido a que el proceso fue el mismo para las 8 muestras, se describe de manera detallada un solo proceso y finalizado se realizó una tabla con todos los resultados obtenidos.

3.1.3.1 Impregnación

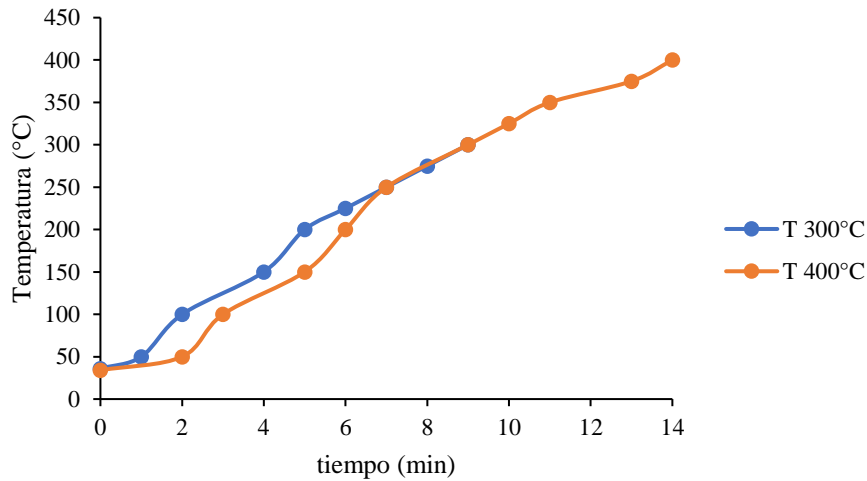
Para la preparación de la muestra se pesaron 150 g de cuesco de nuez de palma africana, luego se adiciono ácido fosfórico (H_3PO_4) diluido en agua destilada manteniendo una relación 1:2 la cual indica una proporción en masa en la que por cada parte de ácido presente en la mezcla; se añaden dos partes de agua, después se llevó a la plancha de calentamiento con agitación magnética, cuando la muestra llegó a una temperatura de 100 °C se dejó 1 hora en agitación constante. Posteriormente se lleva al horno por un tiempo aproximado de 5 horas a temperatura de secado de 105 °C para así eliminar la humedad de la muestra. Finalizado el tiempo quedó lista la impregnación del cuesco.

3.1.3.2 Activación

Se realiza una rampa de temperatura como se muestra en la figura 3, teniendo en cuenta la temperatura inicial del equipo, llegando hasta la temperatura de 300°C, cuando este alcanza esa temperatura se deja la muestra por 30 minutos en el equipo, una vez finalizado el tiempo especificado se procede a pesar nuevamente todas las partes del reactor y la muestra final obtenida.

Figura 3.

Rampa de temperatura a 300°C y 400°C



La figura 3 muestra que el equipo presentó condiciones estables, garantizando así condiciones operacionales adecuadas para el proceso de pirólisis.

Se describe el proceso general de pirólisis que se realizó igual para todas las muestras, aunque utilizando las variables anteriormente mencionadas.

(300°C para 30 min)

Condiciones de la prueba: Inicio: 1:47 T:300°C N₂: 1L/min

En la tabla 4 se muestran los valores de las cantidades y propiedades del pirolizador en gramos antes de la reacción.

Tabla 4.*Pesos iniciales de muestra y elementos asociados al proceso de pirólisis*

Pesos iniciales	
Parámetro	Valor
Peso vaso recolector de líquido	113,32 g
Peso tapa reactor	1129,76 g
Peso reactor sin tapa	2632,60 g
Peso de la muestra	25,06g

Nota: El peso de la muestra corresponde a la biomasa introducida en el reactor. El peso del reactor incluye únicamente el contenedor vacío. El peso de los vasos recolectores corresponde a los recipientes destinados a la recolección de condensados del proceso.

En la tabla 5 se presentan los resultados obtenidos como caso ejemplo para las condiciones antes mencionadas.

Tabla 5.*Pesos finales de muestra y elementos asociados al proceso de pirólisis.*

Pesos finales	
Parámetro	Valor
Peso vaso recolector de líquido	113,32 g
Líquidos pirolíticos	0 g
Peso tapa reactor	1129,69 g
Peso reactor sin tapa con canicas y muestra	2712,63 g
muestra final	16,45g

Nota: El peso de la muestra corresponde a la biomasa introducida en el reactor. El peso del reactor incluye únicamente el contenedor vacío. El peso de los vasos recolectores corresponde a los recipientes destinados a la recolección de condensados del proceso.

3.1.3.3 Lavado

Luego de los procesos de impregnación y activación química, las muestras fueron lavadas con agua destilada mediante probetas hasta alcanzar un pH aproximado a 7. Con este procedimiento se logró la eliminación de residuos ácidos de H_3PO_4 presentes en la superficie del carbón activado. Según Nyamful et al. (2020), el pH de las muestras sin lavar puede presentar valores tan bajos como 2.6, lo que indica la existencia de óxidos ácidos en su superficie, los cuales pueden obstaculizar aplicaciones de adsorción en soluciones neutras o básicas. Este ajuste hacia valores neutros genera una estabilidad del material y el comportamiento como adsorbente en medios acuosos, particularmente en procesos donde la adsorción depende de las cargas superficiales del carbón activado y su interacción con los contaminantes en el agua.

La metodología descrita anteriormente fue aplicada de manera repetitiva para cada una de las relaciones de impregnación evaluadas 0.5% y 1.8%, variando únicamente la proporción del agente químico respecto al precursor. De esta forma, se respalda la comparabilidad entre las muestras activadas bajo condiciones experimentales constantes.

Cabe aclarar que al proceso de lavados de las muestras con relación de impregnación de 0%, no se realizó ningún tipo de lavado posterior a la activación, debido a que, no se empleó ningún agente químico durante la etapa de impregnación.

3.2 Evaluar la eficiencia de adsorción de los carbones activados sobre la remoción de SDBS presente en muestras de aguas de producción de un campo de petróleo colombiano mediante espectroscopia UV-Vis

El dodecilbenceno Sulfonato de Sodio (SDBS), representa un reto ambiental en las aguas de producción del sector petrolero debido a su estabilidad química y elevada solubilidad. En relación a ello, los carbones activados obtenidos a partir de residuos orgánicos aparecen como una alternativa sostenible, cuya capacidad adsorbente depende de las condiciones de activación y del desarrollo de su estructura porosa.

3.2.1 Equipo

En la Figura 4 se observa el espectrofotómetro UV-Vis empleado en este trabajo. Este equipo permite medir la absorción o transmitancia de la radiación electromagnética en los rangos de ultravioleta (190–500 nm) y visible (400–800 nm). Este proceso ayuda a identificar la $\lambda_{\text{máx}}$ del SDBS y cuantificar la concentración residual de SDBS en soluciones antes y después de procesos de adsorción y tratamiento, teniendo en cuenta la comparación de absorbancias con una curva de calibración.

Figura 4.

Espectrofotómetro Ultravioleta Visible



Fuente: Thermo Fisher Scientific (s. f.).

3.2.2 Procedimiento

El procedimiento experimental se realizó teniendo en cuenta los 8 carbones activados, con el fin de simular condiciones críticas de contaminación y evaluar la eficiencia de adsorción de los carbones; la metodología se inició con la preparación de solución sintética de SDBS a su mayor concentración (2000 ppm).

3.2.2.1 Preparación de la solución salina sintética (Salmuera).

Para representar las condiciones reales del agua de producción de un campo petrolero colombiano, se preparó una salmuera sintética mediante disolución de sales inorgánicas de alta pureza (NaCl - 270 ppm, NaHCO₃ - 800 ppm, CaCl₂*H₂O - 40 ppm) en agua destilada, ajustando así una concentración de sales totales de 1110 ppm. La mezcla se agitó hasta completa disolución y se almacenó previamente.

3.2.2.2 Preparación de la solución madre de SDBS.

Se pesó 0.2 g de SDBS y se disolvió en 100 ml de la salmuera sintética previamente preparada, obteniendo una solución madre de concentración (2000 ppm). A partir de dicha solución, se prepararon diluciones para la construcción de la curva de calibración.

