



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

Informe final de Proyecto de Investigación

DIGI-PUI-004

Informe final de proyecto de investigación

Universidad de San Carlos de Guatemala

Dirección General de Investigación

Programa Universitario de Investigación en Desarrollo Industrial

**Diseño y evaluación de un filtro de carbón activado de cascarilla de café modificado
químicamente para la remoción de colorante azul reactivo 19 en aguas contaminadas.**

Unidad avaladora: Centro de Investigaciones de Ingeniería

4.8.63.6.78

M.A. Ing. Qco. Mario José Mérida Meré

Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales -LIEXVE-, Sección Química Industrial,

Centro de Investigaciones de Ingeniería CII/USAC

Guatemala 27/11/2025



Informe final de Proyecto de Investigación

Contraportada

Autoridades de la Dirección General de Investigación

Dra. Alice Patricia Burgos Paniagua

Directora General de Investigación

Inga. Liuba María Cabrera de Villagrán

Coordinadora del Programa Universitario de Investigación

Autores

M.A. Ing. Qco. Mario José Mérida Meré, 20040697.

Coordinador del proyecto

Ing. Qca. Telma Maricela Cano Morales, 16162.

Investigador Profesional

Ing. Ind. Juan Pablo López Cano, 20220113.

Investigador Profesional

Inga. Qca. Claudia Elisa Castellanos Jurado, 20230984.

Investigador Profesional

Inga. Qca. Susana María Aroche

Investigadora Asociada

Br. Renato Paolo Cisneros Quiñonez, 20231031.

Auxiliar de Investigación II

Br. Melinna Lizeth Beteta Castro, 20240650.

Auxiliar de Investigación II

El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la DIGI de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria número: 4.8.63.6.78 en el Programa Universitario de Investigación en Desarrollo Industrial.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.

Este informe está licenciado bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

Puede copiarse, distribuirse y adaptarse con la condición de dar crédito a los autores, no usarlo con fines comerciales y compartir cualquier obra derivada bajo la misma licencia.

Para más información, visite: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>



Informe final de Proyecto de Investigación

Índice general

Índice de Tablas	2
Índice de Figuras	4
Resumen	7
Palabras clave	7
Abstract	8
Keywords	8
1. Introducción	9
2. Contexto de la investigación	12
3. Revisión de literatura	16
4. Planteamiento del problema	17
5. Objetivos	20
6. Hipótesis (si aplica)	21
7. Método	21
7.1. Tipo de investigación	21
7.2. Enfoque y alcance de la investigación	23
7.3. Diseño de la investigación	25
7.4. Población, muestra y muestreo	27
7.5. Técnicas	30
7.6. Resumen de las variables o unidades de análisis	34
7.7. Procesamiento y análisis de la información	35
8. Resultados y discusión	36
9. Propiedad intelectual	50
10. Beneficiarios directos e indirectos	50
11. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados	51
12. Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND)	52
13. Otras contribuciones del proyecto al desarrollo	53
14. Vinculación	54
15. Conclusiones	55



Informe final de Proyecto de Investigación

16. Recomendaciones	56
Referencias	58
Apéndice	61
Declaración del coordinador (a) del proyecto de investigación	101
Aval del director (a) del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro regional universitario	110
Recepción de la Dirección General de Investigación	110

Índice de Tablas

Tabla 1 Variables de estudio.....	27
Tabla 2 Objetivos, variable, instrumentos y unidad de medida o cualificación utilizada en la investigación.	34
Tabla 3 Grupos funcionales carbón activado químicamente	36
Tabla 4 Grupos funcionales carbón activado físicamente	37
Tabla 5 Eficiencia de columna de adsorción del filtro.....	38
Tabla 6 Tiempo espacial de columna de adsorción	39
Tabla 7 Prueba de Kruskal Wallis	40
Tabla 8 Prueba post-hoc de Dunn.....	42
Tabla 9 Beneficiarios directos e indirectos de la investigación	50
Tabla 10 Actividades realizadas de divulgación.....	51
Tabla 11 Impregnación de carbón obtenido de cascarilla de café con ácido fosfórico al 20 % a 60 °C	61
Tabla 12 Secado de carbón impregnado con ácido fosfórico.	61
Tabla 13 Lavado de carbón activado con agua destilada.....	63
Tabla 14 Pirólisis de carbón vegetal obtenido de la cascarilla de café	63
Tabla 15 Análisis granulométrico de carbón activado.....	64
Tabla 16 pH de soluciones filtradas en columna de adsorción con carbón activado	66
Tabla 17 Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos ácidos en el carbón activado físicamente, corrida 1	67
Tabla 18 Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos ácidos en el carbón activado físicamente, corrida 2	67
Tabla 19 Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos ácidos en el carbón activado físicamente, corrida 3.....	68



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 20 Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos básicos en el carbón activado físicamente, corrida 1	68
Tabla 21 Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos básicos en el carbón activado físicamente, corrida 2	70
Tabla 22 Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos básicos en el carbón activado físicamente, corrida 3	71
Tabla 23 Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos ácidos en el carbón activado químicamente, corrida 1	79
Tabla 24 Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos ácidos en el carbón activado químicamente, corrida 2	79
Tabla 25 Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos ácidos en el carbón activado químicamente, corrida 3	80
Tabla 26 Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos básicos en el carbón activado químicamente, corrida 1	81
Tabla 27 Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos básicos en el carbón activado químicamente, corrida 2	83
Tabla 28 Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos básicos en el carbón activado químicamente, corrida 3	85
Tabla 29 Determinación de moles equivalentes g/g de grupos ácidos de carbón activado químicamente	93
Tabla 30 Determinación de moles equivalentes g/g de grupos básicos de carbón activado químicamente	93
Tabla 31 Determinación de moles equivalentes g/g de grupos ácidos de carbón activado físicamente	93
Tabla 32 Determinación de moles equivalentes g/g de grupos básicos de carbón activado físicamente	94
Tabla 33 Grupos funcionales carbón activado químicamente	94
Tabla 34 Grupos funcionales carbón activado físicamente	94
Tabla 35 Soluciones para curvas de calibración	95
Tabla 36 Absorbancia en función de la concentración para curva de calibración	95
Tabla 37 Absorbancia de soluciones filtradas en función del tamiz y lecho de columna	97
Tabla 38 Concentración de soluciones filtradas en función de la absorbancia medida	98
Tabla 39 Determinación de caudal de columna de adsorción en función del lecho	99
Tabla 40 Diámetro Interno y externo de columna de adsorción	99
Tabla 41 Determinación del tiempo espacial del filtro (τ)	100



Informe final de Proyecto de Investigación

Índice de Figuras

Figura 1. Diseño experimental trifactorial.	30
Figura 2. Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) del carbón activado tratado químicamente obtenido de la cascarilla de café.	36
Figura 3. Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) del carbón activado tratado físicamente obtenido de la cascarilla de café.	37
Figura 4. Prueba Shapiro-Wilks	39
Figura 5. Análisis Kriskal-Walls	41
Figura 6. Análisis comparativo del tratamiento y rank	43
Nota. Gráfica del análisis comparativo entre cada tratamiento y el rank obtenido.	43
Figura 7. Porcentaje pasante de material en función de la apertura de tamiz	65
Figura 8. Porcentaje material retenido en función de la apertura de tamiz	65
Figura 9. Curva de titulación para determinación de grupos ácidos de carbón activado físicamente, corrida 1	73
Figura 10. Curva de titulación para determinación de grupos ácidos de carbón activado físicamente, corrida 2	73
Figura 11. Curva de titulación para determinación de grupos ácidos de carbón activado físicamente, corrida 3	74
Figura 12. Curva de titulación para determinación de grupos básicos de carbón activado físicamente, corrida 1	74
Figura 13. Curva de titulación para determinación de grupos básicos de carbón activado físicamente, corrida 2	75
Figura 14. Curva de titulación para determinación de grupos básicos de carbón activado físicamente, corrida 3	75
Figura 15. Determinación de punto de equivalencia para grupos ácidos de carbón activado físicamente, corrida 1	76
Figura 16. Determinación de punto de equivalencia para grupos ácidos de carbón activado físicamente, corrida 2	76
Figura 17. Determinación de punto de equivalencia para grupos ácidos de carbón activado físicamente, corrida 3	77
Figura 18. Determinación de punto de equivalencia para grupos básicos de carbón activado físicamente, corrida 1	77
Figura 19. Determinación de punto de equivalencia para grupos básicos de carbón activado físicamente, corrida 2	78



Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 20. Determinación de punto de equivalencia para grupos básicos de carbón activado físicamente, corrida 3	78
Figura 21. Curva de titulación para determinación de grupos ácidos de carbón activado químicamente, corrida 1	87
Figura 22. Curva de titulación para determinación de grupos ácidos de carbón activado químicamente, corrida 2	87
Figura 23. Curva de titulación para determinación de grupos ácidos de carbón activado químicamente, corrida 3	88
Figura 24. Curva de titulación para determinación de grupos básicos de carbón activado químicamente, corrida 1	88
Figura 25. Curva de titulación para determinación de grupos básicos de carbón activado químicamente, corrida 2	89
Figura 26. Curva de titulación para determinación de grupos básicos de carbón activado químicamente, corrida 3	89
Figura 27. Determinación de punto de equivalencia para grupos ácidos de carbón activado químicamente, corrida 1	90
Figura 28. Determinación de punto de equivalencia para grupos ácidos de carbón activado químicamente, corrida 2	90
Figura 29. Determinación de punto de equivalencia para grupos ácidos de carbón activado químicamente, corrida 3	91
Figura 30. Determinación de punto de equivalencia para grupos básicos de carbón activado químicamente, corrida 1	91
Figura 31. Determinación de punto de equivalencia para grupos básicos de carbón activado químicamente, corrida 2	92
Figura 32. Determinación de punto de equivalencia para grupos básicos de carbón activado químicamente, corrida 3	92
Figura 33. Curva de calibración de absorbancia en función de la concentración	96
Figura 34. V101isita técnica a Finca Filadelfia.....	101
Figura 35. Instalaciones de la Finca Filadelfia.....	101
Figura 36. Adquisición de la materia prima de cascarilla de café.....	102
Figura 37. Determinación del porcentaje de humedad.....	102
Figura 38. Molienda de la cascarilla de café.....	103
Figura 39. Análisis granulométrico.....	103
Figura 40. Obtención del carbón.....	104
Figura 41. Lavado del carbón.....	104
Figura 42. Impregnación del carbón	105



Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 43. Secado del carbón	105
Figura 44. Activación del carbón	106
Figura 45. Medición del colorante azul 19.....	106
Figura 46. Preparación de la solución	107
Figura 47. Filtro de carbón activado	107
Figura 48. Medición de pH	108
Figura 49. Medición del color	108
Figura 50. Medición de adsorbancia	109



Informe final de Proyecto de Investigación

Resumen

La investigación abordó el problema de la contaminación de cuerpos de agua por colorantes sintéticos, específicamente Azul Reactivo 19, proponiendo como alternativa el aprovechamiento de la cascarilla de café para producir carbón activado y emplearlo en un filtro de columna para el tratamiento de aguas residuales sintéticas. Se justificó por la necesidad de contar con tecnologías de bajo costo que, al mismo tiempo, valoricen residuos agroindustriales. El objetivo general fue diseñar y evaluar un filtro con carbón activado de cascarilla de café modificado químicamente, analizando su eficiencia en función de la granulometría, el espesor del lecho y el tiempo de operación. El estudio fue de tipo aplicado, con enfoque cuantitativo y diseño experimental, desarrollado en el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la USAC, con el apoyo del Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE) y la participación de un equipo de investigadores y estudiantes vinculados a cursos sobre colorantes.

Se caracterizó el carbón mediante método de Boehm, espectroscopía FTIR y análisis granulométrico, y se evaluó la remoción del colorante en columna de adsorción, midiendo la concentración por espectrofotometría UV-Vis a partir de una curva de calibración. La información se analizó mediante estadística descriptiva y cálculo de eficiencias de remoción. Los resultados muestran eficiencias superiores al 99.4 % y operación en rangos de pH cercanos a la neutralidad, evidenciando la viabilidad técnica del sistema. La divulgación se realizó mediante informes técnicos y actividades académicas y de divulgación científica, y los resultados pueden servir concretamente a municipalidades, comunidades afectadas por colorantes, pequeños beneficiadores de café y empresas textiles que busquen alternativas accesibles para el tratamiento de sus efluentes.

Palabras clave

1. Carbón activado	2. Adsorción	3. Aguas sintéticas	4. Colorantes reactivos	5. Filtros
--------------------	--------------	---------------------	-------------------------	------------



Informe final de Proyecto de Investigación

Abstract

The research addressed the problem of contamination of water bodies by synthetic dyes, specifically Reactive Blue 19, proposing as an alternative the use of coffee husk to produce activated carbon and employ it in a column filter for the treatment of synthetic wastewater. The study was justified by the need for low-cost technologies that simultaneously add value to agro-industrial residues. The overall objective was to design and evaluate a filter with chemically modified coffee-husk activated carbon, analyzing its efficiency as a function of particle size distribution, bed depth, and operating time. The study was applied in nature, with a quantitative approach and experimental design, and was carried out at the Engineering Research Center of the School of Engineering of USAC, with the support of the Vegetable Extracts Research Laboratory (LIEXVE) and the participation of a team of researchers and students involved in courses on dyes.

The activated carbon was characterized using the Boehm method, FTIR spectroscopy and particle-size analysis, and dye removal was evaluated in an adsorption column, measuring concentration by UV-Vis spectrophotometry based on a calibration curve. The information was analyzed using descriptive statistics and calculation of removal efficiencies. The results show efficiencies higher than 99.4% and operation within pH ranges close to neutrality, demonstrating the technical feasibility of the system. The findings were disseminated through technical reports and academic and scientific outreach activities, and the results may serve municipalities, communities affected by dye contamination, small coffee processors and textile companies seeking accessible alternatives for the treatment of their effluents.

Keywords

Plus Activated carbon, adsorption, synthetic wastewater, reactive dyes, filters



Informe final de Proyecto de Investigación

1. Introducción

La contaminación de los cuerpos de agua debido a los efluentes industriales, en particular los de la industria textil, es una problemática global de gran envergadura. Dentro de los contaminantes más críticos se encuentran los colorantes reactivos, como el azul reactivo 19, un compuesto antraquinónico ampliamente utilizado en el teñido de fibras textiles, especialmente algodón. Este colorante se caracteriza por su alta solubilidad y estabilidad química, lo que dificulta su remoción mediante tratamientos convencionales de aguas residuales, como la coagulación-floculación o procesos biológicos (Hao et al., 2010).

Además, su estructura compleja y la presencia de grupos sulfonados le confieren una elevada resistencia a la decoloración y a la biodegradación, de modo que aun en bajas concentraciones puede conferir color persistente a los cuerpos de agua receptores. Desde el punto de vista ecológico, la presencia de estos compuestos reduce la penetración de la luz solar en el medio acuático, afecta los procesos de fotosíntesis de organismos productores primarios y altera la dinámica de oxígeno disuelto, lo que puede desencadenar impactos negativos en cadenas tróficas completas.

Adicionalmente, se ha reportado que los colorantes reactivos, incluidos los de la familia de los azules, pueden generar productos intermedios tóxicos durante su degradación incompleta, lo que aumenta su riesgo ambiental y su persistencia en los ecosistemas acuáticos (Vidal et al., 2018). Frente a esta realidad, numerosos países enfrentan el desafío de controlar las descargas de aguas residuales coloreadas, en un contexto donde muchas pequeñas y medianas empresas textiles no cuentan con tecnologías de tratamiento avanzadas accesibles y adaptadas a sus capacidades técnicas y económicas.

El carbón activado es uno de los materiales más utilizados en la adsorción de contaminantes debido a su alta área superficial, porosidad y capacidad de retener una amplia gama de compuestos (Kyzas et al., 2012). Estos atributos lo han posicionado como un insumo clave en sistemas de pulido de efluentes, en etapas terciarias de tratamiento y en aplicaciones de potabilización, particularmente cuando se requiere la remoción de contaminantes recalcitrantes o compuestos traza. Sin embargo, su producción a partir de materias primas convencionales, como la madera o el carbón mineral, implica costos elevados y un impacto ambiental significativo, asociado tanto al uso de recursos no renovables como a las emisiones generadas durante los procesos de carbonización y activación.

En este sentido, el uso de materiales de desecho, como la cascarilla de café, para la producción de carbón activado ha despertado un interés creciente debido a su bajo costo, abundancia y sostenibilidad, especialmente en países productores de café como Guatemala (Ayalew & Aragaw, 2020). Este subproducto agrícola, que comúnmente es desechado o utilizado para compostaje, posee una estructura rica en lignina, celulosa y hemicelulosa, lo que le confiere propiedades adsorbentes destacadas tras su activación física o química (González-García, 2018). La transformación de la cascarilla de café en carbón activado no solo permite valorizar un residuo agroindustrial abundante, sino que también contribuye a



Informe final de Proyecto de Investigación

disminuir la presión sobre fuentes tradicionales de materia prima y a reducir la cantidad de residuos sólidos que terminan en vertederos o son quemados a cielo abierto. De esta forma, el desarrollo de adsorbentes lignocelulósicos se integra en una lógica de economía circular, en la que los desechos de una cadena productiva sirven como insumo para resolver problemas ambientales en otra.

No obstante, la eficacia de un sistema de filtración basado en carbón activado no solo depende de las propiedades intrínsecas del material, sino también de parámetros operativos críticos que han sido poco explorados en estudios previos. Por ejemplo, la granulometría del adsorbente influye directamente en la superficie específica disponible para la adsorción, donde partículas más finas (< 0.5 mm) han demostrado incrementar la eficiencia de remoción en sistemas estáticos (Aljeboree et al., 2017).

Desde el punto de vista de la transferencia de masa, la reducción del tamaño de partícula acorta las distancias de difusión internas y externas, acelera la cinética de adsorción y favorece el establecimiento rápido del equilibrio entre la fase líquida y la superficie sólida. Sin embargo, esta mejora en el desempeño adsorbente suele acompañarse de un aumento en la pérdida de carga y de una mayor tendencia a la colmatación, especialmente en sistemas de flujo continuo, lo que hace necesario encontrar un balance entre eficiencia y estabilidad hidráulica. Asimismo, el espesor del lecho en filtros dinámicos determina el tiempo de contacto entre el contaminante y el adsorbente, siendo crucial para alcanzar la saturación del material (Smith et al., 2022).

Lechos más altos ofrecen mayor volumen de carbón activado disponible y una zona de transferencia de masa más amplia, pero también incrementan la resistencia al flujo y pueden requerir estructuras de soporte de mayor robustez. Por otro lado, el pH de modificación durante la activación química, especialmente con agentes como el ácido fosfórico, altera la densidad de grupos funcionales en la superficie del carbón, mejorando su afinidad por colorantes aniónicos como el azul reactivo 19 (Akindolie & Choi, 2022). La protonación o desprotonación de grupos ácidos y básicos modifica la carga superficial del adsorbente y su interacción electrostática con las especies de colorante presentes en solución, de manera que el pH de activación y el pH de operación se convierten en variables de diseño fundamentales. En conjunto, estos parámetros operativos (granulometría, espesor de lecho y pH de modificación) conforman un espacio de diseño que, aunque mencionado en la literatura, no siempre ha sido abordado de manera sistemática en un mismo estudio, lo que limita la posibilidad de extrapolar resultados a aplicaciones reales.

Esta investigación abordó estas brechas mediante el diseño y la evaluación de un filtro de carbón activado derivado de cascarilla de café, modificado químicamente, para la remoción del colorante azul reactivo 19 en aguas sintéticas residuales simuladas. A diferencia de estudios previos que emplearon efluentes reales, donde la complejidad de la matriz acuosa limita el control experimental, el uso de aguas sintéticas permitió aislar y cuantificar el impacto de variables clave como la granulometría, el espesor del lecho y el pH de modificación (Castellar-Ortega et al., 2020). Esta estrategia experimental hizo posible



Informe final de Proyecto de Investigación

trabajar con una composición conocida y reproducible del efluente, eliminando la interferencia de otros contaminantes orgánicos e inorgánicos y permitiendo asociar de manera más directa los cambios en la respuesta del sistema (eficiencia de remoción, comportamiento hidráulico, evolución del pH) con modificaciones en las condiciones de operación.

Este enfoque metodológico no solo garantizó la reproducibilidad de los resultados, sino que también facilitó la identificación de condiciones óptimas para futuras aplicaciones a escala industrial, en las que sí se trabajará con matrices complejas. Además, la elección de la cascarilla de café como materia prima obedece a una lógica de pertinencia local: se trata de un residuo agroindustrial disponible en el contexto guatemalteco, cuya valorización puede generar sinergias entre el sector agrícola, la academia y la industria textil.

En términos más amplios, el estudio se enmarca en los esfuerzos por desarrollar tecnologías de tratamiento de aguas residuales que sean técnicamente robustas, económicamente viables y ambientalmente sostenibles. La propuesta de un filtro de carbón activado obtenido de cascarilla de café se plantea como una alternativa de bajo costo frente a la importación de carbones comerciales, reduciendo la dependencia de insumos externos y aprovechando recursos endógenos.

Este enfoque es especialmente relevante para pequeñas y medianas empresas textiles, que suelen enfrentar limitaciones financieras y tecnológicas para cumplir con normativas ambientales cada vez más estrictas. El hecho de que el sistema evaluado opere en condiciones de pH cercanas a la neutralidad y no requiera equipos de alta complejidad refuerza su potencial para ser adaptado a instalaciones con capacidades técnicas limitadas, tanto en áreas urbanas como en territorios periurbanos e industriales emergentes.

Este estudio contribuyó al desarrollo de tecnologías de remediación hídrica sostenibles, aprovechando un subproducto agrícola de bajo costo y optimizando parámetros críticos de diseño que maximizan la eficiencia de adsorción. Los hallazgos sirven como base para implementar sistemas de tratamiento accesibles en la industria textil guatemalteca, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en materia de agua limpia y gestión ambiental.

En particular, los resultados se relacionan con el ODS 6 (agua limpia y saneamiento) al proponer una alternativa para mejorar la calidad de los efluentes vertidos a cuerpos de agua, y con el ODS 12 (producción y consumo responsables) al promover la valorización de residuos agroindustriales en un esquema de economía circular. De manera complementaria, la información generada puede apoyar la formulación de políticas públicas y lineamientos técnicos en el país, así como servir de insumo para la formación de profesionales en ingeniería y ciencias ambientales, fortaleciendo las capacidades nacionales en investigación aplicada y gestión de recursos hídricos. En síntesis, la introducción de un filtro de carbón activado a partir de cascarilla de café para la remoción de azul reactivo 19 no solo responde a un problema específico de contaminación hídrica, sino que se integra en un marco más



Informe final de Proyecto de Investigación

amplio de desarrollo sostenible, innovación tecnológica y aprovechamiento racional de los recursos disponibles en el contexto guatemalteco.

2. Contexto de la investigación

Esta propuesta surgió como continuación de un proyecto previo en el que se exploró la efectividad de la cascarilla de café como material adsorbente para la remoción de colorantes en aguas sintéticas. En aquel estudio inicial, realizado bajo condiciones estrictamente controladas de laboratorio, se demostró que el carbón activado derivado este subproducto agrícola posee una capacidad prometedora para adsorber el colorante azul reactivo 19, ampliamente utilizado en la industria textil. Sin embargo, los resultados obtenidos evidenciaron la necesidad de profundizar en parámetros operativos clave que influyen directamente en la eficiencia del sistema de filtración, tales como la granulometría del adsorbente, el espesor del lecho y el pH de modificación química durante la activación del carbón. Estos factores, aunque mencionados en la literatura, no habían sido explorados de manera sistemática en el contexto de aguas residuales simuladas, lo que limitaba su aplicabilidad en escenarios industriales. En esa primera etapa se priorizó demostrar la viabilidad técnica básica del uso de cascarilla de café como precursor de carbón activado, pero aún no se contaba con información suficiente para proponer rangos óptimos de diseño ni lineamientos claros para el escalamiento del sistema (Kyzas et al., 2012; Ayalew & Aragaw, 2020).

A partir de estas limitaciones identificadas, la presente investigación se planteó como un esfuerzo por consolidar y refinar el conocimiento generado previamente, avanzando desde una prueba de concepto hacia una propuesta más robusta de diseño. El proyecto retoma la experiencia acumulada en la producción y caracterización del carbón activado obtenido de cascarilla de café, incorporando ahora un análisis más fino de las condiciones de operación del filtro, con énfasis en la respuesta del sistema frente a variaciones de tamaño de partícula, altura de lecho y condiciones de activación química. De esta manera, el trabajo se ubica en una fase intermedia entre la investigación básica y la investigación aplicada, orientada a producir resultados que puedan ser transferidos posteriormente a contextos reales de tratamiento de efluentes textiles (González-García, 2018; Castellar-Ortega et al., 2020).

El estudio se centró en optimizar estos parámetros críticos mediante el uso de aguas sintéticas residuales, diseñadas para replicar la composición química de efluentes textiles típicos. Esta elección metodológica permitió aislar variables interferentes comunes en aguas reales, como la presencia de metales pesados, sólidos suspendidos u otros contaminantes orgánicos, lo que garantizó un análisis preciso y reproducible del desempeño del filtro. Además, el enfoque en aguas sintéticas facilitó la estandarización de las pruebas, un paso esencial para validar científicamente el diseño antes de su eventual escalamiento a entornos industriales. Este tipo de aproximación ha sido empleada en otros estudios de adsorción de colorantes, precisamente para controlar la concentración del contaminante objetivo y evaluar, con mayor claridad, la



Informe final de Proyecto de Investigación

influencia de las variables de diseño seleccionadas (Aljeboree et al., 2017; Castellar-Ortega et al., 2020).

Al trabajar con aguas sintéticas, también fue posible establecer una línea base sobre la cual, en investigaciones futuras, se podrán comparar los resultados obtenidos con efluentes reales de la industria textil, donde la matriz es más compleja y dinámica. De esta forma, el proyecto se concibe como una etapa necesaria de consolidación experimental que antecede a la validación en campo, contribuyendo a reducir la incertidumbre técnica al momento de tomar decisiones sobre el diseño de filtros a escala piloto o semiindustrial (Smith et al., 2022). Este enfoque gradual, primero en sistemas simplificados y luego en matrices reales, responde a buenas prácticas de investigación en tratamientos avanzados de aguas residuales y permite maximizar el aprovechamiento de recursos humanos y materiales disponibles.

La investigación se enmarcó en la problemática ambiental de Guatemala, donde la industria textil, pese a su relevancia económica, enfrenta desafíos significativos en el tratamiento de sus efluentes debido a los altos costos asociados a tecnologías convencionales y la falta de infraestructura adecuada en pequeñas y medianas empresas. En un contexto en el que muchos vertidos aún llegan a ríos y quebradas con tratamientos limitados o inexistentes, los colorantes reactivos se suman a otras cargas orgánicas y químicas que deterioran progresivamente la calidad del agua (Hao et al., 2010; Vidal et al., 2018). Esta situación se ve agravada por la localización de parte de la actividad textil en cuencas donde los recursos hídricos ya se encuentran bajo presión, tanto por el crecimiento urbano como por la expansión agrícola, lo que incrementa la competencia por el uso del agua y agudiza los efectos de la contaminación.

Geográficamente, Guatemala presenta una alta densidad de actividad textil en regiones como Sacatepéquez, Chimaltenango y la Ciudad de Guatemala, zonas donde la escasez hídrica durante la temporada seca (de noviembre a abril) agrava la concentración de contaminantes en cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Comunidades rurales aledañas a estas áreas, que dependen de ríos y lagos para actividades agrícolas, pesca y consumo doméstico, resultan particularmente afectadas por la degradación de la calidad del agua. Aunque el presente estudio se desarrolló íntegramente en laboratorio, la selección del azul reactivo 19 como contaminante modelo y el uso de un residuo agroindustrial típico del país permiten establecer un vínculo claro entre la investigación y las problemáticas concretas que enfrentan estas regiones (Hao et al., 2010; Ayalew & Aragaw, 2020).

