

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Eficiencia de la adsorción del bagazo caña de azúcar modificado por
adición de quitosano y pululano en la remoción del colorante rojo-G en
muestras sintéticas**

Tesis presentada por el Bachiller:
Azurin Figueroa, Sebastian Mauricio
ORCID: 0009-0007-1986-879X

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesor (a):
Dr. Colina Andrade, Gilberto de Jesús
ORCID: 0000-0002-6623-0760

Arequipa – Perú
2025

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA AMBIENTAL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 27 de Agosto del 2025

Dictamen: 013774-C-EPIA-2025

Visto el borrador del expediente 013774, presentado por:

2019200031 - AZURIN FIGUEROA SEBASTIAN MAURICIO

Titulado:

**EFICIENCIA DE LA ADSORCIÓN DEL BAGAZO CAÑA DE AZÚCAR MODIFICADO POR ADICIÓN DE
QUITOSANO Y PULULANO EN LA REMOCIÓN DEL COLORANTE ROJO-G EN MUESTRAS
SINTÉTICAS**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO AMBIENTAL

**29727348 - LAZARTE ARREDONDO SONIA
DICTAMINADOR**



**43238145 - BENEGAS LLANOS ROSARIO CAROLINA
DICTAMINADOR**



**72384055 - MEDINA RAMOS ROBERT JOAQUIN
DICTAMINADOR**



Eficiencia de la adsorción del bagazo caña de azúcar modificado por adición de quitosano y pululano en la remoción del colorante rojo-G en muestras sintéticas

INFORME DE ORIGINALIDAD

28%

INDICE DE SIMILITUD

26%

FUENTES DE INTERNET

12%

PUBLICACIONES

10%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	4%
2	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	3%
3	definicion.edu.lat Fuente de Internet	2%
4	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	1%
5	cris.ulima.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
8	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%

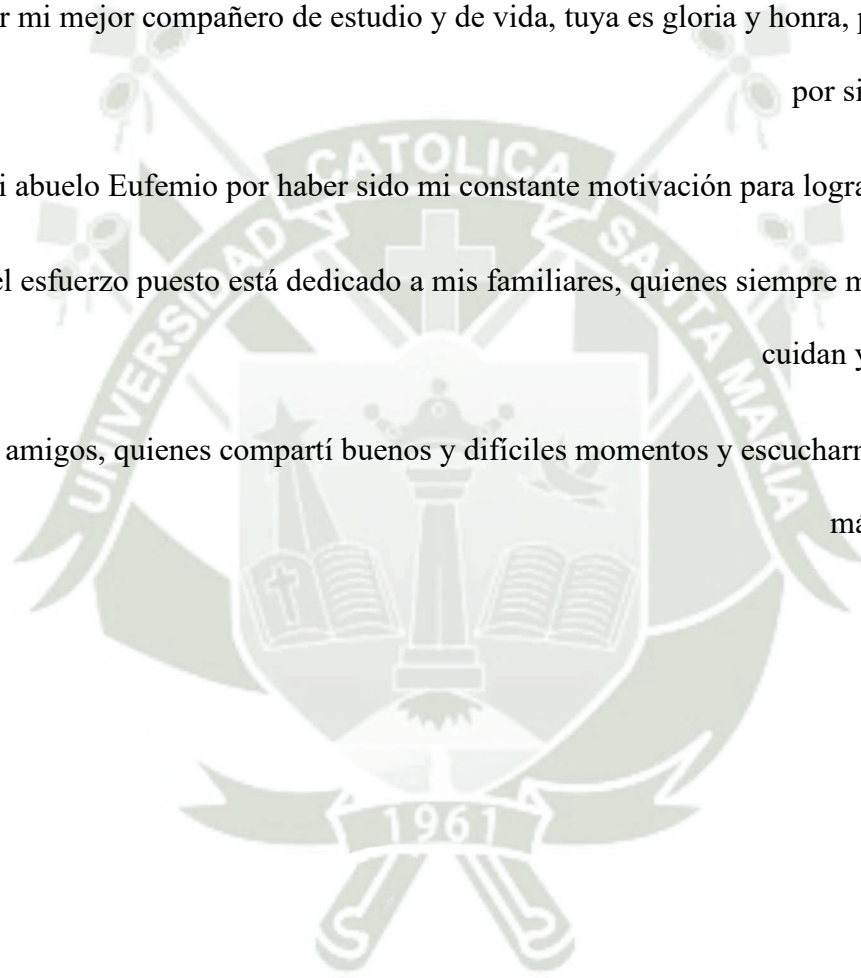
Dedicatoria

La presente tesis se la dedico a papá Dios por guiarme, escucharme y sobre todo apoyarme diariamente y en todo momento, en días buenos como no tan buenos, todo es gracias a él, gracias por amarme y no abandonarme a pesar de todos nuestros errores.

A Jesús y Virgen María , tuya es honra y gloria para siempre, gracias al Espíritu Santo, por ser mi mejor compañero de estudio y de vida, tuya es gloria y honra, para siempre y por siempre. Amén.

A mi abuelo Eufemio por haber sido mi constante motivación para lograr este estudio. Todo el esfuerzo puesto está dedicado a mis familiares, quienes siempre me acompañan, cuidan y me protegen.

A mis amigos, quienes compartí buenos y difíciles momentos y escucharme aun cuando más los necesité.

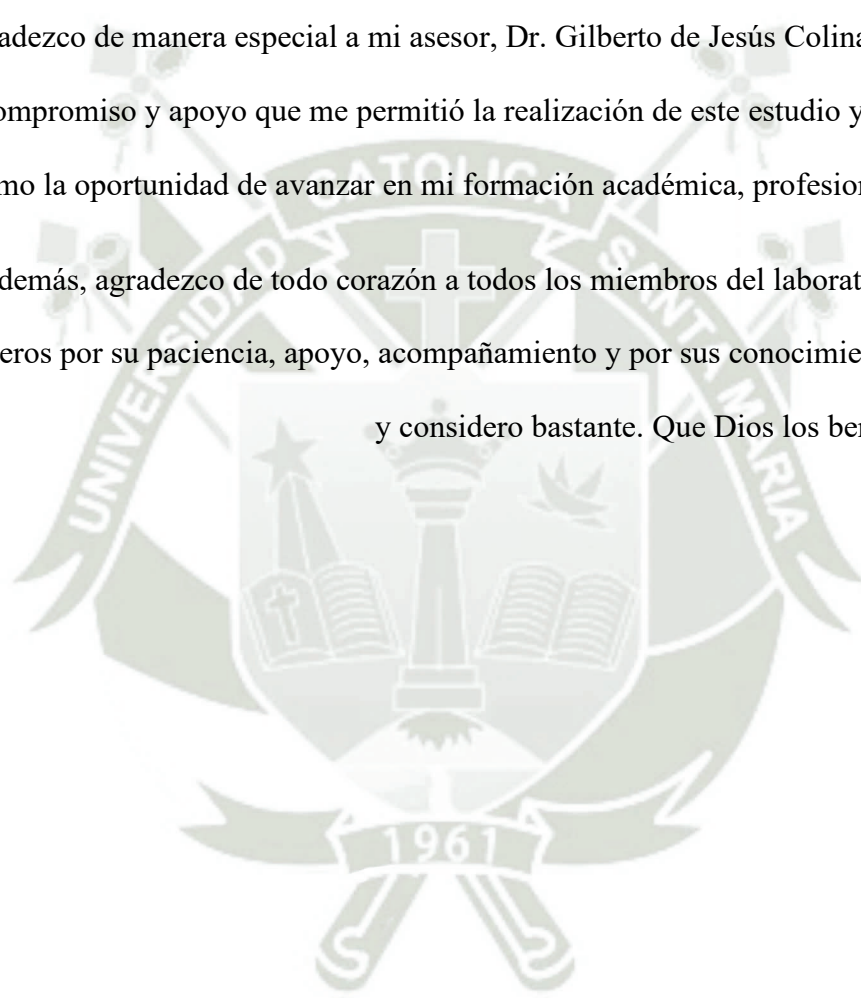


Agradecimientos

Agradezco siempre primero a papá Dios por las oportunidades de avanzar día a día, por ser mi fuente de inspiración y ser mi motivación, dar las gracias a mis papás, por apoyarme siempre, a mi familia, amigos y compañeros, cada quien sabe lo cuanto agradezco estoy por su apoyo y consejos para la vida.

Agradezco de manera especial a mi asesor, Dr. Gilberto de Jesús Colina Andrade, por su compromiso y apoyo que me permitió la realización de este estudio y aprovechar al máximo la oportunidad de avanzar en mi formación académica, profesional y personal.

Además, agradezco de todo corazón a todos los miembros del laboratorio, doctores, ingenieros por su paciencia, apoyo, acompañamiento y por sus conocimientos, lo valoro y considero bastante. Que Dios los bendiga siempre.



RESUMEN

El proceso de adsorción ha sido considerado como un método opcional para el tratamiento de los efluentes textiles. Los residuos agroindustriales como el bagazo de caña de azúcar son generados en muchas regiones del Perú, de igual forma el quitosano, polímero proveniente de la quitina de los crustáceos y el pululano, biopolímero producido por el hongo *Aureobasidium pullulans*. Dicho adsorbentes pueden ser modificados de forma térmica y química para incrementar sus capacidades de remoción. El objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia de adsorción del colorante rojo-G (RG) sobre el bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) modificado (BCAM) por adición de pululano (P) y quitosano (Q) presente en muestras sintéticas. Los adsorbentes fueron caracterizados mediante parámetros de S_{BET} . 13.42 (m^2/g) en el BCAM y Q, sin embargo, de P fue de 12.88 y FTIR. Se realizaron cuatro tratamientos (T1, T2, T3 y T4) modo batch por triplicado, usando diferentes proporciones de los adsorbentes estudiados 1:1:16, obteniendo un máximo de remoción $95.68 \pm 0.13\%$ a una concentración inicial de rojo G, $C_{oRG} = 30 \text{ mg/L}$ a una dosis de adsorbente, $C_A = 60 \text{ mg}$. La capacidad de adsorción máxima dada identificada es a dosis de 60 mg/L de colorante RG con 60 mg de adsorbente en 120 min obteniéndose 667.50 mg/g. Por otro lado, el que presenta menor capacidad es a las concentraciones de 60 mg/L del colorante a una dosis de 40 mg de adsorbente. Las cinéticas e isothermas de adsorción fueron evaluadas, obtenido un ajuste cinético de pseudo segundo orden ($K_2 = 1.12 \times 10^{-5}$) e isoterma de Langmuir ($R = 0.9999$, $K_{Langmuir} = 4.38 \times 10^{-19}$) en el T3. Se concluyó que a una $C_{oRG} = 48.62 \text{ mg/L}$, con $C_A = 40.5 \text{ mg}$ y a un tiempo de $t = 120 \text{ min}$ la remoción fue de $R = 70.02 \pm 0.47\%$. A mayor concentración de adsorbente y a una menor concentración del adsorbato, la remoción será mayor.

Palabras clave:

Rojo G, adsorción, bagazo de caña de azúcar.

ABSTRACT

The adsorption process has been considered an optional method for the treatment of textile effluents due to its high efficiency in removing these compounds. Agro-industrial waste such as sugarcane bagasse are generated in many regions of Peru, as well as chitosan, a polymer derived from the chitin of crustaceans and pullulan, a biopolymer produced by the fungus *Aureobasidium pullulans*. These adsorbents can be thermally and chemically modified to increase their removal capacities, including synthetic dyes used in textiles. The objective of this study was to evaluate the adsorption efficiency of the dye red-G (RG) on sugarcane bagasse (*Saccharum officinarum*) modified (BCAM) by the addition of pullulan (produced by *Aureobasidium pullulans*) (P) and chitosan (Q) present in synthetic samples. The adsorbents were characterized by SBET parameters: 13.42 (m²/g) in BCAM and Q, however, P was 12.88 and FTIR. Four treatments (T1, T2, T3 and T4) were carried out in batch mode in triplicate, using different proportions of the studied adsorbents 1:1:16, obtaining a maximum removal of 95.68 ± 0.13% at an initial concentration of red G, CoRG = 30 mg/L at an adsorbent dose, CA = 60 mg. The adsorption kinetics and isotherms were evaluated, obtaining a pseudo second order kinetic fit (K₂=1.12 x 10⁻⁵) and Langmuir isotherm (R= 0.9999, K_{Langmuir} = 4.38 x 10⁻¹⁹ and b = 4 x 10⁻¹⁷), at T3. It was concluded that at a CoRG = 48.62 mg/L, with CA = 40.5 mg and at a time of t = 120 min the removal was R= 70.02 ± 0.47%. The higher the adsorbent concentration and the lower the adsorbate concentration, the greater the removal will be.

Keywords:

Red G, adsorption, sugarcane bagasse.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN..... 1

CAPÍTULO I 3

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 4

1.1. Problemática de la investigación 4

1.2. Justificación..... 6

1.2.1. Justificación Social 6

1.2.2. Justificación Ambiental..... 6

1.2.3. Justificación Económica..... 6

1.2.4. Justificación Tecnológica 7

1.2.5. Justificación Política/Institucional 7

1.3. Objetivos..... 7

1.3.1. Objetivo general..... 7

1.3.2. Objetivos específicos..... 7

1.4. Hipótesis 8

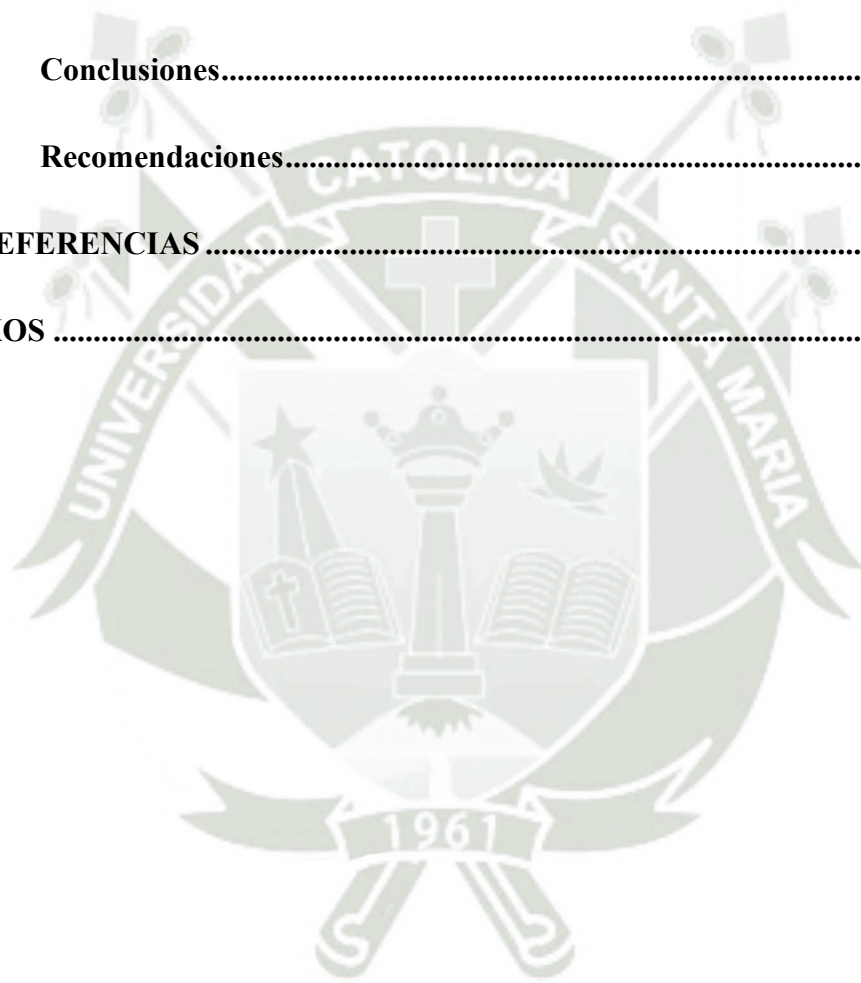
CAPÍTULO II..... 9

2. FUNDAMENTO TEÓRICO..... 10

2.1. Antecedentes de la investigación 10

2.2.	Marco teórico	16
2.2.1.	Aguas residuales textiles	16
2.2.2.	Colorante Rojo G.....	19
2.2.3.	Adsorción.....	20
2.2.4.	<i>Aureobasidium pullulans</i>	24
2.2.5.	Bagazo de caña de azúcar	25
2.2.6.	Quitosano.....	27
2.3.	Marco legal.....	31
CAPÍTULO III		36
3.	METODOLOGÍA	37
3.1.	Tipo y nivel de investigación.....	37
3.2.	Diseño de la investigación	37
3.3.	Métodos de investigación	38
3.3.1.	Área de estudio	38
3.3.2.	Diseño experimental	38
CAPÍTULO IV.....		52
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
4.1.	Determinación de las características de los adsorbentes	53
4.1.1.	Identificación de grupos funcionales mediante análisis F-TIR	53
4.1.2.	Análisis elemental CHNS	56
4.1.3.	Análisis de superficie (fisisorción) S_{BET}	58
4.1.4.	Estudio exploratorio de remoción de RG sobre el BCA y BCAM ...	62

4.2.	Análisis de la efectividad del adsorbente en estudio sobre el colorante. .	65
4.3.	Determinación de las condiciones experimentales óptimas (ANOVA)....	69
4.4.	Evaluación de la eficiencia de adsorción del colorante RG	78
CAPITULO V		90
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
5.1.	Conclusiones.....	91
5.2.	Recomendaciones.....	93
6.	REFERENCIAS	94
ANEXOS		112



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las aguas residuales de la industria textil convencional.	19
Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del bagazo de caña BCA.....	26
Tabla 3. Operacionalización de variables.....	38
Tabla 4. Equipos y materiales.....	39
Tabla 5. Justificación de los valores de los niveles seleccionadas	40
Tabla 6. Factores y niveles experimentales	41
Tabla 7. Diseño experimental de las pruebas en sistema Batch	41
Tabla 8. Datos de la experimentación	47
Tabla 9. Promedio obtenidos del análisis elemental de los adsorbentes en estudio.	56
Tabla 10. Resultados obtenidos del análisis de superficie aplicado	60
Tabla 11. Comparación antes y después del bagazo sobre el colorante RG	65
Tabla 12. Comparación antes y después del adsorbente sobre el colorante RG	68
Tabla 13. Resultados obtenidos de la aplicación del diseño experimental.....	70
Tabla 14. Análisis de varianza para la adsorción de RG sobre BCAM-P-Q.....	71
Tabla 15. Estadísticas de ajuste	71
Tabla 16. Capacidades de adsorción en base a los tratamientos	79
Tabla 17. Constantes cinéticas calculadas	85
Tabla 18. Parámetros calculados de las isothermas de Freundlich y Langmuir.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Plantas de tratamiento de aguas residuales en la Industria Textil.....	18
Figura 2. Estructura química del colorante Rojo-G.....	20
Figura 3. Clasificación de isothermas de adsorción – desorción según la IUPAC	21
Figura 4. Isotherma de adsorción de Langmuir	23
Figura 5. A) Aureobasidium pullulans y B) Molécula de Pullulan, ilustración 3D	25
Figura 6. Estructura química de bagazo de caña de azúcar	27
Figura 7. Molécula de Quitosano	31
Figura 8. Modificación térmica del BCA	43
Figura 9. Determinación de $\lambda_{\max}$ y calibración de RG.....	45
Figura 10. Activación química y térmica de los adsorbentes (BCA, P, Q)	46
Figura 11. Tratamientos modo Batch	47
Figura 12. Espectros de los adsorbentes identificando sus grupos funcionales.	53
Figura 13. Cromatogramas de los adsorbentes: (A), BCAM, (B), P y (C) Q.....	58
Figura 14. Isothermas de adsorción y desorción de los adsorbentes en estudio.....	59
Figura 15. Recta de calibración del RG mediante análisis UV-Vis	62
Figura 16. Remoción de RG sobre de BCA, BCAM y Ci/Cf.....	63
Figura 17. Efecto de la remoción de RG considerando la concentración de adsorbente	66
Figura 18. Mecanismo de adsorción del RG sobre el BCAM-P-Q	69
Figura 19. Diagrama de Pareto para la adsorción de RG sobre BCAM-P-Q	72
Figura 20. Graficas de diseño experimental	73
Figura 21. Gráficas 3D de sobre remoción según los factores	75
Figura 22. Cinéticas de adsorción a diferentes concentraciones	79
Figura 23. Cinéticas de pseudo primer y segundo orden.....	80
Figura 24. Isothermas (A), Modelo de Freundlich y (B), Modelo de Langmuir.....	86

INTRODUCCIÓN

El agua constituye un recurso esencial para la vida y el funcionamiento adecuado de los ecosistemas, por lo que su estado influye directamente en los efectos que puede generar, ya sean beneficiosos o perjudiciales. En los últimos años, la alteración de los cuerpos de agua debido a la introducción de efluentes a razón de las actividades humanas se ha convertido en una de las principales preocupaciones ambientales. (Calixto et al., 2022)

La industria textil produce desechos con una gran diversidad en su naturaleza, abarcando componentes físicos, químicos y biológicos de considerable complejidad. Debido a esta heterogeneidad, es indispensable emplear estrategias combinadas que integren procesos de descomposición y neutralización, con el propósito de asegurar una remoción eficaz de los contaminantes que se vierten al ambiente. (Trombotto, 2023)

Los contaminantes generados por la industria textil presentan una composición variada y compleja en términos físicos, químicos y biológicos. Esta diversidad en sus características exige la aplicación conjunta de métodos que permitan tanto su degradación como su neutralización, con el fin de lograr una eliminación eficiente de los contaminantes liberados. Los efluentes de las industrias textiles son una de las causas de diferentes impactos ambientales, debido a su toxicidad. (Sivaram et al., 2019). Existen varias maneras de poder remover los contaminantes como los colorantes de las aguas residuales como; oxidaciones químicas, físico químicas y procesos biológicos. Algunos de los procesos, coagulación – floculación, filtración, adsorción, oxidación avanzada, tratamientos biológicos, etc. (Ita y López, 2020). Dentro de estos procesos, la adsorción es valorado como una de las prometedoras alternativas para la remoción de los colorantes en aguas residuales ya que es debido a la simplicidad, facilidad en la operación, eficiencia en la remoción y capacidad de regeneración. (Peralta, 2021).

A nivel nacional y mundial, se evidencia una carencia de métodos de adsorción innovadores que puedan ser aplicados eficazmente a escala industrial. Al mismo tiempo, se percibe una limitada capacidad por parte de las industrias para gestionar adecuadamente la disposición y tratamiento de los efluentes generados, los cuales, en numerosos casos, son vertidos directamente al sistema de alcantarillado como si se tratara de residuos domésticos comunes. Esta práctica contribuye significativamente a la contaminación hídrica, la cual, en determinadas situaciones, resulta irreversible debido a la complejidad de su tratamiento, en otros casos, representa un riesgo potencial para la salud pública al facilitar la propagación de diversas enfermedades. (Tejada, 2015).

Una de las alternativas viables que se toma en cuenta son los residuos orgánicos; residuos de bagazo de caña de azúcar, por su eficiencia moderada, además se tiene el quitosano que es proveniente de manera orgánica de la quitina que se encuentra en la cáscara de los crustáceos (cangrejos, langostas, camarón, etc.) y sobre el pululano, (biopolímero) debido a que se puede cultivar y/o producirse en medios líquidos bajo condiciones óptimas controladas (carbono, nitrógeno y oxigenación), dicho biopolímero, es producido por el microorganismo *Aureobasidium pullulans* (hongo saprofito) que se puede encontrar en ambientes naturales y/o cultivarse mediante fermentación sumergida para producir pululano. (Bozoudi y Tsaltas, 2018).