3.2.2.3 Construcción de la curva de calibración UV-VIS.

Se acondicionaron soluciones patrones de SDBS en salmuera con concentraciones de 2000 ppm. Las absorbancias fueron medidas en un espectrofotómetro UV-VIS, registrando la longitud de onda máxima de absorción (222 nm) Zhang et., al (2018) identificó experimentalmente el máximo de absorción del SDBS mediante espectrofotometría UV, lo que permitió construir curvas de calibración confiables bajo las condiciones del experimento. Aunque no se indica explícitamente que dicho pico fue a 222 nm, la práctica de encontrar un pico alrededor de 220-225 nm en este tipo de surfactantes respalda la elección de 222 nm en este trabajo. Se construyó la curva de calibración lineal absorbancia vs concentración, imprescindible para el cálculo de la concentración residual en los ensayos de adsorción.

3.2.2.4 Ensayos de adsorción por lote (batch).

Se distribuyeron aproximadamente 0.05 g de carbón activado junto a 5 ml de solución de SDBS a una concentración inicial fija de 2000 ppm en salmuera, dentro de los tubos cónicos de polipropileno. Las mezclas fueron agitadas en un agitador orbital a 150 rpm durante 24 horas a temperatura constante de 65°C para alcanzar el equilibrio de adsorción.

3.2.2.5 Separación sólido-líquido y análisis por UV-VIS.

Pasado el tiempo de interacción, las muestras fueron centrifugadas a 30 rpm por 20 minutos. Se recolectó el líquido y se midió su absorbancia en el espectrofotómetro UV-VIS a la

longitud máxima del SDBS (222 nm). A partir de la curva de calibración, se determinó la concentración residual del SDBS.

4 Análisis de Resultados

4.1 Síntesis y caracterización del carbón

En la tabla 6 se muestran las cantidades de los productos obtenidos durante las pruebas de pirólisis establecidas en el diseño experimental.

Tabla 6.

Condiciones de preparación y porcentaje de rendimientos de las muestras de carbón activado

Muestra	Tiempo pirólisis (min)	Temp. °C	Impregnación %, H ₃ PO ₄	Gramos CA entrada	Porcentaje		
					% Líquido	% sólidos	% Gas
1	30	300	0,5	25,08	0,00	69,06	30,94
2	60	300	0,5	25,01	6,64	59,54	33,83
3	30	400	0,5	25,00	0,00	62,20	37,80
4	60	400	0,5	25,02	0,00	55,44	44,56
5	30	300	1,8	25,00	16,00	62,08	21,92
6	60	300	1,8	25,00	30,60	54,60	14,80
7	30	400	1,8	25,01	43,98	53,70	2,32
8	60	400	1,8	25,02	34,37	53,92	11,71

En la tabla 6 se observa que a medida que la temperatura de pirólisis se incrementa, el porcentaje de gas y líquido producido aumenta, mientras que el rendimiento en fase sólida tiende a disminuir. Este comportamiento es consistente con la descomposición progresiva de la lignocelulósica de la biomasa, favoreciendo la obtención de un material carbonoso con mayor desarrollo de área superficial y poros. Bustamante-González et al. (2024) estudiaron la pirólisis de cáscara de nuez de palma y encontraron que, al aumentar la temperatura, la pérdida de volátiles

fue más acentuada, lo que incrementó la microporosidad del carbón obtenido y favoreció la capacidad de adsorción de CO₂. Por otra parte, Abnisa et al. (2022), al evaluar diferentes residuos de palma (PKS, EFB y OPF), concluyeron que el rendimiento en bio-aceite decrece a temperaturas elevadas, mientras que la fracción de gas aumenta de forma progresiva, lo que confirma la tendencia observada de los datos presentados en la tabla 6.

A tiempos cortos alrededor de 30 min, los porcentajes de rendimiento sólido son relativamente más altos, indicando una menor degradación térmica. Sin embargo, conforme el tiempo aumenta hasta los 60 minutos, el proceso de carbonización se intensifica y se consolidan estructuras más estables y posiblemente con mayor desarrollo de poros. En estas condiciones, aunque el rendimiento sólido disminuye, se obtiene un carbón activado con características texturales más favorables para procesos de adsorción

Por su parte la impregnación con ácido fosfórico desempeña un papel fundamental en la activación química, propiciando la generación de porosidad y mejorando el rendimiento relativo de la fase sólida frente a condiciones sin impregnación. Se destaca que los mejores resultados de equilibrio entre rendimiento sólido y desarrollo textural se alcanzaron en condiciones de temperatura 400 °C y tiempos de pirólisis de 60 minutos, en presencia de H₃PO₄ con relación de impregnación de 1,8 %. Esto confirma que el ajuste fino de las variables de síntesis permite optimizar la calidad del carbón activado obtenido, maximizando tanto la estabilidad estructural como el potencial de adsorción.

Los valores alcanzados validan que las condiciones seleccionadas permiten obtener materiales con un rendimiento y propiedades texturales adecuados, lo cual resulta fundamental

para aplicaciones de adsorción de compuestos orgánicos como el dodecilsulfonato de sodio (SDBS) en aguas de producción.

4.2 Análisis estadístico

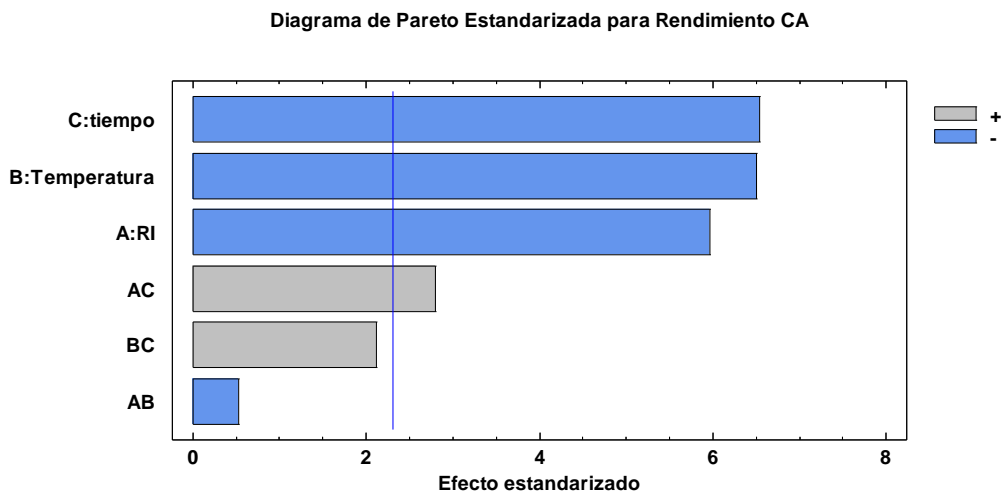
Con el fin de evaluar la influencia de los parámetros de síntesis en el desempeño del carbón activado obtenido a partir de cuesco de palma africana, se realizó un análisis estadístico considerando como variables independientes la relación de impregnación, la temperatura de pirólisis y el tiempo de activación. Por otra parte, como variables dependientes fueron seleccionadas el rendimiento de carbón activado producido en cada prueba de pirolisis, y en segunda medida la cantidad de surfactante SDBS removido durante los ensayos de adsorción. Este enfoque permite identificar los factores más significativos y sus posibles sinergias, facilitando la optimización del proceso de síntesis y el entendimiento de los fenómenos que rigen la adsorción.

4.2.1 Análisis del porcentaje de carbón activado obtenido

En la figura 5, 6 y 7 se evidencia el análisis estadístico del porcentaje de rendimiento del CA, el cual permitió evaluar como las condiciones de pirolisis y activación influyen en el rendimiento obtenido. Se logro establecer parámetros óptimos de síntesis y relacionar las variables en cuanto al proceso y la cantidad de solidos recuperados.

Figura 5.

Diagrama de Pareto rendimiento CA

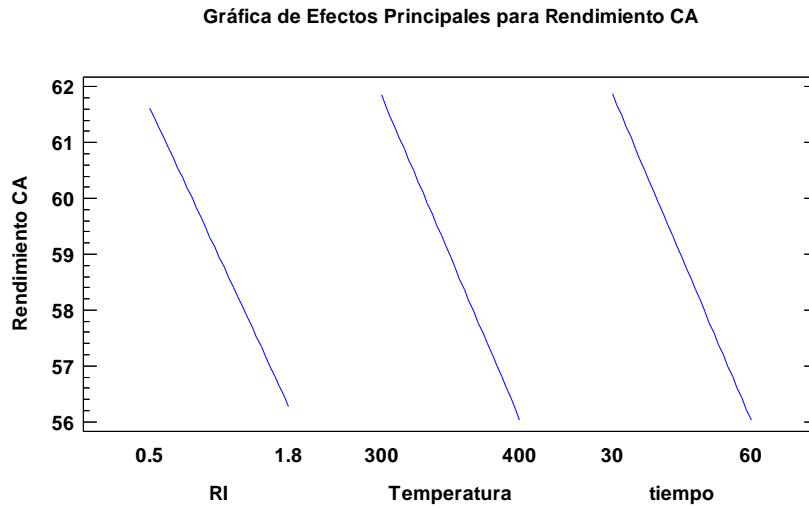


Las barras con color gris (+) indican que existe un efecto significativo sobre el incremento del rendimiento de carbón activado. Entre tanto, el color azul (-) indica que el factor presenta un efecto negativo. Por otra parte, en el diagrama de Pareto se puede observar que los factores y sus combinaciones están ordenados de mayor a menor efecto sobre la variable dependiente en estudio.