Si bien este estudio no incluyó muestreos in situ, su enfoque en el desarrollo de un filtro de bajo costo, elaborado a partir de un residuo local abundante como la cascarilla de café, respondió a una necesidad urgente: proveer soluciones tecnológicas accesibles que mitiguen el impacto ambiental de la industria textil, particularmente en empresas de menor escala que carecen de recursos para implementar sistemas de tratamiento complejos. En este sentido, la propuesta se alinea con experiencias internacionales que buscan reemplazar o complementar



Informe final de Proyecto de Investigación

tecnologías tradicionales de tratamiento por procesos de adsorción basados en materiales de origen agrícola, con el fin de reducir costos y huella ambiental (Kyzas et al., 2012; González-García, 2018). Esta pertinencia local y global fortalece el argumento de que la cascarilla de café puede convertirse en un insumo estratégico para abordar simultáneamente la gestión de residuos sólidos y la remoción de colorantes en efluentes.

La relevancia de esta investigación trascendió el ámbito técnico. En Guatemala, el incumplimiento de normativas ambientales, como el Reglamento de Descargas de Aguas Residuales (Acuerdo Gubernativo 236-2006), se debe en gran medida a la falta de opciones económicas y eficientes para el tratamiento de efluentes. El desarrollo de un filtro basado en carbón activado de cascarilla de café no solo facilitó el cumplimiento de estas regulaciones, sino que también se alineó con compromisos internacionales como el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 de las Naciones Unidas, que promueve el acceso universal al agua limpia y el saneamiento. Además, al aprovechar un subproducto agrícola que actualmente se desecha o subutiliza, el proyecto fomentó la economía circular, reduciendo la generación de residuos y promoviendo prácticas sostenibles en sectores clave (Ayalew & Aragaw, 2020; González-García, 2018). Esta articulación entre normativa nacional, agendas globales y recursos locales refuerza la pertinencia estratégica de la investigación en el marco de las políticas de desarrollo sostenible.

Cabe destacar que, aunque el estudio se realizó en condiciones de laboratorio durante un período de diez meses, sus hallazgos tuvieron implicaciones prácticas inmediatas. La optimización de la granulometría del carbón activado permitió determinar un tamaño de partícula que maximizó la superficie de contacto sin comprometer la permeabilidad del lecho, recogiendo la evidencia reportada en estudios previos sobre la importancia del tamaño de partícula en la eficiencia de adsorción (Aljeboree et al., 2017). Por otro lado, evaluar el espesor del lecho ayudó a identificar el equilibrio entre la capacidad de adsorción y la pérdida de presión en el sistema, un factor crítico para diseñar filtros eficientes en términos energéticos y operativos (Smith et al., 2022).

Finalmente, el análisis del pH de modificación química durante la activación del carbón reveló cómo ajustar este parámetro para potenciar la densidad de grupos funcionales en la superficie del material, mejorando su afinidad por el colorante azul reactivo 19 (Akindolie & Choi, 2022). Este conocimiento es esencial para definir protocolos de producción reproducibles y transferibles a otros contextos productivos donde se disponga de cascarilla de café u otros residuos lignocelulósicos. En conjunto, los resultados obtenidos no solo generaron conocimiento científico sobre los mecanismos de adsorción en sistemas de filtración, sino que también ofrecieron una solución tecnológica viable y escalable para un problema ambiental prioritario en Guatemala.



Informe final de Proyecto de Investigación

Al integrar el uso de residuos agrícolas, optimizar parámetros de diseño y alinearse con políticas globales de sostenibilidad, el proyecto se constituyó en un modelo innovador para abordar desafíos hídricos en contextos con recursos económicos y técnicos limitados. Los resultados obtenidos sentaron las bases para colaboraciones con la industria textil, autoridades ambientales y comunidades afectadas, promoviendo un enfoque integral hacia la gestión sostenible del agua y abriendo la posibilidad de futuras etapas de validación en campo, desarrollo de prototipos piloto y formulación de lineamientos técnicos específicos para el uso de carbón activado de cascarilla de café en el tratamiento de efluentes coloreados (Kyzas et al., 2012; Castellar-Ortega et al., 2020).



Informe final de Proyecto de Investigación

3. Revisión de literatura

Contaminación por Colorantes en Aguas Residuales

El vertido de aguas residuales con alto contenido de colorantes sintéticos, como el Azul Reactivo 19, es uno de los principales problemas de contaminación que enfrenta la industria textil. Estos colorantes, por su estructura química, son altamente solubles y presentan resistencia a la degradación biológica, lo que les permite permanecer en los cuerpos de agua durante largos períodos de tiempo. En consecuencia, estos compuestos no solo afectan la calidad del agua, sino que también presentan riesgos tóxicos para la vida acuática y humana. Se ha documentado que los métodos tradicionales de tratamiento de aguas residuales, como la coagulación-floculación y la precipitación química, no logran remover completamente estos contaminantes.

Uno de los métodos más prometedores y efectivos para la remoción de colorantes es el uso de adsorbentes, entre los cuales destaca el carbón activado, un material ampliamente reconocido por su capacidad de adsorción debido a su alta porosidad y área superficial específica.

Carbón Activado como Adsorbente Eficiente

El carbón activado es un material que se obtiene mediante la carbonización controlada de biomasa, seguido de un proceso de activación que aumenta significativamente su porosidad y superficie específica. Esta propiedad convierte al carbón activado en un adsorbente eficaz para la remoción de contaminantes, incluidos los colorantes industriales como el Azul Reactivo 19. Según Kosaiyakanon et al. (2020), el carbón activado producido a partir de residuos agrícolas puede ser modificado para mejorar sus propiedades adsorbentes. En su estudio, utilizaron biochar modificado con surfactante derivado de cascarilla de café para la remoción de colorantes reactivos, logrando resultados satisfactorios en términos de eficiencia de remoción.

Cascarilla de Café como Precursor de Carbón Activado

La cascarilla de café, un subproducto abundante en las zonas productoras de café, se ha utilizado como materia prima para la producción de carbón activado debido a su alto contenido de lignina y celulosa. Estudios recientes han demostrado que el carbón activado producido a partir de residuos de café tiene una alta capacidad de adsorción para diferentes tipos de contaminantes. Tran et al. (2020) evaluaron la eficiencia del carbón activado derivado de residuos de café para la adsorción de colorantes, encontrando que el carbón presentaba una alta capacidad de remoción de azul de metileno.

Por otro lado, Mekuiko et al. (2023) desarrollaron un carbón activado derivado de cáscaras de cacao que fue utilizado para la remoción del colorante Azul Reactivo 19. Su investigación confirmó que la estructura porosa y la amplia área superficial del carbón activado permiten adsorber eficientemente grandes cantidades de colorantes bajo condiciones óptimas de operación.



Informe final de Proyecto de Investigación

Mecanismos de Adsorción y Factores Críticos

La adsorción en carbón activado se rige por una serie de parámetros que afectan directamente la eficiencia del proceso, tales como la concentración inicial del colorante, el pH de la solución, el tiempo de contacto y la temperatura. En el caso de la adsorción del Azul Reactivo 19, se ha observado que el proceso sigue un comportamiento isotérmico tipo Langmuir, lo que sugiere la formación de una monocapa de colorante en la superficie del adsorbente.

Además, estudios como los de Ahmad y Rahman (2011) sobre la cinética de adsorción, sugieren que el proceso de adsorción sigue un modelo de pseudo-segundo orden, lo que implica que la adsorción está controlada por interacciones químicas entre el adsorbente y el colorante. El estudio de Dehvari et al. (2016) también indicó que la eficiencia del proceso de adsorción aumenta a medida que se ajusta el pH de la solución a valores ácidos, lo cual favorece la protonación de los sitios activos del carbón, mejorando la captura de colorantes aniónicos como el Azul Reactivo 19.

Uso de Carbón Activado Modificado

En investigaciones recientes, se ha explorado el uso de carbones activados modificados para aumentar su capacidad adsorbente. Por ejemplo, Mafo et al. (2023) estudiaron el uso de carbones magnéticos para la remoción de colorantes, incluidos el Azul Reactivo 19, lo que permite la recuperación del adsorbente mediante un campo magnético, haciéndolo reutilizable. Otro enfoque es el desarrollo de composites de carbón activado con nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2), que además de adsorber los contaminantes, permite su degradación mediante fotocatalisis bajo luz UV.

La investigación reciente se ha centrado en optimizar las condiciones operativas para maximizar la eficiencia de la adsorción y desarrollar adsorbentes de bajo costo y alta eficiencia. Estudios como los de Deivasigamani et al. (2023) han demostrado el potencial de utilizar biomasa tratada para la remoción de colorantes reactivos, destacando el uso de carbones activados derivados de residuos agrícolas, como la cascarilla de café, bajo condiciones experimentales óptimas. Estos estudios representan avances significativos en el desarrollo de tecnologías de tratamiento de aguas residuales que son tanto sostenibles como económicamente viables.

4. Planteamiento del problema

El tratamiento de aguas residuales industriales, especialmente aquellas provenientes del sector textil, enfrenta un desafío crítico debido a la persistencia de colorantes sintéticos como el Azul Reactivo 19, resistentes a métodos convencionales de purificación. Aunque el carbón activado se ha posicionado como un adsorbente eficaz, persiste una brecha en el desarrollo de tecnologías accesibles que aprovechen subproductos agrícolas locales, como la cascarilla de café, en regiones con alta contaminación hídrica y recursos limitados, como Guatemala. Si bien estudios previos han demostrado la capacidad de la cascarilla de café para adsorber colorantes en condiciones controladas, existe un vacío en la comprensión de cómo parámetros críticos de diseño, como la granulometría del adsorbente, el espesor del lecho y el pH de modificación química, influyen en la eficiencia del sistema de filtración. Por



Informe final de Proyecto de Investigación

ejemplo, aunque se sabe que partículas más finas aumentan la superficie de contacto, no se ha determinado la granulometría óptima que equilibre la capacidad de adsorción con la permeabilidad del lecho en sistemas dinámicos. Asimismo, el espesor del lecho, clave para garantizar un tiempo de contacto adecuado, no ha sido explorado sistemáticamente en combinación con la activación química del carbón.

Adicionalmente, la mayoría de las investigaciones se han realizado en aguas reales, donde la presencia de contaminantes secundarios (metales, sólidos suspendidos) dificulta la identificación de relaciones causales entre variables operativas y eficiencia de remoción. Esto limita la reproducibilidad y escalabilidad de los resultados. En contraste, el uso de aguas sintéticas residuales simuladas permite aislar el efecto de los parámetros críticos, facilitando la optimización del filtro antes de su aplicación en entornos industriales complejos.

Esta investigación importante debido a la creciente presión sobre los cuerpos de agua en Guatemala, donde la industria textil —motor económico clave— vierte efluentes sin tratamiento adecuado, afectando a comunidades rurales que dependen de fuentes contaminadas para su subsistencia. El desarrollo de un filtro de bajo costo, basado en un residuo agrícola abundante, no solo ofrecería una solución práctica para la remoción del Azul Reactivo 19, sino que también promovería la economía circular al valorizar la cascarilla de café. Sin embargo, sin una caracterización rigurosa de los parámetros de diseño, esta tecnología no podrá alcanzar su máximo potencial ni ser adoptada eficazmente por las pequeñas y medianas empresas textiles, principales responsables de la contaminación hídrica en el país.

El problema radica en la falta de estudios que optimicen integralmente el diseño de filtros de carbón activado derivados de cascarilla de café, considerando variables operativas clave en condiciones controladas. Abordar esta brecha es esencial para transformar un material prometedor en una tecnología viable, escalable y alineada con las necesidades ambientales y económicas de regiones con recursos limitados.

Residuos agroindustriales como precursores de carbones activados para colorantes aniónicos

El uso de residuos agroindustriales como precursores de carbones activados se ha consolidado como una estrategia de tratamiento de aguas residuales que combina eficiencia técnica y valorización de subproductos agrícolas. Diversos autores han documentado que materiales como cascarilla de arroz, cáscaras de semillas oleaginosas y otros residuos lignocelulósicos pueden transformarse en adsorbentes de alto desempeño para la remoción de colorantes catiónicos y aniónicos, con capacidades de adsorción que compiten con carbones comerciales, pero con menores costos y menor huella ambiental (Salleh et al., 2011). Este enfoque es especialmente atractivo en contextos donde la agroindustria genera grandes volúmenes de residuos y, al mismo tiempo, existen pequeñas y medianas empresas textiles que descargan efluentes coloreados sin tratamiento avanzado.

En el caso específico de colorantes aniónicos, que presentan mayor persistencia y comportamiento más complejo en comparación con los catiónicos, se ha demostrado que la



Informe final de Proyecto de Investigación

activación química de residuos como la cascarilla de arroz y la cascarilla de café con agentes como $ZnCl_2$ mejora la porosidad, la carga superficial y la presencia de grupos oxigenados, incrementando significativamente la remoción de colorantes tipo índigo y ácidos en matrices reales de aguas textiles (Paredes-Laverde et al., 2021). Estos resultados respaldan la pertinencia de explorar la cascarilla de café como precursor de carbón activado para la remoción de colorantes reactivos aniónicos, aprovechando un residuo localmente disponible y coherente con la realidad productiva del país.

Caracterización fisicoquímica del carbón activado

La eficiencia de un carbón activado no depende únicamente de su área superficial y distribución de poros, sino también de la naturaleza y cantidad de grupos funcionales en su superficie. La titulación de Boehm se ha consolidado como una técnica de referencia para cuantificar grupos ácidos y básicos (carboxílicos, lactónicos, fenólicos, entre otros) y relacionarlos con la reactividad del carbón frente a diferentes contaminantes. Estudios recientes han enfatizado que, para carbones de origen lignocelulósico, una correcta estandarización de la titulación (control de CO_2 , tiempos de equilibrio y fuerza iónica) es clave para obtener resultados reproducibles y comparables entre laboratorios (Schönherr et al., 2018). Esta información permite establecer conexiones directas entre la química superficial del adsorbente y su desempeño frente a colorantes aniónicos como el Azul Reactivo 19.

De forma complementaria, la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se ha utilizado para identificar cualitativamente los tipos de grupos funcionales y corroborar la presencia de estructuras aromáticas, enlaces C–O, C=O y grupos hidroxilo en la superficie de los carbones activados. Trabajos clásicos han demostrado que la combinación de FTIR con métodos de titulación permite no solo diferenciar carboxilos, lactonas y fenoles, sino también evaluar cómo las condiciones de activación modifican la acidez o basicidad de la superficie y, con ello, la afinidad por contaminantes iónicos (Barkauskas & Dervinyte, 2004). En el contexto del carbón activado de cascarilla de café empleado en este estudio, el uso conjunto de Boehm y FTIR proporciona una base sólida para interpretar la relación entre grupos funcionales, pH de operación y remoción de Azul Reactivo 19 en sistemas de filtro.

Columnas de lecho fijo y diseño de filtros de adsorción

Más allá de los ensayos en lote, las columnas de lecho fijo representan el puente natural hacia el diseño de sistemas de tratamiento continuos, ya que permiten estudiar la saturación progresiva del adsorbente, la forma de la curva de ruptura y la vida útil del lecho. Una revisión amplia de Patel (2019) muestra que, en diferentes sistemas de tratamiento, la interpretación de curvas de ruptura mediante modelos como Thomas, Yoon–Nelson o BDST es fundamental para dimensionar adecuadamente la altura de lecho, el tiempo de servicio y la frecuencia de regeneración o reemplazo del adsorbente. Estos criterios son directamente aplicables al análisis de filtros de carbón activado para efluentes textiles, donde las oscilaciones de carga hidráulica y de concentración de colorante son frecuentes.



Informe final de Proyecto de Investigación

En el caso de colorantes, estudios con columnas empacadas han puesto de manifiesto que variables como la altura de lecho, el caudal y la concentración de entrada determinan la pendiente y el desplazamiento de la curva de ruptura. Por ejemplo, López-Cervantes et al. (2018) evaluaron la remoción de un colorante azo en una columna de lecho fijo usando un biosorbente de quitosán–glutaraldehído y encontraron que mayores alturas de lecho y menores caudales condujeron a tiempos de ruptura más prolongados y a una mejor utilización del material adsorbente. Este tipo de comportamiento es coherente con lo esperado en filtros de carbón activado de cascarilla de café: un lecho más profundo y un flujo moderado favorecen tiempos de contacto mayores, una zona de transferencia de masa más estable y, en consecuencia, una mayor eficiencia global de remoción.

Cuando se emplean carbones activados obtenidos de residuos agroindustriales, la respuesta de la columna está además condicionada por el tamaño de partícula y la microporosidad del material. Paredes-Laverde et al. (2021) mostraron que, para carbones activados de cascarilla de arroz y café, el uso de fracciones granulométricas más finas, en combinación con un pH ácido y dosis adecuadas de adsorbente, permite alcanzar remociones de colorante superiores a las de un carbón activado comercial. Este tipo de evidencias respalda el enfoque del presente trabajo, en el cual se estudian de forma sistemática la granulometría, el espesor de lecho y el tiempo de operación del filtro, con el fin de identificar combinaciones de parámetros que maximicen la remoción de Azul Reactivo 19 y, al mismo tiempo, resulten viables para una futura implementación en sistemas de tratamiento a pequeña y mediana escala

5. Objetivos

Objetivo General

Diseñar y evaluar un filtro de carbón activado elaborado a partir de cascarilla de café para la remoción del colorante azul reactivo 19 simulando aguas sintéticas residuales industriales.

Objetivos Específicos

1. Diseñar y evaluar un filtro utilizando como adsorbente carbón activado de cascarilla de café modificado químicamente.
2. Determinar la eficiencia del filtro en la remoción del colorante azul reactivo 19, en función de la granulometría de adsorbente.
3. Analizar la eficiencia del filtro en la remoción del colorante azul reactivo 19, en función del espesor del lecho.
4. Calcular la eficiencia del filtro en la remoción del colorante azul reactivo 19, en función del tiempo de operación.



Informe final de Proyecto de Investigación

6. Hipotesis (si aplica)

1. H₀: El filtro elaborado con carbón activado de cascarilla de café modificado químicamente no presenta una eficiencia significativa en la remoción del colorante azul reactivo 19.

H₁: El filtro elaborado con carbón activado de cascarilla de café modificado químicamente presenta una eficiencia significativa en la remoción del colorante azul reactivo 19

2. H₀: La granulometría del adsorbente no influye significativamente en la eficiencia de remoción del colorante azul reactivo 19.

H₁: La granulometría del adsorbente influye significativamente en la eficiencia de remoción del colorante azul reactivo 19.

3. H₀: El espesor del lecho filtrante no afecta significativamente la eficiencia de remoción del colorante azul reactivo 19.

H₁: El espesor del lecho filtrante afecta significativamente la eficiencia de remoción del colorante azul reactivo 19.

4. H₀: El tiempo de operación del filtro no tiene un efecto significativo sobre la eficiencia de remoción del colorante azul reactivo 19.

H₁: El tiempo de operación del filtro tiene un efecto significativo sobre la eficiencia de remoción del colorante azul reactivo 19.

7. Método

7.1. Tipo de investigación.

Este proyecto corresponde a una investigación aplicada y experimental, conforme a los criterios establecidos por Frascati (2015). Su enfoque principal es generar conocimientos orientados a un objetivo práctico: el diseño y evaluación de un filtro de carbón activado de cascarilla de café modificado químicamente para la remoción del colorante Azul Reactivo 19 en aguas sintéticas residuales simuladas. Como investigación aplicada, busca desarrollar una solución tecnológica concreta y transferible, aprovechando un material de bajo costo y sostenible para abordar un problema ambiental crítico en la industria textil.

En este marco, la investigación se distancia de la investigación básica, cuyo propósito es ampliar el conocimiento sin una aplicación inmediata, y se posiciona claramente en el nivel en el que el conocimiento científico se orienta a resolver una necesidad específica. El problema de partida no es abstracto: surge de la dificultad real que tienen las empresas textiles para remover colorantes reactivos de sus efluentes y cumplir la normativa ambiental. Así, cada decisión metodológica, desde la selección del colorante modelo hasta la elección de la cascarilla de café como precursor del carbón activado, responde a la intención explícita de generar resultados que puedan ser traducidos en una tecnología concreta, susceptible de ser probada, ajustada y, eventualmente, adoptada por actores productivos. De esta forma, el



Informe final de Proyecto de Investigación

proyecto se ubica en la lógica de “investigación orientada a la misión”, donde la producción de conocimiento está estrechamente vinculada a la solución de problemas socioambientales específicos.

El enfoque aplicado se fundamenta en la capacidad de transformar los resultados en un producto tangible: un sistema de filtración optimizado que pueda implementarse en entornos industriales. Esto incluye no solo la validación técnica del filtro, sino también la generación de protocolos estandarizados para su fabricación y operación, priorizando la accesibilidad para pequeñas y medianas empresas. A diferencia de estudios previos centrados en aguas reales, esta investigación utiliza aguas sintéticas para garantizar el control experimental, permitiendo aislar el impacto de variables clave como la granulometría del adsorbente, el espesor del lecho y el pH de modificación química durante la activación del carbón.

En coherencia con este carácter aplicado, el proyecto persigue que el resultado final no se limite a un conjunto de datos o conclusiones académicas, sino que se materialice en especificaciones técnicas, rangos de operación, recomendaciones de diseño y secuencias de operación que puedan incorporarse a manuales, guías o instructivos. El filtro evaluado se concibe como un prototipo funcional que, con los ajustes correspondientes, podría evolucionar hacia un módulo de tratamiento real, ya sea autónomo o integrado a sistemas existentes. Este tránsito desde el laboratorio hacia la práctica es precisamente el sello de la investigación aplicada: el conocimiento generado está pensado para salir del entorno académico y dialogar con las capacidades, limitaciones y necesidades de la industria.

Como investigación experimental, el estudio se desarrolla bajo condiciones rigurosamente controladas, manipulando las variables independientes mencionadas para evaluar su efecto en la eficiencia de adsorción. Este enfoque permite probar hipótesis específicas —como la relación entre la superficie específica del carbón y su granulometría, o la influencia del pH de activación en la funcionalización química—, generando datos cuantitativos que validen el diseño del filtro. La experimentación incluyó la caracterización fisicoquímica del carbón activado mediante técnicas como la espectroscopía FTIR y el método de Boehm, asegurando una comprensión integral de los mecanismos de adsorción.

El carácter experimental implica, además, el control sistemático de las condiciones de operación (concentración inicial del colorante, caudal, volumen de lecho, tiempo de operación, temperatura) y la repetición de ensayos para garantizar la reproducibilidad de los resultados. La manipulación deliberada de las variables independientes permite establecer comparaciones directas entre tratamientos y atribuir con mayor certeza las diferencias observadas a los cambios introducidos en el sistema. Así, la investigación no se limita a describir un fenómeno, sino que se orienta a verificar causalidades: qué ocurre cuando se reduce el tamaño de partícula, se incrementa la altura del lecho o se modifica el pH de activación, y cómo estos cambios se reflejan en indicadores como la eficiencia de remoción y el comportamiento hidráulico del filtro.



Informe final de Proyecto de Investigación

La pertinencia de este trabajo radica en su potencial para impactar tanto en el ámbito tecnológico como en políticas públicas. Al ofrecer una alternativa sostenible y económicamente viable para el tratamiento de efluentes textiles, el proyecto se alinea con normativas nacionales e internacionales, como el Reglamento de Descargas de Aguas Residuales en Guatemala y el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 de las Naciones Unidas. Además, los hallazgos podrían respaldar la formulación de políticas que incentiven el uso de tecnologías basadas en residuos agrícolas, así como el registro de patentes para su implementación industrial. En síntesis, esta investigación no solo avanza en el conocimiento científico sobre adsorción, sino que también propone un modelo replicable para la gestión sostenible del agua en contextos con recursos limitados.

En este sentido, el tipo de investigación escogido —aplicada y experimental— es coherente con la aspiración de generar impacto más allá del aula y del laboratorio. La posibilidad de que, a partir de este trabajo, se diseñen prototipos piloto, se establezcan convenios con empresas textiles o se impulsen programas de transferencia tecnológica, refuerza la idea de que el proyecto se ubica en la frontera entre la ciencia y la solución directa de problemas. Al mismo tiempo, el cumplimiento de criterios metodológicos estrictos —control de variables, uso de técnicas de caracterización y análisis estadístico— asegura que el avance hacia la aplicación no sacrifica el rigor científico, sino que lo aprovecha como base para construir una tecnología sólida, justificable y defendible tanto ante la comunidad académica como ante tomadores de decisión y usuarios finales.

7.2. Enfoque y alcance de la investigación.

El enfoque de la presente investigación es cuantitativo, centrado en la evaluación rigurosa de la eficiencia de adsorción del colorante Azul Reactivo 19 mediante técnicas precisas como la espectrofotometría UV-Vis. Este método permite analizar de manera objetiva el comportamiento del filtro de carbón activado bajo condiciones experimentales controladas, priorizando tres variables independientes: la granulometría del adsorbente, el espesor del lecho y el pH de modificación química durante la activación del carbón. A diferencia de estudios previos, se elimina el componente cualitativo relacionado con percepciones comunitarias, ya que la fase actual se enfoca exclusivamente en la validación técnica del sistema de filtración en condiciones estandarizadas de laboratorio.

Dentro de este enfoque cuantitativo, la variable dependiente principal es la concentración residual de Azul Reactivo 19 en el efluente tratado y, derivada de ella, la eficiencia de remoción del colorante. Cada tratamiento se definió a partir de combinaciones específicas de granulometría, espesor de lecho y pH de modificación, registrando para cada una de ellas valores numéricos de absorbancia, concentración, pH y parámetros hidráulicos. El uso de instrumentos de medición calibrados, protocolos de muestreo definidos y réplicas experimentales permitió minimizar la influencia del error aleatorio y fortalecer la confiabilidad de los resultados. De este modo, el enfoque cuantitativo no se limitó a “medir”, sino que se orientó a generar información estadísticamente sólida que respaldara las conclusiones sobre el desempeño del sistema.



Informe final de Proyecto de Investigación

El alcance de la investigación es explicativo-experimental, pues buscó no solo cuantificar la eficacia del filtro, sino también explicar las relaciones causales entre las variables de diseño y la capacidad de adsorción del carbón activado. Esto incluyó determinar cómo la granulometría influye en la superficie específica disponible para la adsorción, cómo el espesor del lecho afecta el tiempo de contacto entre el adsorbente y el contaminante, y cómo el pH de modificación durante la activación química altera la densidad de grupos funcionales en la superficie del material. En esta lógica explicativa, no solo se describieron tendencias, sino que se plantearon argumentos sobre los mecanismos físicos y químicos que subyacen a las diferencias observadas entre tratamientos, integrando la información de caracterización del material con el desempeño en columna.

Para ello, se empleó un diseño experimental factorial que combina estos parámetros en múltiples niveles, garantizando un análisis integral de sus interacciones y efectos individuales. Este tipo de diseño permite evaluar, por ejemplo, si la mejora en la remoción asociada a una granulometría más fina depende o no de la altura del lecho, o si el efecto del pH de modificación se mantiene constante para diferentes combinaciones de tamaño de partícula. La estructura factorial del experimento contribuyó a aprovechar de manera eficiente el número de corridas realizadas, reduciendo la cantidad de ensayos necesarios para obtener conclusiones robustas y facilitando la construcción de modelos que incluyan términos de interacción entre variables.