Por estas razones, el presente estudio tiene como objetivo general la evaluación de la eficiencia de adsorción del colorante rojo-G sobre el bagazo de caña de azúcar modificando por la adición de un biopolímero (pululano) y quitosano presente en muestras sintéticas, realizando tratamientos modo batch.



CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Problemática de la investigación

A nivel mundial, la industria textil, a través del uso de tintes y productos de acabado, es responsable de aproximadamente el 20 % de la contaminación del agua potable (DGC, 2024). Las fábricas textiles vierten millones de litros de aguas residuales no tratadas al alcantarillado público, generando el 22 % del volumen total de aguas residuales producidas por todas las industrias, las cuales terminan desembocando en ríos y mares. Se estima que anualmente se liberan al ambiente unas 105 toneladas de colorantes a través de los 200.000 millones de litros de aguas residuales generados (Prehu, 2024). Estos efluentes contienen colorantes sintéticos altamente tóxicos, reactivos y persistentes, lo que los hace difíciles de degradar mediante los métodos convencionales de tratamiento de aguas. Además, muchos de estos colorantes, entre ellos el azul índigo, el Azul BR, el rojo Remazol y el RG poseen propiedades cancerígenas y mutagénicas, agravando su impacto ambiental y generando un enorme problema en las aguas residuales debido a su baja biodegradabilidad ya que presentan estructuras moleculares altamente resistentes (Hamzah et al., 2023) y (Real Huamaní, 2019).

En el Perú, el creciente desarrollo de industrias químicas, especialmente la textil, ha generado un alarmante incremento de efluentes coloreados (Herazo et al., 2011). Estos efluentes, que representan entre el 10 % y el 25 % de las descargas en la etapa de teñido, son a menudo vertidos de manera inadecuada a cuerpos de agua, afectando parámetros como el pH, la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y los sólidos totales (Real Huamaní, 2019). Esta contaminación pone en riesgo no sólo la flora y fauna acuáticas, sino también a las comunidades humanas que dependen de estos recursos hídricos para su subsistencia diaria (Alarcón, 2023). Las descargas de efluentes textiles también se dirigen hacia las líneas de alcantarillado que

llevan a las plantas de tratamiento de SEDAPAL, donde se espera que sean procesados para su uso como agua potable. Sin embargo, la descarga directa en playas y ríos genera problemas graves, ya que los productos químicos pueden causar la muerte de especies en los ecosistemas acuáticos, exacerbando la crisis ambiental en el país y contraviniendo los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU relacionados con el acceso a agua limpia y saneamiento (Real Huamaní, 2019).

En la región de Arequipa, la industria textil es fundamental para la economía local, con entre 800 y 900 micro y pequeñas empresas dedicadas a la fabricación de prendas e insumos en fibra de camélidos. Este sector es particularmente notable, ya que alberga a tres de las empresas textiles más importantes del mundo, como Grupo Michell, Incalpaca y Sarfatty, estas compañías han logrado ingresar en mercados globales al posicionar productos como prendas de vestir, hilados y tejidos planos (Diario el Pueblo, 2010). Sin embargo, el crecimiento de la industria también ha traído importantes desafíos ambientales. El manejo inadecuado de los efluentes industriales, especialmente el vertido de aguas residuales que contienen colorantes sintéticos representa una grave amenaza para la calidad del agua y los ecosistemas locales.

Desde esta perspectiva, el proceso de la adsorción representa un método alternativo y novedoso para el tratamiento de efluentes coloreados debido a su alta eficiencia. Para este propósito se han implementado usualmente carbones activados y resinas sintéticas, con los cuales se ha logrado remover satisfactoriamente colorantes; no obstante, su alto precio y reducido rango de polaridad los convierte en materiales poco apropiados para el diseño de estrategias a gran escala. En este sentido, el uso de residuos agroindustriales constituye una opción innovadora debido a su alta disponibilidad, mínimo valor económico e impacto ambiental favorable al aprovechar material de desecho (Herazo, Romero, & Anaguano, 2011). Por lo antes expuesto el objetivo de la siguiente investigación es

evaluar la eficiencia de adsorción del colorante RG sobre el BCAM con P proveniente del *Aureobasidium pullulans* y el Q presente en muestras sintéticas.

1.2. Justificación

La justificación de esta investigación se enmarca en varios aspectos clave.

1.2.1. Justificación Social

En términos sociales, la contaminación de fuentes de agua afecta directamente a las comunidades que dependen de ellas, generando riesgos para la salud y afectando su calidad de vida. Proponer soluciones sostenibles para la eliminación de colorantes en el agua es importante para garantizar el acceso a agua limpia, un derecho humano fundamental (Alarcón, 2023).

1.2.2. Justificación Ambiental

Desde una perspectiva ambiental, es fundamental desarrollar métodos efectivos como la adsorción, valorando residuos agroindustriales para ser utilizados como materiales adsorbentes, innovadores y eficientes para la remoción de colorantes de los efluentes industriales, ya que estos compuestos son difíciles de degradar y pueden persistir en el ambiente durante largos periodos. Abordar esta problemática contribuirá a la restauración de la calidad del agua y a la protección de los ecosistemas acuáticos.

1.2.3. Justificación Económica

La elección de estos materiales se sustenta en la búsqueda de una solución económicamente viable para el tratamiento de aguas residuales. Al utilizar subproductos agrícolas e industriales, se reduce significativamente el costo de producción de los

adsorbentes. Además, la capacidad de estos materiales para ser regenerados y reutilizados múltiples veces disminuye los gastos asociados a la disposición final de los residuos.

1.2.4. Justificación Tecnológica

Desde una perspectiva tecnológica, esta investigación contribuye al desarrollo de procesos de tratamiento de aguas más eficientes y respetuosos con el medio ambiente. La adsorción es una técnica sencilla y versátil que puede adaptarse a diferentes tipos de contaminantes y volúmenes de agua. Al evaluar el desempeño del bagazo de la caña de azúcar, el pululano y el quitosano, se busca identificar el adsorbente más adecuado para la remoción del RG y establecer las condiciones óptimas de operación.

1.2.5. Justificación Política/Institucional

Finalmente, en el ámbito político e institucional, los resultados de esta investigación pueden ser fundamentales para influir en la formulación de políticas públicas más estrictas y efectivas sobre el manejo de efluentes industriales y la protección de recursos hídricos, esto contribuiría a mejorar la normativa ambiental en el país, promoviendo prácticas industriales más responsables y sostenibles.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Evaluar la eficiencia de adsorción del colorante RG sobre el BCAM por adición de pululano y quitosano presente en muestras sintéticas.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las características del bagazo de caña de azúcar activado mediante tratamiento térmico, con el fin de mejorar sus propiedades fisicoquímicas y de

superficie mediante el cálculo de área superficial específica S_{BET} , análisis elemental, CHNS y pruebas preliminares modo batch.

- Analizar la efectividad del adsorbente en estudio sobre el colorante RG mediante la potencial sinergia con pululano y quitosano a diferentes proporciones usando sistemas de tratamiento modo batch.
- Determinar las condiciones experimentales óptimas para remover el colorante RG modificando la dosis del bagazo de caña de azúcar modificado, así como el tiempo de contacto utilizando métodos estadísticos avanzados, como el análisis de varianza (ANOVA).
- Evaluar la eficiencia de adsorción del colorante RG sobre el bagazo de caña de azúcar modificado por adición de pululano y quitosano presente en muestras sintéticas, mediante análisis cinético de adsorción (tiempo en equilibrio) e isothermas de adsorción de Freundlich y Langmuir para describir el proceso, estimando el tipo de interacciones formadas.

1.4.Hipótesis

La modificación del bagazo de caña con pululano y quitosano mejorará su capacidad de adsorción del rojo-G en muestras sintéticas, gracias a los grupos funcionales que favorecen interacciones adsorbente-adsorbato. Estos aditivos aumentarán la superficie específica y reactividad del bagazo, optimizando su eficiencia. La concentración inicial del colorante, el tiempo de contacto y la dosis del adsorbente influirán en el proceso, validando los modelos de Freundlich y Langmuir.



CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Internacionales

De Hamzah et al. (2023), desarrollaron un proyecto utilizando bioadsorbentes, abordaron un enfoque innovador para el tratamiento de aguas residuales mediante el uso de bioadsorbentes derivados del bagazo de caña de azúcar. Este material, un residuo agrícola común, fue modificado químicamente para mejorar su capacidad de adsorción y eliminar el tinte rojo Remazol. El proceso comenzó con la calcinación del bagazo a 200 °C, seguida por un tratamiento con una solución de quitosano al 1%. Este tratamiento es crucial, ya que introduce propiedades químicas y estructurales que aumentan la eficiencia del material como adsorbente. En cuanto al desempeño del material, se encontró que la dosis óptima para eliminar el tinte era de 150 mg, alcanzando un equilibrio en 60 min. La eliminación del tinte fue más eficiente en condiciones ácidas, específicamente a un pH de 4, y disminuyó a medida que aumentaba la concentración del tinte en la solución. Los datos experimentales se ajustaron bien al modelo de isoterma de adsorción de Langmuir, lo que indica que el proceso ocurre principalmente en sitios activos homogéneos en la superficie del adsorbente.

Según Noreen et al. (2020), durante el desarrollo del estudio se buscó demostrar cómo los biocompuestos poliméricos basados en bagazo de caña de azúcar pueden ser utilizados eficazmente para la eliminación del tinte Acid Black-234 (AB-234), un colorante común en las aguas residuales textiles. El estudio determinó que las condiciones óptimas para la adsorción eficiente del colorante variaban según el tipo de biocompuesto utilizado. En términos de pH, los valores óptimos fueron los siguientes: para el bagazo puro (SB) fue pH 2; para polipirrol/bagazo (PPy/SB) fue pH 3; para polianilina/bagazo (PAn/SB) fue pH 4; para polipirrol/quitosano (PPy/Ch) fue pH 4; para polianilina/quitosano (PAn/Ch)

fue pH 5; para polipirrol/almidón (PPy/St) fue pH 3; y para polianilina/almidón (PAn/St) fue pH 3. Los resultados obtenidos por Noreen et al. (2020) demuestran que los biocompuestos poliméricos basados en bagazo de caña son materiales altamente eficientes para la eliminación del tinte Acid Black-234 en aguas residuales textiles.

De Ejaz et al. (2021), sostuvieron que una gran cantidad de aguas residuales industriales que contienen contaminantes, incluidos tintes tóxicos, deben procesarse antes de su descarga al medio ambiente, informó de materiales biológicos como el bagazo de caña de azúcar (SB) por su papel como adsorbentes para eliminar los colorantes del agua. En este estudio, se utilizó el residuo SB después de la fermentación para la eliminación del tinte. Se administró un pretratamiento combinado de NaOH y cloruro de metiltrioctilamonio a SB para la eliminación de lignina, y el SB pretratado se utilizó para la producción de celulasa a partir de *Bacillus aestuarii* UE25. La cepa produjo 118 UI mL⁻¹ de endoglucanosa y 70 UI mL⁻¹ de β -glucosidasa. La microscopía electrónica de barrido y los espectros FTIR mostraron la eliminación de lignina y celulosa en SB fermentada. Este residuo se utilizó para la adsorción de un colorante azoico, rojo congo (CR). Los estudios termodinámicos, isotérmicos y cinéticos para la adsorción de CR revelaron características distintivas de adsorción de SB. La SB no tratada siguió la isoterma de Langmuir, mientras que la SB pretratada y la SB fermentada obedecieron al modelo de isoterma de Freundlich. El modelo de pseudo-segundo orden se ajustó bien a los adsorbentes estudiados. Los resultados de los estudios termodinámicos revelaron una adsorción espontánea con valores de energía libre estándar negativos. La SB no tratada mostró una tendencia de remoción del 90,36 % a 303,15 K de temperatura, mientras que los adsorbentes compuestos por SB pretratada y fermentada eliminaron alrededor del 98,35 % y el 97,70 %, respectivamente. El estudio proporcionó una estrategia para utilizar SB

para la producción de celulasa y su uso como adsorbente para la eliminación de colorantes tóxicos.

Según Zeng et al. (2021), señalaron que tanto la contaminación secundaria como la baja resistencia mecánica de los adsorbentes han impedido gravemente la aplicación práctica de los métodos de adsorción en el tratamiento de aguas residuales con colorantes. En este trabajo, los autores sintetizaron de manera innovadora un adsorbente de hidrogel compuesto de pululano para la adsorción de colorantes mediante la incorporación de polidopamina (PDA) y montmorillonita (MMT) en la matriz de hidrogel. En primer lugar, se verificó la formación exitosa de los adsorbentes resultantes mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier y análisis de mapeo elemental con microscopio electrónico de barrido. A continuación, se investigaron varias propiedades fisicoquímicas (como las propiedades térmicas y de hinchamiento, la microarquitectura y la resistencia mecánica) de los cinco adsorbentes preparados (PM1-PM5). Estos resultados demostraron que los adsorbentes tenían propiedades ajustables, lo que se puede lograr ajustando la relación de masa PDA/MMT. A continuación, se exploró sistemáticamente el rendimiento de adsorción del colorante. El adsorbente resultante (PM3) tuvo una capacidad de adsorción máxima de 112,45 mg/g y sus datos de adsorción se describieron mejor mediante una isoterma de Langmuir y una cinética de pseudo-segundo orden. Finalmente, se estudiaron los mecanismos de adsorción y la posible viabilidad comercial del adsorbente. En conjunto, el adsorbente diseñado pudo evitar eficazmente la generación de la contaminación secundaria típica de los adsorbentes y mostró una excelente resistencia mecánica, abriendo así un nuevo horizonte en la mitigación de la contaminación ambiental de las industrias textiles.

Otra investigación como la de Aramesh & Bagheri (2021), en su investigación, indicaron que la contaminación ambiental por moléculas de colorantes se ha convertido en un tema

de investigación intensiva en los últimos años debido a sus efectos peligrosos para la salud humana, los organismos y los animales. El tratamiento eficaz y la eliminación de las moléculas de colorante de las matrices ambientales y las fuentes de agua son de suma importancia. El despliegue de materiales baratos, seguros, verdes, sostenibles y respetuosos con el medio ambiente para eliminar estos contaminantes del agua es el principal reto de las últimas décadas. El quitosano y sus derivados/compuestos, como un sorbente económico, fácil de conseguir y respetuoso con el medio ambiente, han atraído cada vez más atención para la eliminación de moléculas de colorante. Este artículo de revisión se centra en la aplicación de quitosano y adsorbentes inteligentes a base de quitosano para la eliminación de colorantes. Se discuten los métodos recientes para la preparación de compuestos a base de quitosano y su aplicación en la eliminación de colorantes. Además, se evaluaron los posibles mecanismos de interacción del quitosano y los adsorbentes a base de quitosano con las moléculas de colorantes. Por último, se dirigen las perspectivas futuras del uso del quitosano como adsorbente para la eliminación de moléculas de colorante.

De Bakar et al. (2022), exploraron la aplicación potencial de adsorbentes híbridos para el bagazo de caña de azúcar y el tallo de plátano mediante el uso de un experimento de adsorción por lotes. Para determinar el impacto en la modificación de la dosis y tiempos de contacto, se llevaron a cabo varios experimentos. Para realizar el análisis de adsorción se utilizaron los modelos de isothermas de Langmuir y Freundlich. Por otro lado, se analizó el comportamiento y el mecanismo utilizando los modelos cinéticos de pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden. Los hallazgos revelan que, en 100 mL de muestra de colorante sintético, a una dosis óptima de bagazo de caña de azúcar y tallo de plátano, y a un tiempo de contacto óptimo de 65 min, se eliminó más del 80% del color. Los modelos de isothermas mostraron que el estudio se ajustaba mejor a Langmuir con un coeficiente

de correlación R^2 de 0,9048. Además, la cinética de adsorción del color mostró que el pseudo-segundo orden se ajustaba bien con el coeficiente de correlación 0,9639, que es mayor que el pseudo-primer orden, 0,4827. Debido al bajo costo de los medios utilizados en el estudio, los adsorbentes híbridos de bagazo de caña de azúcar y tallo de plátano tienen un buen potencial para la eliminación del color en el tratamiento de aguas residuales textiles. Como resultado, proporciona un método alternativo para abordar los problemas asociados con el exceso de color en las plantas de tratamiento de aguas residuales con tintes.

2.1.2. Nacionales

Espinoza & Mejía (2020), evaluaron el uso de perlas de quitosano en la remoción de colorantes azoicos de la industria textil y alimentarias (Rojo Allura) tomando en cuenta factores como el pH, concentración del colorante y cantidad de perlas magnetizadas. Para la obtención de las perlas se utilizó quitosano al 2 %, glutaraldehído y magnetita (previamente sintetizada mediante un proceso de hidrólisis oxidativa), posteriormente se caracterizaron las perlas y la magnetita mediante espectroscopía infrarroja y microscopía electrónica de barrido. se encontró que la capacidad máxima de adsorción (Q_m , mg.g^{-1}) de las perlas de quitosano se produjo a $\text{pH} = 2$ para ambos tintes azo. Los experimentos de equilibrio para la adsorción de CBY se ajustaron bien con el modelo de isoterma de Langmuir, mientras que la adsorción de CBR encajó bien con el modelo de isoterma de Freundlich. La capacidad máxima de adsorción de las perlas de ETMC fue de 179,45 mg.g^{-1} para CBY y 377,60 mg.g^{-1} para CBR. Los datos cinéticos de adsorción de CBY y CBR usando las perlas MC, TMC y ETMC se ajustaron mejor mediante el modelo cinético de pseudo-segundo orden. Los resultados de la prueba de adsorción competitiva para una mezcla binaria (relación = 1: 1 de CBY: CBR en la mezcla) indicaron que las perlas de ETMC registraron la mejor eficiencia de eliminación del tinte CBY (99,1 %).

Los resultados indican que el material ETMC es un adsorbente prometedor para la eliminación óptima de colorantes azoicos en soluciones acuosas.

De Taípe, et al. (2017), propusieron un enfoque innovador para la eliminación de colorantes azoicos mediante la preparación de perlas de quitosano magnetizadas y modificadas químicamente con etilendiamina. Este proceso tiene como objetivo aumentar la cantidad de grupos funcionales en el quitosano, lo que puede facilitar interacciones electrostáticas con los grupos funcionales de los colorantes azoicos. Esta interacción es fundamental para mejorar el porcentaje de remoción de estos contaminantes en aguas residuales, dado que los colorantes azoicos son conocidos por su resistencia a la degradación y su impacto ambiental negativo. La modificación química del quitosano con etilendiamina no solo incrementa la cantidad de grupos funcionales disponibles, sino que también mejora las propiedades adsorbentes del material. Esto permite que las perlas magnetizadas interactúen más eficazmente con los colorantes, aumentando así su capacidad para adsorber estos compuestos. La elección de la etilendiamina como agente modificador se basa en su capacidad para introducir grupos amino que pueden formar enlaces electrostáticos con los grupos azoicos presentes en los colorantes.

2.1.3. Regionales

Según Valencia (2017), describe la síntesis de un hidrogel híbrido y su aplicación en la remoción de colorantes de tipo azoico efluentes industriales textiles de la ciudad de Arequipa. El hidrogel fue sintetizado a partir de una reacción de polimerización y Quitosano, los cuales fueron entrecruzados químicamente en una atmósfera inerte, en diferentes proporciones según diseño experimental estadístico. Se utilizaron como agente entrecruzante, iniciador y acelerador a N°N° metileno bisacrilamida, persulfato de potasio y N, N, N', N' - tetrametil-etilenodiamina respectivamente; y se evaluó la mejor proporción de NIPA y quitosano a partir del porcentaje de remoción de colorante. Se

determinó las mejores condiciones para su aplicación, variando los parámetros de pH, temperatura, tiempo de contacto y concentración de adsorbente; para esta etapa se utilizó una solución de colorante preparada en laboratorio. Dichas condiciones fueron utilizadas en una matriz de agua residual industrial de una empresa textil de la ciudad de Arequipa. Los resultados obtenidos indican que es posible remover el 64 % de colorante en una muestra de agua residual industrial textil y hasta el 50 % de algunos metales como cobre, níquel y manganeso. Todos los residuos fueron tratados por un procedimiento de recuperación con metanol, de tal forma que al final se puede separar el hidrogel del colorante, permitiendo la reutilización de ambos. Este estudio permitirá utilizar el hidrogel como una alternativa potencial para la remoción de colorantes en aguas residuales procedentes de la industria textil.

2.2.Marco teórico

2.2.1. Aguas residuales textiles

La industria textil es una de las principales consumidoras de recursos como agua, energía y productos químicos auxiliares. Este sector genera grandes volúmenes de aguas residuales que contienen altas concentraciones de contaminantes, entre ellos colorantes, compuestos orgánicos refractarios, sustancias tóxicas, tensoactivos y componentes clorados. Estas características convierten a los efluentes textiles en uno de los más difíciles de tratar (Gómez, Escudero, & Gamarra, 2012).

Los colorantes sintéticos, ampliamente utilizados en la industria textil, son especialmente problemáticos debido a su resistencia a la degradación química y biológica. Esto dificulta su eliminación mediante métodos convencionales y representa un riesgo significativo para los ecosistemas acuáticos. En respuesta a esta problemática, ha surgido un interés creciente por el uso de tintes naturales como alternativas más sostenibles. Sin embargo,

algunos tintes naturales también pueden ser tóxicos si se utilizan mordientes específicos como el cromo para fijar el colorante en los tejidos (Wang, Jiang, & Gao, 2022).

El tratamiento de las aguas residuales textiles es complejo debido a la diversidad de contaminantes presentes. Los colorantes son los principales responsables del impacto visual y químico de estos efluentes, mientras que los compuestos orgánicos refractarios y los metales pesados contribuyen significativamente a su toxicidad. Además, los tensoactivos utilizados en detergentes y procesos auxiliares incrementan la dificultad del tratamiento.

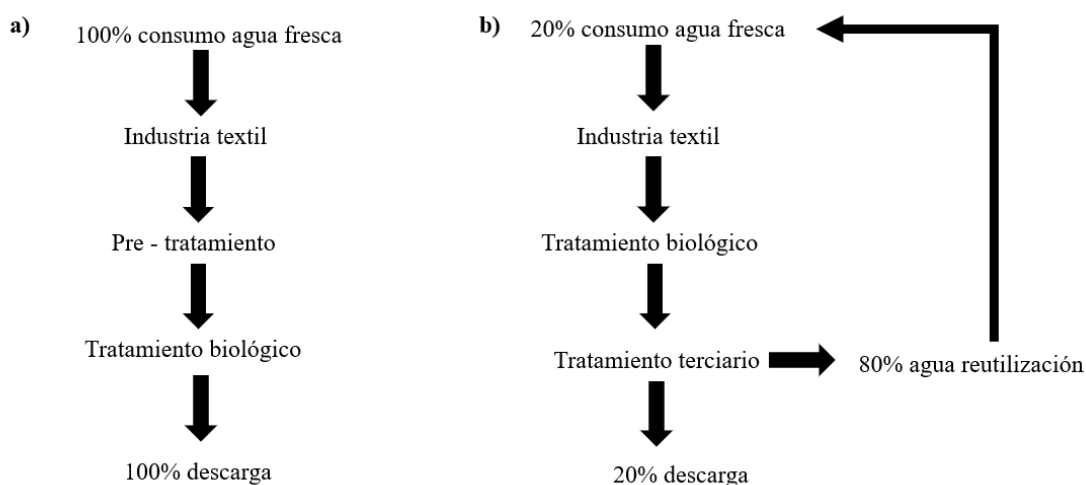
En términos ambientales, el vertido no controlado de estas aguas residuales puede tener efectos devastadores. Los productos químicos presentes afectan la vida acuática y pueden acumularse en la cadena alimentaria, poniendo en riesgo tanto a los ecosistemas como a las comunidades humanas que dependen de estos recursos.