La figura 5 evidencia que las variables más influyentes en el rendimiento del carbón activado son el tiempo de pirólisis, la temperatura y la relación de impregnación, en ese orden de importancia. Las interacciones entre variables (AC, BC, AB) tienen un efecto mucho menor, lo que sugiere que el comportamiento del rendimiento depende principalmente de los factores individuales y no significativamente de la combinación entre ellos.

Figura 6.

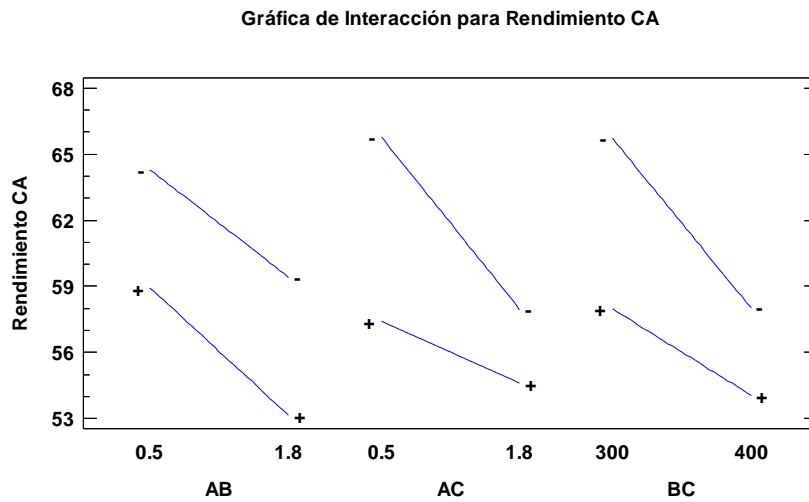
Diagrama de efectos principales del rendimiento CA



En la figura 6 Se observa que al aumentar la relación de impregnación (0.5 a 1.8), la temperatura (300 a 400 °C) y el tiempo (30 a 60 min) ocasiona una disminución progresiva en el rendimiento del carbón activado. Este comportamiento está relacionado con que a mayores condiciones de pirolisis favorecen la degradación de la biomasa, reduciendo la cantidad de producto sólido obtenido.

Figura 7.

Diagrama de interacción para rendimiento CA



En la figura 7 las interacciones muestran que el efecto combinado de las variables intensifica la reducción del Rendimiento a medida que aumentan los niveles de las condiciones de operación. Las interacciones (AB, AC, BC) confirman que los factores no actúan de manera totalmente independiente, pero refuerzan la tendencia general: condiciones mayores en el proceso disminuyen el rendimiento final del carbón activado.

Tabla 7.

Condiciones óptimas para obtener un mayor rendimiento de Carbón Activado

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
RI	0,5	1,8	0,5
Temperatura	300,0	400,0	300,0
tiempo	30,0	60,0	30,0

Este resultado optimizado de la tabla 7 indicó que condiciones bajas de activación permitieron conservar una mayor fracción sólida de la biomasa, evitando grandes pérdidas de masa por volatilización, lo cual se traduce en un mayor aprovechamiento del precursor en la obtención del carbón activado. Sin embargo, el alcance de este proyecto consiste en obtener carbones activados con alta remoción de surfactante SDBS. Para cumplir con este propósito, y considerando el conjunto de variables, en la siguiente sección se evalúan las condiciones de síntesis (Temperatura, RI y Tiempo) sobre el rendimiento de remoción de SDBS.

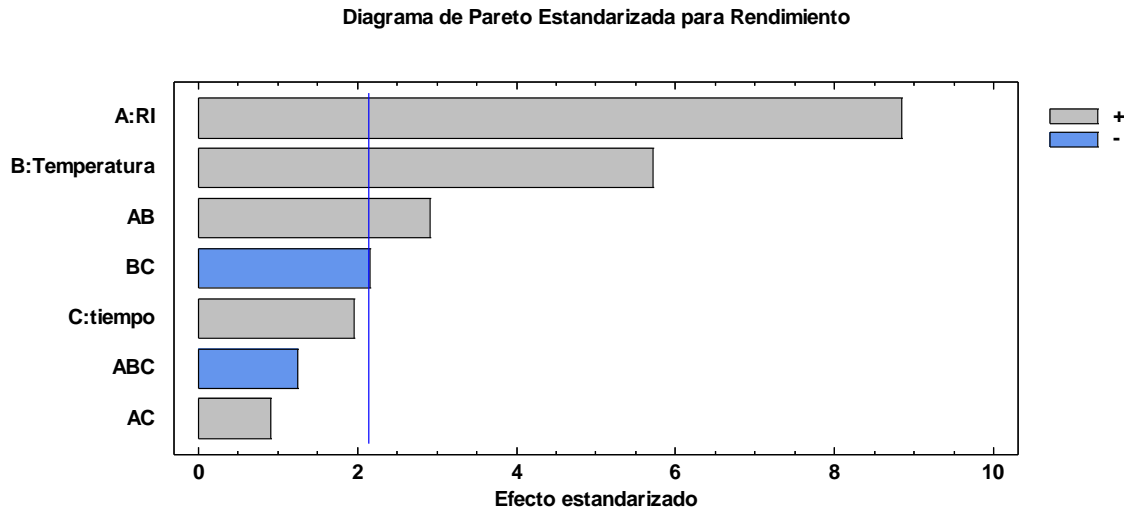
4.2.2 Análisis de la remoción del SDBS

Inicialmente se evaluaron los 8 carbones activados, durante 24 horas alcanzando el punto de equilibrio. El análisis estadístico del porcentaje rendimiento de adsorción de SDBS buscó determinar la eficiencia del carbón activado en la remoción de este surfactante aniónico. Con ello se pretendió evidenciar la capacidad del material para tratar aguas contaminadas y resaltar las condiciones en las que se alcanzaron los mayores porcentajes de eliminación.

En la figura 8 se presenta el diagrama de Pareto entre los factores seleccionados para la síntesis de los carbones activados y los resultados de la remoción de SDBS durante los ensayos realizados a condiciones estáticas en el laboratorio.

Figura 8.

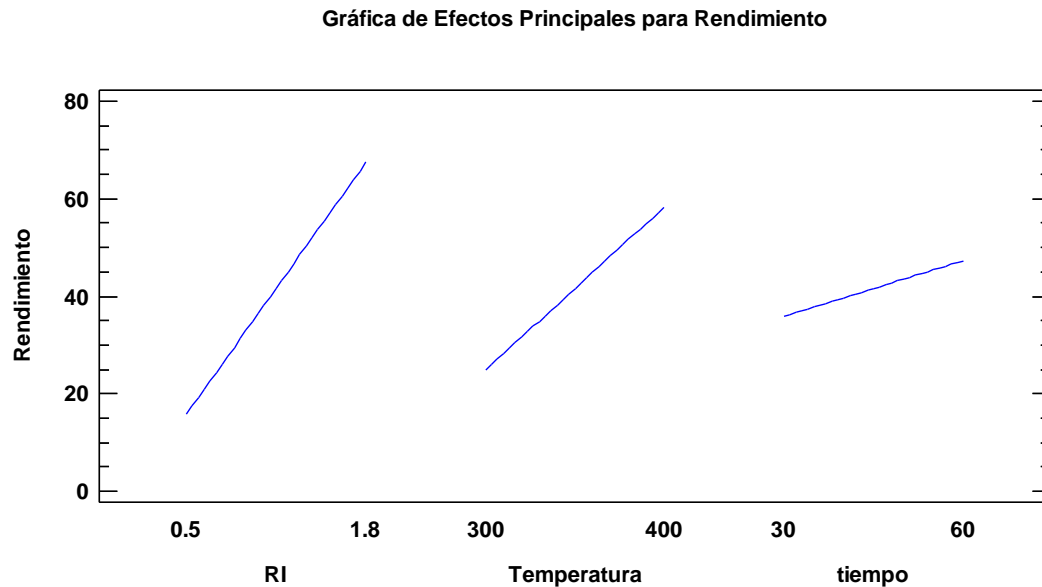
Diagrama de Pareto estandarizada para rendimiento SDBS



El diagrama de Pareto obtenido para el análisis de rendimiento del carbón activado figura 8 evidencia que la variable con mayor influencia es la relación de impregnación. Este resultado confirma que la cantidad de agente activante (H_3PO_4) incorporado en el precursor determina de manera directa el grado de desarrollo poroso y la eficiencia de carbonización, lo que se traduce en un aumento significativo en el rendimiento del material fina.