En cuanto a las delimitaciones, el alcance se circunscribió a ensayos en columna a escala de laboratorio, utilizando aguas sintéticas residuales simuladas, preparadas con Azul Reactivo 19 a concentraciones definidas. No se incluyeron efluentes reales ni otros colorantes, lo cual constituye una restricción intencional del alcance: se privilegió el control experimental y la claridad en la interpretación de resultados por encima de la diversidad de escenarios. Esta decisión permite que la presente fase se centre en comprender el comportamiento del sistema en condiciones ideales y sienta las bases para futuras investigaciones aplicadas en matrices más complejas. Asimismo, el estudio se desarrolló en un periodo de tiempo finito, lo que implicó limitar el horizonte de operación de la columna y evaluar la remoción dentro de rangos de tiempo definidos.

Este enfoque y alcance se alinean directamente con los objetivos específicos del proyecto. En primer lugar, el diseño y evaluación del filtro con carbón modificado químicamente se validó mediante técnicas como la espectroscopía FTIR y el método de Boehm, que permitió caracterizar los grupos funcionales responsables de la adsorción. La inclusión de estas técnicas de caracterización dentro de un enfoque cuantitativo asegura que las observaciones sobre el desempeño del filtro puedan relacionarse con propiedades medibles de la superficie del adsorbente, evitando interpretaciones especulativas. En segundo lugar, la evaluación de la granulometría comparó partículas de distintos tamaños Tamiz N.º 10: 2.00 (mm) y Tamiz N.º 8: 2.36 (mm) para identificar la configuración óptima que maximice la eficiencia sin comprometer la permeabilidad. Este análisis permitió discutir el compromiso entre área de contacto disponible para la adsorción y estabilidad hidráulica del lecho.



Informe final de Proyecto de Investigación

En tercer lugar, el análisis del espesor del lecho determinó el equilibrio entre la capacidad de remoción y la pérdida de presión en el sistema. Al trabajar con alturas de lecho diferenciadas se pudo observar cómo un incremento en el volumen de carbón activado disponible y en el tiempo de contacto se traduce en variaciones en la eficiencia global, sin perder de vista las implicaciones prácticas que tiene un aumento en la resistencia al flujo. Por último, el estudio del pH de modificación durante la activación química reveló cómo este parámetro influye en la afinidad del carbón por el colorante, permitiendo establecer rangos de pH de activación que generan superficies más adecuadas para la interacción con especies aniónicas. De esta forma, cada objetivo específico se abordó con una estrategia experimental coherente con el enfoque cuantitativo y con el nivel de profundidad explicativa planteado.

Los resultados se procesaron mediante análisis estadístico para identificar correlaciones significativas entre variables, respaldando la generación de modelos predictivos. Este procesamiento estadístico permitió discernir qué efectos eran realmente atribuibles a las variables de diseño y cuáles podían considerarse producto del azar experimental, fortaleciendo la validez interna del estudio. La interpretación de los resultados no se limitó a la comparación de promedios, sino que incorporó la significancia estadística como criterio para aceptar o rechazar hipótesis sobre el comportamiento del sistema.

Este alcance explicativo no solo fundamentó científicamente el diseño del filtro, sino que también proporcionó protocolos replicables para su escalamiento industrial, priorizando su aplicabilidad en la industria textil guatemalteca. El establecimiento de condiciones operativas claras, en términos de tamaño de partícula, espesor de lecho, tiempos de operación y pH de modificación, facilita que otros laboratorios o plantas piloto repliquen el sistema y adapten sus parámetros a diferentes capacidades de tratamiento. La eliminación de componentes cualitativos refuerza el rigor metodológico, asegurando que los hallazgos sean transferibles a contextos reales sin depender de percepciones subjetivas, lo que consolida la viabilidad técnica de la solución propuesta y deja abierta la posibilidad de que, en etapas posteriores, se incorporen estudios sociales y económicos complementarios que analicen aceptación, costos y barreras de implementación.

7.3. Diseño de la investigación.

El diseño de la investigación es de tipo experimental, con el propósito de evaluar la capacidad de adsorción del carbón activado de cascarilla de café modificado químicamente para remover el colorante Azul Reactivo 19 en aguas sintéticas residuales simuladas. A diferencia de estudios previos que empleaban aguas reales, este diseño prioriza el control experimental, permitiendo manipular variables clave relacionadas con el diseño del filtro: la granulometría del adsorbente, el espesor del lecho y el tiempo de operación en la columna (además del pH de modificación química definido en la etapa de activación del carbón). Bajo este esquema, el sistema se concibe como un modelo simplificado y controlado, donde es posible estudiar de forma aislada y comparativa el efecto de las condiciones de diseño sobre la eficiencia de remoción del colorante, minimizando la influencia de factores externos.



Informe final de Proyecto de Investigación

El diseño experimental se basó en la manipulación de tres variables independientes, cuyos niveles se definieron de la siguiente manera:

Granulometría del carbón activado: Tamiz N.º 10: 2.00 mm y Tamiz N.º 8: 2.36 mm (utilizando tamices estandarizados, a partir de la fracción predominante obtenida en el análisis granulométrico).

Espesor del lecho: 20 cm y 30 cm, seleccionados como alturas representativas para comparar un lecho compacto de menor volumen con uno de mayor capacidad adsorbente.

Tiempo de operación: 0, 15, 30, 45, 60 y 100 minutos, registrados como puntos de muestreo para describir la evolución temporal de la concentración de Azul Reactivo 19 en el efluente tratado.

Se empleó un diseño factorial (multiplicativo) $2 \times 2 \times 5$, combinando los niveles de cada variable, lo que generó un conjunto de tratamientos experimentales que cubren diferentes configuraciones del filtro dentro del rango de interés. Cada tratamiento se realizó con 3 réplicas independientes, totalizando 60 experimentos, con el fin de garantizar robustez estadística y minimizar el error aleatorio asociado a la variabilidad experimental. El orden de ejecución de los tratamientos se organizó de manera sistemática y, en lo posible, aleatorizada, para evitar sesgos derivados de efectos de arrastre, condiciones ambientales o variaciones operativas en el tiempo de trabajo.

Las aguas sintéticas se prepararon disolviendo el colorante Azul Reactivo 19 en agua destilada, ajustando la concentración a 100 mg/L para simular efluentes textiles de alta carga de colorante. Se trabajó con un pH neutro (6.5 ± 0.2) y una temperatura constante (25 ± 1 °C), controlando estas condiciones en todas las corridas experimentales. La selección de 100 mg/L como concentración inicial buscó representar un escenario exigente para el filtro, de forma que las diferencias entre tratamientos fueran suficientemente claras y la capacidad adsorbente del carbón activado pudiera evaluarse bajo un desafío significativo.

En cada combinación de granulometría y espesor de lecho se hizo pasar el agua sintética a través de la columna, recolectando muestras de efluente en los tiempos establecidos (0, 15, 30, 45, 60 y 100 minutos). Las concentraciones residuales de Azul Reactivo 19 se determinaron mediante espectrofotometría UV-Vis, calculando la eficiencia de remoción como parámetro de respuesta principal. Paralelamente, se registraron variables complementarias como el pH del efluente y el caudal, a fin de contar con información adicional sobre el comportamiento hidráulico y químico del sistema.

El análisis de los resultados se realizó mediante una prueba de Kruskal Wallis para determinar el impacto significativo ($p < 0.05$) de cada variable independiente (granulometría, espesor del lecho, tiempo de operación, y el pH de modificación establecido en la etapa de activación) y sus posibles interacciones sobre la eficiencia de remoción del colorante. Antes



Informe final de Proyecto de Investigación

de aplicar la prueba, se verificaron los supuestos básicos del modelo (normalidad de los residuos, homogeneidad de varianzas y ausencia de valores atípicos extremos).

Cuando se identificaron diferencias significativas, se aplicó una prueba post hoc de Dunn para comparar los niveles de cada variable y establecer qué configuraciones del sistema resultaban estadísticamente superiores. Este análisis permitió, por ejemplo, determinar si las diferencias entre las granulometrías evaluadas eran realmente relevantes desde el punto de vista estadístico, o si el aumento del espesor del lecho generaba un beneficio consistente en términos de remoción del colorante.

En conjunto, el diseño experimental adoptado no solo permitió identificar combinaciones de parámetros operativos favorables, sino también comprender, con base estadística, cómo influyen estas variables en la respuesta del sistema. Esto convierte al diseño en una herramienta central del estudio, ya que vincula de manera ordenada la planificación de los ensayos, la recopilación de datos y la formulación de conclusiones aplicables al diseño y futura implementación de filtros de carbón activado de cascarilla de café en contextos reales de tratamiento de efluentes textiles.

Tabla 1

Variables de estudio

Variable	Niveles	Descripción
Granulometría adsorbente	del 2.0 y 2.36 mm	Tamaño de partícula del carbón activado, determinado mediante tamizado estandarizado (ASTM).
Espesor del lecho	20 y 30 cm	Altura de la capa de carbón activado en la columna de filtración.
Tiempo de operación	0, 15, 30, 45, 60, 100 min	Tiempo de operación
Réplicas	3	Cada combinación de variables se probará con 3 réplicas para robustez estadística.
Concentración colorante	de 100 mg/L	Concentración fija de Azul Reactivo 19 en aguas sintéticas preparadas en laboratorio.
pH del agua sintética	6.5 ± 0.2	pH controlado en las aguas sintéticas para simular condiciones neutras de efluentes.

Nota. Variables que se utilizaron para el diseño experimental de la investigación.

7.4. Población, muestra y muestreo.

La población de este estudio estuvo compuesta, en sentido conceptual, por todas aquellas aguas residuales provenientes de procesos de teñido textil que contienen colorantes reactivos



Informe final de Proyecto de Investigación

similares al Azul Reactivo 19. Sin embargo, para efectos operativos y con el fin de garantizar un control estricto de las condiciones experimentales, esta población se representó mediante aguas sintéticas residuales simuladas, diseñadas en laboratorio para replicar la composición química de efluentes textiles contaminados con dicho colorante. Estas aguas se prepararon disolviendo el Azul Reactivo 19 en concentraciones controladas (100 mg/L), ajustando el pH a 6.5 ± 0.2 y manteniendo una temperatura constante de 25 ± 1 °C. La preparación se realizó en lotes homogéneos, utilizando agitación mecánica hasta la completa disolución del colorante y verificando visualmente la ausencia de partículas no disueltas; de esta forma se garantizó homogeneidad y reproducibilidad en las condiciones experimentales a lo largo de todo el estudio.

Antes de ser utilizadas en cada ensayo, las soluciones sintéticas se mantuvieron en recipientes limpios y debidamente rotulados, evitando la exposición prolongada a la luz directa o a variaciones bruscas de temperatura. Esto permitió asegurar que las diferencias observadas en la eficiencia de remoción se debieran a las combinaciones de variables de diseño del filtro y no a cambios no controlados en la composición del agua sintética.

Criterios de inclusión y exclusión

Para definir con claridad qué lotes de agua sintética formaban parte de la población operativa del estudio, se establecieron criterios de inclusión y exclusión, tanto a nivel de concentración del colorante como de condiciones fisicoquímicas básicas:

Criterios de inclusión:

Aguas sintéticas preparadas con concentración estandarizada de Azul Reactivo 19 (100 mg/L), verificadas mediante medición espectrofotométrica o por control volumétrico durante la preparación.

Muestras con pH controlado en el rango neutro (6.5 ± 0.2), ajustadas con soluciones de ácido o base diluidos hasta alcanzar el rango especificado.

Lotes de agua sintética libres de interferentes adicionales (metales pesados, sólidos suspendidos, aceites o materia orgánica no considerada en el diseño), preparados exclusivamente con agua destilada y el colorante objetivo.

Criterios de exclusión:

Muestras con desviaciones en la concentración de colorante superiores a ± 10 % del valor objetivo, ya sea por errores en la dosificación o por pérdidas durante la preparación.

Aguas sintéticas con pH fuera del rango establecido (6.3–6.7), aun después de intentar su corrección, ya que esto podría alterar la especiación del colorante y la carga superficial del adsorbente.



Informe final de Proyecto de Investigación

Lotes contaminados con sustancias no relacionadas con el estudio (por ejemplo, aceites, materia orgánica externa, restos de detergentes o sedimentos), que pudieran competir por los sitios de adsorción o modificar el comportamiento hidráulico del sistema.

Estos criterios aseguraron que la “población efectiva” utilizada en los ensayos fuera lo más homogénea posible, reduciendo al mínimo la variabilidad atribuible al agua de alimentación y concentrando el análisis en el efecto de las variables de diseño del filtro.

Muestra

La muestra experimental se definió como el conjunto de lotes estandarizados de 500 mL de agua sintética preparados en laboratorio bajo las condiciones antes descritas. Cada experimento utilizó un volumen fijo de 500 mL por réplica, tanto para garantizar consistencia en las pruebas de adsorción como para facilitar la comparación entre tratamientos. Este volumen se consideró suficiente para estabilizar el flujo en la columna, obtener el número de alícuotas necesarias para los análisis y evitar efectos de vaciado prematuro del sistema durante el tiempo máximo de operación (100 minutos).

Para garantizar la representatividad estadística, se realizaron 3 réplicas por cada combinación de variables experimentales (granulometría, espesor del lecho, tiempo de operación), siguiendo el diseño factorial establecido. Cada réplica se preparó a partir de un lote independiente de agua sintética, cumpliendo los criterios de inclusión, de modo que fue posible estimar la variabilidad intra-tratamiento y calcular promedios y desviaciones estándar con fundamento estadístico.

Parámetros estadísticos para el cálculo de muestra

El muestreo se basó en un diseño experimental trifactorial, donde el tamaño de la muestra estuvo determinado por el número de combinaciones de variables y sus réplicas. En este caso, la combinación de dos niveles de granulometría, dos niveles de espesor de lecho y cinco tiempos de operación generó 20 tratamientos experimentales. Al aplicar 3 réplicas por tratamiento, se obtuvo un total de 60 experimentos.

Este enfoque garantiza robustez estadística al permitir evaluar la variabilidad intra e inter-tratamiento y aplicar pruebas de similitud. Dado que las aguas sintéticas se diseñaron para ser homogéneas y reproducibles, no fue necesario recurrir a un cálculo convencional de tamaño de muestra basado en poblaciones altamente variables, como suele hacerse en estudios de campo con aguas reales. En lugar de ello, el tamaño de muestra se definió en función de los requerimientos del diseño factorial y de la necesidad de contar con réplicas suficientes para detectar diferencias significativas entre tratamientos.

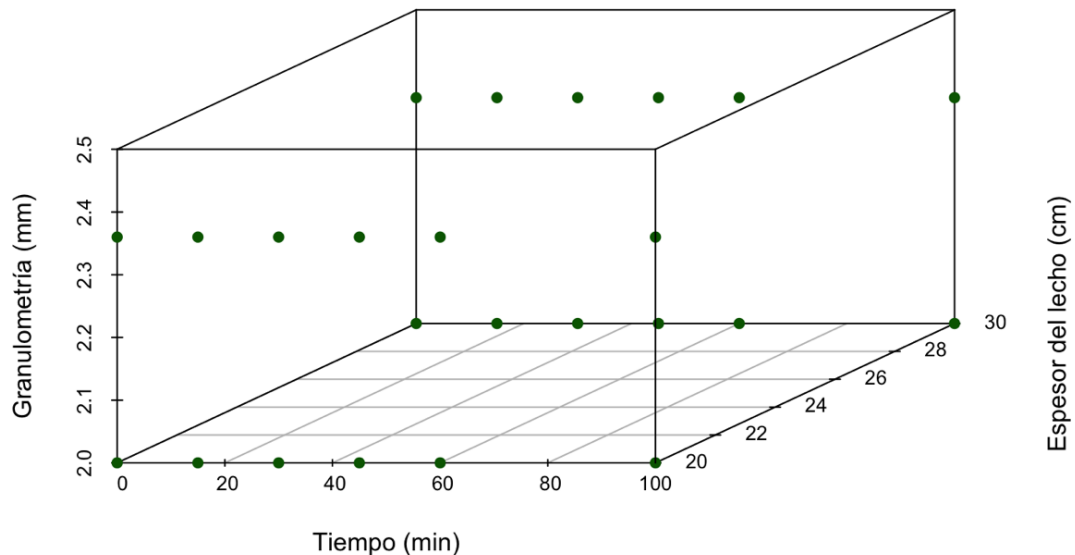
En síntesis, la estrategia de población muestra y muestreo adoptada en esta investigación permitió trabajar con un sistema controlado y estadísticamente robusto, donde la variación en los resultados se atribuye principalmente a las variables de diseño del filtro y no a

Informe final de Proyecto de Investigación

fluctuaciones en la calidad del agua de alimentación. Esto refuerza la validez interna del estudio y sienta bases sólidas para futuras fases de validación en matrices de aguas residuales reales.

Figura 1.

Diseño experimental trifactorial.



Nota. Diseño trifactorial de la investigación, tomando en cuenta la granulometría, el espesor del lecho y el tiempo de contacto.

7.5. Técnicas.

Para la presente investigación, se utilizaron técnicas experimentales cuantitativas con el fin de evaluar la eficiencia del filtro de carbón activado de cascarilla de café modificado químicamente en la remoción del colorante Azul Reactivo 19 en aguas sintéticas residuales simuladas. A continuación, se detallan las técnicas, procedimientos y equipos empleados en el desarrollo del proyecto:

Técnicas Cuantitativas

Análisis de laboratorio para la cuantificación del colorante:

Se utilizó espectrofotometría UV-Vis para medir la concentración de Azul Reactivo 19 en las muestras de agua antes y después del tratamiento. La absorbancia se registrará a 595 nm, longitud de onda óptima para este colorante, empleando un espectrofotómetro UV-Visible marca Perkin Elmer. Este equipo permitió cuantificar la eficiencia de remoción con precisión, asegurando la repetibilidad de los resultados.



Informe final de Proyecto de Investigación

Preparación del adsorbente (carbón activado modificado químicamente):

La cascarilla de café se procesó mediante activación química con ácido fosfórico (H_3PO_4), siguiendo protocolos estandarizados. Primero, el material se carbonizó en un horno mufla a $600\text{ }^\circ\text{C}$ para eliminar compuestos volátiles. Posteriormente, se impregnó con H_3PO_4 a pH 4 para modificar su superficie. El carbón activado resultante se caracterizó mediante Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) para identificar grupos funcionales clave (ej. $-COOH$, $-OH$) y mediante el método de Boehm para cuantificar la acidez superficial.

Pruebas de adsorción:

Las pruebas se realizaron en un sistema de filtración en columna, donde se evaluarán tres variables:

- Granulometría del carbón activado: 2.0 y 2.36 mm (clasificados con tamices ASTM).
- Espesor del lecho: 20 y 30 cm
- Flujo de agua sintética para simular condiciones operativas realistas.

Se circularon 500 mL de agua sintética contaminada (100 mg/L de colorante) a través del filtro, midiendo la concentración residual cada 30 minutos hasta alcanzar equilibrio.

Equipos de Laboratorio

- Para la investigación se emplearon los siguientes equipos:
- Espectrofotómetro UV-Vis para mediciones de concentración de colorante.
- Horno mufla para la carbonización de la cascarilla de café.
- Espectrómetro FTIR para caracterización química del carbón activado.
- Tamices ASTM estandarizados para clasificar la granulometría del adsorbente.
- Sistema de filtración en columna con control de flujo y presión.

Los experimentos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE) y el Centro de Investigaciones de Ingeniería, espacios equipados con la infraestructura necesaria.

Organización, Registro y Recolección de Información

Las aguas sintéticas se prepararon en lotes de 500 mL, garantizando homogeneidad en concentración de colorante (100 mg/L), pH (6.5 ± 0.2) y temperatura ($25 \pm 1^\circ\text{C}$). Cada muestra se etiquetó con un código único que incluirá la combinación de variables probadas (ej. G05-E10-pH2 para granulometría <0.5 mm, espesor 10 cm, pH de modificación 2). Los datos se registrarán en una base de datos electrónica, incluyendo absorbancia, eficiencia de remoción y parámetros operativos. Se seguirán protocolos estandarizados para garantizar la trazabilidad y replicabilidad de los experimentos.



Informe final de Proyecto de Investigación

- Diseñar y evaluar un filtro utilizando como adsorbente carbón activado de cascarilla de café modificado químicamente.

Se recolectó y secó la cascarilla de café, posteriormente será carbonizada en horno mufla (600 °C, 1-2 horas) y activada químicamente con ácido fosfórico (H₃PO₄). Luego se lavó y secó el carbón activado obtenido. Este fue caracterizado mediante espectroscopía infrarroja (FTIR) realizado en el proyecto predecesor DIGI 4.8.63.4.71 y método de Boehm para verificar grupos funcionales (Boehm, 2002; Ayalew & Aragaw, 2020). El carbón activado será empacado en columna para construir el filtro experimental y se verificará estabilidad hidráulica con flujo de agua destilada.

Acidez superficial según Boehm:

$$\text{Grupos superficiales (meq/g)} = \frac{(V_{\text{blanco}} - V_{\text{muestra}}) \times N \times 1000}{m_{\text{carbón}}} \quad (\text{ec. 1})$$

V_{blanco} : Volumen consumido por la solución control (L).

V_{muestra} : Volumen consumido por la solución en presencia de carbón activado (L).

N : Normalidad de la solución valorante (meq/mL).

$m_{\text{carbón}}$: masa del carbón activado utilizado (g).

- Evaluar la eficiencia del filtro en la remoción del colorante azul reactivo 19, en función de la granulometría del adsorbente.

Se clasificaron mediante tamizado dos granulometrías del carbón activado (2.0 mm y 2.36 mm). Se montaron columnas filtrantes idénticas usando cada tamaño de partícula con condiciones fijas de operación (20 cm de espesor, caudal constante ~200 mL/min). Se alimentaron 500 mL de solución acuosa con 100 mg/L de azul reactivo 19, del agua sintética.

La eficiencia de remoción se calculó según (Castellar-Ortega et al., 2020):

$$\% \text{ Remoción} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (\text{ec. 2})$$

C_0 : Concentración inicial del colorante (mg/L).

C_t : Concentración residual del colorante (mg/L) medida mediante UV – Vis a 595 nm.

Informe final de Proyecto de Investigación

- Evaluar la eficiencia del filtro en la remoción del colorante azul reactivo 19, en función del espesor del lecho.

Se seleccionó la granulometría óptima obtenida del objetivo 2, y se evaluó en columnas con diferentes espesores del lecho (20 y 30 cm). Se hicieron circular una solución acuosa sintética con 100 mg/L del colorante, manteniendo constantes el flujo (10 mL/min), pH y temperatura. La eficiencia de remoción se calculó nuevamente mediante (Kyzas & Lazaridis, 2012) por la ecuación 2.

- Evaluar la eficiencia del filtro en la remoción del colorante azul reactivo 19, en función del tiempo.

Se usó la configuración óptima (granulometría y espesor) determinada anteriormente, operando continuamente el filtro y tomando muestras a diferentes intervalos (0, 15, 30, 45, 60 y 100 minutos). Se midieron concentración residual de colorante por espectrofotometría UV-Vis. Se determinó el tiempo espacial (τ), que representa el tiempo promedio de permanencia del agua en el filtro, calculado según (Smith et al., 2022):

$$\tau = \frac{V_{lecho}}{Q} \quad (ec.3)$$

Donde:

τ : Tiempo espacial (min).

V_{lecho} : Volumen del lecho del adsorbente (cm³).

Q : Caudal volumétrico (mL/min).

El volumen del lecho (V) se determina mediante:

$$V = A \times h \quad (ec.4)$$

A : Área transversal de la columna (cm²).

h : Espesor del lecho de adsorbente (cm).

Además, se analizó la cinética de adsorción mediante ajuste de modelos como pseudo-primer y pseudo-segundo orden para determinar la cinética de adsorción (Foo & Hameed, 2010; Yagub et al., 2014):

Modelo pseudo-primer orden:

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} t \quad (ec.5)$$

Modelo pseudo-segundo orden:

Informe final de Proyecto de Investigación

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (ec. 6)$$

q_e : Capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g).

q_t : Capacidad de adsorción en tiempo t (mg/g).

k_1, k_2 : Constantes de velocidad cinética del modelo correspondiente (min^{-1} o $\text{g/mg} \cdot \text{min}$).

7.6. Resumen de las variables o unidades de análisis.

Tabla 2

Objetivos, variable, instrumentos y unidad de medida o cualificación utilizada en la investigación.

Objetivo específico	Variable	Instrumentos	Unidad de medida o cualificación
1. Diseñar y evaluar un filtro utilizando como adsorbente carbón activado modificado químicamente.	Propiedades físicoquímicas del carbón	FTIR, Método de Boehm	Espectro FTIR (bandas de absorción), Acidez superficial (mmol/g)
2. Evaluar la eficiencia del filtro en función de la granulometría del adsorbente.	Tamaño de partícula (granulometría)	Tamices ASTM	2.0 y 2.36 mm
3. Evaluar la eficiencia del filtro en función del espesor del lecho.	Espesor del lecho	Sistema de filtración en columna con escalas métricas	cm (20 y 30)
4. Evaluar la eficiencia del filtro en función del tiempo	Tiempo de operación	En minutos	0, 15, 30, 45, 60, 100
Evaluación general de la eficiencia del filtro	Porcentaje remoción colorante	de Espectrofotómetro UV-Vis	% de remoción

Nota. Operacionalización de las variables con relación a los objetivos específicos.



Informe final de Proyecto de Investigación

7.7. Procesamiento y análisis de la información.

Investigación Cuantitativa: El análisis de los datos obtenidos en los experimentos se realizó mediante métodos estadísticos para evaluar la eficiencia del filtro de carbón activado de cascarilla de café en la remoción del colorante Azul Reactivo 19. A continuación, se describen las técnicas y procedimientos de análisis que se aplicaron:

Análisis Descriptivo: Se realizaron análisis descriptivos iniciales para resumir los datos recolectados, calculando valores promedio, desviaciones estándar, mínimos y máximos de las concentraciones residuales de colorante después del tratamiento. Esto permitirá una aproximación preliminar al comportamiento del filtro bajo diferentes condiciones experimentales, como la granulometría del adsorbente, el espesor del lecho y el pH de modificación química.

Prueba de normalidad Shapiro-Wilk: prueba utilizada para verificar la normalidad de los datos obtenidos de adsorbancia con relación al tamaño de partícula, tiempo y espesor de lecho.

Prueba Krustal Wallis: con la prueba Shapiro-Wilk se demostró que no existe distribución normal en los datos, por lo que se aplicó una prueba no paramétrica que se adapta a la distribución de los datos obtenidos. Esta prueba compara las distribuciones entre las medianas de distintos grupos. Este análisis identificó si los cambios en las condiciones experimentales tienen un impacto significativo (nivel de significancia del 5%, $p < 0.05$) sobre la eficiencia de adsorción.

Prueba post-hoc de Dunn: ya que la prueba de Krustal Wallis determinó que sí existe una diferencia entre las distribuciones de los datos, se procedió a realizar una prueba de Dunn para identificar cuáles grupos son los que tienen una diferencia significativa ($p > 0.05$).