En resumen, las aguas residuales textiles representan un desafío significativo debido a su compleja composición y elevado impacto ambiental. La búsqueda de soluciones efectivas para su tratamiento es esencial para mitigar sus efectos negativos y promover prácticas más sostenibles dentro del sector textil.

La Figura 1 muestra dos esquemas comparativos del consumo y tratamiento de agua en la industria textil. En el esquema tradicional (a), la producción depende en un 100% de agua fresca, la cual después del uso industrial y un tratamiento biológico es descargada en su totalidad al ambiente. En contraste, el esquema de reutilización (b) incorpora un tratamiento terciario que permite recuperar hasta un 80% del agua empleada, reduciendo el consumo de agua fresca al 20% y la descarga al ambiente en la misma proporción. Este enfoque representa una alternativa más sostenible al disminuir la presión sobre las fuentes hídricas y reducir los impactos ambientales de los efluentes textiles.

Figura 1.

Plantas de tratamiento de aguas residuales en la Industria Textil: a: sin aplicar reutilización; b: aplicando reutilización se reduce el consumo de agua fresca.



Nota. Adaptado de Fábregas (2021)

2.2.1.1. Características de las aguas residuales textiles

Es importante caracterizar las aguas residuales textiles para desarrollar métodos de tratamiento efectivos y flujo de proceso. En la industria textil se utilizan diversas materias primas, como el algodón, las fibras sintéticas y la lana. Las aguas residuales se producen principalmente durante la ejecución de cuatro etapas: pretratamiento, teñido, impresión y acabado funcional (Wang, Jiang, & Gao, 2022).

El porcentaje de un parámetro definido para la caracterización de aguas residuales textiles incluye la demanda química de oxígeno (DQO), el pH, el color, los sólidos en suspensión, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), N-NH_x, fosfato total (TP), nitrógeno Kjeldahl total (TKN), conductividad, metales, demanda total de oxígeno (TOC), Cl⁻, sólido disuelto total (TDS), grasa, alcalinidad, tensioactivos, dureza, sólido suspendido volátil (VSS), sulfuro, N-NO_x, sólidos totales, turbidez, carbono orgánico disuelto (DOC), halógeno orgánico absorbible (AOX), carbono total (TC). De la Tabla 1, las aguas residuales textiles compuestas se caracterizan principalmente mediante el análisis de

DBO, DQO, sólidos suspendidos (SS) y sólidos disueltos (DS) (Wang, Jiang, & Gao, 2022).

Tabla 1.

Características de las aguas residuales de la industria textil convencional.

Parámetros	Valor
pH	6–10
Temperatura, °C	35–45
Demanda bioquímica de oxígeno, mg/L	80–6,000
Demanda química de oxígeno, mg/L	150–12,000
Aceite y grasa, mg/L	10–30
Sólidos suspendidos totales, mg/L	15–8,000
Amoníaco libre	<10
Sólidos disueltos totales, mg/L	2,900–3,100
Cloruro, mg/L	1,000–1,600
Sodio, mg/L	70
Oligoelementos, mg/L	<10
Sílice, mg/L	<15
Nitrógeno Kjeldahl total, mg/L	70–80
Color	50–2,500

Nota. Adaptado de Wang et al. (2022)

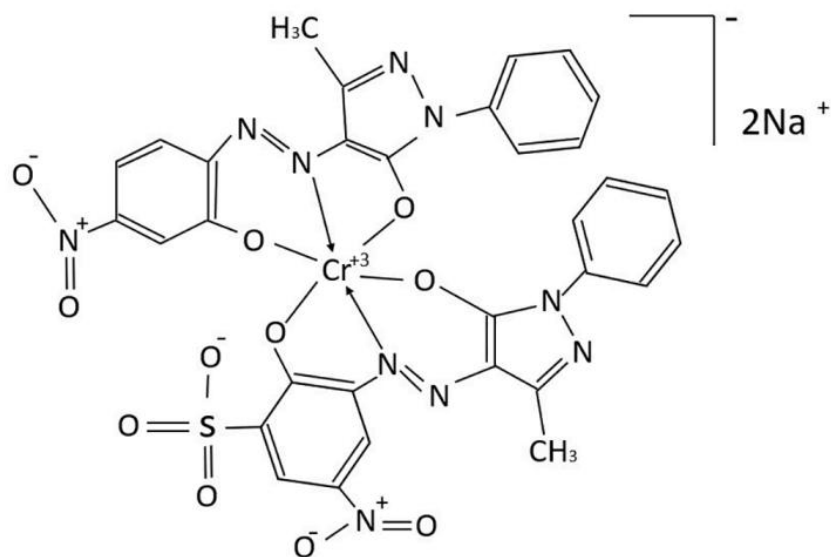
2.2.2. Colorante Rojo G

A nivel mundial, existen más de 100,000 colorantes comerciales, de los cuales aproximadamente el 15% de la producción anual es vertida en cuerpos de agua sin un tratamiento adecuado, causando daños tanto al medio ambiente como a la salud pública. (Alarcon et al., 2022).

La Figura 2 muestra la estructura química del colorante RG, uno de los colorantes más utilizados en el teñido de fibras de alpaca.

Figura 2.

Estructura química del colorante Rojo-G



Nota. Adaptado de Alarcón et al. (2022).

2.2.3. Adsorción

La adsorción es un fenómeno de superficie en el que una sustancia se acumula en la interfase de un sistema líquido-líquido, sólido-líquido, gas-líquido o gas-sólido. El uso de adsorbentes sólidos tiene una importancia ambiental significativa debido a que permiten remover contaminantes de efluentes acuosos y gaseosos por su naturaleza porosa y por los grupos funcionales superficiales que posee (Beltrán, 2015).

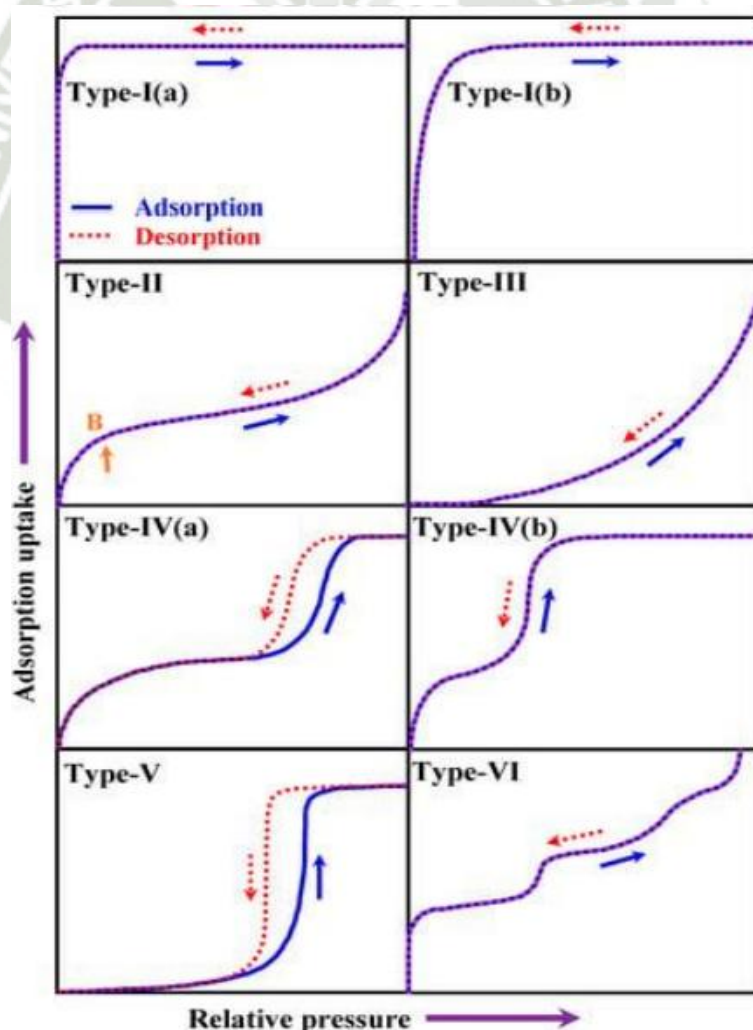
Este fenómeno se puede clasificar según su naturaleza en adsorción física o química. La adsorción física involucra sólo a fuerzas intermoleculares débiles (fuerza de Van der Waals), por lo que las interacciones son reversibles. Como consecuencia de no haber transferencia de electrones, las especies que interaccionan mantienen su individualidad e

identidad. Tampoco existe especificidad en cuanto a los sitios de adsorción, las entalpías de adsorción son menores a 20 kcal.mol^{-1} (Beltrán, 2015).

Por otro lado, la adsorción química involucra la formación de enlaces entre las moléculas de adsorbato y la superficie adsorbente, por lo que es irreversible y específica. Las entalpías de adsorción son mayores a las de la adsorción física y se encuentran entre 20 y $100 \text{ kcal.mol}^{-1}$. Este tipo de adsorción ocurre a mayores temperaturas que la adsorción física (Beltrán, 2015).

Figura 3.

Clasificación de isotermas de adsorción – desorción según la IUPAC



Nota. Adaptada de Themmes et al. (1998)

2.2.3.1. Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción son modelos que describen la relación entre la cantidad de adsorbato retenido en la superficie de un adsorbente y su concentración en la fase líquida o gaseosa, a una temperatura constante, en condiciones de equilibrio (Suárez, 2002).

- Isoterma de Langmuir

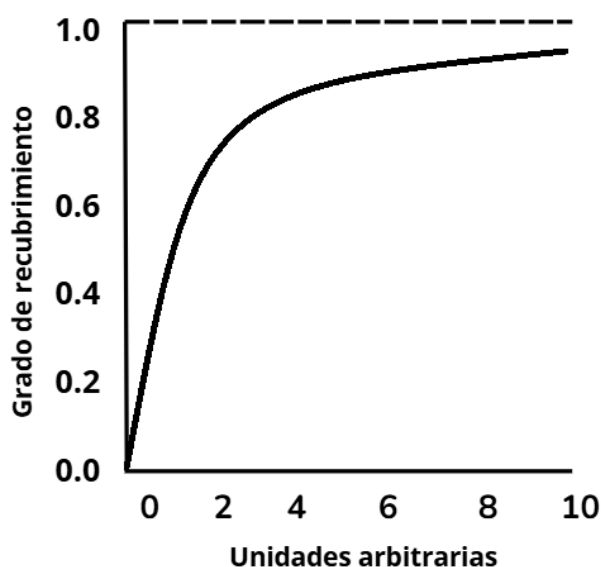
La isoterma de Langmuir constituye el primer modelo formal que buscó describir el fenómeno de adsorción, siendo ampliamente utilizado en estudios de catálisis, superficies y materiales adsorbentes. Este modelo se fundamenta en la hipótesis de que la adsorción ocurre en sitios homogéneos de la superficie del sólido, con una sola capa de moléculas adsorbidas (monocapa), sin interacciones significativas entre las moléculas ya fijadas y las que se encuentran en el medio. Su importancia radica en que permite interpretar el comportamiento cinético y termodinámico de los procesos de adsorción y establecer parámetros fundamentales como la capacidad máxima de adsorción y la energía de adsorción (Suárez, 2002).

La Figura 4 muestra la representación típica de la isoterma de Langmuir. Se observa cómo el grado de recubrimiento de la superficie del sólido (eje Y) aumenta rápidamente conforme se incrementa la concentración o presión del adsorbato (eje X). Inicialmente, la pendiente es elevada debido a la gran disponibilidad de sitios activos; sin embargo, a medida que estos sitios se saturan, el incremento en la adsorción se vuelve más lento hasta aproximarse a un valor máximo cercano a 1, correspondiente a la formación de una monocapa completa. Esta tendencia refleja el equilibrio de saturación, donde ya no es posible incrementar el recubrimiento sin aumentar la superficie disponible. En

condiciones experimentales, este comportamiento se presenta cuando el sólido es no poroso y la temperatura del sistema es superior al punto de ebullición del gas, lo que evita la condensación y asegura que la adsorción observada responda al modelo de Langmuir. (Suárez, 2002).

Figura 4.

Isoterma de adsorción de Langmuir



Nota. Adaptado de Suarez (2002)

La isoterma de Langmuir es un modelo teórico válido para la adsorción en una monocapa sobre una superficie completamente homogénea con un número finito de sitios idénticos y específicos de adsorción y con una interacción despreciable entre las moléculas, representado por la ecuación 1 (Moreno & Hormaza, 2014).

$$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (1)$$

Dónde:

q_{max} : es una constante que denota la capacidad máxima de adsorción, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$

K_L : define la afinidad del adsorbato por el adsorbente, $L.mg^{-1}$

- **Isoterma de Freundlich**

Según Moreno & Hormaza (2014), el modelo de Freundlich es una ecuación empírica que no asume homogeneidad en la energía de los sitios en la superficie y sin límite en la carga máxima de adsorción, y muestra una consistencia de una distribución exponencial de centros activos característicos de una superficie heterogénea, representada como la ecuación:

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2)$$

Dónde:

K_F : n caracterizan la capacidad y la intensidad de adsorción, respectivamente; hipotéticamente K_F alcanza el valor cuando la C_e se aproxima a la unidad y así puede ser considerado como un indicador de la intensidad de adsorción, $(mg.g^{-1}/mgL^{-1})^{-1/n}$

2.2.4. Aureobasidium pullulans

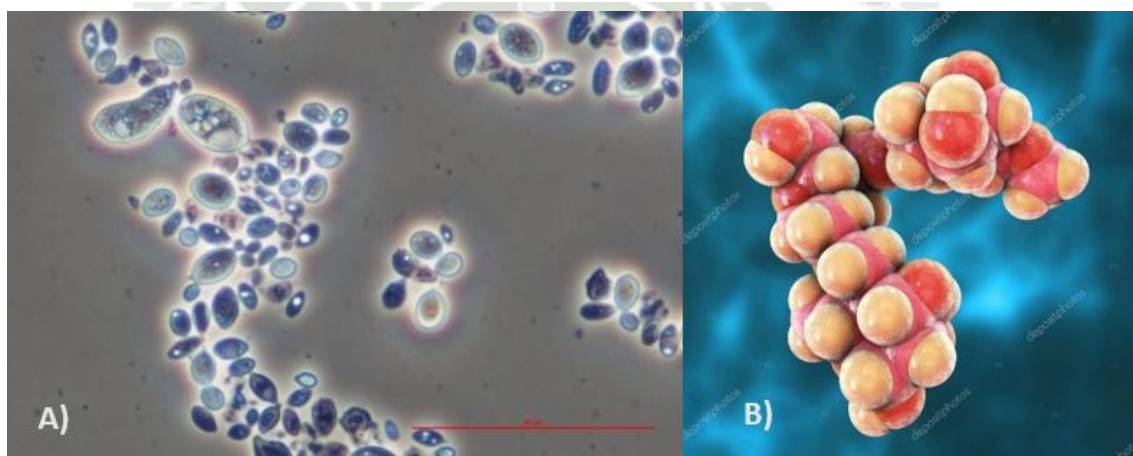
Es un hongo saprofita similar a una levadura que se ha estudiado continuamente durante más de 100 años (Prasongsuk et al., 2018), que es particularmente conocida por su importancia biotecnológica como productor del polisacárido extracelular (EPS), pululano biodegradable (Figura 5A). Este componente es un biomaterial prometedor y actualmente se utiliza, entre otros, para el envasado de alimentos y medicamentos. Su potencial biotecnológico también se observa en la producción de una variedad de enzimas hidrolíticas (Zalar et al., 2008)

2.2.4.1. Pululano

El pululano es uno de los metabolitos microbianos importantes producidos por *Aureobasidium pullulans*, hongo polimórfico, en todo el mundo. El pululano es un homopolímero lineal compuesto de subunidades de maltotriosa interconectadas con enlaces glicosídicos (Figura 5B). Este polímero se explota en las industrias alimentaria, cosmética, médica y farmacéutica, incluida la fabricación de plásticos biodegradables (Singh, 2021).

Figura 5.

A) Aureobasidium pullulans visto con microscopio óptico y B) Molécula de Pullulan, ilustración 3D



Nota. Adaptado de Celador y Rivas (2015) y Kon (2018).

2.2.5. Bagazo de caña de azúcar

El bagazo de caña de azúcar es un residuo lignocelulósico fibroso remanente de los tallos de caña, que contiene entre un (20 y 45) % de fibra insoluble, como la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. El bagazo contiene antocianinas, flavonoides y polifenoles que han sido estudiados por su acción antioxidante. Inciden como anti mutagénicos y posiblemente anticancerígenos (Pinero, 2023).

La Tabla 2 muestra las propiedades fisicoquímicas del bagazo de caña, incluyendo su humedad, tamaño de partícula, densidad, y otros parámetros importantes como el

contenido de cenizas, volátiles y carbón fijo. Estos valores son fundamentales para caracterizar el material en estudios de adsorción, ya que influyen en su capacidad de retención y desempeño en el tratamiento de contaminantes.

Tabla 2.

Propiedades fisicoquímicas del bagazo de caña BCA

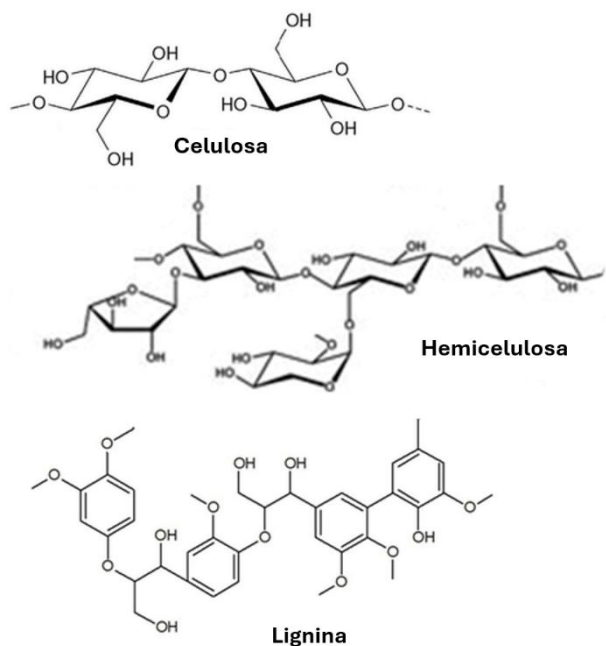
Humedad, %	4
Tamaño de la partícula, mm	0.5 - 1
Densidad, g/cc	0.12
Volátil, %	68-70
Cenizas, %	1.26
Carbón fijo, %	28.7 – 30.7
C, %	48.58
H, %	5.97
O %	38.94
N, %	0.2

Nota. Adaptado de (Manals-Cutiño, Penedo-Medina, & Salas-Tort, 2015).

El bagazo de caña de azúcar es un residuo lignocelulósico complejo, no un polímero simple. Su estructura química es una mezcla de varios polímeros vegetales, entre otros componentes menores (cenizas, extractivos, etc.). (Figura 6).

Figura 6.

Estructura química de bagazo de caña de azúcar



Nota. Adaptado de (Da Silva & Frollini, 2020).

2.2.5.1. Identificación de las estructuras químicas

Sobre el bagazo de caña de azúcar está compuesto principalmente por:

- Celulosa (40–50%) → polímero lineal de β -D-glucosa unida por enlaces β -(1→4)-glucosídicos.
- Hemicelulosa (25–35%) → polímero ramificado de xilosa, manosa, arabinosa y galactosa.
- Lignina (15–25%) → polímero aromático con unidades de fenilpropano (p-cumaril, coniferil y sinapil alcohol).

Estas tres macromoléculas contienen grupos funcionales polares:

- Hidroxilos (–OH)
- Carboxilos (–COOH)

- Metoxilos ($-\text{OCH}_3$)
- Fenoles aromáticos (en lignina)

De acuerdo con el colorante rojo G presenta:

- Núcleos aromáticos (anillos bencénicos conjugados).
- Grupos azo ($-\text{N}=\text{N}-$) y sulfonatos ($-\text{SO}_3\text{Na}$).
- Átomos de Cr (Cromo) como posible centro coordinante o complejo metálico.
- Presencia de Na^+ como contraión y enlaces polares $\text{C}-\text{N}$, $\text{C}-\text{O}$, $\text{N}=\text{N}$.

Estos grupos confieren carga negativa ($-\text{SO}_3^-$) y alta afinidad por superficies con grupos $-\text{OH}$ o $-\text{NH}_2$ protonados (como las del bagazo en medio ácido).

Según Rodríguez et al. (2014), durante el proceso de adsorción o interacción química, ocurren principalmente interacciones fisicoquímicas y enlaces superficiales.

- Etapa 1: Activación del bagazo

En condiciones de pH ácido o neutro, los grupos $-\text{OH}$ de la celulosa, hemicelulosa y lignina pueden ionizarse parcialmente:



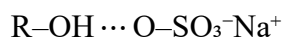
Esto permite la formación de puentes de hidrógeno o interacciones electrostáticas con el colorante.

- Etapa 2: Formación de enlaces entre el bagazo y el colorante

El Rojo G (aniónico) puede reaccionar o interaccionar con el bagazo mediante:

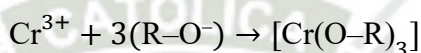
a) Puentes de hidrógeno

Entre los grupos $-OH$ de la celulosa/hemicelulosa y los grupos azo o sulfonato del colorante:



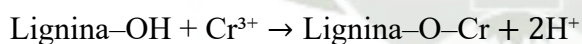
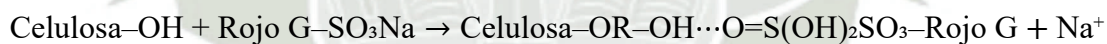
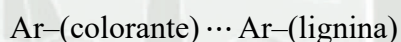
b) Enlaces iónicos o de coordinación

En presencia de Cr^{3+} , el metal puede formar complejos de coordinación con oxígenos de la celulosa o lignina:



c) Interacciones $\pi-\pi$

Los anillos aromáticos del Rojo G pueden alinearse con los anillos fenólicos de la lignina, estableciendo fuerzas de Van der Waals o apilamientos $\pi-\pi$:



El resultado es la formación de un complejo adsorbente-colorante donde los grupos funcionales del bagazo actúan como centros activos que fijan al colorante mediante enlaces químicos y fuerzas secundarias. (Rodríguez et al., 2014).

2.2.6. Quitosano

El quitosano es un polisacárido que se origina a partir de la quitina, uno de los polímeros naturales más abundantes en la naturaleza. La quitina, por su parte, está formada por monómeros de D-acetilglucosamina, unidos por enlaces $\beta 1-4$, siendo descubierta en 1811

por Bracconot. La quitina se encuentra en la cáscara de los crustáceos (cangrejos, langostas, etc.), insectos, arácnidos, en la pared de algunos hongos, en algas verdes y protozoarios. En 1859, Rouguet trató la quitina con hidróxido de potasio, de lo cual obtuvo un polisacárido que Hoppe-Seller denominó luego como quitosano (Bolívar, 2021).

El quitosano es un polisacárido lineal con una estructura semejante a la de la celulosa. Sin embargo, uno de los grupos hidroxilo de la glucosa es sustituido por un grupo amino ($-NH_2$) o un grupo acetilamino ($-HNOCH_3$). El quitosano está formado por unidades desacetiladas (anaranjadas) y unidades acetiladas (azul), distribuidas al azar (Bolívar, 2021).