Figura 9.

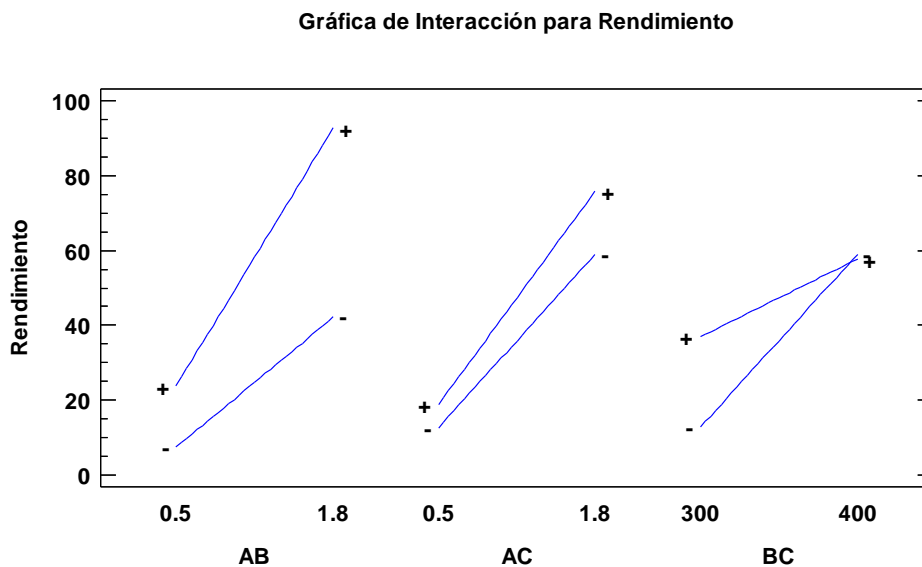
Diagrama de efectos principales del rendimiento SDBS



En la figura 9 se observa que el incremento de la relación de impregnación (0.5 – 1.8) y de la temperatura (300°C - 400°C) aumenta significativamente la eficiencia de remoción de SDBS, debido a la generación de mayor área superficial y desarrollo de porosidad en el carbón activado. Por el contrario, el efecto del tiempo de activación es inverso; un tiempo prolongado (60 min) tiende a reducir la capacidad adsorbente, posiblemente por el colapso parcial de microporos o pérdida de grupos funcionales activos.

Figura 10.

Diagrama de interacción para rendimiento SDBS



Las interacciones de la figura 10 muestran que los efectos combinados de las variables intensifican el comportamiento observado en los efectos principales. La combinación alta relación de impregnación y alta temperatura (AB) resulta en una mayor remoción, confirmando la sinergia entre ambos factores para mejorar la estructura porosa. En contraste, la interacción tiempo temperatura (BC) evidencia que, aunque la temperatura elevada favorece la adsorción, este efecto se atenúa cuando el tiempo de activación aumenta, mostrando que los tiempos largos generan pérdidas en el desempeño.

Tabla 8.

Condición optima SDBS

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
RI	0,5	1,8	1,8
Temperatura	300,0	400,0	400,0
tiempo	30,0	60,0	60,0

La tabla 8, muestra las mejores condiciones para maximizar la eficiencia adsorbente, es necesario trabajar con parámetros de activación más intensos en cuanto a impregnación y temperatura, pero mantener un tiempo corto que evite la degradación excesiva de la matriz del carbón activado.

4.3 Caracterización BET

La eficiencia del carbón activado en la remoción de este surfactante aniónico, se puede atribuir al área superficial y a las propiedades texturales. El método BET determinó el área superficial específica de los carbones activados sintetizados bajo diferentes condiciones de relación de impregnación, temperatura y tiempo de pirólisis. Los datos de la Tabla 8 presentan los resultados del análisis de las muestras sintetizadas previamente a partir del cuesco de palma africana.

Tabla 9.

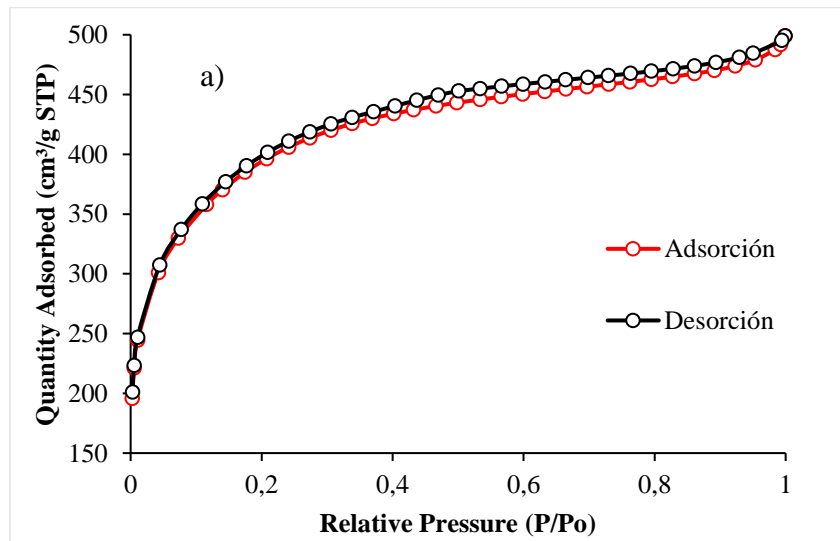
Caracterización BET de los carbones activados sintetizados

Muestra (RI/T/t)	Volumen total (cm³/g)	A_{BET} (m²/g)	Tamaño de poro BJH (nm)
CA. -0.5/400°C/1h	0.2562	801.85	2.9836
CA. -1.8/400°C/1h	0.2432	1,449.04	2.9386

Los resultados de la Tabla 9 confirman que el incremento en la relación de impregnación (RI = 1.8) permitió alcanzar un área superficial significativamente mayor (1,449.04 m²/g) en comparación con la muestra con menor impregnación (RI = 0.5; 801.85 m²/g). Aunque el volumen total de poro no aumentó de forma proporcional (0.2432 de CA-1.8/400°C/1h frente a 0.2562 de 0.5/400°C/1h cm³/g), los carbones tienen tamaños de poro promedio cercanos a los 3 nm, confirmando su tipo mesoporoso. Este comportamiento concuerda con lo reportado en la literatura, donde se afirma que una mayor cantidad de agente activante (H₃PO₄) favorece la apertura de la estructura carbonosa y contribuye al desarrollo de superficies específicas más amplias (Thommes et al., 2021).

Figura 11.

Curvas de adsorción/desorción de N₂ de los carbones activados.





Nota: Curvas de adsorción/desorción para: a) C.A – RI: 1,8, T: 400 °C y t:1 hora; b) C.A – RI: 0,5, T: 400 °C y t:1 hora

En la Figura 4a y 4b, se observa una curva característica del tipo I(b) según la clasificación de la IUPAC (2015). Este tipo de isoterma se asocia con materiales que tienen microporos mayores e incluso mesoporos estrechos ($< 2,5$ nm), con una adsorción inicial pronunciada a bajas presiones relativas ($P/P_0 < 0,2$) y posterior formación de una meseta casi horizontal. Esto indica que el CA desarrolla microporosidad y también una fracción mesoporosa significativa, lo que amplía sus aplicaciones ya que permite la difusión de moléculas de mayor tamaño, como surfactantes aniónicos. La reducida histéresis observada entre las curvas de adsorción y desorción indica que los poros presentan una geometría que favorece la estabilidad del material durante procesos de adsorción y regeneración. Esto se evidencia con el análisis Barrett–Joyner–Halenda (BJH) el cual arrojó un ancho de poro promedio de 2,94 nm (adsorción) y 2,93 nm (desorción), lo que ubica al material dentro del rango de los mesoporos (2–50 nm).