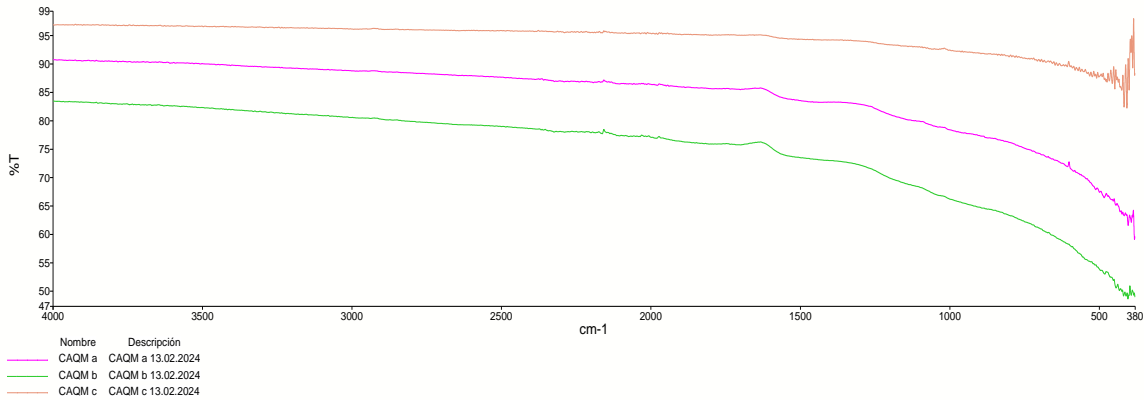
Software de Análisis: El análisis estadístico se realizó utilizando R Studio e InfoStat, herramientas especializadas que permiten ejecutar los análisis estadísticos con precisión. Estos programas también generarán gráficos de interacción y superficies de respuesta para visualizar relaciones complejas entre variables. La elección de software asegura confiabilidad en los resultados y replicabilidad del estudio.

Informe final de Proyecto de Investigación

8. Resultados y discusión

Figura 2.

Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) del carbón activado tratado químicamente obtenido de la cascarilla de café.



Nota. Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) adaptado del proyecto DIGI 4.8.63.4.71 año 2023.

Tabla 3

Grupos funcionales carbón activado químicamente

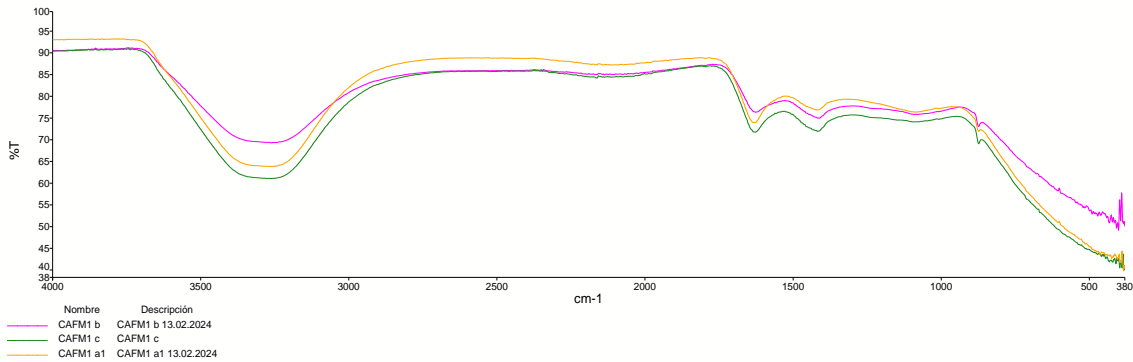
Corrida No.	Moles grupos básicos (meqiv-g/g)	Conformación grupos básicos (%)	Promedio	Moles grupos ácidos (meqiv-g/g)	Conformación grupos ácidos (%)	Promedio
1	4.180	35.834	35.861 ± 0.024	7.485	64.166	64.139 ± 0.024
2	4.196	35.874		7.500	64.126	
3	4.192	35.874		7.493	64.126	

Nota. Grupos funcionales del carbón activado químicamente en el Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales -Liexve- utilizando ácido fosfórico.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 3.

Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) del carbón activado tratado físicamente obtenido de la cascarilla de café.



Nota. Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) adaptado del proyecto DIGI 4.8.63.4.71 año 2023.

Tabla 4

Grupos funcionales carbón activado físicamente

Corrida No.	Moles grupos básicos (meqiv-g/g)	Conformación grupos básicos (%)	Promedio	Moles grupos ácidos (meqiv-g/g)	Conformación grupos ácidos (%)	Promedio
1	1.600	61.586	59.957 ± 1.638	0.998	38.414	40.043 ± 1.638
2	1.399	58.309		1.000	41.691	
3	1.497	59.976		0.999	40.024	

Nota. Grupos funcionales del carbón activado físicamente en el Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales -Liexve-, utilizando el equipo mufla.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 5

Eficiencia de columna de adsorción del filtro

Tamiz	Lecho	Tiempo min	Concentración mg/L	Eficiencia %	
8	20	0	99.87611	0.00000	
		15	0.45462	0.99545	
		30	0.37197	0.99628	
		45	0.28933	0.99710	
		60	0.34443	0.99655	
		100	0.26178	0.99738	
		30	0	99.68327	0.00000
	15		0.39952	0.99599	
	30		0.26178	0.99737	
	45		0.12404	0.99876	
	60		0.15159	0.99848	
	100		0.12404	0.99876	
	10		20	0	99.79346
		15		0.53726	0.99462
30		0.50972		0.99489	
45		0.34443		0.99655	
60		0.06894		0.99931	
100		0.01385		0.99986	
30		0		99.79346	0.00000
		15	0.28933	0.99710	
		30	0.26178	0.99738	
		45	0.06894	0.99931	
		60	0.04140	0.99959	
		100	0.01385	0.99986	

Nota. Eficiencia del filtro de carbón activado en función del tamaño de partícula, del espesor del lecho y del tiempo de contacto.

Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 6
Tiempo espacial de columna de adsorción

Tamiz No.	Lecho cm	Tiempo min	Caudal mL/min	τ min
8	20	15	50.31	0.5745
		30	51.43	0.5620
		45	50.76	0.5694
		60	52.13	0.5544
		100	52.23	0.5533
	30	15	43.52	0.9961
		30	47.74	0.9081
		45	49.61	0.8739
		60	48.14	0.9007
		100	47.87	0.9057
10	20	15	49.60	0.5827
		30	49.21	0.5873
		45	50.69	0.5702
		60	52.62	0.5493
		100	51.50	0.5612
	30	15	49.12	0.7674
		30	46.05	0.8186
		45	39.79	0.9475
		60	41.71	0.9038
		100	38.32	0.9837

Nota. Tiempo espacial de la columna de adsorción en función del tamaño de partícula, espesor del lecho y tiempo de contacto.

Figura 4.
Prueba Shapiro-Wilks

Variable	n	Media	D.E.	W*	p
Adsorbancia	60	0.003133	0.002151	0.918484	0.0023

Nota. Prueba utilizada para para verificar si los datos siguen una distribución normal.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 7

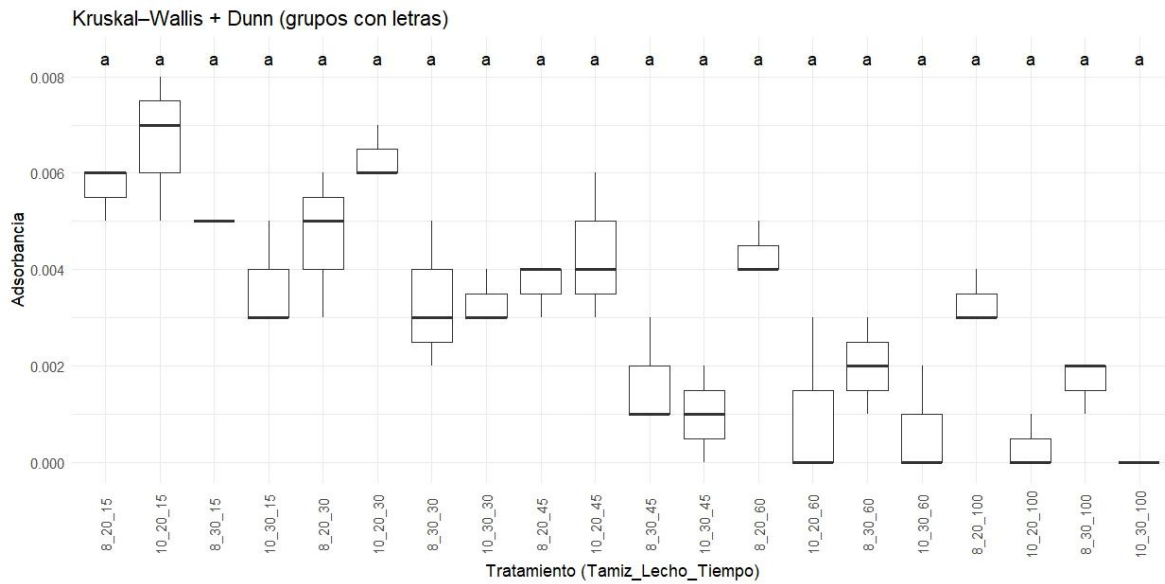
Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Tamiz	Lecho	Tiempo	N	Medias	D.E.	Medianas	C	H	p
Absorbancia	8		15	3	0.0057	0.0006	0.0060	0.9775	49.086	0.0001
			30	3	0.0047	0.0015	0.0050			
			45	3	0.0037	0.0006	0.0040			
			60	3	0.0043	0.0006	0.0040			
			100	3	0.0033	0.0006	0.0030			
			15	3	0.0050	0.0000	0.0050			
	10		30	3	0.0033	0.0015	0.0030			
			45	3	0.0017	0.0012	0.0010			
			60	3	0.0020	0.0010	0.0020			
			100	3	0.0017	0.0006	0.0020			
			15	3	0.0067	0.0015	0.0070			
			30	3	0.0063	0.0006	0.0060			
	10		45	3	0.0043	0.0015	0.0040			
			60	3	0.0010	0.0017	0.0000			
			100	3	0.0003	0.0006	0.0000			
			15	3	0.0037	0.0012	0.0030			
			30	3	0.0033	0.0006	0.0030			
			45	3	0.0010	0.0010	0.0010			
		60	3	0.0007	0.0012	0.0000				
		100	3	0.0000	0.0000	0.0000				

Nota. Prueba para determinar si las distribuciones de medianas entre varios grupos son iguales o diferentes.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 5.
Análisis Kriskal-Walls



Nota. Gráfica para relacionar los datos de la absorbancia y los diferentes tratamientos.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 8

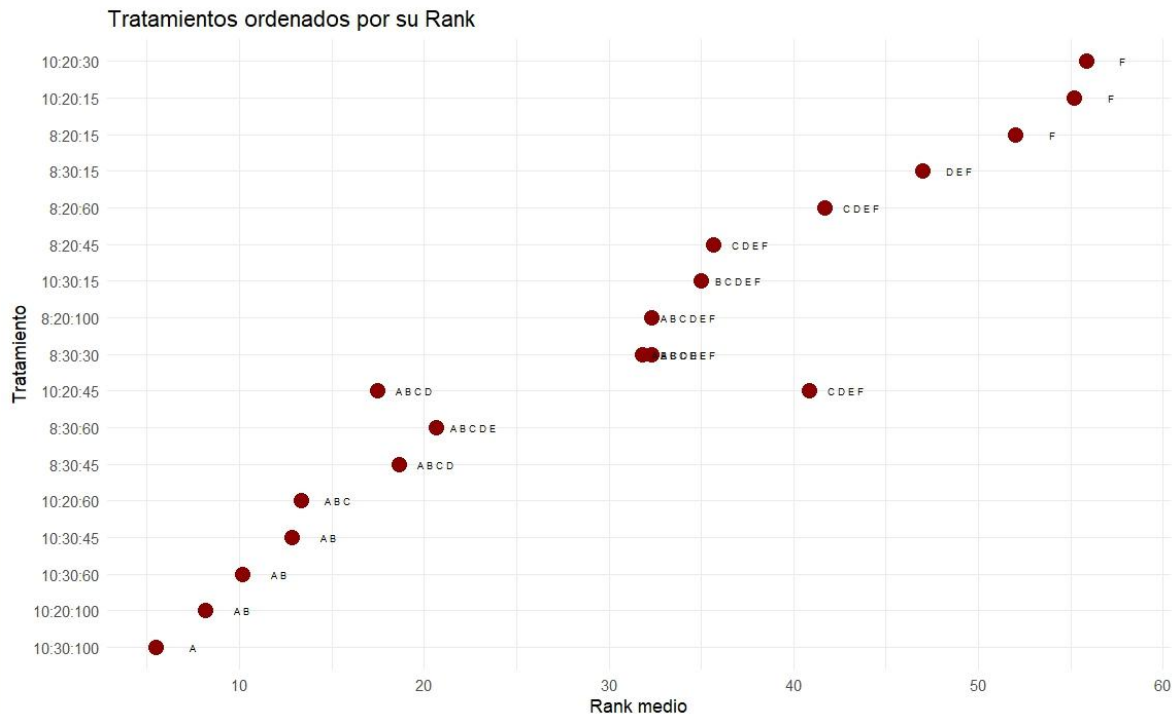
Prueba post-hoc de Dunn

Trat.	Medianas	Ranks							
10_30_100	0,0000	5.500	A						
10_20_100	0,0000	8.167	A	B					
10_30_60	0,0000	10.17	A	B					
10_30_45	0,0010	12.83	A	B					
10_20_60	0,0000	13.33	A	B	C				
8_30_100	0,0020	17.50	A	B	C	D			
8_30_45	0,0010	18.67	A	B	C	D			
8_30_60	0,0020	20.67	A	B	C	D	E		
8_30_30	0,0030	31.83	A	B	C	D	E	F	
10_30_30	0,0030	32.33	A	B	C	D	E	F	
8_20_100	0,0030	32.33	A	B	C	D	E	F	
10_30_15	0,0030	35.00		B	C	D	E	F	
8_20_45	0,0040	35.67		B	C	D	E	F	
10_20_45	0,0040	40.83			C	D	E	F	
8_20_60	0,0040	41.67				D	E	F	
8_20_30	0,0050	43.50				D	E	F	
8_30_15	0,0050	47.00					E	F	
8_20_15	0,0060	52.00						F	
10_20_15	0,0070	55.17							F
10_20_30	0,0060	55.83							F

Nota. Prueba que se utiliza después de que un análisis de Kruskal-Wallis ha demostrado que hay diferencias significativas entre tres o más grupos. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 6. Análisis comparativo del tratamiento y rank



Nota. Gráfica del análisis comparativo entre cada tratamiento y el rank obtenido.

La caracterización del carbón activado obtenido de cascarilla de café indica que el material desarrollado presenta una superficie químicamente heterogénea, con presencia simultánea de grupos funcionales ácidos y básicos. De acuerdo con el método de Boehm aplicado al carbón activado químicamente, cuyos promedios se resumen en la Tabla 3 y se detallan en el Apéndice (Tablas 27, 28 y 31), se observa un contenido de grupos ácidos del orden de 1.4–1.6 meq/g y de grupos básicos cercano a 1.0 meq/g. Esta distribución sugiere una superficie rica en grupos carboxílicos, fenólicos y lactónicos, coherente con la activación con ácido fosfórico, que favorece la formación de sitios activos capaces de interactuar con moléculas orgánicas mediante puentes de hidrógeno, interacciones π – π y fuerzas de Van der Waals. En el caso del carbón activado físicamente, los resultados del método de Boehm resumidos en la Tabla 4 y en las Tablas 29, 30 y 32 del Apéndice muestran una ligera predominancia de grupos básicos sobre los ácidos, con valores aproximados de 1.87 meq/g para grupos ácidos y alrededor de 2.00 meq/g para grupos básicos. En conjunto, estos resultados confirman que la cascarilla de café es una materia prima adecuada para producir carbones activados con funcionalidades superficiales comparables a las reportadas para adsorbentes obtenidos de otros residuos lignocelulósicos.

Esta combinación de grupos ácidos y básicos sobre una misma superficie resulta especialmente ventajosa para la remoción de colorantes reactivos aniónicos, ya que permite disponer simultáneamente de sitios de interacción electrostática, sitios capaces de establecer



Informe final de Proyecto de Investigación

enlaces de hidrógeno y dominios aromáticos que facilitan interacciones π - π con el esqueleto orgánico del colorante. La heterogeneidad química observada se traduce, por tanto, en un espectro amplio de mecanismos de adsorción que contribuyen a las altas eficiencias de remoción reportadas posteriormente. Asimismo, la similitud en el orden de magnitud de las concentraciones de grupos funcionales respecto de otros carbones preparados a partir de residuos agrícolas sugiere que el proceso de activación empleado es efectivo no solo para generar porosidad, sino también para desarrollar una química superficial acorde con los requerimientos del sistema de tratamiento planteado. De esta forma, se cumple el objetivo específico relacionado con la caracterización del adsorbente y se sientan las bases para explicar el comportamiento observado en los ensayos en columna.

Los espectros de FTIR del carbón activado química y físicamente, presentados en las Figuras 2 y 3, refuerzan esta interpretación. En el carbón tratado con ácido fosfórico se identifican bandas asociadas a estructuras aromáticas y a grupos oxigenados (enlaces O-H, C-O y P-O), compatibles con la presencia de grupos hidroxilo, carboxílicos y fosforados derivados del agente activante, lo cual concuerda con los valores de grupos ácidos y básicos reportados en la Tabla 3 y en la Tabla 31. En el carbón activado físicamente se mantiene la estructura aromática del carbono, pero con un perfil de grupos oxigenados ligeramente distinto, coherente con la menor proporción relativa de grupos ácidos y la mayor proporción de sitios básicos señalada en la Tabla 4 y en la Tabla 32. La combinación de los resultados de FTIR y del método de Boehm permite concluir que ambos adsorbentes cuentan con una superficie funcional apta para la interacción con un colorante reactivo aniónico como el Azul Reactivo 19.

La presencia de bandas características asociadas a grupos fosforados en el carbón activado químicamente evidencia, además, que parte del fósforo incorporado durante la activación permanece anclado a la matriz carbonosa, lo que puede influir en la acidez de la superficie y en la formación de sitios con afinidad específica por grupos funcionales del colorante. De igual manera, las bandas correspondientes a enlaces O-H y C-O indican la existencia de sitios hidrofílicos que favorecen la humectación del lecho y el contacto íntimo entre la fase líquida y la superficie del adsorbente durante el paso del efluente por la columna. En el carbón activado físicamente, el predominio de estructuras aromáticas relativamente más “limpias” y una menor intensidad relativa de bandas asociadas a grupos oxigenados sugieren una superficie algo más básica, lo que explica la ligera diferencia en la relación ácidos/básicos determinada por Boehm. En conjunto, la coincidencia entre la información espectroscópica y la titulación ácido-base proporciona una visión coherente de la química superficial del material y permite atribuir el buen desempeño del carbón no solo a su área superficial, sino al balance adecuado de grupos funcionales que intervienen en la adsorción del colorante.

El análisis granulométrico del carbón activado, resumido en la Tabla 13 y complementado por las Figuras 4 y 5, indica que la mayor proporción del material se concentra en fracciones intermedias de tamaño de partícula, particularmente en la zona asociada a los tamices 10 y 12 (aperturas de 2.00–1.70 mm). Las fracciones muy gruesas y las muy finas representan porcentajes menores, lo que justifica la selección de granulometrías de trabajo cercanas a



Informe final de Proyecto de Investigación

estos tamaños para la operación de la columna de adsorción. Esta elección busca un equilibrio entre un área superficial suficiente para favorecer la adsorción del colorante y una pérdida de carga hidráulica aceptable en el filtro, de modo que el sistema pueda operar de forma estable sin obstrucciones prematuras.

Desde el punto de vista del diseño del lecho, el predominio de partículas de tamaño intermedio también contribuye a conformar una porosidad interparticular adecuada, reduciendo el riesgo de formación de canales preferenciales y mejorando la distribución del flujo a lo largo de la sección transversal de la columna. Un material excesivamente fino aumentaría la resistencia al flujo, generando caídas de presión importantes y una posible colmatación temprana, mientras que partículas demasiado gruesas disminuirían el área de contacto efectiva y, por ende, la velocidad de adsorción. El rango granulométrico seleccionado a partir de la Tabla 13 puede considerarse, por lo tanto, como un compromiso operativo que permite alcanzar altas eficiencias de remoción sin sacrificar la estabilidad hidráulica del sistema, lo cual es consistente con la finalidad de desarrollar tecnologías aplicables en condiciones reales de operación en PyMEs o sistemas descentralizados de tratamiento.

En cuanto al método analítico, la curva de calibración construida a partir de las soluciones patrón de Azul Reactivo 19 (Tabla 33) y de las absorbancias promedio registradas (Tabla 34) mostró un comportamiento altamente lineal entre la absorbancia y la concentración en el rango de 5 a 100 mg/L. A partir de estos datos se obtuvo una ecuación del tipo $A = 0.0121 \cdot C + 0.0136$, con un coeficiente de determinación R^2 cercano a 0.9998, lo que evidencia una excelente correlación entre la concentración del colorante y la señal espectrofotométrica. La baja dispersión observada en las absorbancias de las réplicas para cada punto de la curva confirma la repetibilidad del método y respalda la confiabilidad de las concentraciones calculadas para las soluciones filtradas reportadas posteriormente en la Tabla 36.

Este comportamiento prácticamente ideal de la curva de calibración indica que, dentro del rango de interés para el estudio, la respuesta instrumental del espectrofotómetro puede considerarse proporcional a la concentración del colorante, lo que facilita la interpretación de los resultados y la comparación entre tratamientos. El hecho de que las desviaciones sean mínimas también sugiere que las condiciones de medición (longitud de onda, tiempos de estabilización, limpieza de celdas y preparación de soluciones) se controlaron adecuadamente, reduciendo el error experimental asociado al análisis cuantitativo. En este sentido, la robustez del método analítico constituye un pilar importante del trabajo, ya que permite atribuir las diferencias observadas en la remoción del colorante principalmente a los efectos de la granulometría, el espesor de lecho y el tipo de activación, y no a incertidumbres analíticas significativas. Este cumplimiento riguroso del objetivo específico relacionado con la validación de la metodología de cuantificación da solidez al resto de las conclusiones del estudio.

Los valores de pH de las soluciones filtradas por la columna de adsorción se presentan en la Tabla 14. Para todas las combinaciones de tamaño de partícula (tamices 8 y 10) y espesores



Informe final de Proyecto de Investigación

de lecho (20 y 30 cm), el pH inicial de las soluciones se situó alrededor de 6.6, reflejando las condiciones de las aguas sintéticas preparadas. Tras el paso por la columna, el pH del efluente se incrementó ligeramente y se mantuvo, en general, en un rango comprendido entre aproximadamente 6.5 y 7.5, dependiendo del tratamiento y del tiempo de operación. Esta tendencia sugiere que el carbón activado, especialmente el modificado químicamente, no provoca cambios drásticos de acidez o basicidad en el agua tratada, sino que induce un ajuste suave hacia valores cercanos a la neutralidad, condición deseable en sistemas de tratamiento que buscan remover colorantes sin introducir nuevas cargas químicas. Además, las desviaciones estándar reportadas son bajas para la mayoría de los puntos, lo que indica buena repetibilidad en el comportamiento del pH y estabilidad del material adsorbente a lo largo del periodo de operación evaluado.

Desde una perspectiva operativa y ambiental, mantener el pH del efluente dentro de un intervalo cercano a la neutralidad implica que el sistema no requeriría, en una eventual aplicación real, etapas adicionales de corrección de pH previas al vertido o a un tratamiento posterior. Esto representa una ventaja importante frente a otros procesos de eliminación de colorantes que dependen de ajustes extremos de acidez o basicidad, con el consiguiente aumento en el consumo de reactivos. Asimismo, el rango de pH observado es compatible con la especiación aniónica del Azul Reactivo 19 y con la presencia de grupos funcionales ionizados en la superficie del carbón, lo que favorece la interacción electrostática y otros mecanismos de adsorción. La estabilidad del pH a lo largo del tiempo también puede interpretarse como un indicio de que no se producen procesos significativos de lixiviación de especies ácidas o básicas desde el interior del lecho, lo que refuerza la percepción de que el material es químicamente estable bajo las condiciones de trabajo evaluadas.

Los resultados de absorbancia y concentración del Azul Reactivo 19 en las soluciones filtradas se documentan en las Tablas 35 y 36, donde se presentan los valores en función del tamaño de partícula, del espesor de lecho y del tiempo de operación. Al inicio de la operación (0 minutos), las soluciones presentan concentraciones cercanas a los 100 mg/L (≈ 99.7 – 99.9 mg/L), con eficiencias de remoción nulas por definición. Sin embargo, a partir de los 15 minutos de operación las concentraciones residuales disminuyen de forma abrupta a valores inferiores a 0.55 mg/L en todos los tratamientos, lo que implica eficiencias de remoción superiores al 99.4 %. En los tratamientos con tamiz 8 y lecho de 20 cm, la concentración del colorante en el efluente se reduce desde aproximadamente 99.88 mg/L hasta valores del orden de 0.45–0.26 mg/L entre los 15 y 100 minutos, con eficiencias que se mantienen entre 99.5 y 99.7 %, como se resume en la Tabla 5. Cuando se emplea tamiz 8 con un lecho de 30 cm, las concentraciones residuales descienden aún más, situándose entre 0.40 y 0.12 mg/L en el mismo intervalo de tiempo y alcanzando eficiencias entre 99.6 y 99.9 %, lo que evidencia un efecto positivo del incremento en el espesor del lecho sobre la remoción, atribuible al mayor tiempo de contacto entre el colorante y el carbón activado.

Esta caída pronunciada en la concentración del Azul Reactivo 19 durante los primeros minutos sugiere que la zona de transferencia de masa dentro del lecho se establece rápidamente y que la mayoría de los sitios activos accesibles participan de manera efectiva



Informe final de Proyecto de Investigación

en el proceso de adsorción desde el inicio de la operación. El hecho de que, en el caso del tamiz 8, el incremento en el espesor de lecho se traduzca en una mejora adicional de la remoción confirma la importancia de disponer de un mayor volumen de material adsorbente y de un tiempo de residencia más prolongado, factores cruciales para retardar la aparición de la ruptura de la columna en aplicaciones prolongadas. Aun cuando en este estudio el horizonte temporal se limitó a 100 minutos, la tendencia observada permite inferir que, bajo las condiciones evaluadas, el sistema opera muy por debajo de su capacidad máxima de adsorción, lo que abre la posibilidad de ampliar los tiempos de operación en trabajos futuros sin comprometer la calidad del efluente.

En las configuraciones con tamiz 10, que corresponde a una granulometría más fina, se observa un comportamiento similar, pero en general con eficiencias ligeramente superiores. De acuerdo con las Tablas 35, 36 y 5, para el tamiz 10 y lecho de 20 cm las concentraciones residuales disminuyen desde valores cercanos a 0.54 mg/L a los 15 minutos hasta alrededor de 0.014 mg/L a los 100 minutos, con eficiencias que pasan de aproximadamente 99.5 % a prácticamente 99.99 %. En la combinación tamiz 10 y lecho de 30 cm, las concentraciones finales se mantienen en el mismo orden o incluso algo menores, con valores por debajo de 0.30 mg/L desde los 15 minutos y eficiencias que también se aproximan al 99.99 % hacia los 60–100 minutos de operación. Aunque las diferencias entre tratamientos son pequeñas en términos absolutos, desde el punto de vista práctico estos resultados indican que la combinación de partículas más finas y lechos más altos permite acercarse a una remoción casi total del Azul Reactivo 19 dentro del intervalo de tiempos estudiado. La evolución temporal muestra, además, que la mayor parte de la remoción ocurre en los primeros 15–30 minutos de operación, estabilizándose posteriormente las concentraciones residuales en valores muy cercanos a cero, sin evidenciarse ruptura de la columna dentro de los 100 minutos evaluados, lo que sugiere que la capacidad de adsorción del lecho no se ha agotado en ese periodo.

El mejor desempeño del tamiz 10 puede atribuirse a un aumento en el área superficial externa disponible para la transferencia de materia, así como a distancias de difusión intrapartícula menores, lo que favorece la cinética de adsorción. No obstante, el hecho de que la diferencia respecto del tamiz 8 no sea extrema indica que el sistema mantiene un margen operativo razonable para seleccionar la granulometría en función de criterios adicionales, como la facilidad de manipulación del material, la disponibilidad de equipo de tamizado o las condiciones específicas de cada planta de tratamiento. La ausencia de ruptura observable en las curvas de concentración versus tiempo refuerza la idea de que, durante el intervalo analizado, la zona de transferencia de masa no ha alcanzado la salida de la columna, de modo que el lecho todavía dispone de capacidad de adsorción remanente. Esto respalda la viabilidad de emplear configuraciones de lecho similar en escalas mayores, con la expectativa de mantener eficiencias elevadas por periodos de operación más prolongados.