2.2.6.1. Aplicaciones del Quitosano

Según Bolívar (2021), el quitosano se usa en:

- **Tratamiento de agua:** El quitosano interviene en la purificación del agua en varios aspectos. Puede secuestrar iones metálicos como el cobre, plomo, mercurio, etc. También puede contribuir a la eliminación de restos de alimentos, tintes y otros sólidos cargados negativamente. Además, el quitosano puede unir partículas en suspensión, aumentando su tamaño y permitiendo que se eliminen en los sedimentos. Esto produce una eliminación casi total de la turbidez del agua.
- **Agricultura:** El quitosano se usa en el recubrimiento de semillas y hojas, en el mejoramiento de la respuesta a fármacos y/o fertilizantes de acción prolongada, en el mejoramiento de la germinación y el enraizamiento, en el crecimiento de las hojas y en el rendimiento de las semillas.
- **Formación de nano fibras:** En el método de electrohilado se utiliza una fuerza eléctrica para estirar estructuras poliméricas como el quitosano, produciendo

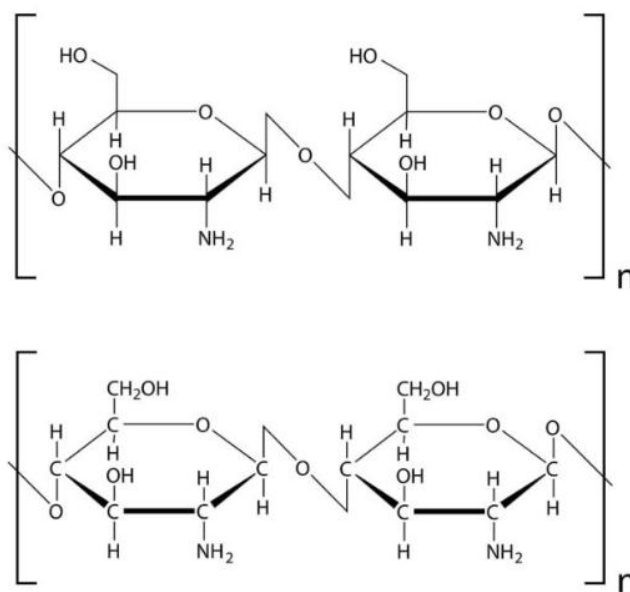
fibras de 50 a 500 nanómetros de diámetro. Estas fibras son biocompatibles y biodegradables y se usan como materiales hemostáticos y de cicatrización de heridas.

- **Usos médicos:** La lista de los usos y aplicaciones del quitosano en medicina es extensa, pudiéndose nombrar los siguientes: implantes ortopédicos, ingeniería de tejidos, curación de heridas, interiorización a los tejidos de fármacos, creación de piel artificial, suturas quirúrgicas y liberación controlada de fármacos.

La Figura 7 muestra la estructura molecular del quitosano, un polisacárido derivado de la quitina. En la imagen se observan las unidades repetidas de glucosamina, con grupos amino ($-NH_2$) que caracterizan su composición química.

Figura 7.

Molécula de Quitosano



Nota. Adaptado de Bolívar (2021).

2.3. Marco legal

2.3.1. Ley N°28611 - Ley General del Ambiente

La Ley N° 28611, promulgada en 2005, constituye la base del marco normativo para la gestión ambiental en el Perú. Esta ley establece los principios y normas fundamentales para garantizar el derecho a un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el desarrollo pleno de la vida. Además, promueve el deber de contribuir a una gestión ambiental efectiva y a la protección del medio ambiente y sus componentes, con el fin de mejorar la calidad de vida de la población y alcanzar un desarrollo sostenible. (MINAM, 2005)

Artículo 66.- De la salud ambiental

66.1 La prevención de riesgos y daños a la salud de las personas es prioritaria en la gestión ambiental. Es responsabilidad del Estado, a través de la Autoridad de Salud y de las personas naturales y jurídicas dentro del territorio nacional, contribuir a una efectiva gestión del ambiente y de los factores que generan riesgos a la salud de las personas.

66.2 La Política Nacional de Salud integra la política de salud ambiental como una prioridad, con el objetivo de garantizar la reducción de riesgos ambientales asociados a las actividades y materias que se encuentran bajo su competencia.

Artículo 67.- Del saneamiento básico

En los distintos niveles de gobierno, tanto a nivel nacional como sectorial, regional y local, se priorizan acciones dirigidas al saneamiento básico, abarcando la construcción y gestión de infraestructura adecuada. Estas acciones incluyen la gestión integral del agua potable, aguas pluviales y subterráneas, así como del sistema de alcantarillado, el reuso de aguas residuales, y la correcta disposición de excretas y residuos sólidos. Se busca garantizar la universalidad, calidad y continuidad de los servicios de saneamiento, junto con la implementación de tarifas que reflejen los costos de dichos servicios, su administración y mejora continua.

2.3.2. Decreto Supremo N° 023-2021-MINAM que aprueba la Política Nacional del Ambiente al 2030

La presente política tiene como objetivo aumentar las acciones de recuperación y restauración de ecosistemas degradados. Esta normativa es de cumplimiento obligatorio para las entidades de la Administración Pública, así como para las personas jurídicas del sector privado y la sociedad civil, según corresponda. La política define objetivos, estrategias, servicios y actividades dirigidas a enfrentar los problemas ambientales críticos que amenazan la sostenibilidad del desarrollo del país, contribuyendo así al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente aquellos relacionados con la vida terrestre y la acción por el clima. (MINAM, 2021).

Objetivo Prioritario 3: Reducir la contaminación del aire, agua y suelo

Este objetivo tiene como finalidad reducir la contaminación del aire, agua y suelo, contribuyendo a la mejora de las estructuras productivas afectadas por la inadecuada gestión de residuos y sustancias químicas. Además, se enfoca en la protección de los suelos y la recuperación de los espacios urbanos, lo cual impacta positivamente en el valor de las propiedades y promueve un ambiente propicio para la inversión tanto de personas naturales como jurídicas. Asimismo, busca mejorar la calidad ambiental mediante la implementación de mecanismos de fiscalización y la remediación de pasivos ambientales, fomentando la sostenibilidad y el uso eficiente de los recursos.

2.3.3. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el Agua, DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM

La presente norma tiene por objeto compilar las disposiciones aprobadas mediante el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, el Decreto Supremo N° 023-2009-MINAM y el Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM, que aprueban los Estándares de Calidad

Ambiental (ECA) para Agua. Este documento define los valores fisicoquímicos y microbiológicos que deben cumplir los diferentes cuerpos de agua superficial y subterránea en el país. Su objetivo es asegurar que los recursos hídricos estén en condiciones adecuadas para su uso por parte de los seres humanos y el ecosistema, alineándose con los principios de la Ley General del Ambiente y los objetivos de la Política Nacional del Ambiente. (MINAM, 2017).

Artículo 5.- Los Estándares de Calidad Ambiental para Agua como referente obligatorio

- Los parámetros de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua se determinan a partir de las siguientes variables:
 - a) Contaminantes característicos del efluente del proyecto o actividad.
 - b) Condiciones naturales de calidad de aguas superficiales no alteradas por actividades humanas.
 - c) Niveles de fondo en cuerpos de agua naturales que indican concentraciones de sustancias de origen natural o antrópico.
 - d) Efecto de descargas en la zona, considerando impactos acumulativos y sinérgicos que afectan la calidad del agua.
 - e) Características específicas de la actividad o entorno que pueden influir en la calidad ambiental.
- La aplicación de los ECA para agua se refiere a los parámetros identificados en base a las variables anteriores, sin requerir la inclusión de todos los parámetros establecidos para la categoría correspondiente.

2.3.4. Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.

El Decreto Supremo que modifica el Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. Este recurso legal se aplica a los líquidos generados por actividades económicas comerciales e industriales, excluyendo los desechos de usuarios domésticos, que provienen de la preparación de alimentos, el aseo personal y desechos fisiológicos. Entre estas actividades se incluye la industria textil, que actualmente carece de una regulación específica para sus efluentes, a diferencia de otros sectores como la minería, curtiembres, cervecías y papel. Esta falta de normativa puede afectar negativamente la calidad del agua, un aspecto crítico para el desarrollo sostenible. En este contexto, es fundamental que se consideren los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 6, que promueve la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. (VIVIENDA, 2019)



CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

3.1.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es experimental, dado que se llevarán a cabo tratamientos controlados para medir la eficiencia de la adsorción de materiales orgánicos, como el bagazo de caña de azúcar modificado con pululano y quitosano, en la remoción del colorante (RG). Es de enfoque cuantitativo, ya que se utilizará el análisis matemático y estadístico. (Hernández, 2020)

3.1.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación a desarrollarse es exploratorio, ya que se realizaron experimentos previos para conocer la eficiencia de la adsorción de materiales orgánicos, obteniendo valores relacionados a la remoción de colorante RG. (Hernández, 2020)

3.2. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación desarrollada es experimental, debido a que fue modificada un grupo de variables tales como pH, concentración de colorante, dosis de adsorbente de bagazo de caña de azúcar y el tiempo de contacto en los tratamientos de adsorción. El bagazo de caña de azúcar (BCA) también fue modificado, con la finalidad de luego visualizar los cambios desarrollados. A continuación, se definen las variables en el presente experimento.

Tabla 3.
Operacionalización de variables

Contextualización	Dimensiones (Variable)	Indicadores	Instrumento de medida	Unidad de medida
Variable Independiente:	Dosis, C_A	Concentración del adsorbente	Balanza analítica	Escala cuantitativa (mg)
	Concentración inicial del colorante RG, C_{oRG}	Concentración inicial del colorante	Balanza analítica	Escala cuantitativa (mg/L)
	Tiempo de contacto, t	Tiempo de contacto entre adsorbente y colorante	Cronómetro	Escala de tiempo (min)
Variable Dependiente:	Eficiencia adsorción del colorante RG	Porcentaje de remoción del colorante	Espectrofotómetro UV - Vis	Porcentaje (%)

3.3. Métodos de investigación

3.3.1. Área de estudio

El ambiente empleado para llevar a cabo la investigación fue en el laboratorio de Ciencias de los Materiales de la Universidad Católica de Santa María de la ciudad de Arequipa, departamento de Arequipa, Perú.

3.3.2. Diseño experimental

3.3.2.1. Localización de la recolección de la muestra

La recolección de la muestra se llevó a cabo en el Laboratorio de Ciencias de los Materiales de la Universidad Católica de Santa María, ubicado en la ciudad de Arequipa, en el departamento de Arequipa, Perú.

3.3.2.2. Localización Experimental

El ambiente experimental se desarrolló en el Laboratorio de Ciencias de los Materiales de la Universidad Católica de Santa María.

3.3.2.3. Equipos, materiales y reactivos

Para la presente investigación se emplearon los siguientes materiales (Tabla 4)

Tabla 4.

Equipos y materiales

Elemento	Descripción
Horno BINDER BD	Para secado
Mufla Thermolyne (Barnsfeed)	Para activación térmica
Analizador elemental (Flash Smart)	Para el análisis elemental (C,H,N,S)
Espectrómetro infrarrojo Thermo Scientific (Nicolet Summit)	Para la identificación de los grupos funcionales
Matraz aforado de 1 L	Para disolución de quitosano y pululano
Agitador magnético	Para homogeneizar las mezclas
Sortometro (Anton Parr Nova 600)	Para determinar características superficiales de los adsorbentes
Balanza analítica (Radwas AS 220)	Para pesar los reactivos
Agua destilada	Solvente para las disoluciones
Ácido acético	Para la disolución del quitosano
Hidróxido de sodio	Para neutralizar la solución
Colorante rojo-G	Sustancia a adsorber
Bagazo de caña de azúcar	Material adsorbente a modificar

3.3.2.4. Diseño experimental factorial

Para determinar el número de pruebas que se realizarán en el sistema modo batch, se empleó un diseño experimental factorial 2^3 , ya que se tiene 3 factores a tomar en cuenta.

$$N = m^k$$

Dónde:

N = Número de experimentos

m = Número de niveles

K = Número de factores

Se realizaron 8 pruebas experimentales con tres réplicas.

Como conclusión se obtiene que se realizaran 8 experimentos y que se tendrá 3 réplicas, por lo tanto, se cuenta con un total de 24 experimentos, considerando los valores seleccionados (Tabla 5)

Tabla 5.

Justificación de los valores de los niveles seleccionados

Justificación de los niveles seleccionados	
Factores	Razón
C_{ORG}, mg/L	En base a trabajos previos revisados en antecedentes se determinó que la concentración del colorante fuese de (30 a 60) mg/L
Concentración del adsorbente, C_A, mg	Se investigó con respecto a la concentración del adsorbente y se concluyó que los valores más adecuados para la investigación son: (40 a 60) mg
Tiempo de contacto t, min	El valor mínimo hallado en investigaciones previas fue de 60 min para el t y dentro de los valores máximos más repetitivas fue de 120 min

Por consiguiente, el proceso para un diseño factorial con 3 factores y 3 réplicas implica la selección de los factores y sus niveles, la determinación de las réplicas, la creación de

una matriz experimental que incluya todas las combinaciones de niveles y réplicas, la realización de los tratamientos correspondientes. (Tabla 6)

Tabla 6.

Factores y niveles experimentales

Factores	Unidades	Nivel 1 (-)	Nivel 2 (+)
C_{ORG}	mg/L	30	60
C_A	mg	40	60
t	min	60	120

A continuación, se construye una matriz experimental que muestra todas las combinaciones posibles de niveles y réplicas. (Tabla 7)

Tabla 7.

Diseño experimental de las pruebas en sistema Batch para la adsorción del colorante en muestras sintéticas

Run	C_{ORG} mg/L	C_A mg	T_c , min	R, %
1	60	60	60	
2	60	60	60	
3	60	60	60	
4	30	40	60	
5	30	40	60	
6	30	40	60	
7	30	60	60	
8	30	60	60	
9	30	60	60	
10	60	40	120	
11	60	40	120	
12	60	40	120	
13	30	60	120	
14	30	60	120	
15	30	60	120	
16	30	40	120	
17	30	40	120	
18	30	40	120	
19	60	40	60	

20	60	40	60
21	60	40	60
22	60	60	120
23	60	60	120
24	60	60	120

N=24

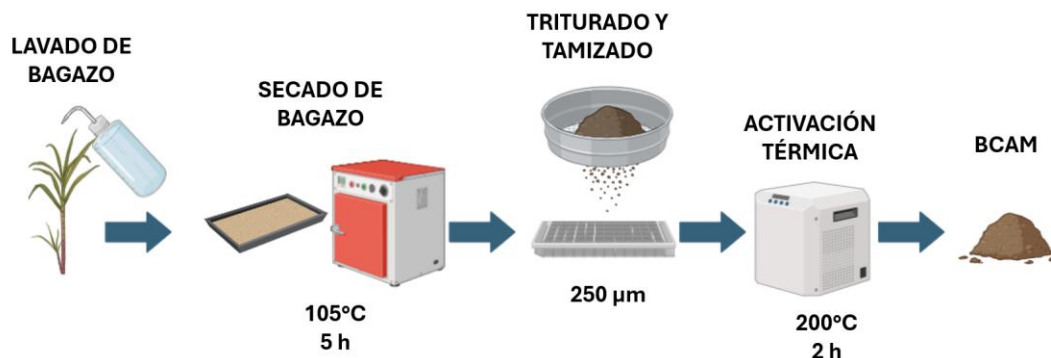
Así mismo, se llevan a cabo los tratamientos siguiendo esta matriz por triplicado, registrando los valores de la respuesta en cada caso. Después, se realizó un análisis estadístico para determinar los efectos principales y las interacciones entre los factores. Por último, se interpretó la información obtenida, extrayendo conclusiones sobre el impacto de los factores en la respuesta y tomando decisiones basadas en estos resultados.

3.3.2.5. Metodología para resolver los objetivos

A. Determinar las características del bagazo de caña de azúcar activado mediante tratamiento térmico, con el fin de mejorar sus propiedades fisicoquímicas y de superficie mediante el cálculo de área superficial específica S_{BET} , análisis elemental, CHNS y pruebas preliminares modo batch.

Modificación térmica de BCA

Se determinó las características del bagazo de caña de azúcar activado mediante un tratamiento térmico controlado. Este proceso comenzó con la recolección del BCA, que se lavó con agua destilada hervida para eliminar impurezas y luego con agua destilada. Posteriormente, el BCA se secó en un horno a 105 °C durante 5 h. Una vez seco, se tamizó para obtener partículas con tamaño de 250 μm . Las muestras secas se etiquetaron como no tratadas y se almacenaron en frascos herméticos. Luego, se sometió a un tratamiento térmico en la mufla Thermolyne (Barnstead) a 200 °C durante 2 h, lo que incrementó su porosidad y mejoró sus propiedades fisicoquímicas y de superficie. (Figura 8).

Figura 8.*Modificación térmica del BCA*

Identificación de grupos funcionales

Para la identificación de los grupos funcionales presentes en las muestras (BCAM, Q y P), se utilizó el equipo de espectroscopia infrarrojo para la transformada de Fourier (FTIR). Para la elaboración de la pastilla requerida a medir en el equipo, se pesó 50 mg de la sal, bromuro de potasio (KBr), 0.5 mg de cada uno de los adsorbentes (BCAM, Q y P), de igual forma de BCA, sometiéndolos a una compresión de 1.75 tn de fuerza aplicada. La pastilla analizada aplicándose 32 barridos a una resolución de 4 cm⁻¹, utilizando el espectrómetro infrarrojo.

Caracterización de la superficie de los adsorbentes

El área superficial específica S_{BET} de los adsorbentes P, Q, BCAM y BCA fue determinada, mediante las isothermas de adsorción – desorción empleando N₂ 77 K, en un sortómetro marca Anton Parr modelo Nova 600, previamente se realizó degasificación de los adsorbentes durante 1 h a 200 °C. En base a los datos obtenidos de la adsorción y desorción del nitrógeno (gas), resultaron el ancho (nm), volumen (cm³/g) y el S_{BET} .

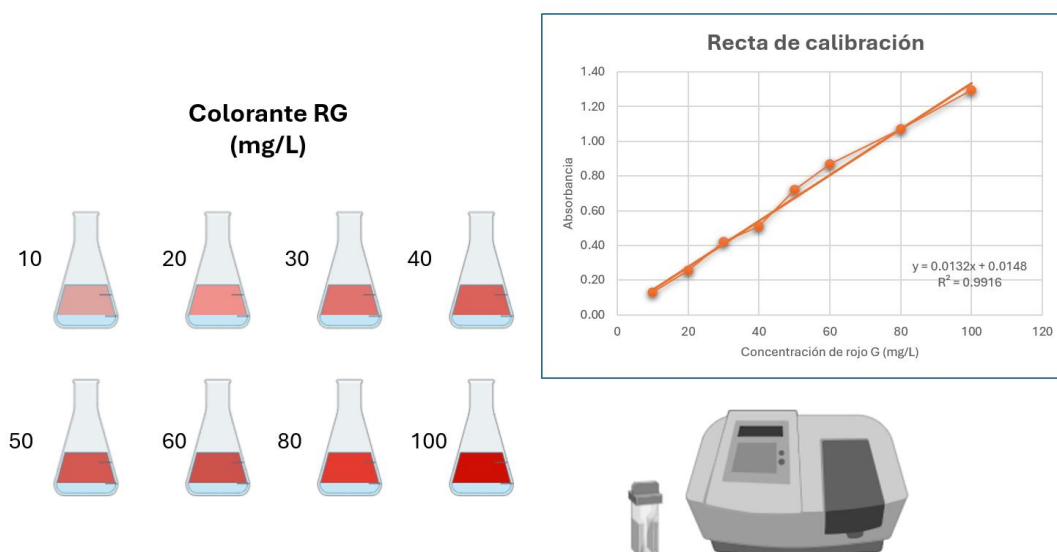
Análisis elemental de los adsorbentes

Para la determinación de los elementos, carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre (C,H,N,S), en los adsorbentes, se realizó mediante la combustión hasta 1800 °C. La cuantificación de C, H, N y S, está basada en la oxidación térmica de los elementos desde los (950 – 1060) °C, produciendo CO₂, H₂O y N₂. Estas composiciones se separaron y se cuantificaron a través de la cromatografía de gases.

Para la realización de este análisis se pesó 10 mg de pentóxido de vanadio V₂O₅, en capsulas de estaño, se añadió los adsorbentes (BCAM, Q y P), de 3 - 3.5 mg cada uno. El análisis fue realizado por duplicado utilizando un analizador elemental, marca Thermo scientific, modelo Flash Smart Elemental Analyzer

Determinación de la recta de calibración

Previamente, a los tratamientos modo batch, se realizó una recta de calibración mediante el espectrofotómetro UV - Vis modelo Genesys 150, Thermo Scientific, equipo donde se realizó el barrido espectral (λ = 200 – 1100) nm del colorante RG a una concentración de 100 mg/L, obteniendo la absorbancia máxima a una λ = 494 nm. Luego, se procedió a realizar la recta de calibración a distintas concentraciones (10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100) mg/L, con la finalidad de cuantificar la concentración del RG en los tratamientos (Figura 9), la disolución fue eficiente utilizando agua destilada, los tratamientos fue realizado por triplicado.

Figura 9.
Determinación de λ_{max} y calibración de RG


B. Analizar la efectividad del adsorbente en estudio sobre el colorante RG mediante la potencial sinergia con pululano y quitosano a diferentes proporciones usando sistemas de tratamiento modo batch.

Para el desarrollo del objetivo planteado, previamente se preparó el adsorbato, realizando dos pesadas una de 30 mg y otra de 60 mg del colorante RG, en una balanza analítica (Radwas AS 220). Posteriormente, se vertió el colorante en un beaker, se disolvió en agua destilada hasta completar un volumen de un 1 L, posteriormente se dejó agitando durante 5 min.

Se prepararon soluciones de quitosano y pululano mediante su disolución controlada en ácido acético (CH_3COOH) y agua destilada. Se colocaron 10 mg de quitosano en un matraz aforado de 1 L, se añadió 100 mL de ácido acético 0,1 M y se complementó con agua destilada. Esta mezcla se calentó a 50 °C durante 30 min para asegurar la disolución completa del quitosano. Se realizó un procedimiento similar para el pululano. Una vez que ambas soluciones estuvieran listas, se mezclaron y se adicionó 160 mg de bagazo

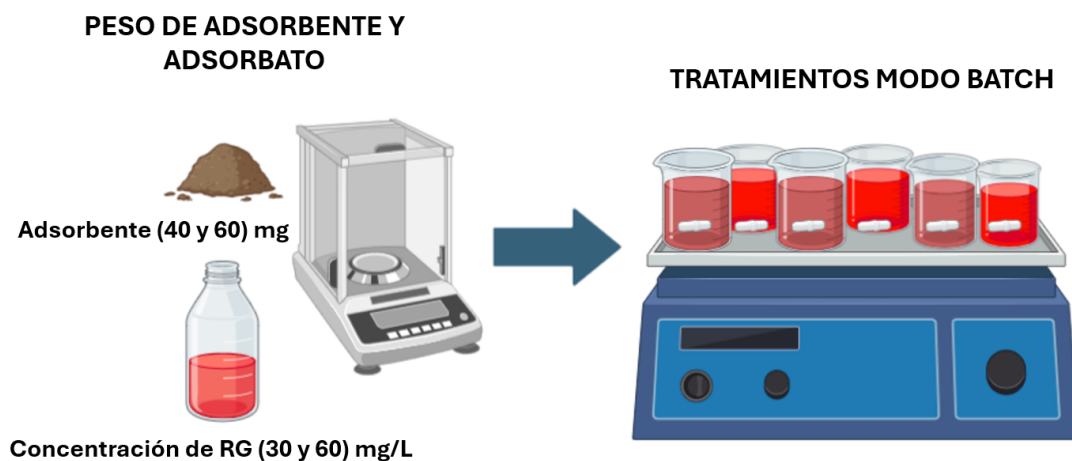
seco a la mezcla. En los tratamientos, fue utilizado concentraciones del adsorbente (BCAM) de (20 y 60) mg/L. A continuación, se añadió gota a gota 1 L de NaOH 1 M para neutralizar la solución ácida y se dejó reposar durante 24 h. Luego, se enjuagó la mezcla con agua destilada para eliminar el exceso de disolvente y se secó el bagazo modificado en un horno a 60 °C durante 24 h. La Figura 10, muestra un flujograma del proceso descrito anteriormente.