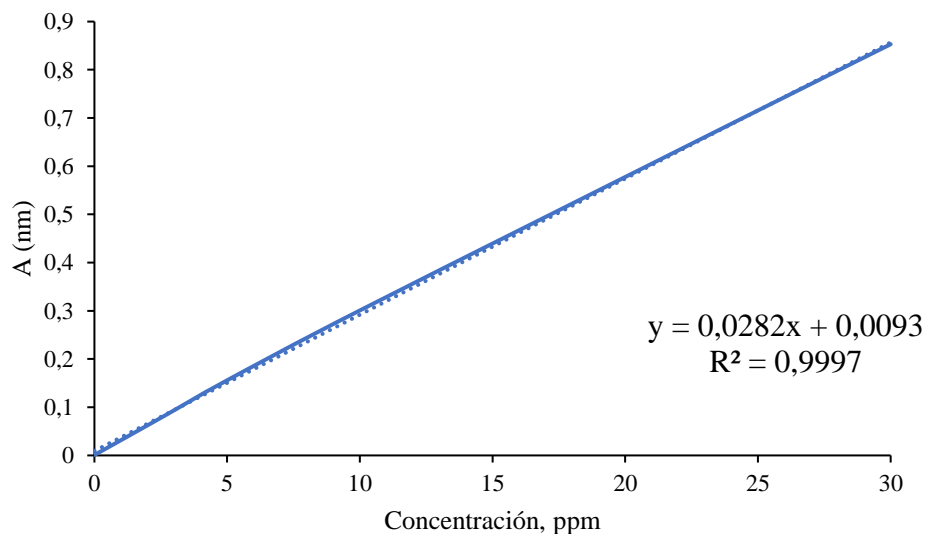
4.4 Análisis de adsorción

El barrido inicial de las 8 muestras de carbón activado obtenidas bajo distintas condiciones de síntesis, el análisis estadístico para la determinación de las variables con mayor impacto en su rendimiento y posteriormente pruebas por el método BET; permitieron la selección del carbón más adecuado (CA 1.8% - 400°C - 60min) para finalmente desarrollar el estudio de adsorción mediante isotermas, lo que permitió evaluar su desempeño frente a la remoción de contaminantes y validar su potencial como material adsorbente.

En la Figura 12 se presenta la curva de calibración obtenida, la cual se realizó para poder transformar los valores de absorbancia a concentraciones residuales después del proceso de adsorción.

Figura 12.

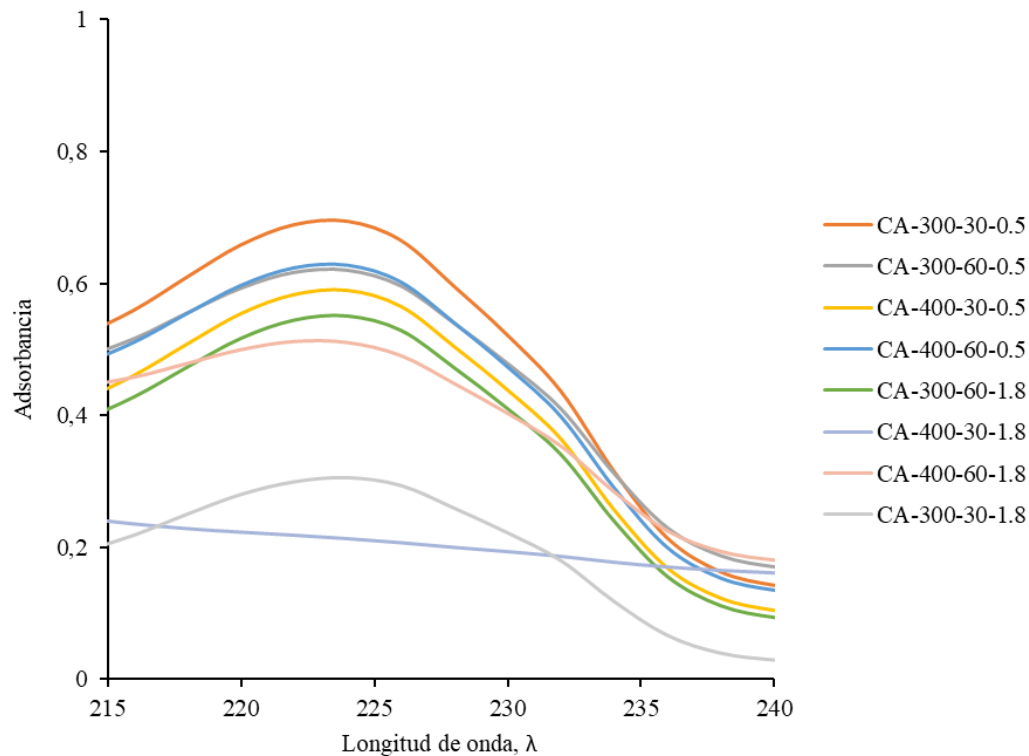
Curva de calibración



La figura 13, muestra los espectros de adsorbancia UV-Vis de los carbonos activados obtenidos bajo las diferentes condiciones de temperatura, tiempo y relación de impregnación. Se observa un máximo de adsorbancia en la región de 220–225 nm. Estos resultados evidencian la influencia de las condiciones de activación en las propiedades del material y su potencial desempeño en procesos de adsorción.

Figura 13.

Espectros de adsorbancia UV-Vis de carbón activado.



4.4.1 Adsorción del carbón activado con isotermas de adsorción

Según las anteriores investigaciones que se han efectuado, se pueden utilizar las isotermas de adsorción de Langmuir, Freundlich y Temkin para modelar de forma matemática el

comportamiento de la adsorción en los carbones activados. Para establecer los parámetros de la adsorción sobre el CA se efectuaron la Ecuación (1), Ecuación (2) y Ecuación (3).

Tabla 10.

Parámetros de las isothermas de adsorción CA (1.8% - 400°C - 60min)

Langmuir				Freundlich			Temkin		
q_{\max}	b	R^2	K_L	n_F	k_F	R^2	n_T	k_T	R^2
383,31	0,30	0,967	0,01	1,95	15,53	0,896	87,01	0,08	0,941

La Tabla 10 muestra que el modelo de Langmuir presentó el mejor ajuste ($R^2 = 0,967$), lo que indica que la adsorción ocurre principalmente en una monocapa de adsorción sobre la superficie del carbón activado, esto evidencia que los sitios activos disponibles tienen un comportamiento relativamente homogéneo. Este comportamiento es coherente con lo reportado por Wang et al. (2023), quienes estudiaron la adsorción de surfactantes aniónicos sobre carbones activados modificados químicamente y encontraron que la activación con H_3PO_4 favorece la generación de superficies con regiones homogéneas y heterogéneas. En la gráfica de ajuste (ver Figura A1), se aprecia que la curva experimental se alinea de manera más consistente con el modelo de Langmuir, confirmando que los primeros sitios de adsorción son los más energéticamente favorables.

El apéndice B corresponde a la linealización de la isoterma de Langmuir (C_e/q_e vs C_e), en la que se observa un ajuste lineal con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9674$, lo que indica un buen grado de correlación entre los datos experimentales y el modelo propuesto. La pendiente (0.0026) y la ordenada al origen (0.3044) permiten estimar los parámetros de la isoterma: la capacidad máxima de adsorción (q_m) y la constante de afinidad (K_L), que reflejan la eficiencia

del carbón activado sintetizado a partir de cuesco de palma africana para remover SDBS. El valor relativamente bajo de la pendiente sugiere una capacidad moderada de adsorción, coherente con las condiciones de síntesis empleadas (relación de impregnación 1.8%, pirólisis a 400 °C durante 1 h).