El comportamiento hidráulico de la columna de adsorción se analiza en la Tabla 37 (determinación del caudal en función del lecho) y se complementa con las dimensiones de la columna en la Tabla 38 y con los tiempos espaciales calculados en la Tabla 6 y detallados en



Informe final de Proyecto de Investigación

la Tabla 39. Para el lecho de 20 cm, los caudales promedio se sitúan alrededor de 50 mL/min, con rendimientos hidráulicos que, en la mayoría de los casos, se ubican aproximadamente entre 93 y 98 %, mientras que para el lecho de 30 cm los caudales son ligeramente menores (del orden de 43–49 mL/min), tal como era de esperarse debido al aumento en la resistencia al flujo. Los tiempos espaciales τ calculados a partir de estos caudales y del volumen efectivo del lecho (Tablas 38 y 39) se encuentran típicamente alrededor de 0.55–0.58 minutos para lechos de 20 cm y entre aproximadamente 0.77 y 0.98 minutos para lechos de 30 cm, dependiendo del tamaño de partícula y del caudal instantáneo. En términos prácticos, esto significa que el agua permanece más tiempo en contacto con el carbón activado cuando el lecho es más alto, lo que contribuye a las altas eficiencias de remoción registradas en las configuraciones con lecho de 30 cm.

La combinación de un rendimiento hidráulico elevado y tiempos espaciales relativamente cortos sugiere que el régimen de operación de la columna es adecuado para aplicaciones en continuo, ya que permite procesar volúmenes de agua apreciables sin comprometer la calidad del efluente. El hecho de que las variaciones de caudal se mantengan dentro de márgenes estrechos indica, además, que no se presentaron fenómenos significativos de compactación del lecho, canalización o formación de bolsas de aire que pudieran alterar la uniformidad del flujo. Desde el punto de vista del diseño, los valores de τ obtenidos proporcionan una referencia útil para dimensionar futuras columnas o módulos en paralelo, ya que permiten estimar la capacidad de tratamiento en función del volumen de lecho disponible y de la concentración de colorante en el afluente. De este modo, el análisis hidráulico complementa la interpretación de las eficiencias de remoción y aporta información clave para el escalamiento del sistema.

En conjunto, la caracterización fisicoquímica del carbón activado de cascarilla de café (Tablas 3, 4, 31 y 32), el comportamiento del pH del efluente (Tabla 14), la calidad del método analítico respaldado por la curva de calibración (Tablas 33 y 34), los resultados de remoción de Azul Reactivo 19 en columna (Tablas 5, 35 y 36) y el desempeño hidráulico del sistema (Tablas 6, 37, 38 y 39) permiten afirmar que el sistema diseñado y evaluado cumple con el propósito de remover eficientemente el colorante de aguas residuales sintéticas. El material presenta una superficie funcional adecuada, el sistema opera en un rango de pH cercano a la neutralidad, las concentraciones residuales del colorante se reducen a valores del orden de centésimas de mg/L y las eficiencias globales de remoción se mantienen por encima del 99.4 % para todas las combinaciones de granulometría, espesor de lecho y tiempo de operación evaluadas. Estos resultados respaldan la viabilidad técnica del uso de carbón activado obtenido de cascarilla de café como adsorbente en filtros de columna para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes reactivos, en coherencia con el objetivo general del proyecto y aportando evidencia experimental para su eventual aplicación en sistemas de tratamiento a pequeña y mediana escala.

Adicionalmente, el conjunto de resultados obtenidos demuestra que es posible articular de manera coherente la selección de la materia prima, las condiciones de activación, la caracterización del material, la validación del método analítico y la evaluación en columna,



Informe final de Proyecto de Investigación

configurando una propuesta tecnológica integral que va más allá de una simple prueba de laboratorio aislada. La coherencia entre la química superficial del adsorbente, el comportamiento del pH, las eficiencias de remoción y la estabilidad hidráulica del sistema refuerza la idea de que la alternativa planteada es robusta y reproducible. Esta robustez es particularmente relevante si se considera la intención de transferir el conocimiento generado hacia actores externos, como municipalidades e industrias textiles, que requieren soluciones de tratamiento confiables, fáciles de operar y adaptables a sus condiciones específicas.

Además de demostrar la viabilidad técnica del sistema, los resultados obtenidos aportan evidencia concreta al cumplimiento de las metas específicas asociadas a las prioridades nacionales en materia de gestión sostenible del agua y protección ambiental declaradas en el proyecto. La reducción sistemática de las concentraciones de Azul Reactivo 19 hasta el orden de centésimas de mg/L (Tablas 5, 35 y 36) muestra que es posible disponer de una tecnología basada en recursos locales capaz de disminuir significativamente la carga de colorantes en efluentes, contribuyendo a la meta de mejorar la calidad de los cuerpos receptores y de las aguas utilizadas en actividades productivas. Al operar en un rango de pH cercano a la neutralidad (Tabla 14) y sin requerir insumos químicos costosos, el sistema se alinea con la búsqueda de soluciones de tratamiento de bajo impacto ambiental, lo cual es coherente con las metas nacionales orientadas a promover procesos de saneamiento que no generen nuevas fuentes de contaminación.

De igual forma, el aprovechamiento de la cascarilla de café como precursor del carbón activado se vincula directamente con las metas específicas relacionadas con la valorización de residuos agroindustriales y la economía circular, también priorizadas a nivel nacional. La caracterización fisicoquímica (Tablas 3, 4, 31 y 32) demuestra que un residuo abundante en el país puede transformarse en un material de alto valor agregado, con propiedades comparables a carbones activados obtenidos de otras fuentes, contribuyendo así a reducir la presión sobre materias primas convencionales y a disminuir el volumen de desechos que se disponen inadecuadamente. Esta reconversión de un residuo en insumo para tecnologías de tratamiento de agua responde a la meta de impulsar alternativas tecnológicas que articulen el sector agroindustrial con la gestión ambiental, particularmente en regiones donde coexisten actividades cafeteras y descargas de efluentes coloreados.

El diseño y evaluación del sistema de columna, incluyendo el análisis del desempeño hidráulico (Tablas 6, 37, 38 y 39) y la demostración de altos niveles de remoción en tiempos de operación relativamente cortos, contribuyen a las metas específicas vinculadas al fortalecimiento de capacidades científicas y tecnológicas nacionales en el ámbito del tratamiento de aguas residuales. El conocimiento generado en cuanto a selección de granulometría, espesores de lecho y tiempos espaciales transferibles a condiciones de operación reales, constituye una base técnica para que futuras iniciativas de escala piloto o demostrativa puedan implementarse en pequeñas y medianas empresas, municipalidades o sistemas descentralizados de tratamiento, avanzando en la meta de disponer de tecnologías apropiadas, de bajo costo y desarrolladas en el país. De esta manera, la evidencia experimental obtenida no solo cumple con los objetivos científicos del proyecto, sino que se



Informe final de Proyecto de Investigación

articula explícitamente con las prioridades nacionales en agua, ambiente, producción más limpia y uso sostenible de los recursos, tal como se planteó en la formulación original de la investigación.

9. Propiedad intelectual

No aplica.

10. Beneficiarios directos e indirectos

Tabla 9 *Beneficiarios directos e indirectos de la investigación*

Resultados, productos o hallazgos	Beneficiarios directos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de Beneficiarios indirectos
Filtro de carbón activado para remoción de colorantes en aguas residuales	Municipalidades afectadas por la contaminación hídrica	5	Población general que depende de cuerpos de agua limpios	5000
Informe técnico sobre remoción de colorantes	Industria textil	10	Investigadores en remediación ambiental	50
Capacitación a comunidades afectadas	Comunidades locales afectadas por la contaminación	100	Organizaciones no gubernamentales (ONGs) ambientales	500

Nota. Número de beneficiarios directos e indirectos de la investigación.



Informe final de Proyecto de Investigación

11. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.

Tabla 10 *Actividades realizadas de divulgación*

	Sí	No
Presentación TV		X
Entrevistas radiales	X	
Podcast		X
Entrevista DIGI	X	
Recursos audiovisuales		X
Congresos científicos nacionales o internacionales	X	
Talleres	X	
Publicación de libro		X
Publicación de capítulo en un libro x		X
Publicación de artículo científico	X	
Divulgación por redes sociales institucionales	X	
Conversatorios con especialistas	X	
Presentación pública	X	
Presentación autoridades USAC	X	
Presentación a beneficiarios directos	X	
Entrega de resultados	X	
Docencia en grado	X	
Docencia postgrado		X
Póster científico		X
Trifoliales		X
Conferencias	X	
Encuentros de campo (días de campo)		X
Intercambio de conocimientos y experiencias con productores y vendedores...		X
Otro (describa)		

Nota. Actividades de divulgación de los resultados finales de la investigación.



Informe final de Proyecto de Investigación

12. Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND)

La presente investigación contribuye significativamente a diversos sectores al ofrecer una solución técnica y sostenible para la remoción del colorante Azul Reactivo 19 en aguas sintéticas residuales simuladas, utilizando un filtro de carbón activado derivado de cascarilla de café modificado químicamente. Los resultados se socializan con actores clave, como municipalidades encargadas de la gestión hídrica e industrias textiles, a través de informes técnicos detallados y talleres de capacitación. Estos materiales incluyen protocolos estandarizados para la fabricación y operación del filtro, enfocados en variables críticas como la granulometría del adsorbente, el espesor del lecho y el pH de modificación durante la activación química. Además, se priorizará la transferencia tecnológica a pequeñas y medianas empresas (PyMEs) textiles, facilitando su adopción de prácticas sostenibles y el cumplimiento de normativas ambientales.

El proyecto se alinea con las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND) de Guatemala, en particular con los ejes de protección ambiental y gestión sostenible del agua. Al validar un sistema de tratamiento basado en un residuo agrícola abundante, como la cascarilla de café, la investigación promueve la economía circular, reduciendo tanto la contaminación hídrica como el volumen de desechos agroindustriales. Esto contribuye directamente a la conservación de cuerpos de agua y al fortalecimiento de prácticas productivas sostenibles en regiones con alta actividad textil, como Sacatepéquez y Chimaltenango, donde la presión sobre las fuentes de agua y los sistemas de drenaje es cada vez más evidente.

Desde la perspectiva de las metas específicas relacionadas con agua y saneamiento, los altos porcentajes de remoción de Azul Reactivo 19 alcanzados por el sistema de filtro de carbón activado respaldan la posibilidad de disminuir la carga de contaminantes vertidos a ríos, quebradas y sistemas de alcantarillado. La validación experimental de un proceso que opera en condiciones cercanas a la neutralidad del pH y que no requiere equipos sofisticados, aporta evidencia para el desarrollo de tecnologías de tratamiento adecuadas para pequeñas plantas de beneficio, lavanderías industriales y PyMEs textiles, contribuyendo a las metas de mejorar la calidad del agua disponible para los usos domésticos, productivos y ecosistémicos.

En cuanto a las metas vinculadas con producción y consumo responsables y gestión de residuos, la transformación de la cascarilla de café en un material adsorbente de alto valor agregado constituye un ejemplo concreto de valorización de residuos agroindustriales. Este enfoque reduce el volumen de desechos que, de otra manera, se dispondrían en vertederos o se quemarían a cielo abierto, y crea un insumo local para el tratamiento de efluentes coloreados. De esta manera, la investigación se articula con la prioridad nacional de impulsar modelos productivos que integren la gestión de residuos en la cadena de valor, fortaleciendo la competitividad del sector cafetero y promoviendo la innovación en la industria ambiental. La implementación futura de este tipo de filtros en contextos municipales o comunitarios también contribuye a las prioridades relacionadas con la reducción de brechas territoriales y el acceso equitativo a servicios básicos, ya que propone una tecnología adaptada a realidades



Informe final de Proyecto de Investigación

de recursos limitados, con potencial de ser construida y operada localmente. Al generar conocimiento aplicable a sistemas de tratamiento de pequeña y mediana escala, el proyecto facilita que municipios con capacidades técnicas y presupuestarias restringidas dispongan de alternativas concretas para mejorar el tratamiento de sus efluentes, avanzando en las metas nacionales de ampliar la cobertura y calidad de los servicios de saneamiento en áreas urbanas y periurbanas.

Finalmente, la investigación aporta a las prioridades nacionales en ciencia, tecnología e innovación, al fortalecer las capacidades locales para el diseño, evaluación y optimización de tecnologías de tratamiento de agua basadas en recursos propios del país. El desarrollo de métodos de activación, caracterización fisicoquímica del carbón, evaluación de desempeño en columnas y análisis de variables de operación genera evidencia científica que puede ser integrada en programas de formación profesional, en la actualización de normativas técnicas y en la formulación de nuevas iniciativas de investigación aplicada. En conjunto, estos aportes permiten que los resultados del proyecto no solo respondan a un problema puntual de contaminación por colorantes, sino que contribuyan de manera directa y verificable al logro de las metas específicas de las Prioridades Nacionales de Desarrollo vinculadas con agua, ambiente, producción sostenible y fortalecimiento de la capacidad científica nacion

13. Otras contribuciones del proyecto al desarrollo

En el ámbito de políticas públicas, los hallazgos del estudio pueden fundamentar iniciativas legislativas orientadas a regular los efluentes industriales y promover tecnologías limpias. Por ejemplo, los datos sobre la eficiencia del filtro bajo condiciones optimizadas (granulometría < 2.00 mm, espesor de lecho de 20 cm y tiempo de operación) pueden servir como evidencia técnica para actualizar normativas como el Reglamento de Descargas de Aguas Residuales (Acuerdo Gubernativo 236-2006). Adicionalmente, el desarrollo del filtro abre oportunidades para el registro de patentes, alineándose con la Política de Investigación de la USAC que incentiva la innovación tecnológica con impacto social y ambiental. Esto no solo posicionará a Guatemala como referente en soluciones basadas en recursos locales, sino que también generará un modelo replicable para otros países en desarrollo que enfrenten desafíos similares de contaminación hídrica y manejo de residuos.

De forma complementaria, el proyecto contribuye al fortalecimiento de capacidades técnicas e institucionales, ya que los protocolos generados para la producción del carbón activado, el diseño del filtro y la evaluación de su desempeño pueden incorporarse en programas de formación de pregrado y posgrado, así como en procesos de actualización profesional para personal de la industria y de entidades reguladoras. Esta transferencia de conocimiento favorece la creación de una masa crítica de profesionales capaces de diseñar, operar y adaptar tecnologías de tratamiento basadas en recursos locales, reduciendo la dependencia de soluciones importadas de alto costo y promoviendo la autonomía tecnológica del país.



Informe final de Proyecto de Investigación

Asimismo, el uso de cascarilla de café como insumo principal abre oportunidades de integración productiva entre el sector agrícola y el sector industrial, generando cadenas de valor donde un residuo agroindustrial adquiere un nuevo rol como materia prima para tecnologías ambientales. Esto puede traducirse en nuevas oportunidades económicas para productores y cooperativas cafetaleras, mediante esquemas de suministro de cascarilla, acuerdos de colaboración o emprendimientos locales dedicados a la elaboración de carbón activado. En conjunto, estas contribuciones apuntan no solo a la mitigación de impactos ambientales, sino también a la dinamización de economías locales y al impulso de modelos de desarrollo más inclusivos y sostenibles.

14. Vinculación

Durante la ejecución del proyecto se concretaron acciones de articulación que facilitaron la transferencia de resultados y el diálogo con actores clave: en la academia, se integró la temática de colorantes y adsorción en el curso de Extracciones Industriales de la USAC, con sesiones de aula-taller y guías breves para replicación en laboratorio; en el sector productivo, se estableció vinculación con Finca La Azotea para la gestión y suministro de cascarilla de café como materia prima del adsorbente, incluyendo visitas y coordinaciones operativas para el manejo de muestras; y en conferencias y espacios de divulgación, se socializaron resultados y aprendizajes del filtro de bajo costo, lo que generó interés de públicos académicos y productivos y dejó materiales de apoyo para continuar la transferencia.



Informe final de Proyecto de Investigación

15. Conclusiones

- El filtro desarrollado tiene potencial real de transferencia y uso en contextos productivos. Los resultados obtenidos permiten definir rangos operativos y criterios de diseño aprovechables por municipalidades y pequeñas y medianas empresas textiles, favoreciendo la incorporación de la cascarilla de café en esquemas de economía circular y aportando a las prioridades nacionales de desarrollo en materia de gestión del agua, producción más limpia y valorización de residuos.
- Con base en la caracterización fisicoquímica del carbón activado obtenido a partir de cascarilla de café y modificado químicamente, así como en el desempeño del sistema de filtración en columna, se determinó que el filtro diseñado cumple adecuadamente con el objetivo de utilizar este material como adsorbente. El carbón presenta una superficie con grupos funcionales ácidos y básicos en proporciones favorables para la interacción con el Azul Reactivo 19, el sistema opera en un rango de pH cercano a la neutralidad y las eficiencias de remoción superan el 99.4 %, por lo que el filtro demuestra ser técnica y funcionalmente viable para el tratamiento de aguas residuales sintéticas con este colorante.
- Al evaluar la eficiencia del filtro en función de la granulometría del adsorbente, se estableció que ambas fracciones de tamaño de partícula estudiadas permiten alcanzar una remoción muy alta del Azul Reactivo 19, superior al 99.4 % en todos los casos, pero la granulometría más fina presenta una ligera ventaja en términos de reducción de la concentración residual del colorante. Esto indica que el tamaño de partícula influye positivamente en el desempeño del sistema, ya que las partículas más finas incrementan el área de contacto y favorecen la adsorción sin generar problemas significativos de operación.
- Dentro del análisis de la eficiencia del filtro en función del espesor del lecho se determinó que el incremento de la altura de la cama de carbón activado de 20 a 30 cm mejora el desempeño del sistema, al aumentar el tiempo de contacto entre el efluente y el adsorbente y reducir las concentraciones residuales de Azul Reactivo 19. Aunque el caudal promedio disminuye ligeramente al aumentar el espesor del lecho, los rendimientos hidráulicos se mantienen altos y no se observan pérdidas de carga excesivas, por lo que el filtro con lecho más alto ofrece una mayor seguridad de remoción sin comprometer la operación, cumpliéndose el objetivo de evaluar la eficiencia en función del espesor del lecho.



Informe final de Proyecto de Investigación

- Al analizar la eficiencia del filtro en función del tiempo de operación, se estableció que la mayor parte de la remoción del Azul Reactivo 19 ocurre en los primeros 15 a 30 minutos, alcanzándose en ese intervalo eficiencias mayores al 99.4 % para todas las combinaciones de granulometría y espesor de lecho, y manteniéndose concentraciones residuales muy bajas hasta los 100 minutos sin evidenciar ruptura de la columna. Este comportamiento demuestra que el filtro no solo es capaz de remover eficazmente el colorante, sino que mantiene su capacidad de adsorción durante el periodo de operación evaluado, cumpliéndose el objetivo de evaluar la eficiencia del sistema en función del tiempo.

16. Recomendaciones

Evaluar el filtro de carbón activado de cascarilla de café modificado químicamente utilizando efluentes reales de la industria textil y de otros generadores de aguas coloreadas, para validar su desempeño en matrices complejas.

Diseñar y documentar un protocolo operativo estándar (arranque, operación, muestreo y mantenimiento) que facilite la implementación del sistema a pequeña y mediana escala en plantas piloto o instalaciones industriales.

Priorizar, en futuros diseños de filtros, el uso de granulometrías similares a las obtenidas con el tamiz N.º 10, incorporando formalmente una etapa de tamizado y control de tamaño de partícula en el proceso de producción del carbón activado.

Realizar ensayos de colmatación y pérdida de carga a tiempos de operación prolongados, para determinar el tamaño de partícula óptimo que combine alta eficiencia de remoción y estabilidad hidráulica del sistema.

Considerar en futuros diseños espesores de lecho iguales o superiores a 30 cm, ajustando la altura del lecho al caudal de diseño y a las restricciones de espacio del lugar de instalación.

Evaluar la implementación de lechos estratificados, combinando distintas granulometrías y/o materiales filtrantes, con el fin de optimizar simultáneamente la eficiencia de remoción, la pérdida de carga y la vida útil del adsorbente.

Dimensionar los sistemas de filtración de manera que el tiempo de residencia del agua en el lecho sea, como mínimo, de 15 a 30 minutos, garantizando así altas eficiencias de remoción del Azul Reactivo 19.



Informe final de Proyecto de Investigación

Desarrollar ensayos de operación de larga duración, incorporando curvas de ruptura y estudios de regeneración o reemplazo del carbón activado, para estimar la vida útil del adsorbente y los costos operativos asociados al sistema.

Ampliar la evaluación del filtro a otros colorantes de uso frecuente en la industria textil y a mezclas de colorantes, con el propósito de definir el rango de aplicabilidad del carbón activado de cascarilla de café modificado químicamente.

Realizar una evaluación técnica, económica y ambiental comparativa entre el filtro desarrollado y otras tecnologías de tratamiento (por ejemplo, coagulación–floculación, oxidación avanzada o carbones comerciales), para fundamentar recomendaciones de implementación dirigidas a municipalidades y PyMEs textiles.

Optimizar las condiciones de activación química (concentración de H_3PO_4 , temperatura y tiempo de activación) mediante diseños experimentales que permitan maximizar la capacidad de adsorción del carbón activado de cascarilla de café.

Incorporar en futuros estudios la caracterización textural del carbón activado (área superficial específica, volumen y distribución de poros), utilizando técnicas como adsorción de N_2 tipo BET, para correlacionar estos parámetros con la eficiencia de remoción de colorantes.

Evaluar el efecto de etapas de pretratamiento de la cascarilla de café (lavado, secado, tamaño de partícula previo a la activación) sobre el rendimiento del carbón activado y sus propiedades fisicoquímicas.

Realizar ensayos que incluyan, además del colorante, otros parámetros de calidad del agua (DQO, DBO, sólidos suspendidos, conductividad), con el fin de determinar la capacidad del sistema para mejorar integralmente la calidad de efluentes coloreados.

Analizar la estabilidad mecánica del carbón activado en operación continua, evaluando pérdida de masa, generación de finos y arrastre de partículas, para definir frecuencias de retrolavado y estrategias de mantenimiento del lecho filtrante.

Desarrollar e implementar prototipos piloto en campo (por ejemplo, en una PyME textil o en una planta municipal), con el objetivo de validar el diseño del filtro en condiciones reales de operación y ajustar los parámetros de diseño obtenidos en laboratorio.

Elaborar manuales de operación, mantenimiento y seguridad dirigidos a personal técnico de municipalidades y empresas, que incluyan instrucciones claras para la preparación del carbón, armado del filtro, operación rutinaria y disposición final del adsorbente agotado.

Investigar alternativas de aprovechamiento o disposición final del carbón activado agotado, evaluando su posible uso como combustible sólido, enmienda en mezclas para construcción u otras aplicaciones, a fin de reducir impactos ambientales asociados a su descarte.



Informe final de Proyecto de Investigación

Incluir en trabajos posteriores una evaluación de riesgos sanitarios y ambientales asociados al uso del filtro, considerando posibles lixiviados, manejo de residuos y cumplimiento de la normativa nacional de vertidos, para fortalecer la aceptabilidad regulatoria del sistema.

Promover la articulación de los resultados del proyecto con políticas públicas y normativa técnica, gestionando que los criterios de diseño y desempeño del filtro puedan considerarse en guías, reglamentos o lineamientos nacionales sobre tratamiento de aguas residuales coloreadas

Referencias

- Ahmad, M. A., & Alrozi, R. (2010). Optimization of preparation conditions for mangosteen peel-based activated carbons for the removal of Remazol Brilliant Blue R using response surface methodology. *Chemical Engineering Journal*, 165(3), 883-890. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.10.049>
- Akindolie, M. S., & Choi, H. J. (2022). Surface modification of spent coffee grounds using phosphoric acid for enhancement of methylene blue adsorption from aqueous solution. *Water Science and Technology*, 85(4), 1218-1234. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.021>
- Aljeboree, A. M., Alshirifi, A. N., & Alkaim, A. F. (2017). Kinetics and equilibrium study for the adsorption of textile dyes on coconut shell activated carbon. *Arabian Journal of Chemistry*, 10(S3381-S3393). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.01.020>
- Ayalew, A. A., & Aragaw, T. A. (2020). Utilization of treated coffee husk as low-cost biosorbent for adsorption of methylene blue. *Adsorption Science and Technology*, 38(5-6), 205-222. <https://doi.org/10.1177/0263617420920516>
- Barkauskas, J., & Dervinyte, M. (2004). An investigation of the functional groups on the surface of activated carbons. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 69(5), 363-375. <https://doi.org/10.2298/JSC0405363B>
- Boehm, H. P. (2002). Surface oxides on carbon and their analysis: A critical assessment. *Carbon*, 40(1), 145-149. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(01\)00060-5](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(01)00060-5)
- Brañez Sánchez, M., Gutiérrez, R., Pérez, R., Uribe, C., & Valle, P. (2018). Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil: Resumen. *Campus*, 23(26), 123-138. <https://doi.org/10.24265/campus.2018.v23n26.03>
- Castellar-Ortega, S., Escudero-Ortiz, A., & García-López, A. (2020). Adsorción de colorantes textiles utilizando carbón activado de cáscaras de café: Modelos cinéticos



Informe final de Proyecto de Investigación

- y eficiencia de remoción. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(2), 345-355.
<https://doi.org/10.24275/rmiq.2020.02>
- Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97(9), 1061-1085.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>
- Dehvari, A., Pakdel, L., & Zarghami, R. (2016). Adsorption of Reactive Blue 19 from aqueous solutions by modified clinoptilolite zeolite: Kinetic and equilibrium studies. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 35(5), 1422-1430.
<https://doi.org/10.1002/ep.12469>
- Deivasigamani, G., Nallathambi, G., & Senthil Kumar, P. (2023). Biomass-derived activated carbons for wastewater treatment: Recent advances and challenges. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101781. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.101781>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2-10.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- González-García, P. (2018). Activated carbon from agricultural residues for water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 360, 78-84.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.103>
- Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313-2342.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>
- Hameed, B. H., & El-Khaiary, M. I. (2008). Batch removal of malachite green from aqueous solutions by adsorption on oil palm trunk fibre: Equilibrium isotherms and kinetic studies. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1-3), 237-244.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.017>
- Hao, O. J., Kim, H., & Chiang, P. C. (2010). Decolorization of wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 30(4), 449-505.
<https://doi.org/10.1080/10643380091184237>
- Kyzas, G. Z., & Lazaridis, N. K. (2012). Adsorption of dyes onto commercially available activated carbons: A comparative study. *Journal of Environmental Management*, 113, 110-120. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.07.002>
- Kumar, P. S., Ramalingam, S., Senthamarai, C., Niranjanaa, M., Vijayalakshmi, P., & Sivanesan, S. (2010). Adsorption of dye from aqueous solution by cashew nut shell:



Informe final de Proyecto de Investigación

Studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions. Desalination, 261(1-2), 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.032>

- López-Cervantes, J., Sánchez-Machado, D. I., Sánchez-Duarte, R. G., & Correa-Murrieta, M. A. (2018). Study of a fixed-bed column in the adsorption of an azo dye from an aqueous medium using a chitosan–glutaraldehyde biosorbent. *Adsorption Science & Technology*, 36(1–2), 215–232. <https://doi.org/10.1177/0263617416688021>
- Mafo, T. J., Fanourakis, S. K., & Pappas, K. (2023). Magnetic activated carbon composites for the removal of textile dyes from wastewater. *Chemical Engineering Journal Advances*, 14, 100226. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100226>
- Mohan, D., & Pittman, C. U. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 142(1-2), 1-53. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.006>
- Paredes-Laverde, M., Salamanca, M., Diaz-Corrales, J. D., Flórez, E., Silva-Agredo, J., & Torres-Palma, R. A. (2021). Understanding the removal of an anionic dye in textile wastewaters by adsorption on ZnCl₂ activated carbons from rice and coffee husk wastes: A combined experimental and theoretical study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105685. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105685>
- Patel, H. (2019). Fixed-bed column adsorption study: A comprehensive review. *Applied Water Science*, 9, 45. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0927-7>
- Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R., & Ahmad, A. (2010). Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1-3), 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.047>
- Salleh, M. A. M., Mahmoud, D. K., Karim, W. A. W. A., & Idris, A. (2011). Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review. *Desalination*, 280(1-3), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.07.019>
- Schönherr, J., Buchheim, J. R., Scholz, P., & Adelhelm, P. (2018). Boehm titration revisited (Part I): Practical aspects for achieving a high precision in quantifying oxygen-containing surface groups on carbon materials. *C*, 4(2), 21. <https://doi.org/10.3390/c4020021>
- Vidal, C. B., dos Santos, A. B., Amaral, M. C. S., & Gonçalves, P. M. (2018). Removal of dyes from textile wastewater using chitosan-derived adsorbents. *Journal of Water Process Engineering*, 25, 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.07.002>
- Villagran, C. (2022). Producción y gestión de aguas residuales en la industria textil guatemalteca. *Informe Nacional de Estadísticas Industriales*, 13(2), 45-57.