Figura 10.

Activación química y térmica de los adsorbentes (BCA, P, Q)



Se realizaron tratamientos en modo batch, modificando las concentraciones del adsorbente (40 y 60) mg/L y del colorante (30 y 60) mg/L, así como el tiempo de contacto (60 y 120) min. Los tratamientos modo Batch se llevaron a cabo con una agitación de 300 RPM en un agitador magnético, marca Velp Scientifica. (Figura 11).

Figura 11.
Tratamientos modo Batch


Tras la experimentación, se procedió el llenado de datos en la siguiente tabla, donde se analizó la absorbancia promedio del ensayo por triplicado. (Tabla 8).

Tabla 8.
Datos de la experimentación

Tiempo,	Absorbancias			Absorbancia,	C_R , mg/L	C_0/C_F	DS	CV	R %
min	1	2	3	$\bar{x}$					
0									
10									
20									
30									
60									
120									

Donde:

C_R : Concentración residual de los tratamientos en cada tiempo dado, mg/L

C_0/C_F : Relación adimensional concentración inicial sobre la concentración final.

DS: Desviación estándar de los tratamientos por triplicado

CV: Coeficiente de variación, %

R: Remoción, %

Una vez conocida la capacidad de adsorción del adsorbente, se pudo calcular la eficiencia de remoción, R. Esto se hizo comparando la concentración inicial con la concentración a un tiempo determinado o concentración final.

La eficiencia de remoción se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia de remoción (\%)} = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100$$

Donde:

- C_o : Concentración inicial, mg/L
- C_f : Concentración final, mg/L

Este cálculo proporciona el porcentaje que ha sido removido por el adsorbente, cuanto mayor sea la eficiencia de remoción, más efectivo será el proceso de adsorción.

C. Determinar las condiciones experimentales óptimas para remover el colorante RG modificando la dosis del bagazo de caña de azúcar modificado, así como el tiempo de contacto utilizando métodos estadísticos avanzados, como el análisis de varianza (ANOVA).

Para determinar las condiciones óptimas para remover el colorante RG, se procesaron los datos mediante el software DESIGN EXPERT. Los datos obtenidos se analizaron mediante pruebas de ANOVA para determinar la influencia y significancia de cada variable en la eficiencia del proceso de adsorción.

D. Evaluar la eficiencia de adsorción del colorante RG sobre el bagazo de caña de azúcar modificado por adición de P y Q presente en muestras sintéticas, mediante

análisis cinético de adsorción (tiempo en equilibrio) e isothermas de adsorción de Freundlich y Langmuir para describir el proceso, estimando el tipo de interacciones formadas.

Se realizó la correlación de los resultados de adsorción para un análisis cinético de pseudo primer orden y pseudo segundo orden, donde permitió conocer la constante cinética y predecir la adsorción entre el adsorbente y adsorbato (RG). Previamente se determinó las capacidades de adsorción (q_t), cantidad adsorbida en el tiempo, con la siguiente ecuación:

$$q_t = \frac{(C_o - C_t) \times V}{m} \quad (3)$$

Donde:

- C_o : concentración inicial, mg/L
- C_t : concentración en el tiempo, mg/L
- V : volumen de la solución, L
- m : masa del adsorbente, g

Las gráficas de cinética se obtienen a través de las capacidades de adsorción con relación al tiempo de contacto, los modelos de las cinéticas de adsorción son:

- **Modelo cinético de pseudo primer orden**

En base al modelo cinético de Lagergren, sugirió la ecuación de velocidad que permitió hallar la adsorción entre un medio líquido que se basa en la capacidad de un sólido, basado en cada ion del colorante se le denomina un lugar de adsorción en el adsorbente (Torres y Vanegas, 2018), la ecuación 4 utilizada para el análisis

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} t \quad (4)$$

Nota. Adaptado de Castro et al. (2013).

Donde para la ecuación (4) se considera:

- q_e : capacidad de adsorción del soluto sobre el adsorbente en equilibrio, mg/g
- q_t : capacidad de adsorción del soluto sobre el adsorbente en el tiempo, mg/g
- k_1 : Constante cinética del modelo de pseudo primer orden, min^{-1}
- t : tiempo de contacto, min

La constante de cinética de pseudo primer orden es la pendiente hallada de la gráfica (Torres y Vanegas, 2018).

- **Modelo cinético de pseudo segundo orden**

Para el modelo de pseudo segundo orden, se tomó en cuenta a H_0 , en la ecuación describe las interacciones químicas dadas con el adsorbato y adsorbente, considerando que la adsorción es directamente proporcional a las concentraciones de los sitios activos (Torres y Vanegas, 2018), la ecuación es:

$$\frac{t}{q_t} = \log(q_e) \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (5)$$

Nota. Adaptado de Castro et al. (2013).

Donde para la ecuación (5) se considera:

- q_e : Capacidad de adsorción del soluto sobre el adsorbente en equilibrio, mg/g
- q_t : Capacidad de adsorción del soluto sobre el adsorbente en el tiempo, mg/g
- k_2 : Constante cinética del modelo de pseudo segundo orden, $\text{g/mg} \cdot \text{min}$
- t : tiempo de contacto, min

La constante cinética de pseudo segundo orden (K_2), se determina:

$$Q_e = 1/ \text{pendiente de la gráfica} \quad (6)$$

Una vez hallada la Q_e , se emplea la siguiente ecuación:

$$k_2 = \left(\frac{1}{(q_e^2)} \times \text{intercepto} \right) \quad (7)$$

Se evaluó la eficiencia de adsorción del colorante RG sobre el bagazo de caña de azúcar modificado. Para ello, se realizaron los análisis cinéticos de adsorción para determinar el tiempo en equilibrio y se ajustaron los resultados experimentales a los modelos matemáticos de Freundlich y Langmuir.





CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

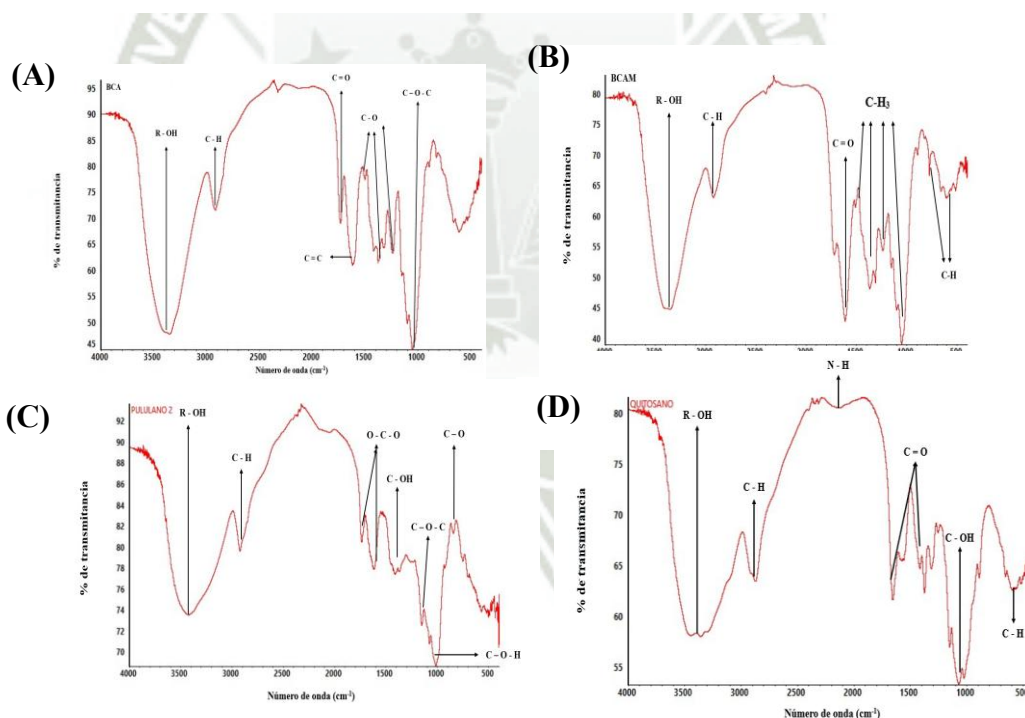
4.1. Determinación de las características de los adsorbentes mediante tratamiento térmico, con el fin de mejorar sus propiedades fisicoquímicas y de superficie mediante el cálculo de área superficial específica S_{BET} , análisis elemental, CHNS y pruebas preliminares modo batch.

4.1.1. Identificación de grupos funcionales mediante análisis F-TIR

Los resultados del análisis cualitativo para determinar parte de la estructura química de los adsorbentes en estudio BCA, BCAM, P y Q, se muestran en la Figura 12.

Figura 12.

Espectros de los adsorbentes en estudio identificando sus grupos funcionales mediante F-TIR: (A) espectro típico BCA, (B) espectro típico BCAM, (C) espectro típico de P y (D) espectro típico de Q.



La Figura 12A (BCA), muestra una primera banda a 3358 cm^{-1} , estas son atribuidas a las bandas de absorción característicos en los grupos de OH (alcoholes) de polisacárido y OH (fenoles) de las ligninas. (Sailema y Venegas, 2024). La banda que se encuentra a 2919 cm^{-1} , corresponde a vibraciones de los grupos C – H, estos enlaces se encuentran por lo

general en la hemicelulosa y celulosa. (Bermello et al., 2008). La banda encontrada a 1736 cm^{-1} , es atribuida a las vibraciones de estiramiento de los enlaces $\text{C}=\text{O}$, dados en los grupos esteres del grupo carboxílico de los ácidos ferúlico. (Sailema y Venegas, 2024). Asimismo, a 1617 cm^{-1} , se tiene una señal asociada a las vibraciones del enlace $\text{C}=\text{C}$, ubicado en el plano del anillo aromático presentes en las ligninas. (Yue et al., 2015). Las señales presentes en el rango $(1374 - 1245)\text{ cm}^{-1}$, son dadas por las vibraciones de los enlaces $\text{C}-\text{O}$ fuera del plano de los grupos arilo de las ligninas. Finalmente, en 1056 cm^{-1} , se presenta una banda que puede estar dadas por las vibraciones de estiramiento asimétrico de los enlaces $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ (éter glucosídico) en el anillo de piranosa (Mandal y Chakrabarty, 2011).

En la Figura 12B (BCAM), se observa una banda característica a 3358 cm^{-1} , típico de grupos R-OH , se estima que ocurren estiramientos y tensiones presentes en la estructura de la celulosa (Vargas et al., 2017). Posteriormente, sigue una banda a 2930 cm^{-1} , se estima la generación de estiramiento de enlaces $(\text{C}-\text{H})$ (Lu y Hsieh, 2010), adicionalmente se observa una banda muy pronunciada a 1728 cm^{-1} , característica de grupos $\text{C}=\text{O}$, estos se consideran enlaces de las cetonas no conjugadas que se encuentran en la hemicelulosa (Morán et al., 2008), además, dentro de los rangos de las bandas $(1374 - 1158)\text{ cm}^{-1}$, se forman los enlaces de $\text{C}-\text{H}_3$, característico por desaparecer la celulosa del espectro, infiriéndose la eliminación de la hemicelulosa del bagazo de caña de azúcar (Vargas et al., 2017). Las bandas restantes $(708\text{ y }606)\text{ cm}^{-1}$, representan grupos cuyo enlace es de $\text{C}-\text{H}$, se estima que corresponden a hidrógenos aromáticos de la lignina (López et al., 2016).

El resultado en estos dos espectros obtenidos (12A-BCA y 12B-BCAM), muestran la evidencia de un cambio de estructura una vez que la muestra es sometida a procesos térmicos, en el BCAM, esta cambia significativamente, aparecen y se intensifican grupos

C - H₃, los cuales no existían en la muestra cruda (BCA), se estima que la estructura celulósica se abre por acción de la temperatura, exponiendo estos grupos y generando una superficie mucho más reactiva para el proceso adsorptivo posterior.

La Figura 12C (P), muestra una primera banda a 3429 cm⁻¹, este rango es característico de grupos R - OH, donde ocurren vibraciones de estiramientos, común en las estructuras de los polisacáridos. Seguidamente, se presenta una banda a 2927 cm⁻¹, correspondiente a las vibraciones de los enlaces de C - H, del grupo de metilo, en el pico (1743- 1628) cm⁻¹, este valor representa vibraciones de estiramientos O - C - O en el P. A 1418 cm⁻¹ se encuentra una banda característica de enlaces de C - OH, con un estiramiento del enlace C - O - C a 1157 cm⁻¹, seguido de una banda a 1081 cm⁻¹, la cual está dada por las vibraciones de C - O - H. Finalmente, a 848 cm⁻¹, se encuentran vibraciones relacionadas a enlaces C - O. (Belda, 2023).

La Figura 12D (Q), muestras bandas características de grupos O - H, se estima que está directamente atribuido a la conformación y concentración molecular de las cadenas de polisacáridos (Sócrates, 2001). Asimismo, a 2876 cm⁻¹, se presentan vibraciones de los enlaces C - H. (Sierra et al., 2013), la banda presente a 2139 cm⁻¹ corresponde a la correlación de enlaces de N - H (Qi et al., 2004). Las bandas (1659 - 1320) corresponde a enlaces C = O, estos atribuidos al estiramiento de los grupos carbonilo (Liu & Zhang, 2015). A 1156 cm⁻¹ se presentan bandas que corresponden a las vibraciones, donde involucran el estiramiento de los grupos alcohólicos C - OH, se estima que son propiedades de los polisacáridos. (Kim et al., 2012). La última banda representativa encontrada (896 cm⁻¹), suministra información acerca de la deformación de los enlaces de C - H. (Orjuela et al., 2023).

De estos dos últimos espectros correspondientes al pululano-P (12C) y quitosano-Q (12D), se puede inferir un gran aporte de superficie reactiva, para ser usados como

precursores potenciales en procesos adsorptivos debido a la presencia de grupos como N-H, C=O, C-OH y R-OH.

4.1.2. Análisis elemental CHNS

Se analizó la composición elemental de los adsorbentes en estudio (BCAM, Q y P), a través de un proceso de combustión y posterior separación cromatográfica (Tabla 9).

Tabla 9.

Promedio de los valores obtenidos del análisis elemental de los adsorbentes en estudio.

Adsorbente	N, %	C, %	H, %	S, %	Total, %
BCAM	1.86 ± 0.05	42.03 ± 0.80	4.68 ± 0.01	0.14 ± 0.01	48.71
P	0.55 ± 0.04	38.17 ± 2.60	5.93 ± 0.43	0.18 ± 0.01	44.83
Q	6.76 ± 0.12	41.47 ± 0.72	5.35 ± 2.05	ND	53.58

ND: No Detectable L_{DD-S} : 0.05 %

El adsorbente BCAM, reportó valores de (1.86 ± 0.05 , 42.03 ± 0.80 , 4.68 ± 0.01 , 0.14 ± 0.01) %, para N, C, H y S respectivamente, dichos resultados se encuentran dentro de los márgenes de otros estudios, tales como Galindo et al., (2023), quienes obtuvieron un valores de; 0.18 % de N, 46.9 % de C, 5.49 % de H y sus valores de S fueron despreciables, situándose dentro de los valores habituales presentes en residuos lignocelulósicos, el escaso contenido de N y S en el bagazo de caña de azúcar, lo convierte en un recurso adecuado para procesos termoquímicos, como los tratamientos hidrotermales, dado que la mínima presencia de estos componentes disminuye la emisión de gases nocivos, incluidos los óxidos de nitrógeno y azufre, así como otros compuestos.

Los resultados obtenidos durante el análisis de P, reportaron valores promedios de: (0.55 ± 0.04 , 38.17 ± 2.60 , 5.92 ± 0.43 y 0.18 ± 0.01) % para N, C, H y S respectivamente. Qian et al., (2020), reportaron un análisis elemental de la cáscara de arroz, paja de maíz, paja de arroz, elote, etc. De los resultados la materia prima que más se asemejó a los promedios

fue la cascarilla de arroz con los siguientes valores: 51.91 % de C, 3.17 % de H, 0.72 % de N y 0.03 % de S, en un proceso de pirólisis de la muestra a 350 °C, el contenido de carbono llega a incrementarse de modo progresivo conforme se elevaba la temperatura durante el proceso de pirólisis. (Qian, 2020).

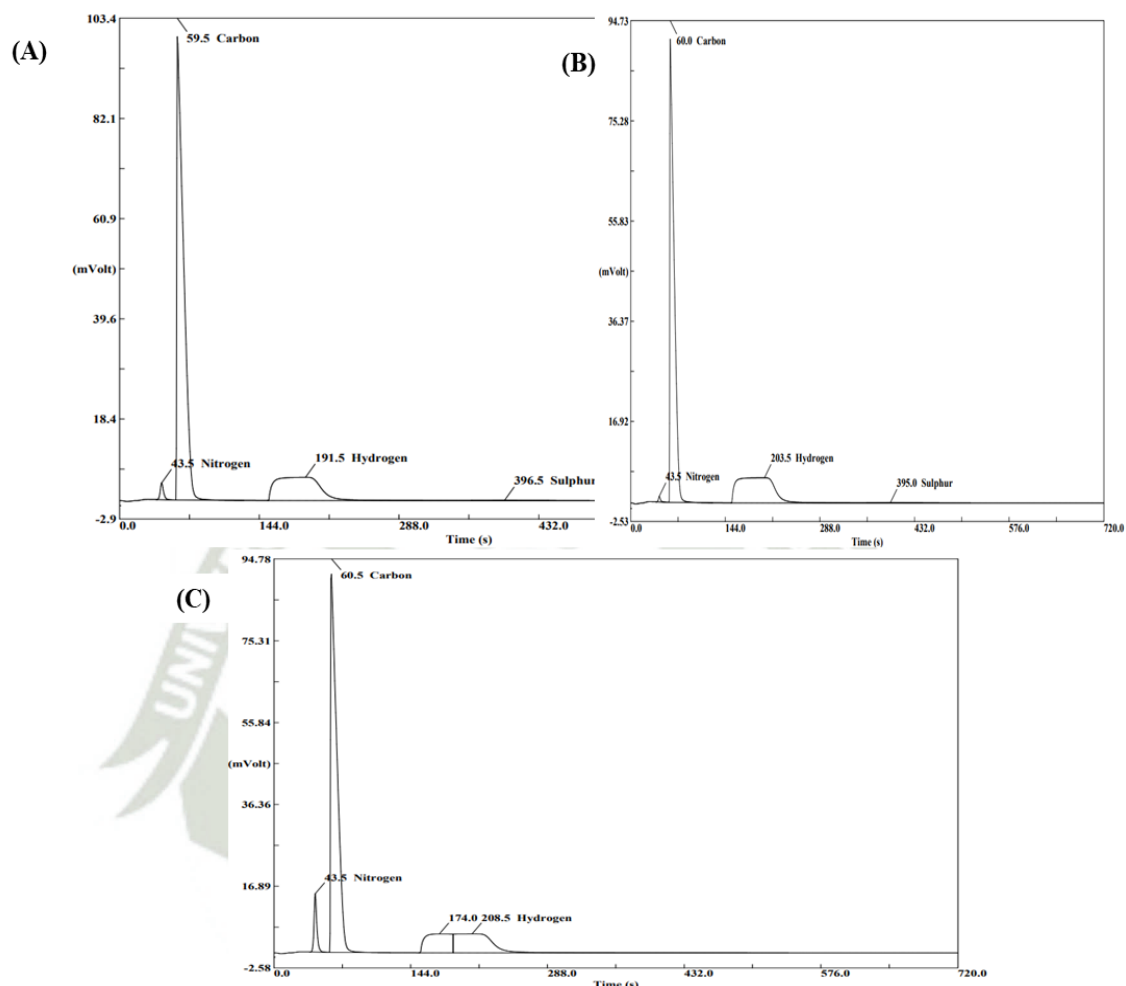
Los resultados obtenidos de Q fueron los siguientes: (6.76 ± 0.12 , 41.47 ± 0.72 , 5.35 ± 2.05 y ND) % para N, C, H y S respectivamente. Dichos promedios coinciden con los resultados de Heras (2023), quien obtuvo 7.8 % de N, 42.1 % de C y 5.4 % de H, Estos valores indican la presencia de numerosos grupos amino disponibles, los cuales permiten la unión con grupos aldehído para la formación de enlaces tipo imina. Tras la modificación con aldehídos, se observó un incremento significativo en la relación H, lo cual confirma la incorporación efectiva del compuesto (Heras, 2023).

Este análisis elemental de todos los adsorbentes en estudio, confirma y complementa el análisis F-TIR, con la presencia de grupos que contiene dichos elementos tales como C=O, N-H, entre otros.

La Figura 13, muestra los cromatogramas típicos de los adsorbentes en estudio (BCAM, P y Q), de acuerdo con el tiempo se identificaron los elementos (CHNS), donde todos los adsorbentes poseen C, H y N, en diferente medida, a diferencia del Q el cual no posee azufre.

Figura 13.

Cromatogramas típicos del análisis elemental a los adsorbentes: (A), BCAM, (B), P y (C) Q.

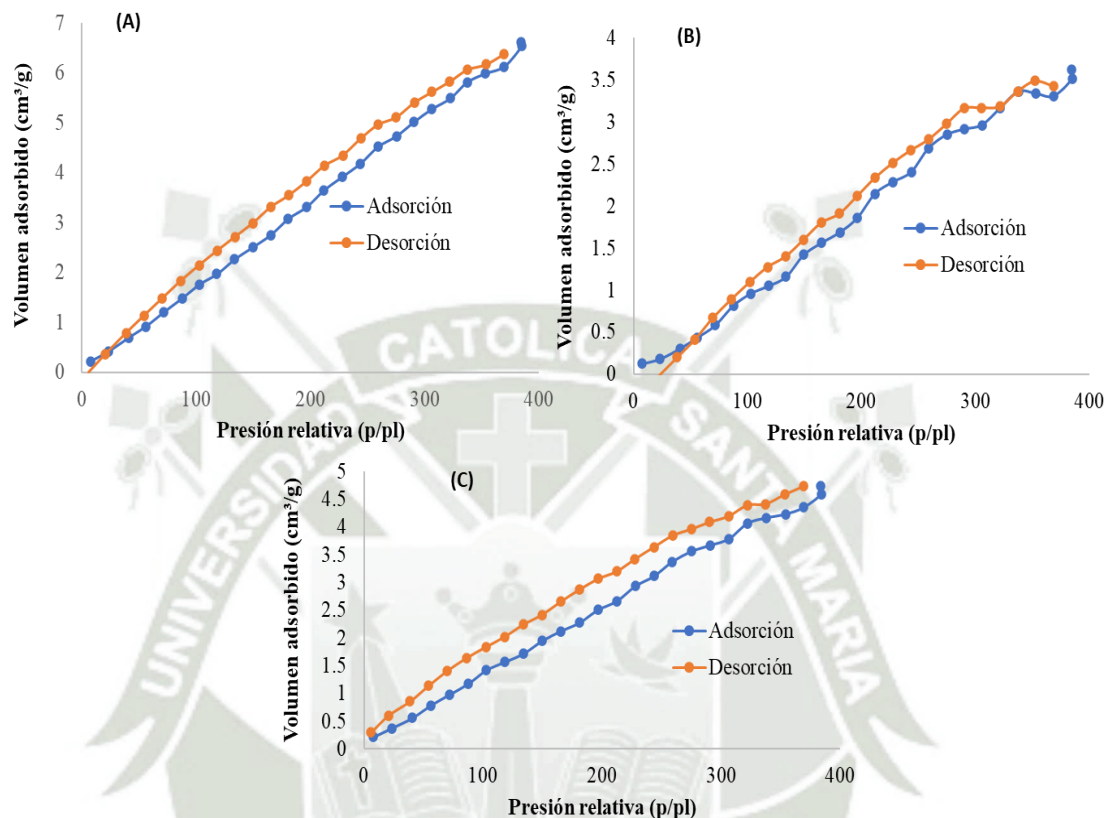


4.1.3. Análisis de superficie (fisisorción) S_{BET} .

Se realizó el análisis de superficie a los adsorbentes en estudio (BCAM, P y Q), obteniendo las isothermas de adsorción y desorción correspondientes a través del método de Brunauer-Emmett-Teller (S_{BET}) a 77K con N_2 (Figura 14).