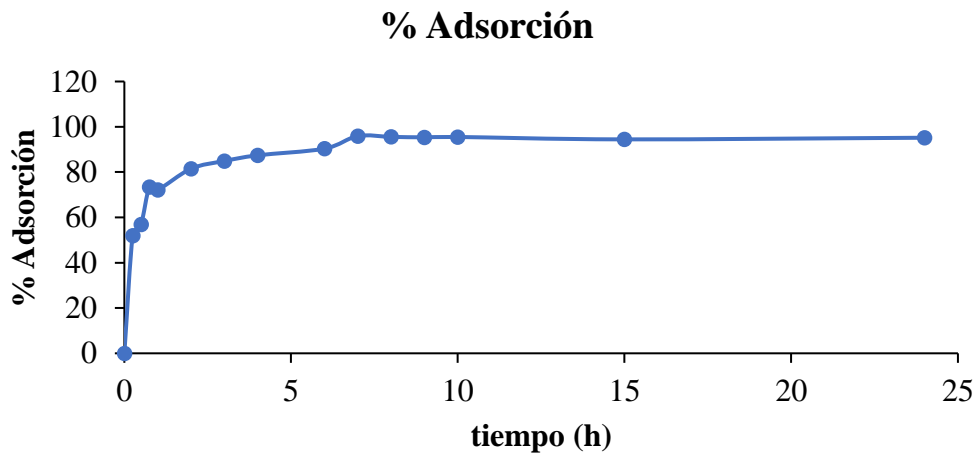
El comportamiento indica que la superficie del carbón presenta sitios activos homogéneos, en concordancia con la teoría de Langmuir, y que la adsorción ocurre preferiblemente como una monocapa. La buena linealidad también confirma que el tiempo de contacto de 24 h fue suficiente para alcanzar el equilibrio. Dado que el SDBS es un surfactante aniónico, la capacidad de remoción depende en gran medida de la interacción electrostática entre sus grupos sulfonato y las cargas superficiales generadas en el carbón activado bajo estas condiciones de síntesis. Esto evidencia que el material obtenido tiene un potencial significativo para aplicaciones de tratamiento de aguas de producción, aunque su capacidad podría optimizarse ajustando parámetros como temperatura de activación o tiempo de pirólisis.

4.4.2 Adsorción del carbón activado a diferentes tiempos

La evaluación del porcentaje de adsorción en función del tiempo permitió establecer el tiempo óptimo de contacto entre el adsorbente y el adsorbato y determinar la cinética del proceso. Este análisis es fundamental para entender la dinámica de ocupación de los sitios activos del carbón activado y el momento en que se alcanza el equilibrio de adsorción. En la figura 14 se observa el comportamiento del carbón activado, lo que permite identificar tanto la rapidez inicial del proceso como la estabilización de la adsorción en función del tiempo.

Figura 14.

Porcentaje de adsorción a diferentes tiempos



Los resultados obtenidos en la figura 14 muestran que la adsorción del surfactante SDBS sobre carbón activado de cuesco de palma africana ocurre en dos fases.

Durante el rango de 0.25 a una hora se alcanza aproximadamente entre el 51,9% al 73,5% de remoción, lo que indica una cinética rápida atribuida a la disponibilidad inicial de sitios activos en la superficie externa del adsorbente. En esta etapa, las moléculas de SDBS se fijan principalmente por interacciones físicas (Van der Waals, dipolo-dipolo) y atracción electrostática con los grupos funcionales superficiales del carbón activado. Luego de las dos horas el incremento fue más lento, pasando de 81.5% a 90.3% a las horas seis horas, señalando que el proceso comienza a estar limitado por la difusión intrapartícula hacia los poros internos.

Entre las 7 y 8 horas la figura 14 alcanza un equilibrio, con valores cercanos al 95% de adsorción, lo cual demuestra una alta eficiencia de remoción y la saturación de la mayoría de los sitios activos. Este comportamiento es característico de absorbentes microporosos con una buena

accesibilidad de poro, donde la etapa inicial está controlada por adsorción superficial rápida y la etapa final por difusión en equilibrio dentro de la matriz porosa. Leyva-Ramos et al. (2019), quienes investigaron la cinética de adsorción del SDBS sobre carbón activado, tras una etapa inicial de adsorción rápida en sitios accesibles, la velocidad del proceso se desacelera hasta alcanzar el equilibrio, ya que la difusión dentro de los poros se vuelve el paso limitante. Este tipo de perfil alta remoción seguida de estabilización es característico de adsorbentes microporosos con buena accesibilidad de poro y un alto número de sitios activos disponibles inicialmente, pero que requieren tiempos largos para saturar los sitios internos más difíciles de alcanzar.

La caracterización BET (Tabla 9) valida los resultados obtenidos en el análisis de remoción de SDBS, confirmando la influencia determinante de la relación de impregnación sobre el desarrollo de la porosidad. En particular, la muestra sintetizada con una relación de impregnación de 1.8 presenta un área superficial específica de 1,449.04 m²/g, significativamente superior a la registrada para la relación de impregnación de 0.5 (801.85 m²/g). Este incremento en área disponible favorece la interacción del adsorbato con los sitios activos, explicando el aumento en la eficiencia de remoción observado en las condiciones optimizadas. No obstante, se evidencia que el mayor desarrollo superficial no se acompaña de un aumento proporcional en el volumen total de poro, lo que sugiere que la generación de micro y mesoporos accesibles, más que la capacidad de volumen total es el factor determinante en la adsorción del SDBS.

4.5 Análisis General de Resultados

Esta sección contiene los resultados más relevantes obtenidos durante la investigación, sirviendo como puente entre la presentación detallada de datos y las conclusiones finales.

4.5.1 Optimización de la Síntesis y Desarrollo Textural

El estudio logró identificar las condiciones óptimas de activación para maximizar el desarrollo textural y la capacidad adsorbente del carbón.

Las condiciones de 400 °C, 60 minutos de activación y una relación de impregnación (RI) de 1.8% con ácido fosfórico (H_3PO_4) fueron clave para obtener un carbón activado con el mejor desempeño.

El incremento en la relación de impregnación fue el factor más determinante, logrando que el carbón activado sintetizado en condiciones óptimas (RI = 1.8) alcanzara un área superficial significativamente mayor de 1,449.04 m²/g, en comparación con el material con menor impregnación (801.85 m²/g).

La caracterización BET confirmó que los materiales obtenidos poseen características mesoporosas, con un tamaño de poro promedio cercano a los 3 nm. Este desarrollo de micro y mesoporos es fundamental, ya que facilita la difusión de moléculas de gran tamaño como el SDBS dentro de la matriz del carbón.

4.5.2 Eficiencia en la Remoción del Surfactante (SDBS)

Los ensayos de adsorción validaron la eficacia del carbón activado de cuesco de palma para el tratamiento de aguas contaminadas con SDBS.

El carbón activado sintetizado mostró una alta eficiencia de remoción, alcanzando valores cercanos al 95% de adsorción de SDBS en las condiciones optimizadas. Este alto rendimiento se correlaciona directamente con el área superficial obtenida.

El proceso cinético de adsorción ocurre en dos fases: una fase inicial rápida, donde se alcanzó entre el 51.9% y el 73.5% de remoción en la primera hora, atribuida a la disponibilidad de sitios activos en la superficie externa. Posteriormente, el proceso se vuelve limitado por la difusión intrapartícula, alcanzando el equilibrio entre las 7 y 8 horas de contacto.

4.5.3 Mecanismo de Adsorción y Modelado

El análisis de isotermas permitió describir el mecanismo de interacción entre el SDBS (adsorbato) y el carbón activado (adsorbente).

El modelo de Langmuir fue el que presentó el mejor ajuste a los datos experimentales, con un alto coeficiente de determinación $R^2 = 0.967$.

Este ajuste confirma que la adsorción del SDBS ocurre principalmente como una monocapa sobre sitios activos que se comportan de manera relativamente homogénea en la superficie del carbón activado.

5 Conclusiones

La cáscara de nuez de palma africana demostró ser un precursor adecuado para la obtención de carbón activado, dado su contenido significativo de celulosa, hemicelulosa y lignina, que favorecen el desarrollo de una estructura porosa tras los procesos de activación física y química.

El carbón activado sintetizado presentó una capacidad de adsorción relevante frente al surfactante SDBS presente en aguas de producción, evidenciado por los porcentajes crecientes de remoción a lo largo del tiempo de contacto, alcanzando un equilibrio entre las 7 y 8 horas de operación.

El carbón activado sintetizado a partir de cáscara de nuez de palma africana presenta una alta eficiencia en la remoción del SDBS, alcanzando valores cercanos al 95% de adsorción. Este rendimiento se correlaciona con las propiedades texturales del material, evidenciadas en el área superficial BET obtenida, que confirma la disponibilidad de sitios activos y la accesibilidad de poros, factores determinantes para la capacidad adsorbente del carbón activado.