Informe final de Proyecto de Investigación

Wong, S., Ngadi, N., Inuwa, I. M., & Hassan, O. (2018). Recent advances in applications of activated carbon from biowaste for wastewater treatment: A short review. *Journal of Cleaner Production*, 175, 361-375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.059>

Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>

Apéndice

Tabla 11

Impregnación de carbón obtenido de cascarilla de café con ácido fosfórico al 20 % a 60 °C

Corrida #	Fecha	Tamiz No.	Masa g	Volumen mL	Proporción m : v
1	8/09/25	10	125	1000	1: 8
2	8/09/25	10	125	1000	1: 8
3	9/09/25	10	125	1000	1: 8
4	9/09/25	10	125	1000	1: 8
5	10/09/25	8	125	1000	1: 8
6	10/09/25	8	125	1000	1: 8
7	11/09/25	8	125	1000	1: 8
8	11/09/25	8	125	1000	1: 8
9	11/09/25	8	125	1000	1: 8
10	11/09/25	8	125	1000	1: 8
11	18/09/25	8	125	1000	1: 8
12	18/09/25	8	125	1000	1: 8
13	22/09/25	10	125	1000	1: 8
14	22/09/25	10	125	1000	1: 8

Nota. El proceso de impregnación se realizó en una manta de calentamiento y agitación ultrasónica.

Tabla 12

Secado de carbón impregnado con ácido fosfórico.

Corrida #	Tamiz No.	Temperatura °C	Humedad %	Masa g	Masa total g	Humedad Promedio %
1	10	80	4.13	151.270		
2	10	80	2.36	134.785	703.094	3.19 ± 0.96
3	10	80	2.90	138.211		



Informe final de Proyecto de Investigación

4	10	80	2.26	143.921		
5	10	80	4.28	134.907		
6	8	80	4.26	146.614		
7	8	80	2.67	135.179		
8	8	80	2.13	140.524	698.110	3.90 ± 1.50
9	8	80	5.84	135.996		
10	8	80	4.59	139.797		

Nota. El secado del carbón impregnado se realizó en un secador eléctrico de bandejas de flujo transversal.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 13

Lavado de carbón activado con agua destilada

Repetición	Tamiz	Fecha	Masa g	Volumen mL	Relación m: V	Lavados Cant.
1	10	16/09/25	100.000	1000	1: 10	5
2	10	17/09/25	91.715	917.15	1: 10	5
3	8	19/09/25	64.127	641.27	1: 10	5
4	10	22/09/25	32.517	325.17	1: 10	5
5	8	22/09/25	31.832	318.32	1: 10	5
6	10	23/09/25	30.209	302.09	1: 10	5
7	8	23/09/25	30.478	304.78	1: 10	5

Nota. Se realizaron los lavados del carbón para la remoción de cenizas contenidas en el material.

Tabla 14

Pirólisis de carbón vegetal obtenido de la cascarilla de café

Tamiz No.	Masa Material (g)	Carbón Act. (g)	Masa total (g)	Rendimiento (%)	**Promedio (%)	Masa Total (g)
10	40.011	32.484	64.415	81.19	80.25 ± 4.31	385.26
10	40.002	31.931		79.82		
10	40.002	34.778	70.611	86.94		
10	40.001	35.833		89.58		
10	40.004	30.420	61.068	76.04		
10	40.012	30.648		76.60		
10	40.011	32.241	64.127	80.58		
10	40.036	31.886		79.64		
8	40.000	31.832	64.349	79.58		
10	40.000	32.517		81.29		
8	40.000	30.478	60.687	76.20		
10	40.000	30.209		75.52		



Informe final de Proyecto de Investigación

Continuación Tabla 14

Tamiz No.	Masa Material (g)	Carbón Act. (g)	Masa total (g)	Rendimiento (%)	**Promedio (%)	Masa Total (g)
10	40.000	29.037	58.981	72.59	76.55 ± 3.30	428.86
10	40.000	29.944		74.86		
10	40.014	29.037	58.981	72.57		
8	40.021	29.944		74.82		
10	40.016	30.163	59.860	75.38		
8	40.010	29.697		74.22		
8	40.000	31.766	64.253	79.42		
10	40.000	32.487		81.22		
8	40.013	30.095	62.427	75.21		
10	40.010	32.332		80.81		
8	40.013	31.269	60.570	78.15		
10	40.010	29.301		73.23		
8	40.064	30.806	63.789	76.89		
10	40.058	32.983		82.34		

Nota. El proceso de pirólisis de la cascarilla se realizó en el equipo mufla.

Tabla 15 Análisis granulométrico de carbón activado

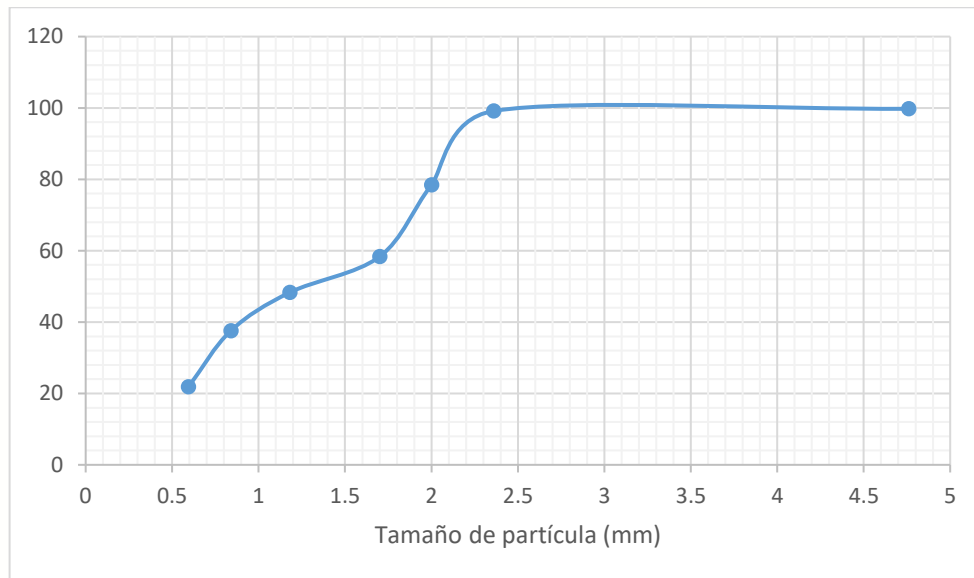
No.	Tamiz mm	Peso Retenido (g)	% Peso Retenido (%)	% Retenido Acumulado (%)	% Pasa (%)
4	4.76	0.468	0.236	0.236	99.764
8	2.36	1.199	0.605	0.841	99.159
10	2.00	41.089	20.728	21.569	78.431
12	1.70	39.815	20.085	41.653	58.347
16	1.18	19.9075	10.042	51.696	48.304
20	0.84	21.243	10.716	62.412	37.588
30	0.60	31.115	15.696	78.108	21.892
Fondo		43.397	21.892	100.000	0.000
Peso total		198.234			

Nota. El análisis granulométrico se realizó en una tamizadora, utilizando tamices regulados por la norma ASTM E-11.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 7.

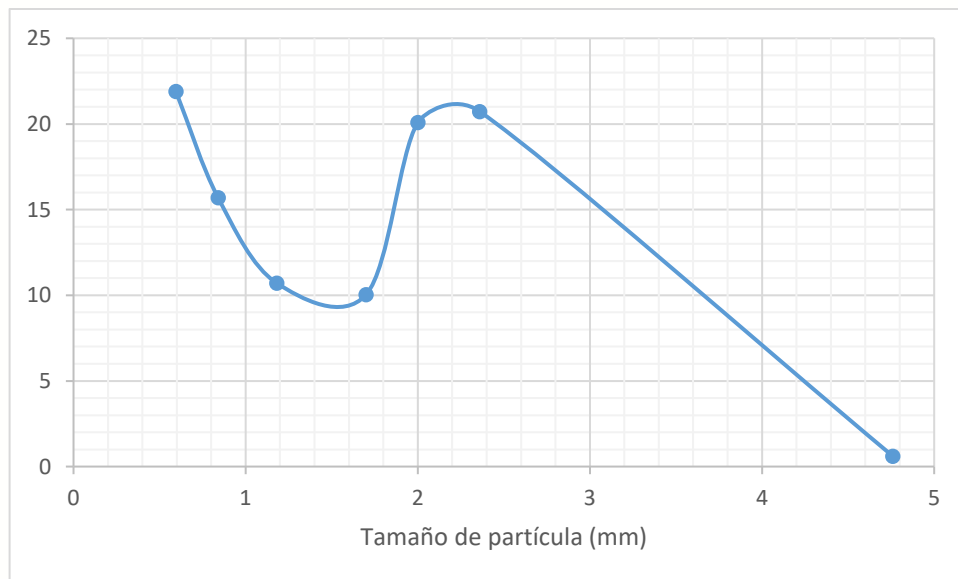
Porcentaje pasante de material en función de la apertura de tamiz



Nota. Gráfica del porcentaje acumulado del material en función de su tamaño de partícula.

Figura 8.

Porcentaje material retenido en función de la apertura de tamiz



Nota. Gráfica del porcentaje acumulado retenido del material en función de su tamaño de partícula.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 16

pH de soluciones filtradas en columna de adsorción con carbón activado

Muestra	Tiempo (min)	R1	R2	R3	Promedio	Desv Est
Tamiz 10 Lecho 20	0	6.694	6.682	6.690	6.69	0.006
	15	7.073	7.735	7.232	7.35	0.346
	30	7.184	7.858	7.560	7.53	0.338
	45	7.227	7.518	7.683	7.48	0.231
	60	7.544	7.310	7.596	7.48	0.152
	100	7.099	7.208	7.590	7.30	0.258
Tamiz 10 Lecho 30	0	6.657	6.635	6.663	6.65	0.015
	15	7.116	7.765	7.004	7.30	0.411
	30	7.281	7.703	7.404	7.46	0.217
	45	7.388	7.642	7.033	7.35	0.306
	60	7.003	7.651	7.022	7.23	0.369
	100	6.985	7.265	6.668	6.97	0.299
Tamiz 8 Lecho 20	0	6.650	6.642	6.634	6.64	0.008
	15	6.809	6.934	6.637	6.79	0.149
	30	6.990	7.035	6.935	6.99	0.050
	45	6.728	7.109	7.452	7.10	0.362
	60	6.822	7.054	6.891	6.92	0.119
	100	6.172	6.655	6.720	6.52	0.299
Tamiz 8 Lecho 30	0	6.641	6.630	6.624	6.63	0.009
	15	7.011	6.820	6.855	6.90	0.102
	30	7.022	7.061	7.447	7.18	0.235
	45	7.225	7.138	7.240	7.20	0.055
	60	7.226	7.041	7.188	7.15	0.098
	100	7.038	6.925	7.170	7.04	0.123

Nota. La medición del pH se realizó utilizando un equipo medidor de pH/mV y EC/TDS.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 17

Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos ácidos en el carbón activado físicamente, corrida 1

pH	V _{HCl} (mL)	dpH	dV	dpH/dV
12.866	0	-0.136	5	-0.0272
12.73	5	-0.213	5	-0.0426
12.517	10	-0.146	5	-0.0292
12.371	15	-0.41	5	-0.082
11.961	20	-0.623	5	-0.1246
11.338	25	-1.166	5	-0.2332
10.172	30	-2.538	5	-0.5076
7.634	35	-1.628	5	-0.3256
6.006	40	-3.388	5	-0.6776
2.618	45	-0.702	5	-0.1404
1.916	50			

Nota. Datos obtenidos realizando la titulación de Boehm.

Tabla 18

Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos ácidos en el carbón activado físicamente, corrida 2

pH	V _{HCl} (mL)	dpH	dV	dpH/dV
12.831	0	-0.037	5	-0.0074
12.794	5	-0.22	5	-0.044
12.574	10	-0.182	5	-0.0364
12.392	15	-0.097	5	-0.0194
12.295	20	-0.465	5	-0.093
11.83	25	-1.007	5	-0.2014
10.823	30	-1.413	5	-0.2826
9.41	35	-2.955	5	-0.591
6.455	40	-3.752	5	-0.7504
2.703	45	-0.698	5	-0.1396
2.005	50	-0.698		

Nota. Datos obtenidos realizando la titulación de Boehm.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 19

Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos ácidos en el carbón activado físicamente, corrida 3

pH	V _{HCl} (mL)	dpH	dV	dpH/dV
12.867	0	-0.125	5	-0.025
12.742	5	-0.162	5	-0.0324
12.58	10	-0.16	5	-0.032
12.42	15	-0.234	5	-0.0468
12.186	20	-0.385	5	-0.077
11.801	25	-1.121	5	-0.2242
10.68	30	-1.22	5	-0.244
9.46	35	-3.1	5	-0.62
6.36	40	-3.541	5	-0.7082
2.819	45	-0.812	5	-0.1624
2.007	50			

Nota. Datos obtenidos realizando la titulación de Boehm.

Tabla 20

Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos básicos en el carbón activado físicamente, corrida 1

pH	V _{NaOH} (mL)	dpH	dV (ml)	dpH/dV
1.289	0	0	0.2	0
1.289	0.2	0.044	0.2	0.22
1.333	0.4	0.02	0.2	0.1
1.353	0.6	0.013	0.2	0.065
1.366	0.8	0.025	0.2	0.125
1.391	1	0.018	0.2	0.09
1.409	1.2	0.038	0.2	0.19
1.447	1.4	0.018	0.2	0.09
1.465	1.6	0.045	0.2	0.225
1.51	1.8	0.031	0.2	0.155
1.541	2	0.027	0.2	0.135
1.568	2.2	0.04	0.2	0.2
1.608	2.4	0.034	0.2	0.17
1.642	2.6	0.047	0.2	0.235
1.689	2.8	0.011	0.2	0.055



Informe final de Proyecto de Investigación

Continuación Tabla 18

pH	V _{NaOH} (mL)	dpH	dV (ml)	dpH/dV
1.7	3	0.049	0.2	0.245
1.749	3.2	0.035	0.2	0.175
1.784	3.4	0.043	0.2	0.215
1.827	3.6	0.044	0.2	0.22
1.871	3.8	0.042	0.2	0.21
1.913	4	0.034	0.2	0.17
1.947	4.2	0.055	0.2	0.275
2.002	4.4	0.063	0.2	0.315
2.065	4.6	0.049	0.2	0.245
2.114	4.8	0.085	0.2	0.425
2.199	5	0.065	0.2	0.325
2.264	5.2	0.06	0.2	0.3
2.324	5.4	0.082	0.2	0.41
2.406	5.6	0.111	0.2	0.555
2.517	5.8	0.125	0.2	0.625
2.642	6	0.108	0.2	0.54
2.75	6.2	0.204	0.2	1.02
2.954	6.4	0.37	0.2	1.85
3.324	6.6	1.217	0.2	6.085
4.541	6.8	3.215	0.2	16.075
7.756	7	2.789	0.2	13.945
10.545	7.2	0.447	0.2	2.235
10.992	7.4	0.215	0.2	1.075
11.207	7.6	0.344	0.2	1.72
11.551	7.8	0.188	0.2	0.94
11.739	8	0.163	0.2	0.815
11.902	8.2			

Nota. Datos obtenidos realizando la titulación de Boehm.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 21

Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos básicos en el carbón activado físicamente, corrida 2

pH	V _{NaOH} (mL)	dpH	dV (ml)	dpH/dV
1.294	0	-0.091	0.2	-0.455
1.203	0.2	0.108	0.2	0.54
1.311	0.4	-0.078	0.2	-0.39
1.233	0.6	0.087	0.2	0.435
1.32	0.8	-0.079	0.2	-0.395
1.241	1	0.112	0.2	0.56
1.353	1.2	-0.08	0.2	-0.4
1.273	1.4	0.11	0.2	0.55
1.383	1.6	0.058	0.2	0.29
1.441	1.8	-0.046	0.2	-0.23
1.395	2	0.054	0.2	0.27
1.449	2.2	-0.056	0.2	-0.28
1.393	2.4	0.119	0.2	0.595
1.512	2.6	-0.047	0.2	-0.235
1.465	2.8	0.056	0.2	0.28
1.521	3	-0.032	0.2	-0.16
1.489	3.2	0.126	0.2	0.63
1.615	3.4	-0.026	0.2	-0.13
1.589	3.6	0.074	0.2	0.37
1.663	3.8	0.019	0.2	0.095
1.682	4	-0.001	0.2	-0.005
1.681	4.2	0.112	0.2	0.56
1.793	4.4	0.018	0.2	0.09
1.811	4.6	0.059	0.2	0.295
1.87	4.8	0.007	0.2	0.035
1.877	5	0.1	0.2	0.5
1.977	5.2	-0.007	0.2	-0.035
1.97	5.4	0.107	0.2	0.535
2.077	5.6	0.013	0.2	0.065
2.09	5.8	0.162	0.2	0.81
2.252	6	0.054	0.2	0.27
2.306	6.2	0.159	0.2	0.795



Informe final de Proyecto de Investigación

Continuación Tabla 21

pH	V _{NaOH} (mL)	dpH	dV (ml)	dpH/dV
2.465	6.4	0.11	0.2	0.55
2.575	6.6	0.306	0.2	1.53
2.881	6.8	0.448	0.2	2.24
3.329	7	1.358	0.2	6.79
4.687	7.2	3.995	0.2	19.975
8.682	7.4	1.704	0.2	8.52
10.386	7.6	0.322	0.2	1.61
10.708	7.8	0.289	0.2	1.445
10.997	8			

Nota. Datos obtenidos realizando la titulación de Boehm.

Tabla 22

Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos básicos en el carbón activado físicamente, corrida 3

pH	V _{NaOH} (mL)	dpH	dV	dpH/dV
1.313	0	0.024	0.2	0.12
1.337	0.2	0.014	0.2	0.07
1.351	0.4	0.034	0.2	0.17
1.385	0.6	0.021	0.2	0.105
1.406	0.8	0.02	0.2	0.1
1.426	1	0.065	0.2	0.325
1.491	1.2	0.036	0.2	0.18
1.527	1.4	0.01	0.2	0.05
1.537	1.6	0.039	0.2	0.195
1.576	1.8	-0.012	0.2	-0.06
1.564	2	0.028	0.2	0.14
1.592	2.2	0.038	0.2	0.19
1.63	2.4	0.054	0.2	0.27
1.684	2.6	0.018	0.2	0.09
1.702	2.8	0.043	0.2	0.215
1.745	3	0.044	0.2	0.22
1.789	3.2	0.067	0.2	0.335
1.856	3.4	0.033	0.2	0.165



Informe final de Proyecto de Investigación

Continuación Tabla 22

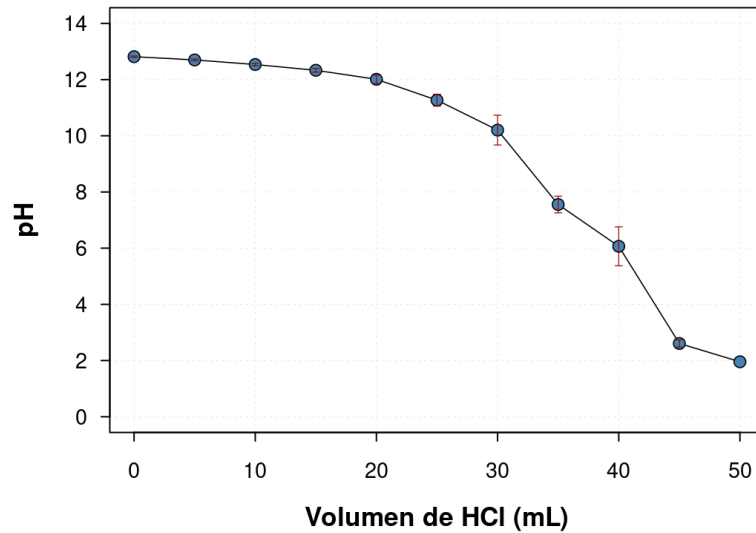
pH	V _{NaOH} (mL)	dpH	dV	dpH/dV
1.889	3.6	0.039	0.2	0.195
1.928	3.8	0.045	0.2	0.225
1.973	4	0.053	0.2	0.265
2.026	4.2	0.056	0.2	0.28
2.082	4.4	0.076	0.2	0.38
2.158	4.6	0.059	0.2	0.295
2.217	4.8	0.033	0.2	0.165
2.25	5	0.104	0.2	0.52
2.354	5.2	0.032	0.2	0.16
2.386	5.4	0.082	0.2	0.41
2.468	5.6	0.091	0.2	0.455
2.559	5.8	0.229	0.2	1.145
2.788	6	0.182	0.2	0.91
2.97	6.2	0.264	0.2	1.32
3.234	6.4	0.562	0.2	2.81
3.796	6.6	1.32	0.2	6.6
5.116	6.8	4.143	0.2	20.715
9.259	7	1.286	0.2	6.43
10.545	7.2	0.55	0.2	2.75
11.095	7.4	0.144	0.2	0.72
11.239	7.6	0.181	0.2	0.905
11.42	7.8			

Nota. Datos obtenidos realizando la titulación de Boehm.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 9.

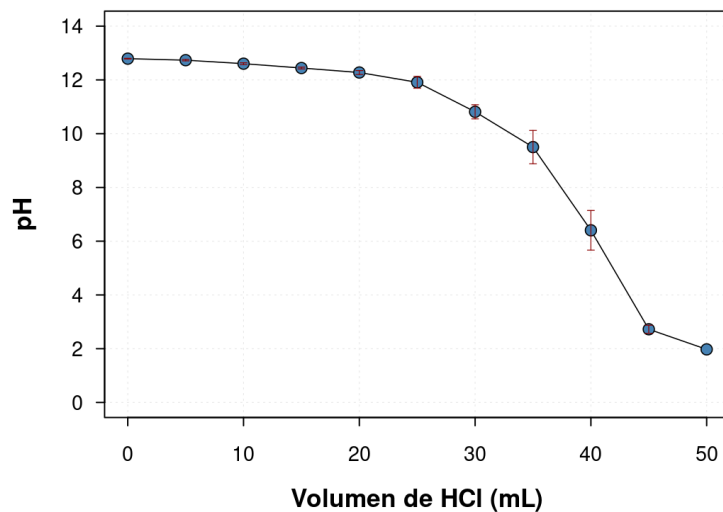
Curva de titulación para determinación de grupos ácidos de carbón activado físicamente, corrida 1



Nota. Curva de titulación realizada con los datos obtenidos de la titulación de Boehm.

Figura 10.

Curva de titulación para determinación de grupos ácidos de carbón activado físicamente, corrida 2

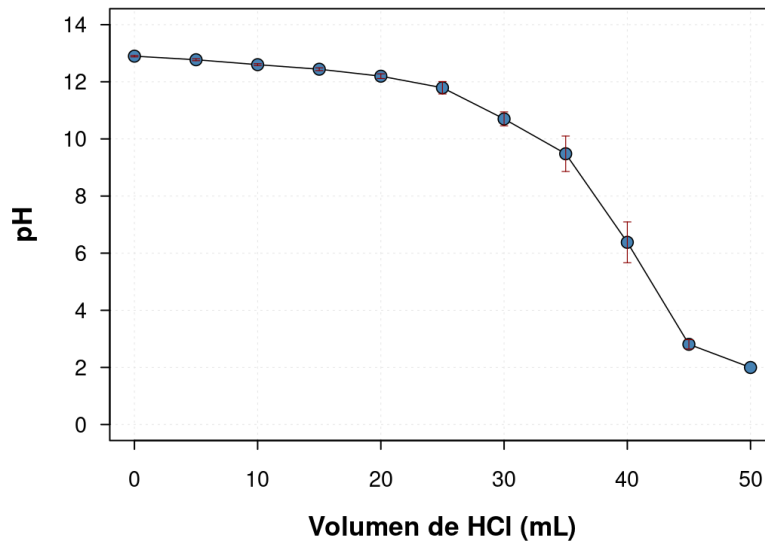


Nota. Curva de titulación realizada con los datos obtenidos de la titulación de Boehm.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 11.

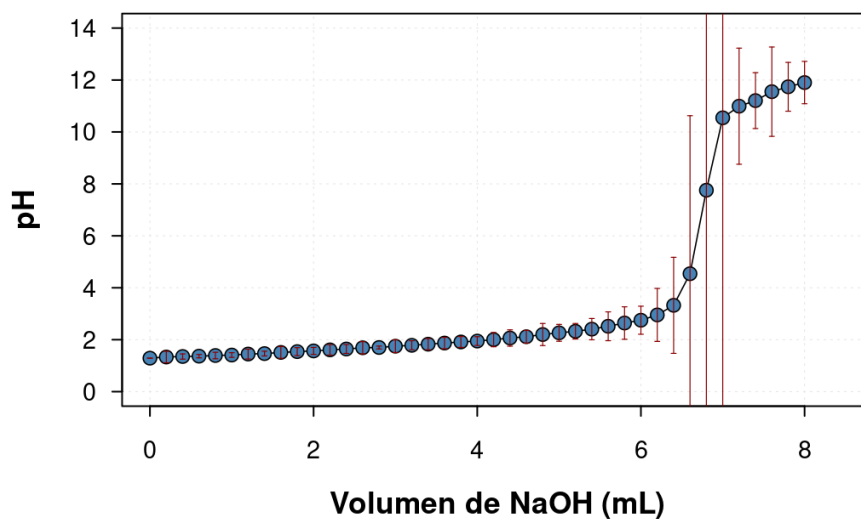
Curva de titulación para determinación de grupos ácidos de carbón activado físicamente, corrida 3



Nota. Curva de titulación realizada con los datos obtenidos de la titulación de Boehm.

Figura 12.