Figura 14.

Isotermas de adsorción y desorción de los adsorbentes en estudio: A) BCAM, B) P y C) Q



La Figura 14, demuestra que la forma de las isotermas de los adsorbentes estudiados coinciden un poco a las isotermas tipo IV según la clasificación IUPAC, comparándose con la Figura 4 , donde la adsorción ocurre en la superficie de poro, adicionalmente, se observa la presencia de histéresis positiva para el proceso de desorción Thommes et al. (2015), indicando que la desorción ocurre a presiones más bajas y con posibilidad de presencia de estructuras mesoporosas (poros de 2.5 nm o más).

La Tabla 10 muestra el resultado del análisis de superficie de los adsorbentes en estudio según el modelo BET.

Tabla 10.

Resultados obtenidos del análisis de superficie aplicado a los adsorbentes en estudio según el modelo BET

Adsorbentes		Volumen de poro, cm ³ /g	S_{BET} , m ² /g	Ancho de poro, nm
BCAM	$\bar{x}$	0.01	13.42	3.54
	CV	24.05 ± 0.00	2.07 ± 0.28	0.00 ± 0.00
Q	$\bar{x}$	0.01	13.42	3.74
	CV	0.10 ± 0.00	5.97 ± 0.8	7.51 ± 0.28
P	$\bar{x}$	0.01	12.88	3.54
	CV	12.12 ± 0.00	11.67 ± 1.5	0.00 ± 0.00

De los resultados obtenidos realizados por duplicado (Tabla 10), se observa que el BCAM obtuvo un $S_{BET} = 13.42 \text{ m}^2/\text{g}$. Comparando este valor con el reportado por Colpas et al. (2017), donde realizaron tratamientos para carbonización a 400 °C (activación química), el valor de este estudio se encuentra muy por debajo ($S_{BET} = 378.9 \text{ m}^2/\text{g}$) con un añadido de peróxido de hidrogeno a una relación de 0,02 y 0,1p/p°, esto debido a que se favorece la hidrólisis de la lignina residual que permanece tras la carbonización, lo que resulta en una mejora de las propiedades texturales, tales como una mayor área superficial específica y una porosidad incrementada. (Gao et al., 2016). El Q mostró un $S_{BET} = 13.42 \text{ m}^2/\text{g}$, en otros estudios como en el de Saborit (2015), se reportó un $S_{BET} = 10.93 \text{ m}^2/\text{g}$, por debajo al obtenido en este estudio. Se estima que en este proceso la muestra de quitosano se encontraba liofilizada y sometida a una desgasificación durante 24 h a una temperatura de 80 °C. Mientras que en otros estudios como de Hinojoza (2014), Reyna (2018) fue de (21.68 y 28.29) m²/g respectivamente, además obtuvieron una histéresis en la isoterma de adsorción – desorción tipo II, identificado como no poroso y macroporoso (IUPAC, 1982). El S_{BET} del P fue de 12.88 m²/g, generalmente dicho biopolímero no se utiliza comúnmente como adsorbente por lo cual no se hicieron estudios de fisorción.

El BCAM obtuvo un volumen de poro igual a $0.01 \text{ cm}^2/\text{g}$. Blanco et al., (1999), reportaron volúmenes de poro inferior a $0.2 \text{ cm}^3/\text{g}$, considerándolos mesoporos y en ensayos a 300°C el volumen de poro fue de $0.2 \text{ cm}^3/\text{g}$, a este valor son considerados microporosos, mientras que a 500°C el volumen de poro obtenido es de $0.6 \text{ cm}^3/\text{g}$. Mientras del Q, obtuvo un volumen de poro igual a $0.01 \text{ cm}^2/\text{g}$, en el estudio de Saborit (2015) alcanzó el volumen de poro a $0.011 \text{ cm}^3/\text{g}$, debido a que el quitosano se encontró por un proceso de liofilización y a un tratamiento térmico de desgasificación de 24 h a 80°C .

En cuanto al ancho de poro, en la presente investigación se obtuvo 3.54 nm del (BCAM), en el estudio de Vargas et al. (2015), determinaron que el ancho de poro del bagazo, 53 nm , este resultado es debido al tratado donde se tamizó a 0.8 mm , aplicado con ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 0.1% , sometido a 150°C por 30 min. Un tamaño de poro entre (2 – 50) nm, es considerado “mesoporo” (IUPAC, 1982) y Liu et al. (2022). El ancho de poro promedio de los ensayos del P fue de 3.54 nm , en otros estudios, el ancho de poro fue de 274 nm debido a que se trató con un agregado de colágeno de 50 mg , siendo agitado a 40°C a 30 min, posteriormente se sometió a la desgasificación (Tören, & Mazari, 2024). En cuanto al Q se obtuvo un valor de 3.74 nm , en el estudio de Gutiérrez et al. (2024), obtuvieron un ancho de poro de 172.83 nm , ya que fue tratado químicamente con tripolifosfato de sodio a 0.1% de concentración con un pH de 5.5.

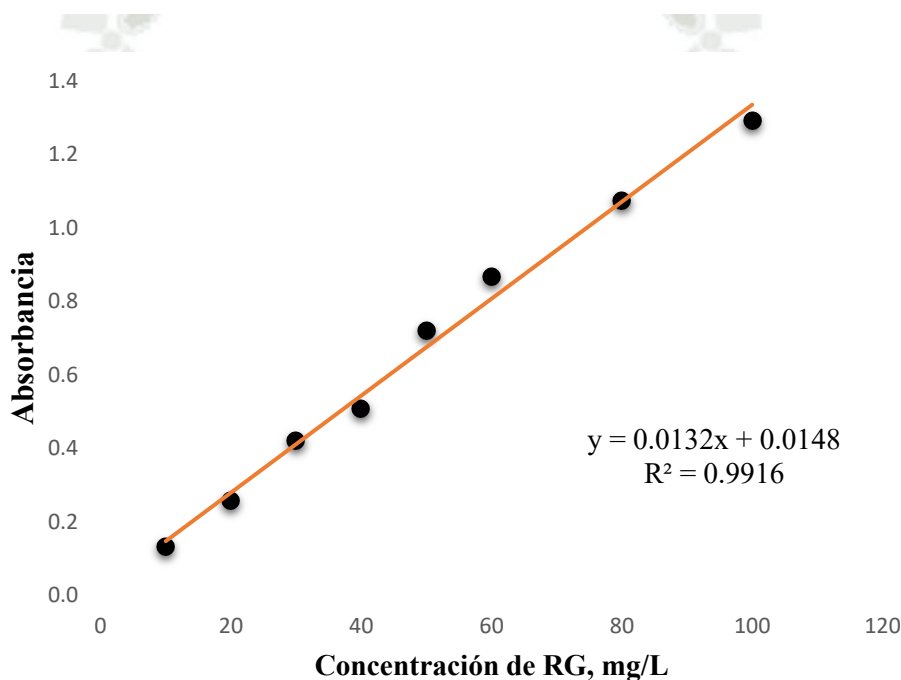
Determinación de la curva de calibración del RG.

En el Anexo 12, se presenta el barrido espectral realizado al RG, en el cual se observa la determinación de la $\lambda_{\text{max-RG}} = 494 \text{ nm}$ (representado por la línea de color azul).

En el Anexo 13, se presentan los resultados de la calibración, donde se muestran las corridas realizadas por triplicado. La tendencia fue lineal con muy poca dispersión en un rango comprendido entre de 0.13 a 1.29 unidades de absorbancia (10 - 100) mg/L. Se obtuvo un $R^2 = 0.9916$, la Figura 15, muestra estos resultados.

Figura 15.

Recta de calibración del RG mediante análisis UV-Vis



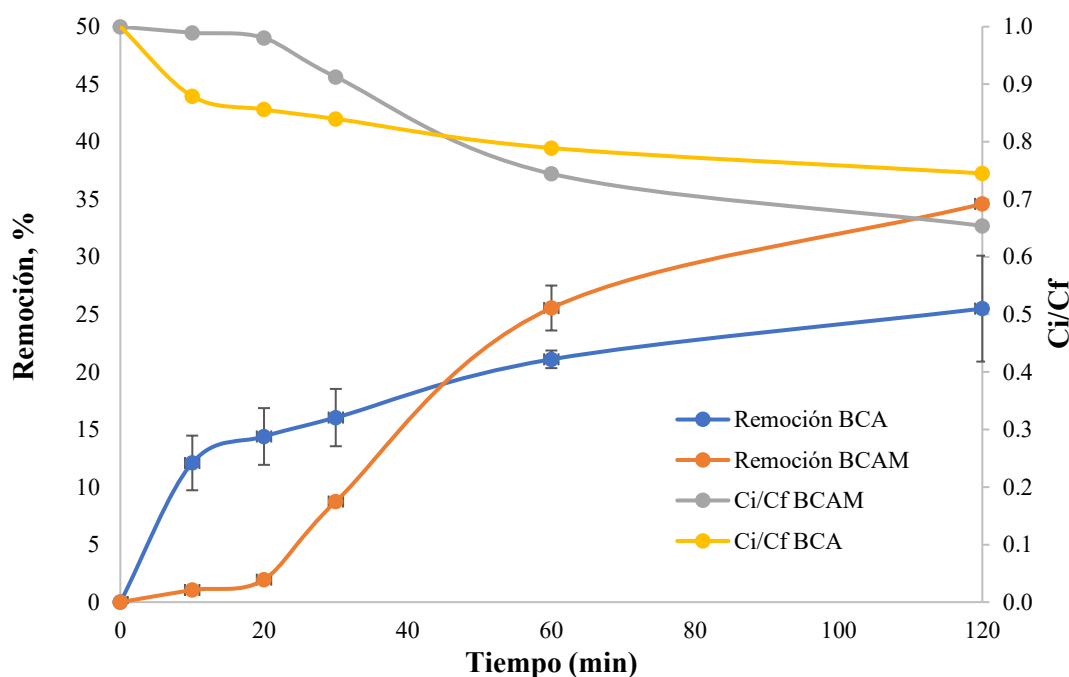
4.1.4. Estudio exploratorio de remoción de RG sobre el BCA y BCAM

La Figura 16 muestra los resultados obtenidos de remoción del RG, sobre el BCA y BCAM respectivamente bajo las siguientes condiciones: $C_{0-RG} = 30$ mg/L, $V = 300$ RPM, $C_A = 60$ mg, a diferentes tiempos de contacto. Este enfoque buscó evaluar la interacción entre el adsorbente y colorante en las condiciones especificadas. Los datos experimentales se encuentran en anexos de las tablas Anexo 14 y Anexo 15.

Con los datos obtenidos, se presenta la gráfica de remoción de BCA y BCAM, y la disminución de las concentraciones inicial sobre las finales en base al tiempo (Figura 16)

Figura 16.

Remoción de RG sobre de BCA y BCAM y concentración residual expresada en C_i/C_f



Como máxima remoción de BCA de 25.5 % a los 120 min. Asimismo, sobre las concentraciones disminuyen de acuerdo con el tiempo de contacto, la concentración mínima obtenida es de 0.75. Sobre BCAM se obtuvo una desviación estándar en la mayor absorbancia al minuto 120 con 0.02 con un coeficiente de variación de 5.34 %, indicando una variabilidad moderada. Son resultados consistentes ya que existen fluctuaciones debido a los factores de la experimentación o a la heterogeneidad del material. Estos valores indican que BCAM presenta una variabilidad moderada. La mayor remoción de presente es de 34.6 % en el minuto 120, donde presenta un incremento abrupto entre los minutos 30 de 8.74 %. Además, la concentración final (relación C_i/C_f) fue de 0.65, teniendo una relación con la remoción del BCAM con RG. Estos hallazgos muestran que

el tratamiento térmico puede introducir cierta variabilidad moderada en el rendimiento del bagazo

Sobre la Figura 16, se puede observar que la remoción sobre el BCAM aumenta en base al tiempo, en los 10 primeros minutos se obtuvo una remoción de 1.06 %, mientras que, en 120 min, la remoción fue de 34.6 %, siendo el valor más alto dentro de los tiempos establecidos. En el estudio de Torres y Vanegas (2018), realizaron tratamientos de remoción con bagazo de caña de azúcar activado químicamente por ácido sulfúrico (H_2SO_4) y cloruro de zinc ($ZnCl_2$), donde los resultados de remoción obtenidos fueron de (30 y 36) % en los tiempos de (60 y 120) min en el azul brillante FCF, debido a que el colorante azul brillante FCF establece una unión preferencial con los grupos funcionales hidroxilo y carboxilo presentes en los polímeros naturales que poseen carga positiva. Esta interacción ocurre principalmente a través de fuerzas electrostáticas, facilitando así el proceso de adsorción (Torres y Vanegas, 2018). Por otro lado, se observa la remoción promedio de los tratamientos que se dieron por triplicado respecto al colorante RG, la remoción máxima del BCA fue está en los 120 min con una eficiencia de remoción de 25.04 %, la menor remoción fue de 12.09 % a los 10 min, seguido de (14.39, 16.04 y 21.1) % en (20, 30 y 60) min respectivamente. Hamzah et al. (2022), evaluaron la efectividad del bagazo de caña de azúcar sin ser tratado térmicamente, obteniendo resultados de 34.7 % de remoción en 120 min y 30 % de remoción a los 60 min, utilizando el colorante rojo Remazol bajo las siguientes condiciones experimentales de: $C_A = 150$ mg (adsorbente), volumen de la solución igual a 100 mL y $C_o = 10$ mg/L de colorante (adsorbato) (Hamzah et al., 2022). El porcentaje de remoción fue relativamente bajo ya que la superficie del bagazo de caña, antes del tratamiento, presenta poros lisos y reducidos, lo que conduce a una superficie reducida para el proceso adsorbtivo. (Kumar et al., 2021).

La Tabla 11, muestra los valores promedio de absorbancia y el porcentaje de remoción de un contaminante antes y después de aplicar un tratamiento con dos tipos de adsorbente: BCA y BCAM. Se observa que ambos adsorbentes reducen la absorbancia, indicando una disminución del contaminante, y logran remociones significativas, siendo el BCAM el que presentó un mayor porcentaje de eliminación (34.6%) en comparación con BCA (25.5%) en un tiempo de 120 min.

Tabla 11.

Comparación antes y después del bagazo sobre el colorante RG

Adsorbente	Antes del tratamiento		Después del tratamiento	
	Absorbancia $\bar{x}$	Remoción (%)	Absorbancia $\bar{x}$	Remoción (%)
BCA	0.51	0.00	0.38	25.5
BCAM	0.51	0.00	0.38	34.6

Nota. BCA = Bagazo de caña de azúcar, BCAM, bagazo de caña de azúcar modificado térmicamente

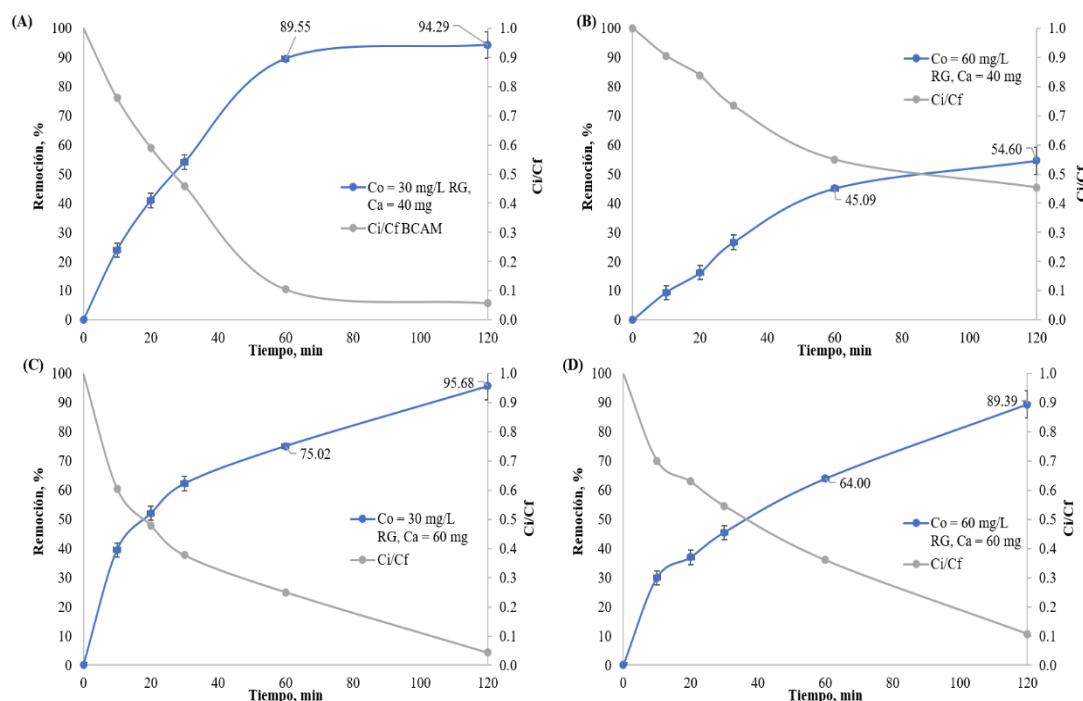
4.2. Análisis de la efectividad del adsorbente en estudio sobre el colorante RG mediante la potencial sinergia con pululano y quitosano a diferentes proporciones usando sistemas de tratamiento modo batch.

Los promedios de los resultados a los tratamientos realizados, se analizó la efectividad de los adsorbentes sobre el colorante RG a diferentes proporciones utilizando el modo batch.

La Figura 17, corresponde a los datos de las remociones en los anexos, donde se observa los datos experimentales realizados por triplicado.

Figura 17.

Efecto de la remoción de RG considerando la concentración de adsorbente C_A y la C_{oRG} : (A) $C_A = 40$ mg y $C_{oRG} = 30$ mg/L, (B) $C_A = 40$ mg y $C_{oRG} = 60$ mg/L, (C) $C_A = 60$ mg y $C_{oRG} = 30$ mg/L y (D) $C_A = 60$ mg y $C_{oRG} = 60$ mg/L



De la Figura 17A, el tiempo total de los tratamientos fue durante 120 min en los cuales se tomaron alícuotas a los tiempos (10, 20, 30, 60, 120) min, en dichos tiempos las remociones fueron graficadas donde el equilibrio se da en el minuto 60, la curva presenta una menor variación en el siguiente tiempo. La remoción máxima obtenida es de 94.29 ± 3.46 %, mientras que, en el estudio de Contreras et al. (2013), el adsorbente a base de bagazo de caña de azúcar con 0.5 g sometida a la impregnación de ácido fosfórico alcanzó la remoción de 98.65 % en el azul de metileno a una concentración de 10 mg/L. (Contreras et al., 2013).

Sobre la Figura 17B, donde los datos experimentales con 40 mg de C_A sometidas a 60 mg/L de RG, a medida del tiempo se muestra una mayor remoción, donde el pico más alto fue en el minuto 120, con una remoción de 54.6 ± 2.55 %. Además, se observa que

la gráfica de la remoción hubo un incremento a medida del tiempo. En el estudio de Hamzah et al. (2023), realizaron tratamientos donde obtuvieron un 98.1 % de remoción a los 120 min. En ambas muestras experimentan una adsorción a los 30 min, lo que llevó al equilibrio en el minuto 60. Dicha remoción fue dada en los parámetros de 150 mg de adsorbente con una concentración de 10 mg/L de rojo Remazol. (Hamzah et al., 2023). Los datos experimentales con 60 mg de adsorbente sometidas a 40 mg/L de RG, a medida del tiempo se muestra una mayor remoción, donde el pico más alto fue en el minuto 120, con una remoción de 95.68 %. (Anexo 17)

La Figura 17C corresponde a los datos del Anexo 18, se observa los datos experimentales con 60 mg de adsorbente a 40 mg/L de RG, donde la mayor remoción es 95.68 ± 2.99 % en el minuto 120, donde se observa que a medida del tiempo habrá remoción Estudios como el de Hamzah et al. (2023), hicieron tratamientos con una concentración de 10 mg/L de rojo Remazol con 150 mg de adsorbente alcanzó a los 60 y 120 minutos 98.1% y 94.4% de remoción respectivamente en un medio ácido (pH 4), en condiciones de pH ácido, la disponibilidad de protones se incrementa, lo que favorece la protonación de los grupos amino presentes en el quitosano, generando grupos cargados positivamente. Esta situación promueve una mayor atracción electrostática entre el quitosano y los colorantes aniónicos, facilitando así una mayor capacidad de adsorción del tinte. En medio ácido, dichos grupos adquieren protones, mientras que en soluciones acuosas neutras conservan su estado sin carga, permitiendo la captación de iones con carga negativa. En este contexto, ocurre un proceso de intercambio iónico basado en fuerzas electrostáticas entre las moléculas de quitosano presentes en la superficie de la caña de azúcar y las del colorante rojo Remazol. (Hamzah et al., 2023).

De la Figura 17D, corresponde al Anexo 19, la absorbancia y la remoción se encuentra indirectamente relacionada, ya que a mayor remoción se presenta una menor una

absorbancia, la mayor remoción es de $89.39 \pm 3.17 \%$, en otros estudios de remoción fue de 48% aproximadamente en adsorbentes entre 0.5 y 1 mm en el minuto 120 en un medio ácido (pH 2), mientras que en los adsorbentes que se encuentren menores a 0.5 mm un 50% de remoción en el medio ácido mencionado, estos tratamientos fueron realizados con el azul brillante de FCF. El adsorbente estuvo activado con H_2SO_4 donde llegan a los 1140 min al punto de equilibrio, pasado este intervalo, la reducción en la concentración de azul brillante fue apenas del 1%, un cambio mínimo (Torres y Vanegas, 2018).

La Tabla 12, presenta los resultados del tratamiento de un colorante utilizando diferentes concentraciones de adsorbente (40 y 60 mg) y dosis de colorante (30 y 60 mg/L). Se muestran los valores promedio de absorbancia antes y después del tratamiento, pasado los 120 min, junto con el porcentaje de remoción. Los datos indican que, en general, el tratamiento reduce significativamente la absorbancia, reflejando alta eficiencia en la eliminación del colorante, con remociones superiores al 54%, alcanzando hasta un 95.68% cuando se combina mayor concentración de adsorbente con menor dosis de colorante.

Tabla 12.