Se logró comprender cómo se comporta el adsorbato sobre el adsorbente a través del estudio de isothermas, mostrando la importancia de seleccionar el modelo adecuado para cada tipo de superficie. Se evidenció que, mientras la isoterma de Langmuir permite describir la formación de monocapa sobre superficies homogéneas, la de Freundlich refleja mejor la heterogeneidad de algunas superficies. Los resultados obtenidos permitieron identificar la capacidad del adsorbente y su afinidad por el adsorbato, y también ofrecen herramientas para predecir y optimizar procesos de adsorción de manera práctica y eficiente. En conjunto, este estudio reafirma que el análisis de isothermas es clave para diseñar y manejar sistemas de adsorción de forma más efectiva y consciente.

6 Recomendaciones

Evaluar diferentes condiciones de activación (temperatura, tiempo, tipo y concentración de agente activante) para maximizar la superficie específica y el volumen de poro del carbón activado, con el fin de incrementar su eficiencia de adsorción.

Realizar en estudios futuros una selección controlada y sistemática del tamaño de partícula del carbón activado, ya que en este trabajo se empleó un rango sin clasificación granulométrica específica. El tamaño de partícula influye directamente en el área superficial, la velocidad de transferencia de masa y la difusión intraparticular del contaminante hacia los poros. Un menor tamaño de partícula incrementa la superficie específica expuesta y acelera la cinética de adsorción, mientras que partículas más grandes pueden favorecer la estabilidad hidráulica en sistemas de flujo continuo. Por lo tanto, la evaluación comparativa de fracciones granulométricas definidas permitirá establecer el tamaño óptimo para maximizar la eficiencia en la remoción de SDBS y facilitar la extrapolación del proceso a aplicaciones a escala piloto o industrial.

Analizar la regeneración y reutilización de los carbones, así como explorar la influencia de variables como pH con el fin de optimizar el proceso de adsorción y garantizar su aplicación práctica en el tratamiento de aguas de producción de campos petroleros.

Referencias Bibliográficas

Alaqarbeh, M. (2021). Adsorption phenomena: Definition, mechanisms, and adsorption types: Short review. *Rhazes: Green and Applied Chemistry*, 13, 43–51.

Alsawy, T., Rashad, E., El-Qelish, M., Mohammed, R. H., et al. (2022). A comprehensive review on the chemical regeneration of biochar adsorbent for sustainable wastewater treatment. *npj Clean Water*, 5, Article 29.

Asimbaya, C., Rosas, N., Endara, D., & Guerrero, V. H. (2015). Obtención de carbón activado a partir de residuos lignocelulósicos de canelo, laurel y eucalipto. *Revista Politécnica*, 36(3), 24-24.

Baby, R., Saad, S., & Azelee, N. I. W. (2021). Recent progress in activated carbon production from oil palm biomass for wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(12), 15435–15464.

Chávez Sumarriva, I. J. (2013). Estudio de extracción del surfactante dodecibenceno sulfonato sódico usando carbón activado.

Díaz Rojas, Y. Y., & Soto Calderón, K. G. (2020). Efecto del agente químico y temperatura en el rendimiento de carbón activado a partir de bagazo de caña de azúcar. *Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo*

Feijtel, T. C. J., & Tolls, J. (1999). Sorption of linear alkylbenzenesulfonates on sediment materials. *Environmental Science & Technology*, 33(18), 3110–3118.

Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2012). Preparation, characterization and evaluation of adsorptive properties of orange peel based activated carbon via microwave induced K_2CO_3 activation. *Bioresource Technology*, 104, 679–686.

Forbes. (2025, enero 28). La producción de aceite de palma cayó 6,6% en 2024 hasta 1,72 millones de toneladas. Forbes Colombia.

Frontera Energy. (2024). SAARA & ProAgrollanos: Proyecto de gestión integrada del agua. Frontera Energy. <https://www.fronteraenergy.ca/who-we-are/our-operations/infrastructure-assets/saara-proagrollanos/>

González Peregrino, J. E., & Escobar Olivares, E. L. (2022). *Remoción del dodecibenceno sulfato de sodio en el agua con carbón de antracita granular activado* (Trabajo de grado de pregrado). Universidad privada Antonio Guillermo Urrelo, Cajamarca, Perú.

HERA Project. (2013). *Linear Alkylbenzene Sulphonate (LAS) – Human & Environmental Risk Assessment* (Actualización 2013/2014).

Hu, G., Li, J., & Zeng, G. (2022). Recent advances in produced water management: Chemical composition, treatment technologies, and environmental impacts. *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126–145.

Jun, K. C., Buthiyappan, A., & Abdul Raman, A. A. (2021). Application of magnetic-biomass-derived activated carbon as an adsorbent for the treatment of recalcitrant wastewater. *Chemical Papers*, 75(10), 5279-5295

Kalam, S., Abu-Khamsin, S. A., Kamal, M. S., & Patil, S. (2021). *Surfactant adsorption isotherms: A review*. ACS Omega, 6(48), 32342-32348.

León, A. Y., Contreras-Arenas, J. D., Garnica-Fuentes, C. F., Jiménez-Caballero, M. A., Pinto-Hernández, D. F., Ariza-León, E., ... & Molina-Velasco, D. R. (2023). Removal of organic compounds in wastewater using cocoa shell-based activated carbon–SiO₂ nanoparticles. *Environment, Development and Sustainability*, 1-20.

León, A. Y., Rincón, J. R., Rodríguez, N., & Molina, D. R. (2022). Optimization of the preparation conditions for cocoa shell-based activated carbon and its evaluation as salts adsorbent material. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-14.

Leyva-Ramos, R., Ocampo-Pérez, R., Bautista-Toledo, I., Rivera-Utrilla, J., Medellín-Castillo, N. A., & Aguilar-Madera, C. A. (2019). *The adsorption kinetics of sodium dodecylbenzenesulfonate on activated carbon. Branched-pore diffusional model revisited and comparison with other diffusional models*. Chemical Engineering Communications, 207(5), 705-721.

Li, Y., Chang, F.-M., Huang, B., Song, Y.-P., Zhao, H.-Y., & Wang, K.-J. (2020). *Activated carbon preparation from pyrolysis char of sewage sludge and its adsorption performance for organic compounds in sewage*. Fuel, 266, 117053.

Liu, X., & Zhu, D. (2024). Biochar modified with anionic surfactants for enhanced adsorption of organic contaminants: Mechanisms and applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 110678.

Mahamad, M. N., Zaini, M. A. A., & Zakaria, Z. A. (2015). Preparation and characterization of activated carbon from pineapple waste biomass for dye removal. *Environmental Technology & Innovation*, 4, 150–158.

Manousaki, E., Psillakis, E., Kalogerakis, N., & Mantzavinos, D. (2004). Degradation of sodium dodecylbenzene sulfonate in water by ultrasonic irradiation. *Water Research*, 38(17), 3751–3759.

Merouani, S. (2024). Ultrasonic destruction of surfactants. *Science of the Total Environment*, 864, 161076.

Moncada Cueto, O., & Castro Gutiérrez, S. V. (2016). Caracterización de mezclas de residuos lignocelulósicos raquis de palma africana y bagazo de caña, para visualizar su potencial en la producción de etanol de segunda generación (Doctoral dissertation, Universidad Santo Tomás).

Noah, A. S. (2019). Oil Palm Empty Fruit Bunches (OPEFB) – Alternative Fibre Source for Papermaking. IntechOpen

Noh, W., Kim, T. H., Lee, K. W., & Lee, T. S. (2020). Selective adsorption of sodium dodecylbenzenesulfonate from a Cs ion mixture by electrospun mesoporous silica nanofibers. *Chemosphere*, 259, 127391.

Permian Basin Water Management Report (2022). Produced water composition and treatment technologies. Texas Produced Water Consortium.

Rahman, A. A., Sulaiman, F., & Abdullah, N. (2016). Influence of washing medium pre-treatment on pyrolysis yields and product characteristics of palm kernel shell. *Journal of Physical Science*, 27(1), 53–75.

Raja, P., & Barron, A. (2022). Análisis de área de superficie BET_nanopartículas.

Rajbongshi, N., et al. (2024). Produced water quality and treatment challenges in petroleum industry: A comprehensive review. *Environmental Technology & Innovation*, 33, 103–124.

Rangabhashiyam, S., & Balasubramanian, P. (2021). Adsorption characteristics of heavy metals in environmental systems: Mechanistic insights, modelling, and effects of influencing parameters. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 6387–6414.

Rashidi, N. A., Yusup, S., & Borhan, A. (2019). Activated carbon from palm kernel shell for CO₂ adsorption: Effect of activation methods and pore structure. *Environmental Technology & Innovation*, 13, 143–157.