Curva de titulación para determinación de grupos básicos de carbón activado físicamente, corrida 1

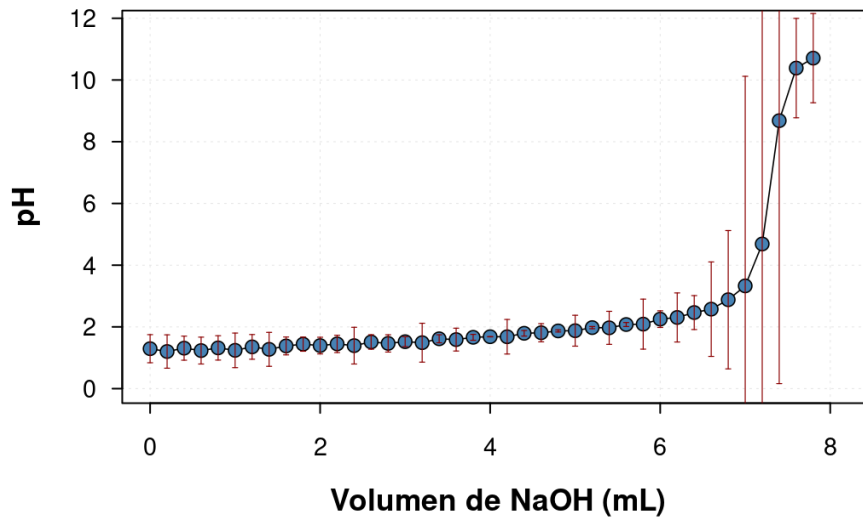


Nota. Curva de titulación realizada con los datos obtenidos de la titulación de Boehm.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 13.

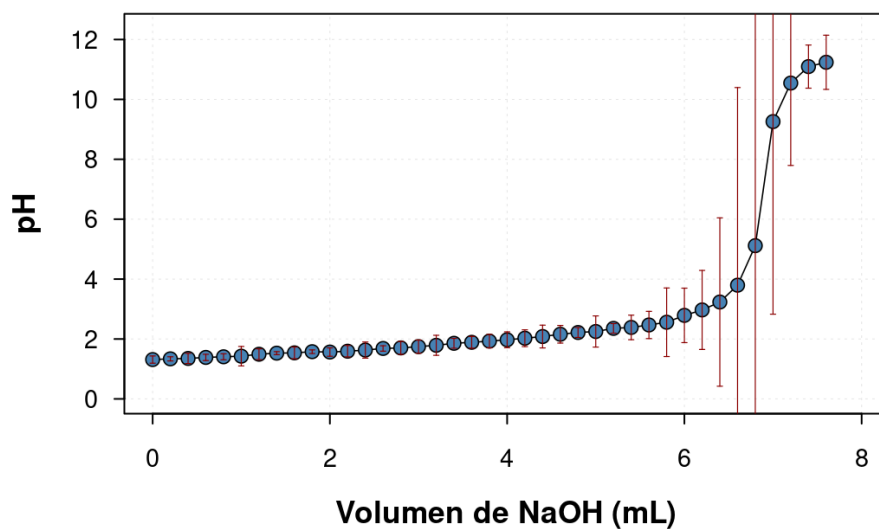
Curva de titulación para determinación de grupos básicos de carbón activado físicamente, corrida 2



Nota. Curva de titulación realizada con los datos obtenidos de la titulación de Boehm.

Figura 14.

Curva de titulación para determinación de grupos básicos de carbón activado físicamente, corrida 3

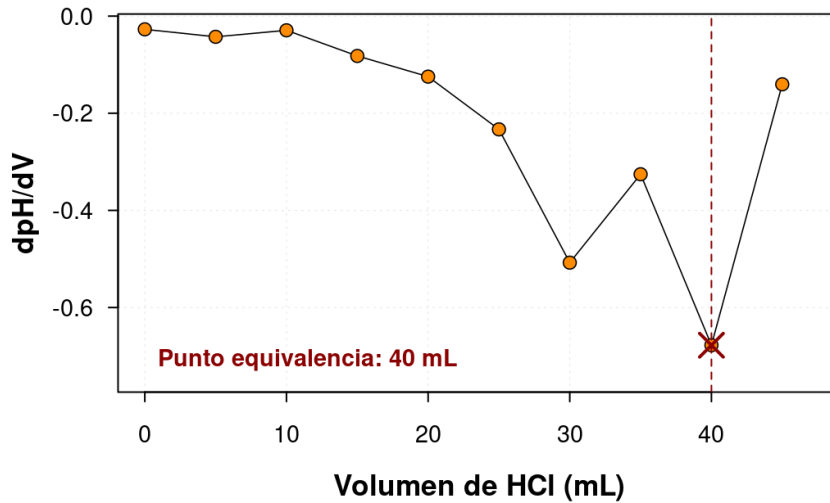


Nota. Curva de titulación realizada con los datos obtenidos de la titulación de Boehm.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 15.

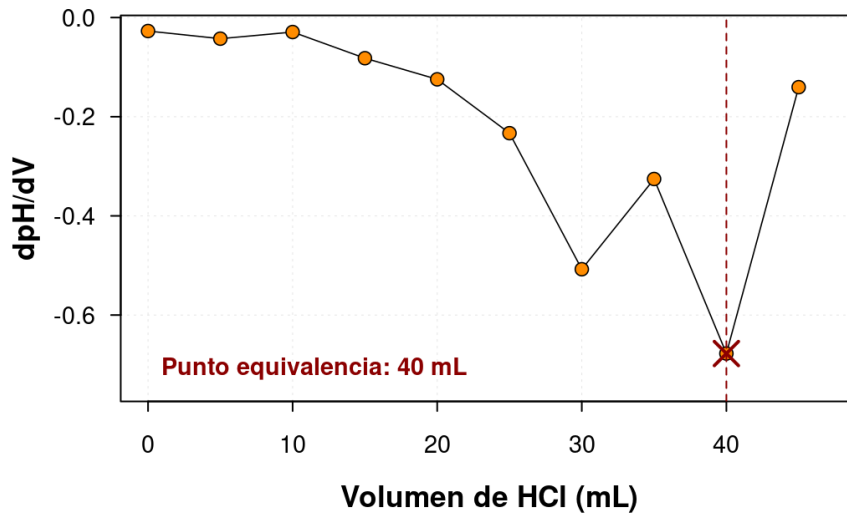
Determinación de punto de equivalencia para grupos ácidos de carbón activado físicamente, corrida 1



Nota. Gráfica realizada con los datos de titulación de Boehm.

Figura 16.

Determinación de punto de equivalencia para grupos ácidos de carbón activado físicamente, corrida 2

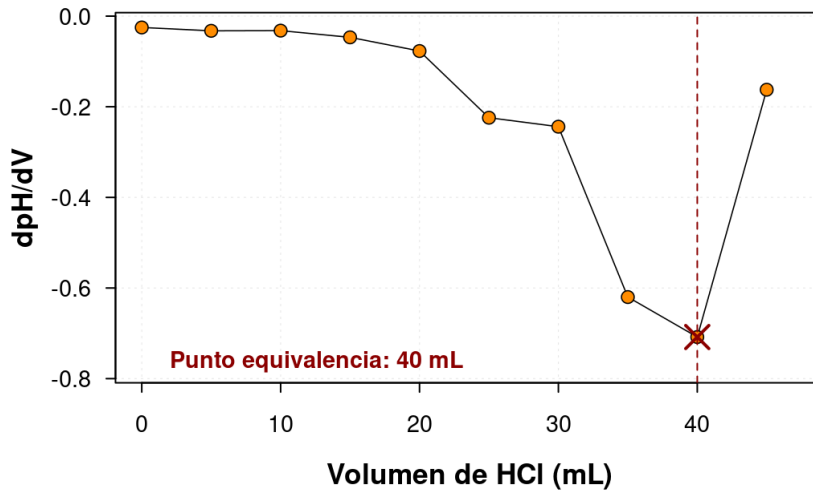


Nota. Gráfica realizada con los datos de titulación de Boehm.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 17.

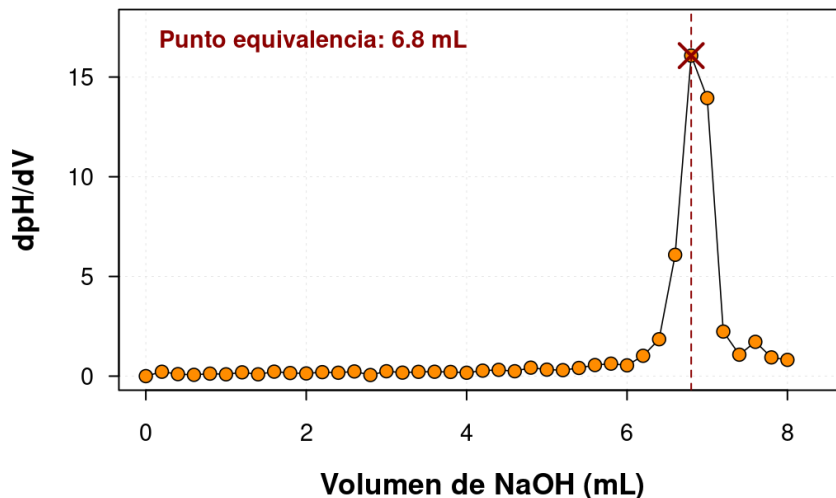
Determinación de punto de equivalencia para grupos ácidos de carbón activado físicamente, corrida 3



Nota. Gráfica realizada con los datos de titulación de Boehm.

Figura 18.

Determinación de punto de equivalencia para grupos básicos de carbón activado físicamente, corrida 1

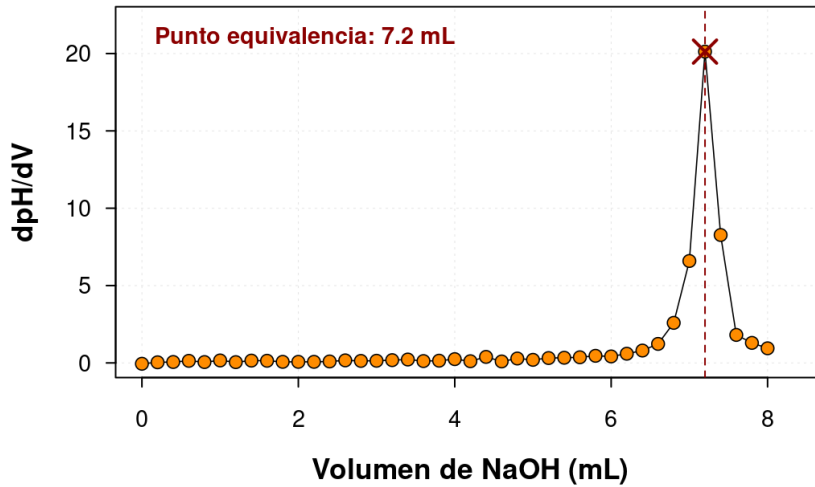


Nota. Gráfica realizada con los datos de titulación de Boehm.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 19.

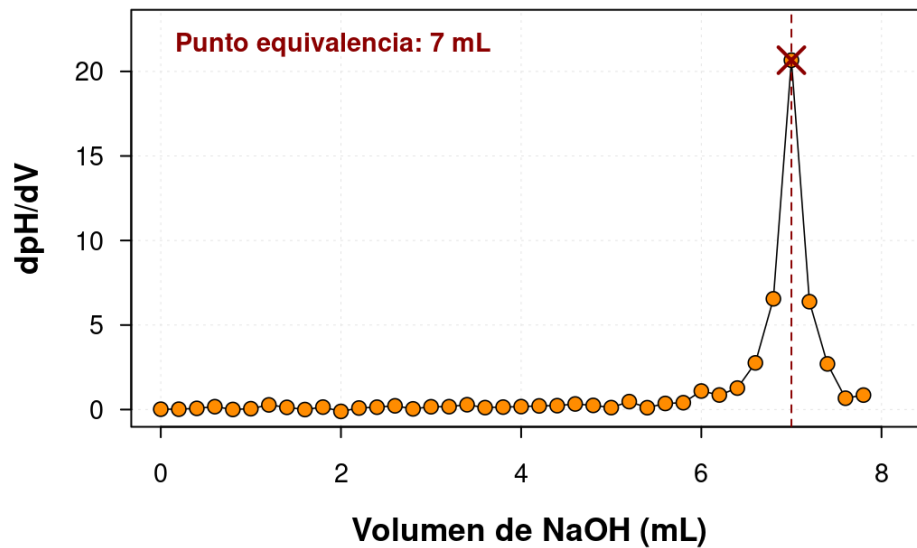
Determinación de punto de equivalencia para grupos básicos de carbón activado físicamente, corrida 2



Nota. Gráfica realizada con los datos de titulación de Boehm.

Figura 20.

Determinación de punto de equivalencia para grupos básicos de carbón activado físicamente, corrida 3



Nota. Gráfica realizada con los datos de titulación de Boehm.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 23

Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos ácidos en el carbón activado químicamente, corrida 1

pH	V _{HCl} (mL)	dpH	dV	dpH/dV
12.235	0	-0.575	5	-0.115
11.66	5	-1.44	5	-0.288
10.22	10	-0.12	5	-0.024
10.1	15	-0.9	5	-0.18
9.2	20	-1.82	5	-0.364
7.38	25	-0.36	5	-0.072
7.02	30	-0.71	5	-0.142
6.31	35	-3.52	5	-0.704
2.79	40	-0.46	5	-0.092
2.33	45	-0.2	5	-0.04
2.13	50			

Nota. Se utilizó carbón activado químicamente con ácido fosfórico.

Tabla 24

Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos ácidos en el carbón activado químicamente, corrida 2

pH	V _{HCl} (mL)	dpH	dV	dpH/dV
12.24	0	-0.63	5	-0.126
11.61	5	-0.925	5	-0.185
10.685	10	-0.55	5	-0.11
10.135	15	-0.97	5	-0.194
9.165	20	-1.57	5	-0.314
7.595	25	-0.335	5	-0.067
7.26	30	-0.76	5	-0.152
6.501	35	-3.68	5	-0.736
2.821	40	-0.473	5	-0.095
2.348	45	-0.214	5	-0.043
2.134	50	-2.134		

Nota. Se utilizó carbón activado químicamente con ácido fosfórico.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 25

Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos ácidos en el carbón activado químicamente, corrida 3

pH	V _{HCl} (mL)	dpH	dV	dpH/dV
12.199	0	-0.77	5	-0.154
11.429	5	-0.883	5	-0.177
10.546	10	-0.623	5	-0.125
9.923	15	-1.262	5	-0.252
8.661	20	-1.179	5	-0.236
7.482	25	-0.531	5	-0.106
6.951	30	-2.119	5	-0.424
4.832	35	-2.32	5	-0.464
2.512	40	-0.313	5	-0.063
2.199	45	-0.166	5	-0.033
2.033	50			

Nota. Se utilizó carbón activado químicamente con ácido fosfórico.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 26

Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos básicos en el carbón activado químicamente, corrida 1

pH	V _{NaOH} (mL)	dpH	dV	dpH/dV
1.276	0	-0.058	0.2	-0.29
1.218	0.2	0.089	0.2	0.445
1.307	0.4	0.012	0.2	0.06
1.319	0.6	-0.045	0.2	-0.225
1.274	0.8	0.068	0.2	0.34
1.342	1	0.008	0.2	0.04
1.35	1.2	0.02	0.2	0.1
1.37	1.4	0.058	0.2	0.29
1.428	1.6	-0.022	0.2	-0.11
1.406	1.8	0.043	0.2	0.215
1.449	2	0.058	0.2	0.29
1.507	2.2	-0.026	0.2	-0.13
1.481	2.4	0.014	0.2	0.07
1.495	2.6	0.04	0.2	0.2
1.535	2.8	0.045	0.2	0.225
1.58	3	0.015	0.2	0.075
1.595	3.2	0.014	0.2	0.07
1.609	3.4	0.033	0.2	0.165
1.642	3.6	0.037	0.2	0.185
1.679	3.8	0.058	0.2	0.29
1.737	4	-0.008	0.2	-0.04
1.729	4.2	0.012	0.2	0.06
1.741	4.4	0.036	0.2	0.18
1.777	4.6	0.027	0.2	0.135
1.804	4.8	0.003	0.2	0.015
1.807	5	0.055	0.2	0.275
1.862	5.2	0.011	0.2	0.055
1.873	5.4	0.022	0.2	0.11
1.895	5.6	0.053	0.2	0.265
1.948	5.8	0.051	0.2	0.255
1.999	6	0.039	0.2	0.195
2.038	6.2	0.061	0.2	0.305



Informe final de Proyecto de Investigación

Continuación Tabla 26

pH	V _{NaOH} (mL)	dpH	dV	dpH/dV
2.099	6.4	0.064	0.2	0.32
2.163	6.6	0.057	0.2	0.285
2.22	6.8	0.06	0.2	0.3
2.28	7	0.078	0.2	0.39
2.358	7.2	0.097	0.2	0.485
2.455	7.4	0.113	0.2	0.565
2.568	7.6	0.153	0.2	0.765
2.721	7.8	0.217	0.2	1.085
2.938	8	0.366	0.2	1.83
3.304	8.2	1.761	0.2	8.805
5.065	8.4	1.219	0.2	6.095
6.284	8.6	0.5	0.2	2.5
6.784	8.8	0.373	0.2	1.865
7.157	9	0.4	0.2	2
7.557	9.2	0.639	0.2	3.195
8.196	9.4	1.689	0.2	8.445
9.885	9.6	1.029	0.2	5.145
10.914	9.8	0.423	0.2	2.115
11.337	10	-11.337	0.2	-56.685

Nota. Se utilizó carbón activado químicamente con ácido fosfórico.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 27

Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos básicos en el carbón activado químicamente, corrida 2

pH	V _{NaOH} (mL)	dpH	dV	dpH/dV
1.265	0	-0.052	0.2	-0.26
1.213	0.2	0.057	0.2	0.285
1.27	0.4	0.089	0.2	0.445
1.359	0.6	-0.102	0.2	-0.51
1.257	0.8	0.055	0.2	0.275
1.312	1	-0.01	0.2	-0.05
1.302	1.2	0.05	0.2	0.25
1.352	1.4	0.001	0.2	0.005
1.353	1.6	0.005	0.2	0.025
1.358	1.8	0.018	0.2	0.09
1.376	2	0.006	0.2	0.03
1.382	2.2	0.027	0.2	0.135
1.409	2.4	0.031	0.2	0.155
1.44	2.6	0.08	0.2	0.4
1.52	2.8	0.055	0.2	0.275
1.575	3	-0.012	0.2	-0.06
1.563	3.2	0.044	0.2	0.22
1.607	3.4	0.002	0.2	0.01
1.609	3.6	-0.002	0.2	-0.01
1.607	3.8	0.05	0.2	0.25
1.657	4	-0.003	0.2	-0.015
1.654	4.2	0.049	0.2	0.245
1.703	4.4	0.014	0.2	0.07
1.717	4.6	0.039	0.2	0.195
1.756	4.8	0.05	0.2	0.25
1.806	5	0.024	0.2	0.12
1.83	5.2	0.028	0.2	0.14
1.858	5.4	0.049	0.2	0.245
1.907	5.6	0.055	0.2	0.275
1.962	5.8	0.032	0.2	0.16
1.994	6	0.054	0.2	0.27
2.048	6.2	0.064	0.2	0.32



Informe final de Proyecto de Investigación

Continuación Tabla 27

pH	V _{NaOH} (mL)	dpH	dV	dpH/dV
2.112	6.4	0.07	0.2	0.35
2.182	6.6	0.093	0.2	0.465
2.275	6.8	0.104	0.2	0.52
2.379	7	0.082	0.2	0.41
2.461	7.2	0.148	0.2	0.74
2.609	7.4	0.196	0.2	0.98
2.805	7.6	0.266	0.2	1.33
3.071	7.8	0.711	0.2	3.555
3.782	8	2.143	0.2	10.715
5.925	8.2	0.682	0.2	3.41
6.607	8.4	0.477	0.2	2.385
7.084	8.6	0.286	0.2	1.43
7.37	8.8	0.368	0.2	1.84
7.738	9	0.391	0.2	1.955
8.129	9.2	0.801	0.2	4.005
8.93	9.4	1.023	0.2	5.115
9.953	9.6	0.997	0.2	4.985
10.95	9.8	0.475	0.2	2.375
11.425	10			

Nota. Se utilizó carbón activado químicamente con ácido fosfórico.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 28

Método de titulación Boehm para determinación de la conformación de grupos básicos en el carbón activado químicamente, corrida 3

pH	V _{NaOH} (mL)	dpH	dV	dpH/dV
1.252	0	0.086	0.2	0.43
1.338	0.2	-0.05	0.2	-0.25
1.288	0.4	0.105	0.2	0.525
1.393	0.6	0.145	0.2	0.725
1.538	0.8	-0.124	0.2	-0.62
1.414	1	0.07	0.2	0.35
1.484	1.2	0.014	0.2	0.07
1.498	1.4	0.039	0.2	0.195
1.537	1.6	0.023	0.2	0.115
1.56	1.8	0.017	0.2	0.085
1.577	2	0.043	0.2	0.215
1.62	2.2	-0.052	0.2	-0.26
1.568	2.4	0.04	0.2	0.2
1.608	2.6	0.006	0.2	0.03
1.614	2.8	0.017	0.2	0.085
1.631	3	-0.081	0.2	-0.405
1.55	3.2	0.043	0.2	0.215
1.593	3.4	0.085	0.2	0.425
1.678	3.6	0.015	0.2	0.075
1.693	3.8	0.045	0.2	0.225
1.738	4	-0.015	0.2	-0.075
1.723	4.2	0.05	0.2	0.25
1.773	4.4	0.018	0.2	0.09
1.791	4.6	0.023	0.2	0.115
1.814	4.8	0.044	0.2	0.22
1.858	5	0.053	0.2	0.265
1.911	5.2	0.008	0.2	0.04
1.919	5.4	0.049	0.2	0.245
1.968	5.6	0.072	0.2	0.36
2.04	5.8	0.045	0.2	0.225
2.085	6	0.055	0.2	0.275
2.14	6.2	0.054	0.2	0.27



Informe final de Proyecto de Investigación

Continuación Tabla 28

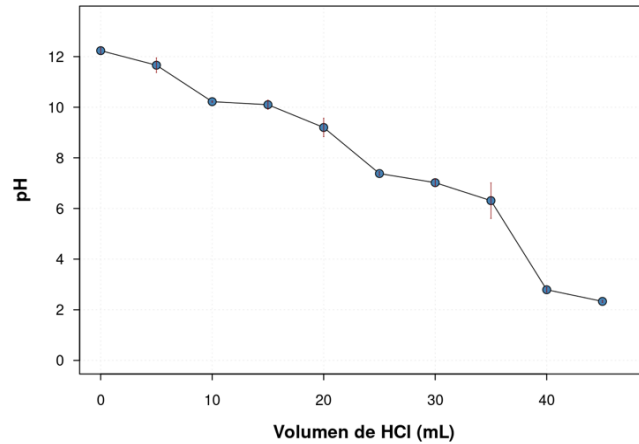
pH	V _{NaOH} (mL)	dpH	dV	dpH/dV
2.194	6.4	0.079	0.2	0.395
2.273	6.6	0.079	0.2	0.395
2.352	6.8	0.108	0.2	0.54
2.46	7	0.092	0.2	0.46
2.552	7.2	0.182	0.2	0.91
2.734	7.4	0.17	0.2	0.85
2.904	7.6	0.387	0.2	1.935
3.291	7.8	1.32	0.2	6.6
4.611	8	1.735	0.2	8.675
6.346	8.2	0.49	0.2	2.45
6.836	8.4	0.39	0.2	1.95
7.226	8.6	0.295	0.2	1.475
7.521	8.8	0.695	0.2	3.475
8.216	9	2.097	0.2	10.485
10.313	9.2	0.657	0.2	3.285
10.97	9.4	0.324	0.2	1.62
11.294	9.6	0.194	0.2	0.97
11.488	9.8	0.151	0.2	0.755
11.639	10			

Nota. Se utilizó carbón activado químicamente con ácido fosfórico.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 21.

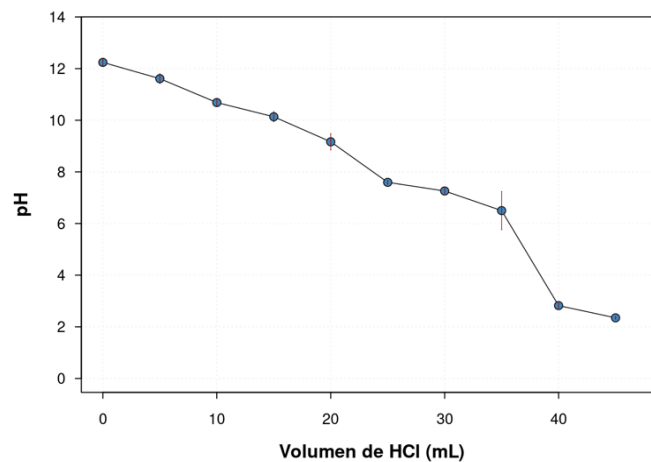
Curva de titulación para determinación de grupos ácidos de carbón activado químicamente, corrida 1



Nota. Gráfica de la curva de calibración de grupos ácidos, en función del pH y el contenido del ácido clorhídrico.

Figura 22.

Curva de titulación para determinación de grupos ácidos de carbón activado químicamente, corrida 2

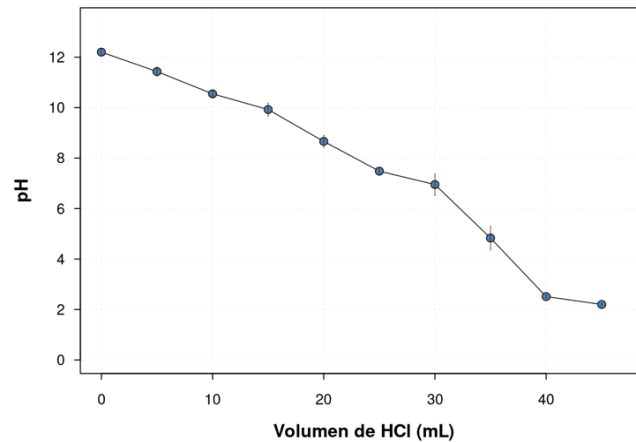


Nota. Gráfica de la curva de calibración de grupos ácidos, en función del pH y el contenido del ácido clorhídrico.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 23.

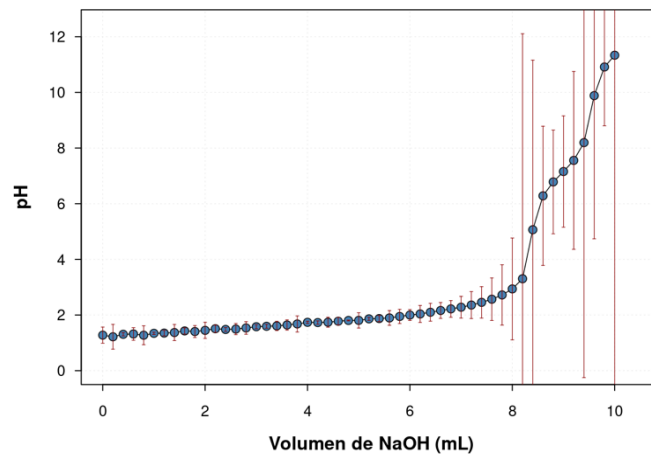
Curva de titulación para determinación de grupos ácidos de carbón activado químicamente, corrida 3



Nota. Gráfica de la curva de calibración de grupos ácidos, en función del pH y el contenido del ácido clorhídrico.

Figura 24.

Curva de titulación para determinación de grupos básicos de carbón activado químicamente, corrida 1

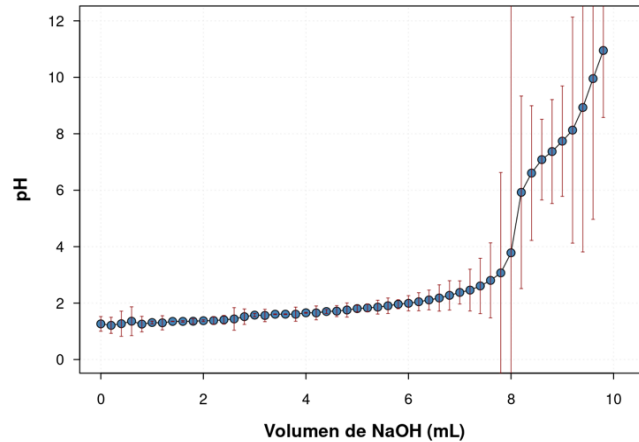


Nota. Gráfica de la curva de calibración de grupos básicos, en función del pH y el contenido del hidróxido de sodio.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 25.