Comparación antes y después del adsorbente sobre el colorante RG

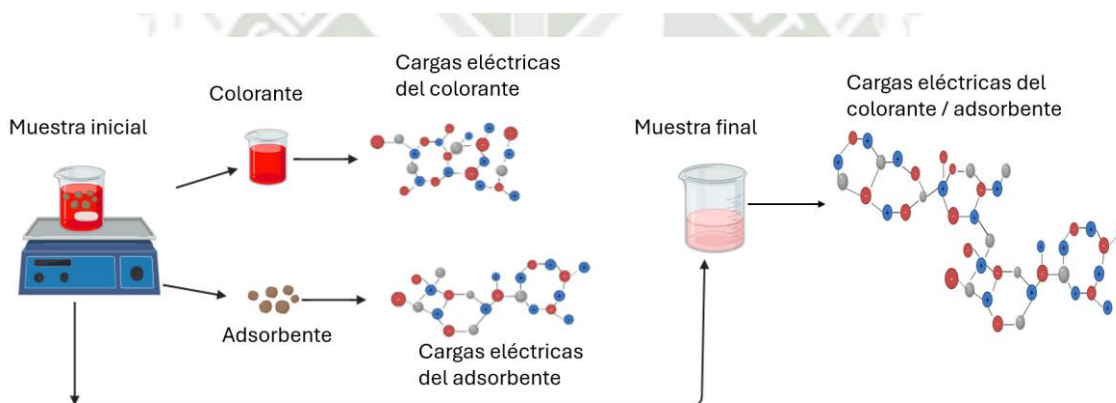
Concentración de adsorbente (mg)	Dosis de colorante (mg/L)	Antes del tratamiento		Después del tratamiento	
		Absorbancia	Remoción	Absorbancia	Remoción
		$\bar{x}$	(%)	$\bar{x}$	(%)
40	30	0.3	0.00	0.02	94.29
40	60	0.49	0.00	0.22	54.6
60	30	0.45	0.00	0.02	95.68
60	60	0.6	0.00	0.06	89.39

4.3. Determinación de las condiciones experimentales óptimas para remover el colorante RG modificando la dosis del bagazo de caña de azúcar modificado, así como el tiempo de contacto utilizando métodos estadísticos avanzados, como el análisis de varianza (ANOVA).

Mediante los tratamientos modo batch, las cargas de los adsorbentes y del adsorbato se presentaron de diferentes maneras, debido a que no poseen la misma cantidad de cargas eléctricas de igual forma en su estructura del adsorbato.

Figura 18.

Mecanismo de adsorción propuesto de la adsorción del RG sobre el BCAM-P-Q



Sobre la Figura 18, el esquema de los colores de las cargas eléctricas del colorante y adsorbente, de color azul son para aquellas cargas que adsorben al nucleófilo (aniones con pares de electrones no compartidos con la capacidad de ceder sus átomos deficientes). Por otro lado, las cargas de color rojo son las regiones donde mayor adsorbe en las regiones de electrófilos (iones positivos, aquellas moléculas que no presenten con átomos sin completar su octeto). Las moléculas de color gris son aquellas zonas o regiones que no poseen demasiadas cargas de electrones. Dichas cargas explican de manera referencial la distribución dimensional de las moléculas. Donde se observa el desprendimiento y unión de ciertas cargas en el mecanismo de adsorción aplicado. (Guediri et al., 2020) y (Kausar et al., 2023).

Tabla 13.

Resultados obtenidos de la aplicación del diseño experimental de cribado para la remoción de RG sobre BCAM-P-Q

Run	C _{ORG} mg/L	C _A , mg	T _c , min	R, %
1	60	60	60	63.11
2	60	60	60	64.32
3	60	60	60	64.61
4	30	40	60	89.04
5	30	40	60	89.6
6	30	40	60	90.17
7	30	60	60	75.5
8	30	60	60	74.56
9	30	60	60	75.11
10	60	40	120	54.62
11	60	40	120	53.17
12	60	40	120	56.05
13	30	60	120	95.81
14	30	60	120	95.58
15	30	60	120	95.78
16	30	40	120	94.18
17	30	40	120	94.63
18	30	40	120	94.24
19	60	40	60	44.76
20	60	40	60	45.4
21	60	40	60	45.16
22	60	60	120	89.68
23	60	60	120	89.11
24	60	60	120	89.48

De la Tabla 13, se observa el análisis de las varianzas de los tratamientos del proceso de remoción del colorante RG, realizado por triplicado. La adsorción máxima alcanzó el 95.81%, en el adsorbato de 30 mg/L con una dosis de 60 mg de adsorbente en el minuto 120. Por otro lado, se reporta que el menor valor fue de 44.76 % de remoción a una C_{oRG} = 60 mg/L, con una C_A = 40 mg del adsorbente y un tiempo t = 60 min, ante este análisis se infiere que el parámetro con una influencia mayor es la C_{oRG} según el software DESIGN EXPERT.

Tabla 14.
Análisis de varianza para la adsorción de RG sobre BCAM-P-Q

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Valor - F	Valor - p	
Model	32.31	7	4.62	2827.96	< 0.0001	significativo
A-	15.75	1	15.75	9653.02	< 0.0001	
Adsorbato						
B-	1.44	1	1.44	884.27	< 0.0001	
Adsorbente						
C-Tiempo	7.96	1	7.96	4880.11	< 0.0001	
AB	4.55	1	4.55	2787.31	< 0.0001	
AC	0.1985	1	0.1985	121.61	< 0.0001	
BC	2.39	1	2.39	1462.87	< 0.0001	
ABC	0.0106	1	0.0106	6.51	0.0213	
Pure Error	0.0261	16	0.0016			
Cor Total	32.33	23				

De la Tabla 14, indica que la tabla ANOVA, brindado por el software DESIGN EXPERT, se observa la significancia estadística por cada efecto de los 3 parámetros medidos con sus respectivas interacciones, AB, BC y AC, mostraron valores significativos (valor p) ya que son menores al 0.5 %. Así como por cada parámetro dado.

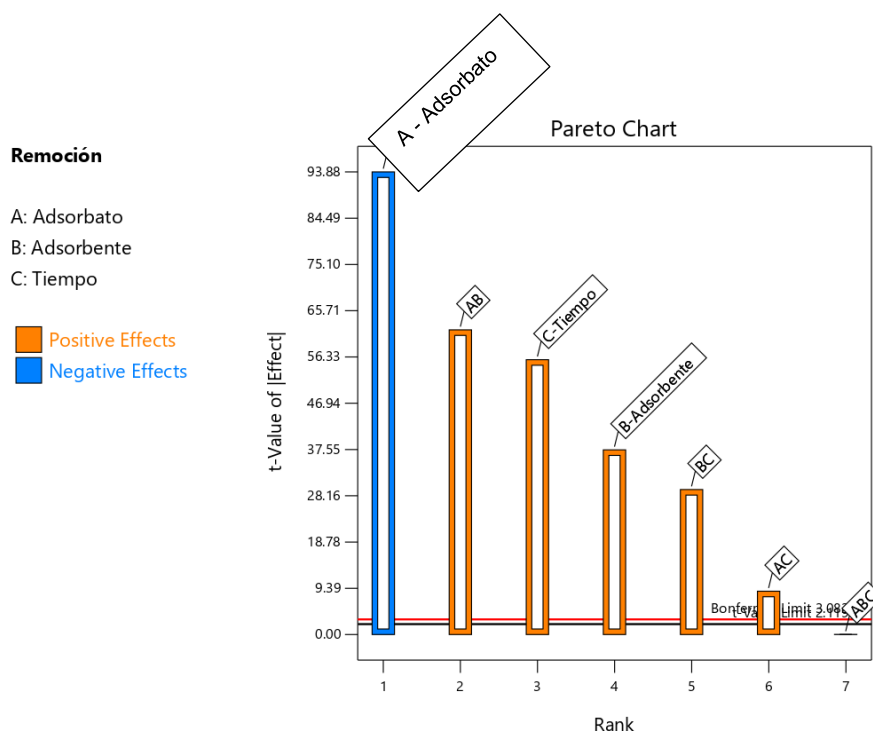
Tabla 15.
Estadísticas de ajuste

Desviación estándar	0.0404	R²	0.9992
Promedio	1.49	R² ajustado	0.9988
Coefficiente de variación	2.72	R² previsto	0.9982
		Precisión Adeq	141.7014

El R² previsto de 0,9982 concuerda razonablemente con el R² ajustado de 0,9988; es decir, la diferencia es inferior a 0,2. Adeq precisión mide la relación señal-ruido. Se recomienda una relación superior a 4. Una relación de 141.70 indica una señal adecuada. Este modelo puede utilizarse para explorar el espacio de diseño. (Tabla 15).

Figura 19.

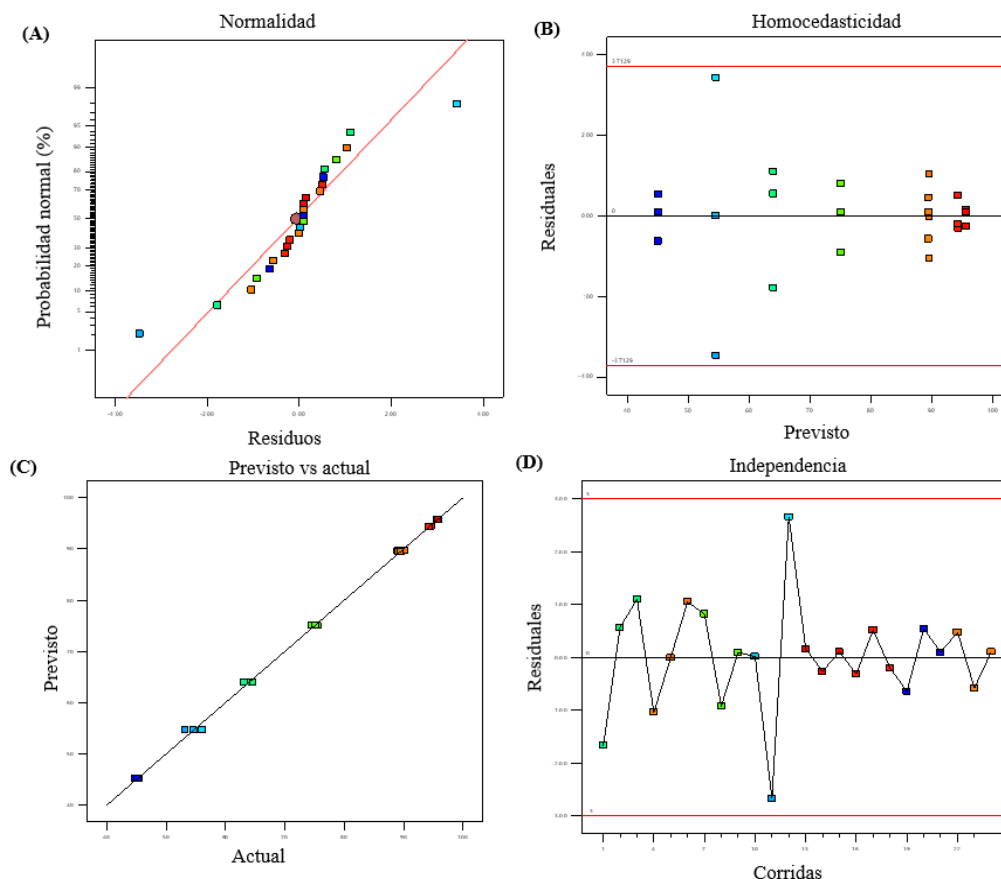
Diagrama de Pareto para la adsorción de RG sobre BCAM-P-Q



De la Figura 19, los parámetros individuales y sinergias de los parámetros son significativas ya que llegan a superar la línea roja (Bonferroni Limit) y línea azul (t Limit), El efecto más significativo es el factor A (adsorbato), ya que su barra azul es la más alta y excede claramente la línea de significancia el cual influye negativamente en la remoción. De los factores significativos adicionales (barras naranjas que también superan la línea), C (Tiempo) de efecto positivo e interacciones AB (adsorbato y adsorbente) y BC (adsorbente y tiempo), también tienen efectos positivos. Se debe tener un cuidado con la cantidad del adsorbato (RG), tras el efecto negativo de (A), ya que tiene un fuerte impacto negativo. Por otro lado, aumentar el tiempo (C) puede mejorar significativamente el proceso. Finalmente, los parámetros “ABC”, no llegaron a superar las líneas Bonferroni Limit y t Limit.

Figura 20.

Graficas de diseño experimental: (A) Normalidad, (B) Homocedasticidad, (C) Predicho vs reales y (D) Independencia



Sobre la Figura 20A, los puntos (residuos estandarizados) se alinearon sobre la línea roja (distribución normal teóricamente), no se observan curvaturas marcadas ni valores extremos severamente alejados, lo que indica una buena normalidad de residuos. La variabilidad de los puntos de colores representa la magnitud de la remoción, donde los tonos rojos indican altas eficiencias de adsorción (hasta 95.81 %) y los azules, bajas.

De la Figura 20B, el gráfico reveló un patrón aleatorio sin tendencias sistemáticas ni variabilidad creciente, lo que indica que el supuesto de homocedasticidad se cumple adecuadamente. La dispersión de puntos alrededor de la línea horizontal (residuo = 0) sin patrones definidos indica homocedasticidad (varianza constante del error), lo cual es un requisito importante para la validez del modelo. La ausencia de residuos fuera de los

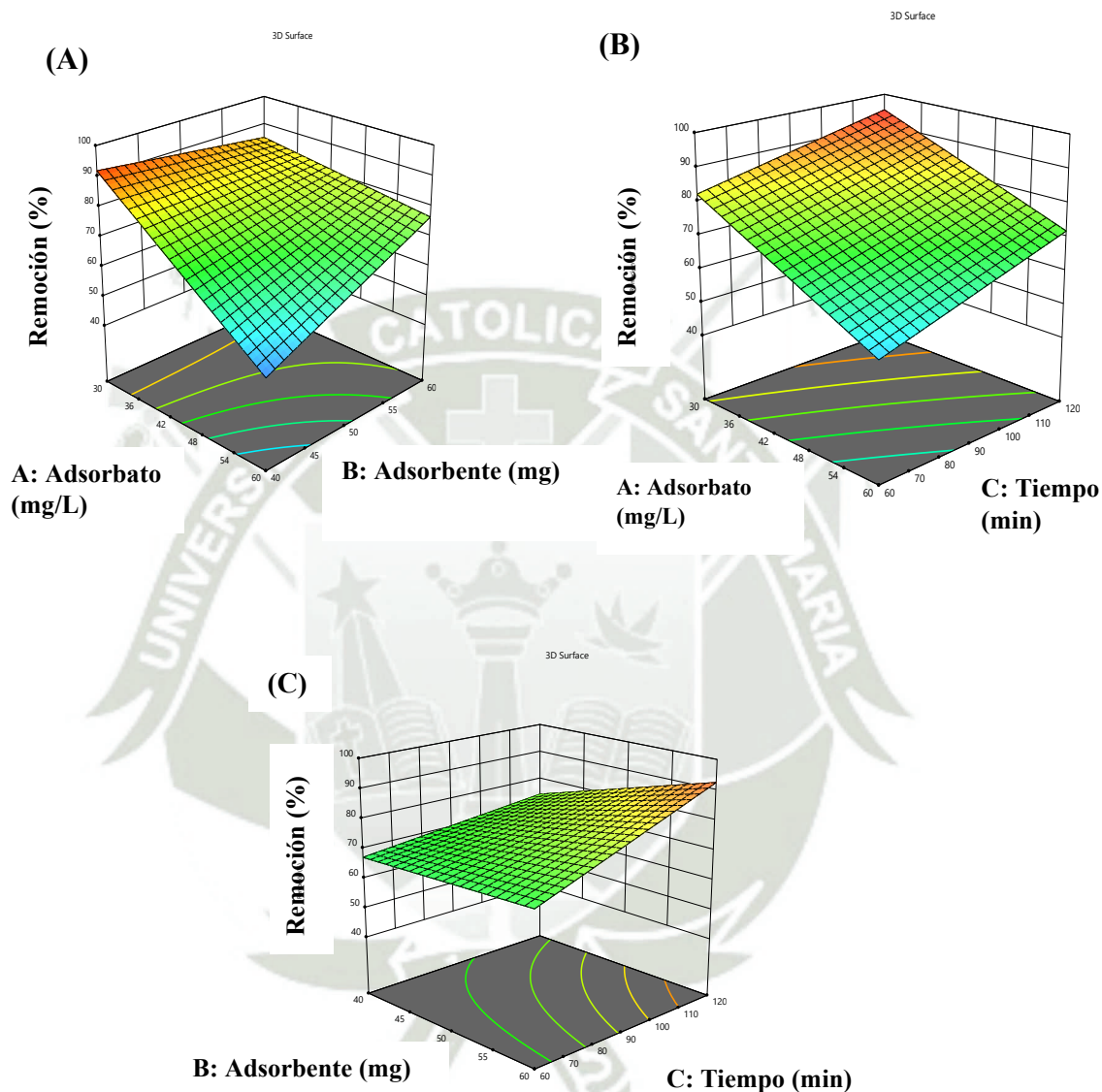
límites de confianza sugiere que no existen observaciones atípicas que comprometan la integridad del modelo.

De la Figura 20C se muestra la comparación entre los valores predichos por el modelo logit y los valores reales observados en el experimento. Los puntos se alinean estrechamente en la diagonal, lo que indica una alta capacidad predictiva del modelo. Asimismo, no se observan desviaciones sistemáticas ni dispersiones significativas, lo que sugiere una baja varianza y una buena precisión en la predicción. Box et al. (2019) destacan que este tipo de gráfico permite visualizar de forma directa la calidad de ajuste de un modelo, siendo deseable que los puntos se ubiquen próximos a la línea de identidad. Por lo tanto, se puede afirmar que el modelo logit ajustado es adecuado para describir la relación entre los factores del experimento (concentración de adsorbato, cantidad de adsorbente y tiempo de contacto) y la remoción lograda.

De la Figura 20D presenta los residuos estandarizados externamente frente al número de corrida experimental. Se observa que los residuos se distribuyen de manera aleatoria en torno al eje horizontal (valor cero), sin evidencias de patrones sistemáticos, cíclicos ni tendencias. Además, ningún valor residual excede los límites críticos de ± 3.72 , lo cual indica la ausencia de puntos influyentes o atípicos. Estos resultados sugieren que los supuestos del modelo, como la homocedasticidad y la independencia de los errores, se cumplen satisfactoriamente. Según Montgomery (2020), el análisis de residuos es un procedimiento esencial para evaluar la validez de un modelo ajustado. En este caso, la distribución aleatoria de los residuos respalda la validez estadística del modelo aplicado.

Figura 21.

Gráficas 3D de sobre remoción según los factores: (A) adsorbente – adsorbato, (B) adsorbato – tiempo y (C) adsorbente – tiempo.



Sobre la Figura 21A, representa la interacción entre dos variables independientes, la concentración inicial del RG (mg/L) y la masa del adsorbente (mg), manteniéndose constante el tiempo de contacto, con respecto a la variable de respuesta: porcentaje de remoción (%). Este tipo de representación es común en análisis multivariados para procesos de tratamiento de aguas, específicamente en tratamientos de adsorción, permitiendo visualizar zonas óptimas de operación. De acuerdo con los resultados

experimentales, se observa que las mayores eficiencias de remoción 94% aproximadamente, se obtienen cuando se trabaja con bajas $C_{ORG} = 30$ mg/L y altas masas C_A (60 mg), especialmente en tiempos prolongados (120 min). Esta tendencia está claramente reflejada en la superficie de respuesta que asciende hacia el vértice superior izquierdo del gráfico. Por el contrario, las menores eficiencias 44% se registran en el extremo opuesto, donde se combinan altas concentraciones de adsorbato (60 mg/L) con bajas masas de adsorbente (40 mg) en tiempos cortos (60 min). Esta región es representada con tonalidades azuladas en la gráfica, indicando baja eficiencia de adsorción. A mayor disponibilidad de sitios activos del adsorbente y menor carga de contaminante, el equilibrio de adsorción se alcanza con mayor eficiencia. Asimismo, el incremento del tiempo favorece la difusión de las moléculas del adsorbato hacia los sitios activos, incrementando la remoción hasta alcanzar una meseta de saturación. Estudios recientes han confirmado estas tendencias Li et al. (2022) demostraron que el aumento de la masa de bioadsorbentes mejora significativamente la remoción de metales pesados desde soluciones acuosas, debido a la mayor disponibilidad de sitios activos, especialmente en sistemas con baja carga contaminante. Asimismo, según Jang et al. (2021), el comportamiento no lineal y sinérgico observado entre variables independientes se modela eficientemente mediante superficies de respuesta. Esta validación estadística respalda el uso del modelo en la predicción de condiciones óptimas de operación.

Sobre la Figura 21B, la interacción entre la cantidad de adsorbente y el tiempo de contacto juega un papel fundamental en la eficiencia del proceso de adsorción. A partir de los datos experimentales analizados, se evidencia una clara sinergia positiva entre estos dos factores. Cuando se utiliza una dosis de adsorbente (60 mg) en combinación con un tiempo de 120 min, como se observa en las corridas 13 a 15, la remoción alcanza valores superiores al 95%, lo cual representa un comportamiento óptimo del sistema. Este

resultado sugiere que el aumento de la dosis proporciona más sitios activos disponibles, y el mayor tiempo permite un mayor acercamiento entre las moléculas del adsorbato y dichos sitios, facilitando el equilibrio del sistema. Cuando se mantiene constante una dosis alta, pero con un tiempo corto (corridas 7-9: 30 mg/L, 60 mg, 60 min), la remoción solo alcanza aproximadamente 75%. Esto indica que, aunque existan suficientes sitios activos, el tiempo no es suficiente para que las moléculas del contaminante difundan y sean adsorbidas completamente. Este fenómeno ha sido ampliamente documentado en literatura. Nguyen et al. (2020) en los procesos de biosorción con residuos agrícolas, un aumento en el tiempo permite superar la resistencia a la difusión interna del adsorbato en la matriz porosa, especialmente cuando se trabaja con partículas de tamaño micrométrico. Además, cuando se trabaja con bajas dosis de adsorbente (40 mg) y tiempos cortos (corridas 19-21), la remoción cae drásticamente a valores por debajo del 46%. Esta evidencia refuerza la necesidad de considerar ambos factores de forma conjunta en el diseño de sistemas eficientes. En el estudio de Iqbal et al. (2021) resaltan que una baja relación masa del adsorbente/tiempo de contacto reduce no solo la eficiencia, sino también la cinética de saturación, generando sistemas con baja reproducibilidad y limitada capacidad de carga. La combinación de una alta dosis de adsorbente con un tiempo prolongado de contacto es la estrategia óptima para maximizar la remoción.

Sobre la Figura 21C, la interacción del adsorbente con el tiempo revela una tendencia ascendente en la eficiencia de remoción al incrementar tanto la dosis de adsorbente como el tiempo de contacto. A mayor cantidad de adsorbente, existen más sitios activos para capturar el adsorbato, mientras que un mayor tiempo permite que el sistema se acerque al equilibrio, optimizando la remoción. La pendiente de la superficie sugiere que existe un punto de saturación, donde incrementos adicionales en alguno de los factores producen mejoras en la remoción. En otros estudios, demostraron que la eficiencia de remoción

presenta un límite intrínseco a bajas concentraciones y que la optimización de la masa de adsorbente es fundamental para alcanzar eficiencias superiores al 90% sin desperdiciar material. La capacidad de remoción depende tanto de la superficie específica del material como de la afinidad adsorbente-adsorbato, siendo la dosis de adsorbente y el tiempo de contacto parámetros críticos en el diseño del proceso (Khaliha et al., 2023)

4.4. Evaluación de la eficiencia de adsorción del colorante RG sobre el bagazo de caña de azúcar modificado por adición de pululano y quitosano presente en muestras sintéticas, mediante análisis cinético de adsorción (tiempo en equilibrio) e isothermas de adsorción de Freundlich y Langmuir para describir el proceso, estimando el tipo de interacciones formadas.