RSC Advances. (2023). *Enhanced adsorption capacity of activated carbon over thermal oxidation treatment for methylene blue removal: Kinetics, equilibrium, thermodynamic, and mechanism insights*. Royal Society of Chemistry.

Scharnberg, A. R. A., Oliveira, H. A., Weschenfelder, S. E., Rubio, J., & Azevedo, A. C. (2023). Flocculation of emulsified oil-in-water with dodecylbenzene sulfonate and polyacrylamide and floc separation by dissolved air flotation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 664, 130929.

Siaw, E., Anang, M. A., & Agoe, A. K. (2021). *Comparing the Effectiveness of Activated Carbons Synthesized from Palm Kernel Shell for the Removal of Rhodamine B Dye from an Aqueous Solution*. *The International Journal of Science & Technology*, 9(8).

Tan, I. A. W., Ahmad, A. L., & Hameed, B. H. (2009). Adsorption isotherms, kinetics, thermodynamics and desorption studies of 2, 4, 6-trichlorophenol on oil palm empty fruit bunch-based activated carbon. *Journal of hazardous materials*, 164(2-3), 473-482.

Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069.

Valizadeh, H., Ghaedi, M., Asfaram, A., & Hajati, S. (2016). Efficient removal of anionic surfactant sodium dodecylbenzenesulfonate using activated carbon derived from biomass wastes. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 33, 250–258.

Vega Quispe, N. G., & Regalado Guerra, S. (2019). *Efecto de sorción y solubilidad en diferentes ionómeros de vidrio utilizados en la clínica dental especializada, de la utea-2018*.

Veil, J. A., Puder, M. G., Elcock, D., & Redweik Jr., R. J. (2004). *A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas, and coal bed methane (Informe técnico ANL/EA/RP-112631)*. Argonne National Laboratory / U.S. Department of Energy

Wang, Z., Chen, L., & Zhang, Y. (2023). Adsorptive removal of organic pollutants by SDBS-modified bentonite: Mechanism insights and performance evaluation. *Applied Clay Science*, 236, 106886.

Xu, T; and Huang, C. (2008). “Electrodialysis-based separation technologies: A critical review”. *AIChE Journal*, 54(12), 3147–3159. DOI: 10.1002/aic.11643

Xu, J., et al. (2021). Fate and behavior of surfactants in oilfield produced water treatment. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205, 108–125.

Xu, P., Zhang, Y., Jiang, W., Hu, L., Xu, X., Carroll, K. C., et al. (2022). *Characterization of produced water in the Permian Basin for potential beneficial use* (Technical Report No. 398). New Mexico Water Resources Research Institute.

Yaseen, D. A., Scholz, M., & Zhang, X. (2022). Surfactant-modified biochar for the adsorption of emerging pollutants from water: A review. *Journal of Environmental Management*, 301, 113904.

Zhang, H., He, L., Luo, H., & Zhang, W. (2018). Adsorption characteristics of anionic surfactant sodium dodecylbenzene sulfonate on the surface of montmorillonite minerals. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(10), 3190.

Zhang, L., Li, H., Zhao, Y., & Wang, Y. (2021). Effect of particle size on adsorption capacity and kinetics of activated carbon for dyes. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 610, 125707.

Apéndices

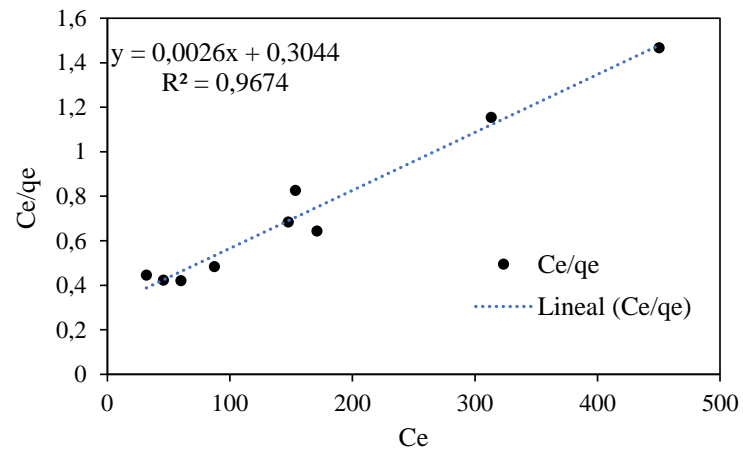
Apéndice A.

Parámetros para la isoterma del modelo de Langmuir en la adsorción del SDBS.

Ci	Ce	Cf	mg SDBS adsorbido	Gramos CA	qe (mg/g)	Ce/qe
200	53,70	146,30	1,46	0,05	27,24	1,97
400	31,88	368,12	3,68	0,05	71,48	0,45
600	45,93	554,07	5,54	0,05	108,64	0,42
800	60,08	739,92	7,40	0,05	142,84	0,42
1000	87,48	912,52	9,13	0,05	180,70	0,48
1200	153,51	1046,49	10,46	0,06	185,55	0,83
1400	147,79	1252,21	12,52	0,06	215,90	0,68
1600	171,20	1428,80	14,29	0,05	265,58	0,64
1800	313,29	1486,71	14,87	0,05	271,30	1,15
2000	450,36	1549,64	15,50	0,05	306,86	1,47

Apéndice B.

Isotermas de adsorción según el modelo matemático de Langmuir

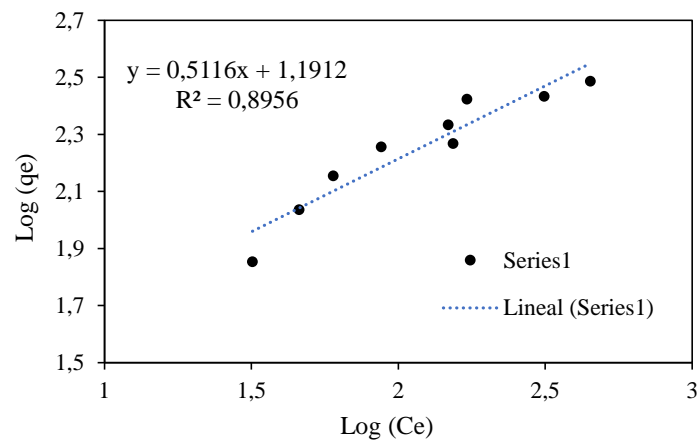


Apéndice C.*Parámetros para la isoterma del modelo de Freundlich en la adsorción del SDBS*

Ci	Ce	Cf	mg SDBS adsorbido	Gramos CA	qe (mg/g)	Log (Ce)	Log (qe)
200	53,70	146,30	1,46	0,0537	27,24	1,73	1,44
400	31,88	368,12	3,68	0,0515	71,48	1,50	1,85
600	45,93	554,07	5,54	0,0510	108,64	1,66	2,04
800	60,08	739,92	7,40	0,0518	142,84	1,78	2,15
1000	87,48	912,52	9,13	0,0505	180,70	1,94	2,26
1200	153,51	1046,49	10,46	0,0564	185,55	2,19	2,27
1400	147,79	1252,21	12,52	0,0580	215,90	2,17	2,33
1600	171,20	1428,80	14,29	0,0538	265,58	2,23	2,42
1800	313,29	1486,71	14,87	0,0548	271,30	2,50	2,43
2000	450,36	1549,64	15,50	0,0505	306,86	2,65	2,49

Apéndice D.

Isotermas de adsorción según el modelo matemático de Freundlich



Apéndice E.*Parámetros para la isoterma del modelo de Temkin en la adsorción del SDBS*

Ci	Ce	Cf	mg SDBS adsorbido	Gramos CA	qe (mg/g)	Ln(Ce)	qe
200	53,70	146,30	1,46	0,0537	27,24	3,98	27,24
400	31,88	368,12	3,68	0,0515	71,48	3,46	71,48
600	45,93	554,07	5,54	0,051	108,64	3,83	108,64
800	60,08	739,92	7,40	0,0518	142,84	4,10	142,84
1000	87,48	912,52	9,13	0,0505	180,70	4,47	180,70
1200	153,51	1046,49	10,46	0,0564	185,55	5,03	185,55
1400	147,79	1252,21	12,52	0,058	215,90	5,00	215,90
1600	171,20	1428,80	14,29	0,0538	265,58	5,14	265,58
1800	313,29	1486,71	14,87	0,0548	271,30	5,75	271,30
2000	450,36	1549,64	15,50	0,0505	306,86	6,11	306,86

Apéndice F.

Isotermas de adsorción según el modelo matemático de Temkin