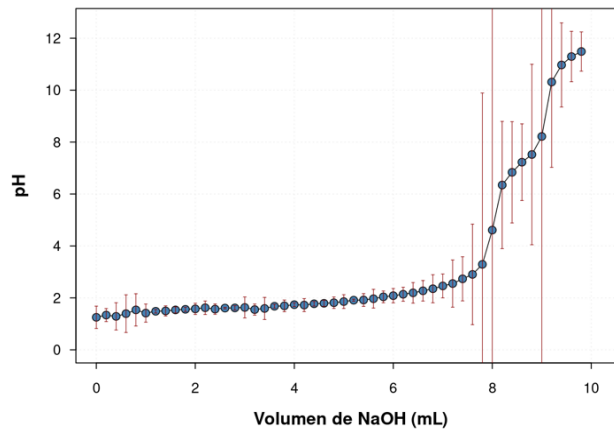
Curva de titulación para determinación de grupos básicos de carbón activado químicamente, corrida 2



Nota. Gráfica de la curva de calibración de grupos básicos, en función del pH y el contenido del hidróxido de sodio.

Figura 26.

Curva de titulación para determinación de grupos básicos de carbón activado químicamente, corrida 3

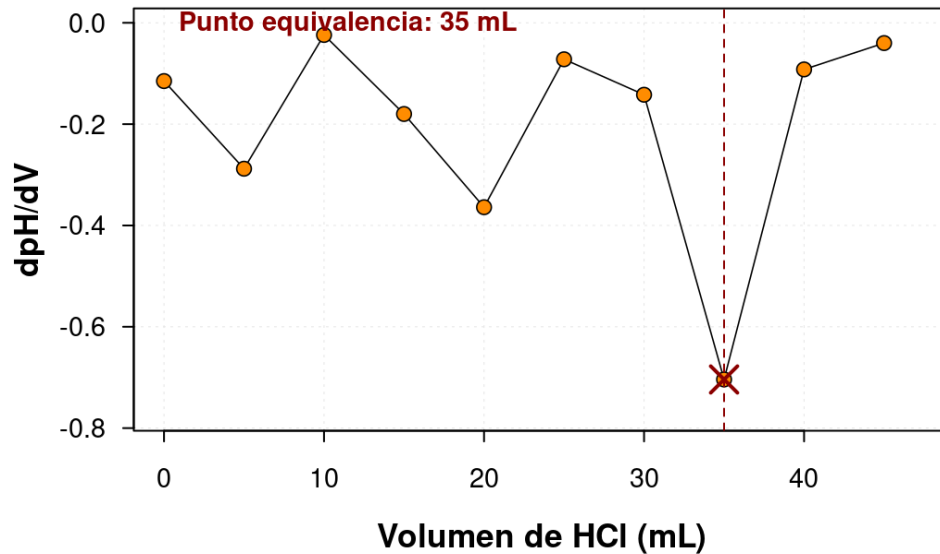


Nota. Gráfica de la curva de calibración de grupos básicos, en función del pH y el contenido del hidróxido de sodio.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 27.

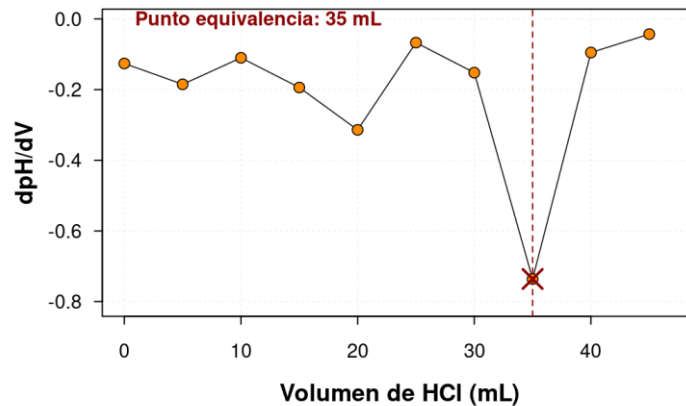
Determinación de punto de equivalencia para grupos ácidos de carbón activado químicamente, corrida 1



Nota. Gráfica del punto de equivalencia para grupos ácidos con el cambio de pH con relación al volumen.

Figura 28.

Determinación de punto de equivalencia para grupos ácidos de carbón activado químicamente, corrida 2

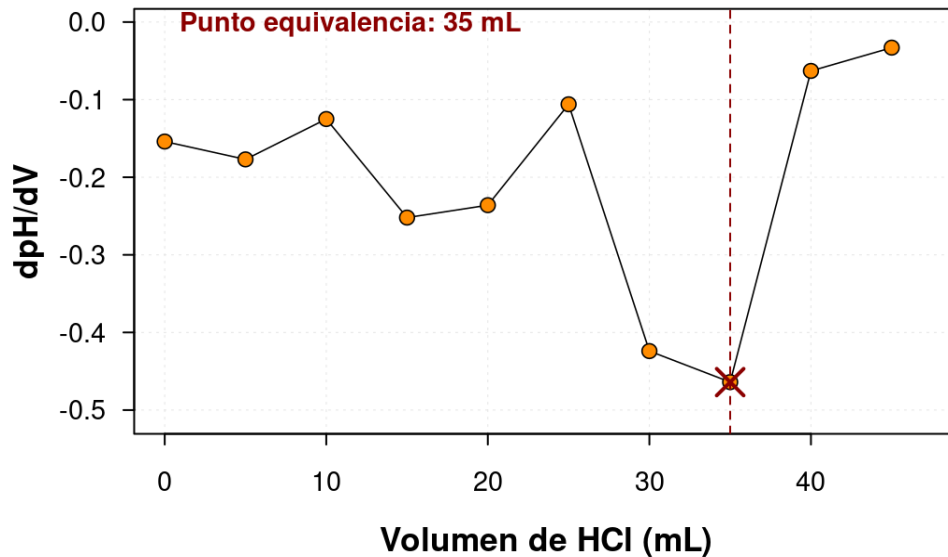


Nota. Gráfica del punto de equivalencia para grupos ácidos con el cambio de pH con relación al volumen.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 29.

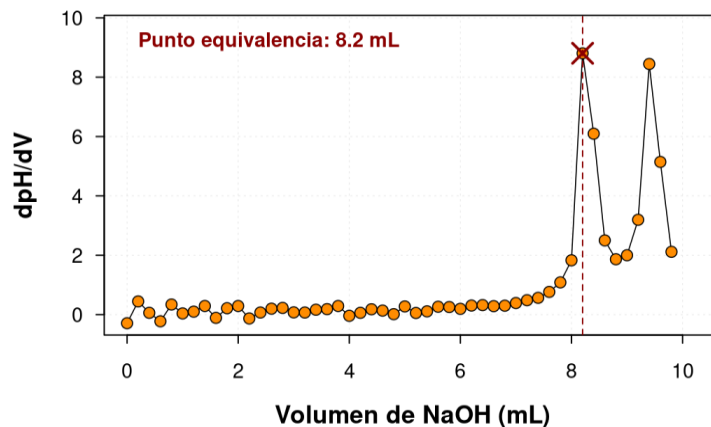
Determinación de punto de equivalencia para grupos ácidos de carbón activado químicamente, corrida 3



Nota. Gráfica del punto de equivalencia para grupos ácidos con el cambio de pH con relación al volumen.

Figura 30.

Determinación de punto de equivalencia para grupos básicos de carbón activado químicamente, corrida 1

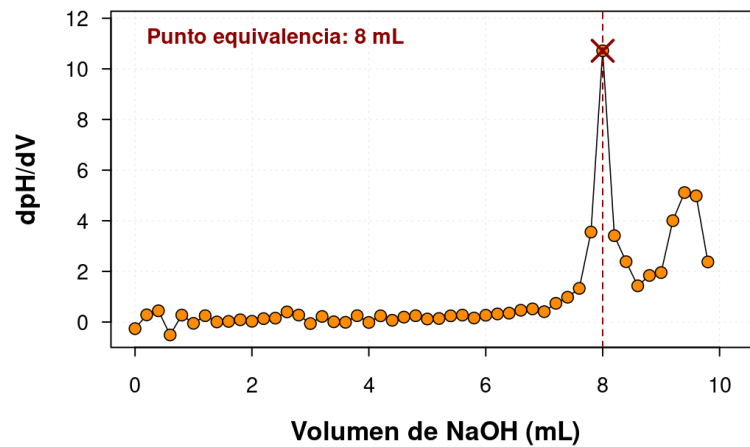


Nota. Gráfica del punto de equivalencia para grupos básicos con el cambio de pH con relación al volumen.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 31.

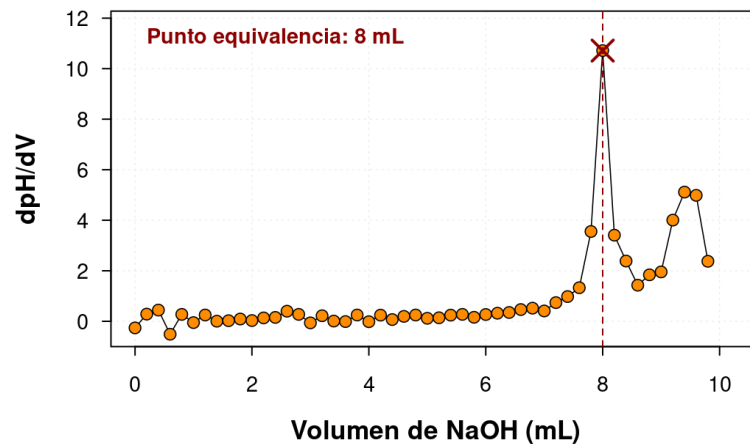
Determinación de punto de equivalencia para grupos básicos de carbón activado químicamente, corrida 2



Nota. Gráfica del punto de equivalencia para grupos básicos con el cambio de pH con relación al volumen.

Figura 32.

Determinación de punto de equivalencia para grupos básicos de carbón activado químicamente, corrida 3



Nota. Gráfica del punto de equivalencia para grupos básicos con el cambio de pH con relación al volumen.

Informe final de Proyecto de Investigación**Tabla 29***Determinación de moles equivalentes g/g de grupos ácidos de carbón activado químicamente*

V _b mL	C _b N	V _{eHCl} mL	C _{HCl} N	V _{ali,b} mL	m g	Moles ácidos mequiv-g/g
50.000	0.500	35.000	0.100	10.000	1.002	7.485
50.000	0.500	35.000	0.100	10.000	1.000	7.500
50.000	0.500	35.000	0.100	10.000	1.001	7.493

Nota. Los valores representan la cantidad de grupos ácidos superficiales del carbón activado, determinada por retrovaloración ácido-base.

Tabla 30*Determinación de moles equivalentes g/g de grupos básicos de carbón activado químicamente*

V _a mL	C _a N	V _{eNaOH} mL	C _{NaOH} N	V _{ali,a} mL	m g	Moles básicos mequiv-g/g
10.000	0.500	8.200	0.100	10.000	1.000	4.180
10.000	0.500	8.000	0.100	10.000	1.001	4.196
10.000	0.500	8.000	0.100	10.000	1.002	4.192

Nota. Los valores representan la cantidad de grupos básicos superficiales del carbón activado, determinada por retrovaloración ácido-base.

Tabla 31*Determinación de moles equivalentes g/g de grupos ácidos de carbón activado físicamente*

V _b mL	C _b N	V _{eHCl} mL	C _{HCl} N	V _{ali,b} mL	m g	Moles ácidos mequiv-g/g
10.000	0.500	40.000	0.100	10.000	1.002	0.998
10.000	0.500	40.000	0.100	10.000	1.000	1.000
10.000	0.500	40.000	0.100	10.000	1.001	0.999

Nota. Los valores representan la cantidad de grupos ácidos superficiales del carbón activado, determinada por retrovaloración ácido-base.

Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 32

Determinación de moles equivalentes g/g de grupos básicos de carbón activado físicamente

V _a mL	C _a N	V _{eNaOH} mL	C _{NaOH} N	V _{ali,a} mL	m g	Moles básicos mequiv-g/g
50.000	0.100	6.800	0.100	10.000	1.000	1.600
50.000	0.100	7.200	0.100	10.000	1.001	1.399
50.000	0.100	7.000	0.100	10.000	1.002	1.497

Nota. Los valores representan la cantidad de grupos básicos superficiales del carbón activado, determinada por retrovaloración ácido-base.

Tabla 33

Grupos funcionales carbón activado químicamente

Corrida No.	Moles grupos básicos (mequiv- g/g)	Conformación grupos básicos (%)	Promedio	Moles grupos ácidos (mequiv- g/g)	Conformación grupos ácidos (%)	Promedio
1	4.180	35.834	35.861 ± 0.024	7.485	64.166	64.139 ± 0.024
2	4.196	35.874		7.500	64.126	
3	4.192	35.874		7.493	64.126	

Nota. Se muestra el porcentaje de la conformación de grupos básicos y ácidos del carbón activado químicamente.

Tabla 34

Grupos funcionales carbón activado físicamente

Corrida No.	Moles grupos básicos (mequiv- g/g)	Conformación grupos básicos (%)	Promedio	Moles grupos ácidos (mequiv- g/g)	Conformación grupos ácidos (%)	Promedio
1	1.600	61.586	59.957 ± 1.638	0.998	38.414	40.043 ± 1.638
2	1.399	58.309		1.000	41.691	
3	1.497	59.976		0.999	40.024	

Nota. Se muestra el porcentaje de la conformación de grupos básicos y ácidos del carbón activado físicamente.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 35

Soluciones para curvas de calibración

Punto	C ₂ (mg/L)	C ₁ (mg/L)	V ₂ (mL)	V ₁ (mL)
1	5.00	100.00	100.00	5.00
2	10.00	100.00	100.00	10.00
3	20.00	100.00	100.00	20.00
4	35.00	100.00	100.00	35.00
5	40.00	100.00	100.00	40.00
6	70.00	100.00	100.00	70.00
7	100.00	100.00	100.00	100.00

Nota. Soluciones utilizadas para obtener los datos de la curva de calibración.

Tabla 36

Absorbancia en función de la concentración para curva de calibración

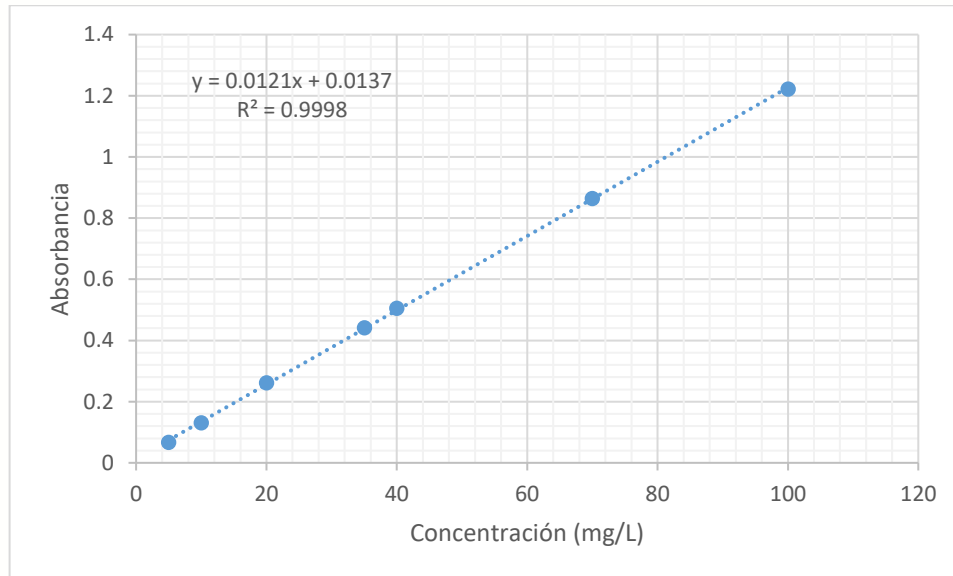
Punto	Concentra (mg/L)	Transmitan %	Absorbancia			Promedio	± SD	Promedio
			R1	R2	R3			
1	5.00	84.8	0.065	0.068	0.069	0.067	0.002	0.067 ± 0.002
2	10.00	72.7	0.128	0.134	0.131	0.131	0.003	0.131 ± 0.003
3	20.00	54.4	0.259	0.263	0.263	0.262	0.002	0.262 ± 0.002
4	35.00	36.2	0.440	0.442	0.441	0.441	0.001	0.441 ± 0.001
5	40.00	31	0.504	0.503	0.509	0.505	0.003	0.505 ± 0.003
6	70.00	13.7	0.862	0.862	0.867	0.864	0.003	0.864 ± 0.003
7	100.00	5.9	1.222	1.222	1.223	1.222	0.001	1.222 ± 0.001

Nota. Valores de la absorbancia en función de distintas concentraciones. Realizado en Laboratorio de Análisis Físicoquímicos -LAFIQ-, CII, USAC.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 33.

Curva de calibración de absorbancia en función de la concentración



<i>Variable control</i>	<i>Variable respuesta</i>	<i>Modelo</i>	<i>R²</i>
<i>Concentración (mg/L)</i>	<i>Absorbancia</i>	$y = 0.0121x + 0.0137$	<i>0.9998</i>

Nota. Gráfica de la curva de calibración de la absorbancia en función de la concentración y su modelo matemático.

Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 37

Absorbancia de soluciones filtradas en función del tamiz y lecho de columna

Tamiz	Lecho	Tiempo min	Abs			Promedio	ED ±	Prom ± ED
			R1	R2	R3			
8	20	0	1.210	1.207	1.209	1.209	0.002	1.209 ± 0.002
		15	0.005	0.006	0.006	0.006	0.001	0.006 ± 0.001
		30	0.003	0.006	0.005	0.005	0.002	0.005 ± 0.002
		45	0.004	0.004	0.003	0.004	0.001	0.004 ± 0.001
		60	0.004	0.005	0.004	0.004	0.001	0.004 ± 0.001
		100	0.003	0.004	0.003	0.003	0.001	0.003 ± 0.001
	30	0	1.206	1.205	1.208	1.206	0.002	1.206 ± 0.002
		15	0.005	0.005	0.005	0.005	0.000	0.005 ± 0.000
		30	0.005	0.002	0.003	0.003	0.002	0.003 ± 0.002
		45	0.001	0.003	0.001	0.002	0.001	0.002 ± 0.001
		60	0.003	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002 ± 0.001
		100	0.001	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002 ± 0.001
10	20	0	1.206	1.210	1.207	1.208	0.002	1.208 ± 0.002
		15	0.005	0.008	0.007	0.007	0.002	0.007 ± 0.002
		30	0.006	0.006	0.007	0.006	0.001	0.006 ± 0.001
		45	0.006	0.003	0.004	0.004	0.002	0.004 ± 0.002
		60	0.003	0.000	0.000	0.001	0.002	0.001 ± 0.002
		100	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000 ± 0.001
	30	0	1.208	1.205	1.210	1.208	0.003	1.208 ± 0.003
		15	0.003	0.003	0.005	0.004	0.001	0.004 ± 0.001
		30	0.004	0.003	0.003	0.003	0.001	0.003 ± 0.001
		45	0.000	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001 ± 0.001
		60	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.001 ± 0.001
		100	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000 ± 0.001

Nota. Valores de la absorbancia de cada una de las soluciones filtradas en función del tamaño de partícula, el espesor del lecho y el tiempo de contacto.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 38

Concentración de soluciones filtradas en función de la absorbancia medida

Tamiz	Lecho	Tiempo min	Concentración mg/L	Eficiencia %	
8	20	0	99.87611	0.00000	
		15	0.45462	0.99545	
		30	0.37197	0.99628	
		45	0.28933	0.99710	
		60	0.34443	0.99655	
		100	0.26178	0.99738	
		30	0	99.68327	0.00000
	15		0.39952	0.99599	
	30		0.26178	0.99737	
	45		0.12404	0.99876	
	60		0.15159	0.99848	
	100		0.12404	0.99876	
	10		20	0	99.79346
		15		0.53726	0.99462
30		0.50972		0.99489	
45		0.34443		0.99655	
60		0.06894		0.99931	
100		0.01385		0.99986	
30		0		99.79346	0.00000
		15	0.28933	0.99710	
		30	0.26178	0.99738	
		45	0.06894	0.99931	
		60	0.04140	0.99959	
		100	0.01385	0.99986	

Nota. Valores de la concentración y la eficiencia de cada una de las soluciones filtradas en función del tamaño de partícula, el espesor del lecho y el tiempo de contacto.

Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 39

Determinación de caudal de columna de adsorción en función del lecho

Tamiz	Lecho	Tiempo min	V _o mL	V _f mL	Tiempo min	Tiempo s	Tiempo min	Caudal mL/min	Rendimiento %
8	20	15	150.000	142.000	2	49.36	2.823	50.31	94.67
		30	150.000	141.000	2	44.51	2.742	51.43	94.00
		45	150.000	145.000	2	51.41	2.857	50.76	96.67
		60	150.000	143.000	2	44.58	2.743	52.13	95.33
		100	150.000	146.000	2	47.71	2.795	52.23	97.33
	30	15	150.000	140.000	3	13.00	3.217	43.52	93.33
		30	150.000	148.000	3	6.00	3.100	47.74	98.67
		45	150.000	148.000	2	59.00	2.983	49.61	98.67
		60	150.000	142.000	2	57.00	2.950	48.14	94.67
		100	150.000	146.000	3	3.00	3.050	47.87	97.33
10	20	15	150.000	140.000	2	49.36	2.823	49.60	93.33
		30	150.000	142.000	2	53.13	2.886	49.21	94.67
		45	150.000	143.000	2	49.28	2.821	50.69	95.33
		60	150.000	145.000	2	45.35	2.756	52.62	96.67
		100	150.000	148.000	2	52.42	2.874	51.50	98.67
	30	15	150.000	140.000	2	51.00	2.850	49.12	93.33
		30	150.000	142.000	3	5.00	3.083	46.05	94.67
		45	150.000	126.000	3	10.00	3.167	39.79	84.00
		60	150.000	130.000	3	7.00	3.117	41.71	86.67
		100	150.000	122.000	3	11.00	3.183	38.32	81.33

Nota. Determinación del caudal de la columna de adsorción, tomando en cuenta la diferencia del volumen en un tiempo determinado.

Tabla 40

Diámetro Interno y externo de columna de adsorción

D _i cm	D _o cm
2	2.54

Nota. Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales -Liexve-.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 41

Determinación del tiempo espacial del filtro (τ)

Diámetro Interno (cm)	2.000
Área de sección transversal (cm ²)	2.540
Ajuste por porosidad (Tamiz 8)	0.460
Ajuste por porosidad (Tamiz 10)	0.400

Tamiz No.	Lecho cm	Volumen Lecho (cm ³)	Tiempo min	Caudal mL/min	τ min
8	20	50.8	15	50.31	0.5745
			30	51.43	0.5620
			45	50.76	0.5694
			60	52.13	0.5544
			100	52.23	0.5533
	30	76.2	15	43.52	0.9961
			30	47.74	0.9081
			45	49.61	0.8739
			60	48.14	0.9007
			100	47.87	0.9057
10	20	50.8	15	49.60	0.5827
			30	49.21	0.5873
			45	50.69	0.5702
			60	52.62	0.5493
			100	51.50	0.5612
	30	76.2	15	49.12	0.7674
			30	46.05	0.8186
			45	39.79	0.9475
			60	41.71	0.9038
			100	38.32	0.9837

Nota. Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales -Liexve-.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 34.

Visita técnica a Finca Filadelfia



Nota. Visita técnica a la Finca Filadelfia por parte del equipo del Liexve. Autor. Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales Liexve. Lugar: Finca Filadelfia, Antigua Guatemala, Sacatepéquez, Guatemala.

Figura 35.

Instalaciones de la Finca Filadelfia



Nota. Instalaciones de la Finca Filadelfia en donde se muestran las plantaciones del café y del área de secado. Autor. Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales Liexve. Lugar: Finca Filadelfia, Antigua Guatemala, Sacatepéquez, Guatemala.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 36.

Adquisición de la materia prima de cascarilla de café.



Nota. Obtención de materia prima de cascarilla de café, utilizada para la producción de carbón activado. Autor. Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales Liexve. Lugar: Finca La Azotea, Jocotenango, Sacatepéquez, Guatemala.

Figura 37.

Determinación del porcentaje de humedad.



Nota. Determinación del porcentaje de humedad de la cascarilla de café, utilizando una termobalanza. Lugar. Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales Liexve.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 38.

Molienda de la cascarilla de café



Nota. Se realizó el proceso de molienda de la cascarilla de café para la reducción del tamaño de partícula Lugar: Sección de Tecnología de la Madera.

Figura 39.

Análisis granulométrico.



Nota. Proceso de granulometría de la cascarilla de café para seleccionar el tamaño de partícula que se utilizó como variable independiente. Lugar. Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales Liexve.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 40.

Obtención del carbón



Nota. Se realizó el proceso de pirólisis de la cascarilla para la obtención de carbón, utilizando un horno de gas. Lugar. Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales Liexve.

Figura 41.

Lavado del carbón.



Nota. Se realizaron lavados, filtraciones y secado del carbón para la remoción de cenizas. Lugar: Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales Liexve.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 42.

Impregnación del carbón



Nota. Proceso se impregnación del carbón utilizando ácido fosfórico H_2PO_3 . Lugar: Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales Liexve.

Figura 43.

Secado del carbón



Nota. El secado del carbón impregnado con ácido fosfórico se realizó en un secador de eléctrico de flujo transversal. Lugar: Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales Liexve.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 44.

Activación del carbón



Nota. La activación del carbón impregnado con ácido fosfórico se realizó en un equipo mufla.. Lugar: Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales Liexve.

Figura 45.

Medición del colorante azul 19



Nota. Se realizó la medición de la cantidad de azul reactivo 19 para la preparación de la solución, se utilizó una balanza analítica. Lugar: Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales Liexve.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 46.

Preparación de la solución



Nota. Se preparó la solución del colorante azul 19, a una concentración de 100 ppm. Lugar: Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales Liexve.

Figura 47.

Filtro de carbón activado



Nota. Se realizó la evaluación del filtro en función del tamaño de partícula, el espesor del lecho y el tiempo de contacto. Lugar: Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales Liexve.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 48.

Medición de pH



Nota. Se realizó la medición del pH de las soluciones filtradas utilizando un potenciómetro. Lugar: Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales Liexve.

Figura 49.

Medición del color



Nota. Se realizó la medición del color de las soluciones filtradas utilizando un colorímetro Cielab. Lugar: Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales Liexve.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 50.

Medición de adsorbancia



Nota. Se realizó la medición de la adsorbancia de las soluciones filtradas. Lugar: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos.



Informe final de Proyecto de Investigación

Declaración del coordinador (a) del proyecto de investigación

El coordinador (a) de proyecto de investigación con base en el Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación, artículo 20, elaboró este informe en función de los datos recabados en el proyecto.

M.A. Ing. Mario José Mérida Meré	
Fecha: 27/11/2025	

Aval del director (a) del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 19 del Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación otorgo el aval al presente informe final de las actividades realizadas en el proyecto **“Diseño y evaluación de un filtro de carbón activado de cascarilla de café modificado químicamente para la remoción de colorante azul reactivo 19 en aguas contaminadas”** en mi calidad de Directora del Centro de Investigaciones de Ingeniería, mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

Vo.Bo. Inga Qca. Telma Maricela Cano Morales Directora Centro de Investigaciones de Ingeniería Facultad de Ingeniería	
Fecha: 27/11/2025	

Recepción de la Dirección General de Investigación

Vo.Bo. Inga. Liuba María Cabrera de Villagrán	
Fecha: 27/11/2025	

/Digi2025