Las curvas de las cinéticas se graficaron al promedio de los tratamientos realizados por triplicado para cada una de las condiciones dadas variando entre las concentraciones de adsorbato y adsorbente. Donde primero se graficaron las capacidades de adsorción “ q_t ” en base al tiempo de contacto “ t ”. Se dividieron en base a la cantidad de C_{ORG} y C_A

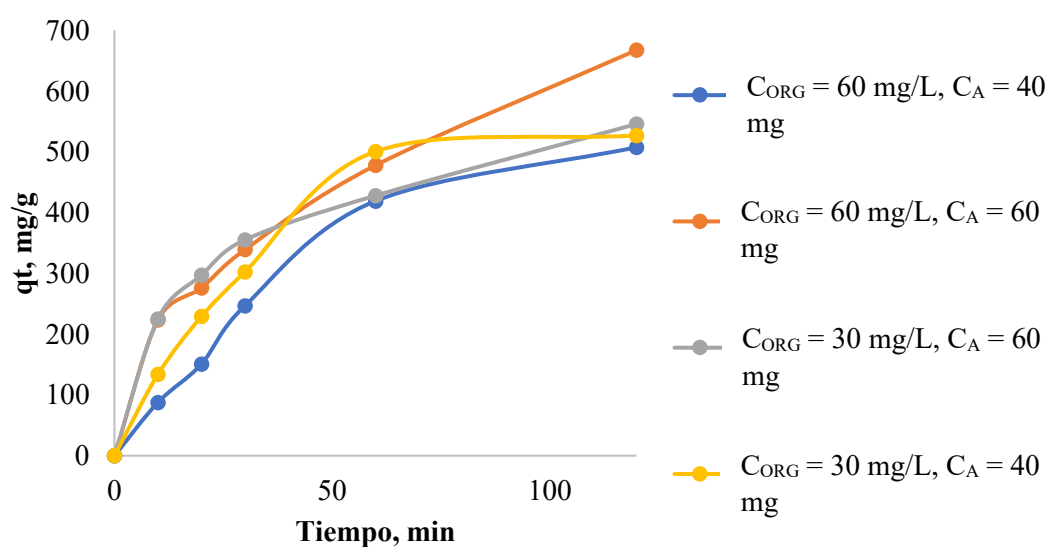
- T1: 60 mg/L de adsorbato con 40 mg de adsorbente
- T2: 60 mg/L de adsorbato con 60 mg de adsorbente
- T3: 30 mg/L de adsorbato con 60 mg de adsorbente
- T4: 30 mg/L de adsorbato con 40 mg de adsorbente

Con la ecuación (3) se obtuvo:

Tabla 16.
Capacidades de adsorción en base a los tratamientos

Tc, min	q _t (T1)	q _t (T2)	q _t (T3)	q _t (T4)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	87.75	223.48	225.17	133.84
20	150.88	276.11	297.14	229.17
30	246.84	339.18	355.22	302.40
60	419.19	477.86	428.03	500.63
120	507.58	667.50	545.88	527.15

Con las capacidades de adsorción se encuentran relativamente altas, ya que el volumen utilizado es de 1 L, y la masa del adsorbente es relativamente baja (0.04 y 0.06) g. Una vez obtenido estos datos, se procedió a realizar las gráficas de cinéticas de acuerdo con cada concentración. (Tabla 16)

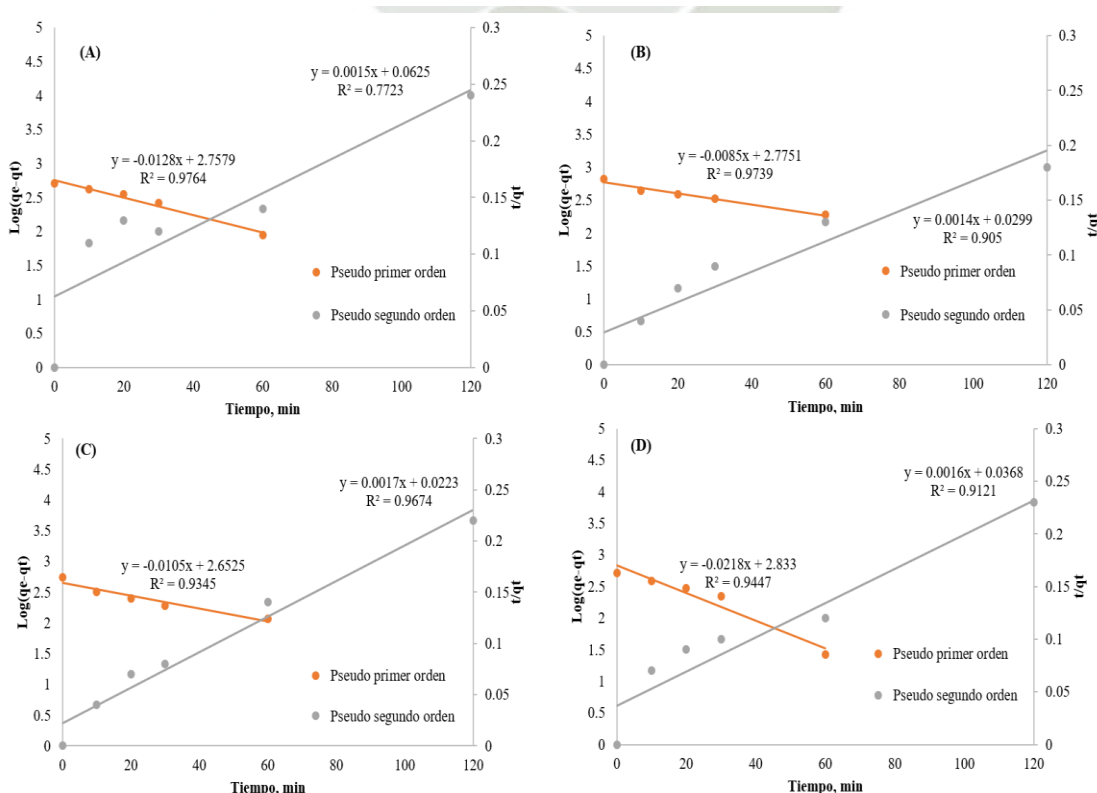
Figura 22.
Cinéticas de adsorción a diferentes concentraciones


Sobre la Figura 22, se observa las curvas cinéticas como resultado del estudio de la cinética de adsorción de acuerdo con la concentración tanto de adsorbato (RG) como del adsorbente a las concentraciones de 40 mg y 60 mg, la capacidad adsorción esta expresado en mg/g, en base al tiempo. Esto permitió indicar que con la dosis de 60 mg/L de colorante RG con 60 mg de adsorbente, tiene mayor capacidad de adsorción en el minuto 120. Por otro lado, el que presenta menor capacidad es a las concentraciones de 60 mg/L del colorante a una dosis de 40 mg de adsorbente. En el estudio de Torres y Vanegas (2018), realizaron una comparación de cinéticas de los adsorbentes (bagazo de caña de azúcar, borra de café y corteza de naranja), donde dicho adsorbentes no se adaptaron al modelo cinético ya que su R^2 , obtuvo valores de 0.507 a 0.644.

Seguidamente, los resultados experimentales fueron correlacionados de acuerdo con los modelos cinéticos (pseudo primer orden y pseudo segundo orden).

Figura 23.

Cinéticas de pseudo primer y segundo orden: (A) C_{ORG} 60 mg/L con una C_A a 40 mg, (B) C_{ORG} 60 mg/L con una C_A a 60 mg, (C) C_{ORG} 30 mg/L con una C_A a 60 mg y (D) C_{ORG} a 30 mg/L con una C_A de 40 mg



De la Figura 23A, se obtiene la constante cinética, k_1 (min^{-1}), que es la pendiente de la gráfica, -0.0128 y el intercepto es el valor de $\log q_e$, 2.7579. En el estudio de Broche et al. (2022), obtuvo los siguientes valores -0.03 (min^{-1}) como k_1 , como q_e (mg/g), 1.456 y con un R^2 de 0.9764, en dicho estudio se realizó en el colorante de azul de metileno a una concentración de 300 g/L a una agitación de 80 RPM con 10 g como adsorbente de bagazo de caña de azúcar determinando que el modelo de pseudo primer orden no se ajusta adecuadamente a la cinética de adsorción del colorante RG utilizando una mezcla de bagazo de caña de azúcar, pululano y quitosano, con 40 mg de biomasa a una concentración de colorante de 60 mg/L. La mezcla de BCAM, Q y P, aporta múltiples grupos funcionales (hidroxilos, aminos, etc.), lo que facilita interacciones químicas fuertes (quimisorción), que el modelo de pseudo primer orden no representa correctamente. (Broche et al., 2022). Además, se obtiene el valor de coeficiente de correlación (R^2), 0.7723, siendo un valor menor que la cinética de adsorción de pseudo primer orden, aplicado las ecuaciones (6 y 7), se obtuvo el valor de q_e de 666.67 mg/g con una constante cinética de pseudo segundo orden de 3.43×10^{-5} (g/mg*min). En el estudio de Broche et al. (2022), determinaron el valor de R^2 de 1, q_e 29.798 mg/g obteniendo el valor de 0.076 (g/mg*min) de la constante cinética dicho estudio fue con el colorante azul de metileno a 300 g/L con el adsorbente de 10 g de bagazo de caña de azúcar tratado. En estudios con biopolímeros, la cinética de pseudo segundo orden ha mostrado buenos resultados. La mezcla de BCAM, Q y P forma una superficie heterogénea y compleja, lo cual puede provocar que el modelo de pseudo segundo orden no se aplique uniformemente a todos los sitios activos. Aunque este modelo asume un mecanismo de quimisorción, en este sistema pueden estar presentes también procesos de difusión con limitación por transporte externo, que afectan la linealidad esperada. (Broche et al., 2022).

Sobre la Figura 23B, el valor obtenido del coeficiente de correlación es de 0.9712 (R^2), la constante cinética (k_1), -0.0085 min^{-1} y el intercepto es el valor de $\log q_e$, 2.7768, en otro estudio, Figueroa et al. (2015) utilizaron el colorante rojo 40 (R40), rojo Allura, a una concentración de 0.25 mg/L con un adsorbente de tuza de maíz de 5.8 g, térmicamente tratada donde obtuvieron 0.872 min^{-1} con un valor de intercepto de 1.622 ya que el proceso de adsorción ocurre de manera natural, absorbiendo energía del entorno (endotérmico) y como la velocidad del proceso mejoran cuando se incrementa la temperatura. (Figueroa et al., 2015).

Sobre la cinética de pseudo segundo orden, la Figura 23B se determinó el R^2 (coeficiente de correlación), 0.905, con la pendiente y el intercepto se obtuvo el valor de q_e de 769.23 mg/g con una constante cinética de pseudo segundo orden de $5.42 \times 10^{-5} \text{ g/mg} \cdot \text{min}$. En el estudio de Pérez et al. (2017), determinaron la constante cinética de pseudo segundo orden (k_2), $5.61 \text{ g/mg} \cdot \text{min}$, utilizaron 5 g de esferas de quitosano previamente tratada como adsorbente, en el adsorbato, colorante rojo reactivo 195 (RR-195), con una concentración de 130 mg/L, k_2 , la adsorción estaría dominado exclusivamente por quimisorción, donde el modelo cinético de pseudo-segundo orden presentaría un mejor ajuste experimental. Bajo estas condiciones, la representación gráfica (t/Q_t vs t) exhibiría una correlación lineal perfecta en toda su extensión (Haerifar y Azizan, 2013). También se determinaron k_2 , $0.817 \text{ g/mg} \cdot \text{min}$, y de q_e de 1.707 mg/g, donde indicaron que la capacidad de retención del adsorbente se incrementa al elevarse la temperatura. (Figueroa et al., 2015). Se determinó q_e (concentración en equilibrio), con el valor de 545.88 mg/g, en el último intervalo de tiempo, los valores de $\text{Log}(q_e - q_t)$ son más estables ya que los valores no decrecen del valor de 2, además, el parámetro de t/q_t , eje de la gráfica de pseudo segundo orden, presenta un crecimiento logarítmico en base al tiempo.

Sobre la Figura 23C, muestra la cinética de adsorción de pseudo primer orden, donde el valor del coeficiente de correlación es de 0.9345 (R^2), la constante cinética (k_1), -0.0105 min^{-1} y el intercepto, $\log q_e$, 2.6525, en el estudio de Pérez et al. (2022), realizaron una mezcla de quitosano con alcohol polivinílico como adsorbente, 45 mg /L, sometido a un tratamiento térmico para la remoción del colorante naranja ácido 7 (NA7) a una concentración de 10 mL, para la cinética de pseudo primer orden obtuvieron una q_e de 410.5 mg/g y una constante cinética de 0.31, la efectividad del adsorbente ante el adsorbato se demuestra en las moléculas del colorante, la reticulación del adsorbente logró una matriz biopolimérica, donde generó cambios en sus propiedades como hinchamiento y solubilidad, afectando la textura y morfología del adsorbente (quitosano y con alcohol trabajado), el adsorbente reticulado permite una eficiencia compatible con los colorantes sintéticos.

Además, la cinética de pseudo según segundo orden, se determinó el R^2 (coeficiente de correlación), 0.9674 con la pendiente y el intercepto se obtuvo el valor de q_e de 588.24 mg/g con una constante cinética de pseudo segundo orden de $1.12 \times 10^{-5} \text{ g/mg} \cdot \text{min}$. En el estudio de Torres (2021), realizó la remoción del colorante rojo Allura a la concentración de 5 y 10 mg/L con el adsorbente de cascara de nuez a 0.25 g, obtuvo una correlación de 0.9803, 7.467 mg/g (q_e), con una constante de 16.63, deduciendo que los procesos de sorción se llevaron sobre la superficie en base a la distribución de heterogénea de los poros.

Sobre la Figura 23D, el coeficiente de correlación es de 0.9448 (R^2), la constante cinética (k_1), -0.0218 min^{-1} y el intercepto es el valor de $\log q_e$, 2.8362, comparándose con el estudio de Dopico et al. (2019), determinaron la constante cinética de pseudo primer orden con el valor de 0.0499 min^{-1} y el intercepto a 0.0127, obteniendo el coeficiente de correlación de 0.6189, teniendo como adsorbente el meollo del bagazo de caña de azúcar

tratado químicamente con 2 a g/L en el colorante azul de metileno (50 mg/L). Los datos del estudio permiten identificar que el mecanismo adsorbente presenta dos etapas diferenciadas: una fase inicial de rápida captación molecular (en los 5 a 8 minutos) que evidencia la selectividad del material lignocelulósico hacia el agente modificante, seguida de un proceso cinéticamente limitado donde se estabilizan las interacciones superficie-sustrato hasta alcanzar condiciones termodinámicas equilibradas. (Abo et al., 2016).

Sobre la cinética de pseudo segundo orden, se determinó el R^2 (coeficiente de correlación), 0.9121 con la pendiente y el intercepto se obtuvo el valor de q_e de 625 mg/g con una constante cinética de pseudo segundo orden de 1.07×10^{-5} g/mg*min. En el estudio de Dopico et al (2019), determinaron k_2 625 g/mg*min, y de q_e 22.53 mg/g, a concentraciones dichas previamente, estos resultados se deben a la influencia de las cargas iónicas. Al ajustar los datos experimentales a este modelo, se sugiere que la etapa que limita el proceso podría ser la interacción entre el colorante y la superficie del adsorbente, mientras que la capacidad de adsorción depende directamente de la cantidad de sitios activos disponibles. Las aguas residuales que contienen colorantes suelen presentar una composición compleja, con altos niveles de sales disueltas, por lo que resulta fundamental evaluar cómo la fuerza iónica afecta el proceso de adsorción. Para estudiar este efecto, se añaden electrolitos a las soluciones acuosas, siendo el cloruro de sodio el más utilizado debido a que está compuesto por iones monovalentes Na^+ y Cl^- , con cargas unitarias, lo que hace que la fuerza iónica sea equivalente a la concentración molar (Aranda, 2010).

Tabla 17.
Constantes cinéticas calculadas

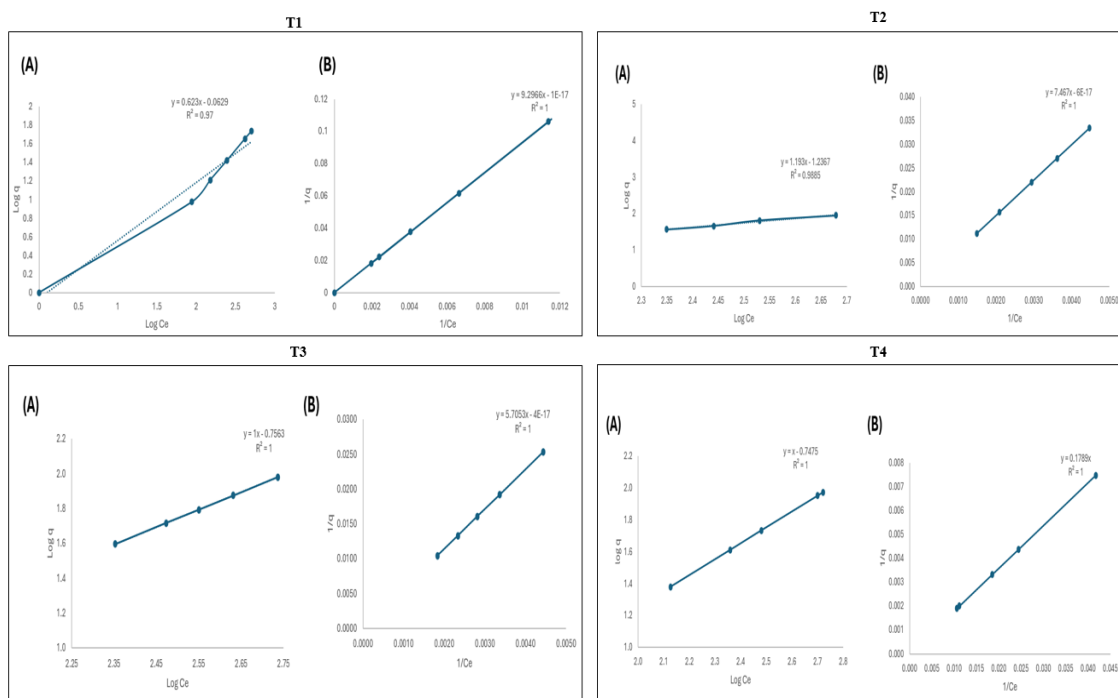
		T1	T2	T3	T4
Cinética de pseudo primer orden	k₁ (min⁻¹)	-0.0129	-0.0085	-0.0104	-0.0218
	q_e (mg/g)	507.58	667.50	545.88	527.15
	R²	0.976	0.974	0.935	0.945
Cinética de pseudo segundo orden	k₂ (g/mg.min)	3.43 x 10 ⁻⁵	5.41 x 10 ⁻⁵	1.12 x 10 ⁻⁵	1.08 x 10 ⁻⁵
	q_e (mg/g)	666.67	769.23	588.24	625
	R²	0.772	0.905	0.967	0.912

En la Tabla 17, se presenta las constantes cinéticas calculadas y concentración en equilibrio, donde se tomó en cuenta los tratamientos a diferentes concentraciones. En cuanto a la cinética de pseudo primer orden, se obtuvieron constantes negativas ya que dicho modelo no describe la adsorción de manera correcta. Con el valor de q_e de la cinética de pseudo segundo orden es más cercano al q_e hallado por cada grafica de los tratamientos.

En base a los resultados de la efectividad de remoción, absorbancia como concentración de equilibrio, se obtuvieron las isothermas de Freundlich y Langmuir.

Figura 24.

Isotermas de los tratamientos respectivos: (A), Modelo de Freundlich y (B), Modelo de Langmuir.



De la Figura 24A, se observa las gráficas de isotermas, se evaluaron las pendientes, interceptos y factor de correlación de dichas isotermas. Donde la adsorción se encuentra mejor adaptada a la isoterma de Langmuir para la adsorción del colorante RG, con los adsorbentes.

De la Figura 24B, se observa las gráficas de isotermas (A), isoterma de Freundlich y (B), isoterma de Langmuir. Obteniendo el valor de 1.193 como pendiente de Freundlich nos permite hallar la capacidad la constante de intensidad de adsorción (n) y la constante de Freundlich (K_F) con el valor del intercepto, 1.2367. En el T2, la isoterma mejor adaptada es Langmuir por el factor de correlación obteniéndose el valor de 1, indicando que es un modelo lineal, con su pendiente de 7.467 y el valor del intercepto de 6×10^{-17} .

La Figura 24C, De la isoterma de Freundlich, se determinó los factores de pendiente, intercepto, y correlación, obteniéndose 1, 0.7563 y 1 respectivamente. Mientras que, en

la isoterma de Langmuir, los valores de 5.7053 como pendiente, 4×10^{-17} de intercepto y con el factor de correlación de 1. Cuando los valores se encuentran muy cercanos, la mezcla del adsorbente predomina en sitios activos, donde se tiene una carga de energía de adsorción diferente que estimulan la aparición de multicapas de las moléculas de RG, se puede dar de manera natural cuando el valor es cercano a la unidad. (Banerjee & Sharma, 2013). Por otro lado, el ajuste al modelo de Langmuir recomienda que debe existir sitios activos, donde se presente una distribución homogénea de la adsorción de energía, generalmente tiende a formar monocapas de las moléculas del rojo G sobre la mezcla del adsorbente. (Ortega et al., 2013).

De la Figura 24D, de la isoterma de Freundlich, se muestra que la pendiente obtiene el valor de 1, 0.7475 del intercepto y como factor de correlación 1 (R^2). Por parte de la isoterma de Langmuir, la pendiente es de 0.1789 y con un intercepto de 1, con un factor de correlación de 1 (R^2), el modelo que mejor representa es de Langmuir ya que representa un proceso en una sola capa, donde no existe interacciones entre las moléculas del adsorbato (RG). También, en el estudio de Ita & López, (2020), cual concuerda con los datos evaluados de la experimentación dada, donde la mezcla del adsorbente remueve de manera natural y sin interacciones, permitiendo un proceso reversible lo cual aumenta una posibilidad de utilizarlo en la industria.

Tabla 18.
Parámetros calculados de las isothermas de Freundlich y Langmuir

	T1	T2	T3	T4
K_F (mg/g (dm³/mg)^{1/n})	0.865	0.058	0.175	0.179
Freundlich				
n	1.61	0.839	1	1
R²	0.97	0.989	1	1
q_{max} (mg/g)	0.108	0.134	0.753	5.589
Langmuir				
K_L (L/g)	1.075×10 ⁻¹⁸	2.232×10 ⁻¹⁸	4.38×10 ⁻¹⁹	9.31×10 ⁻¹⁸
R_L	5.268×10 ⁻¹⁹	1.339×10 ⁻¹⁸	1	1
R²	1	1	1	1

De la Tabla 18, se determinaron los parámetros de las isothermas de Freundlich y Langmuir de los respectivos tratamientos en diferentes concentraciones dadas. Los resultados de la isoterma de Freundlich, al constante de Freundlich ((mg/g (dm³/mg)^{1/n}), el mayor valor se determinó en el tratamiento 1 con 0.865 y menor valor en el T2 con 0.058. Dichos resultados se encuentran dentro del margen, ya que en el estudio de Castellar et al. (2016), determinaron sus constantes de Freundlich con tratamientos de cascara de yuca tratado como adsorbente del colorante azul directo 86 a diferentes concentraciones, obteniendo como máximo el valor de 0.26 (mg/g(dm³/mg)^{1/n}). Asimismo, se determinó n (con relación a la capacidad e intensidad de la adsorción), en el presente estudio de 1.61 y 1.72 mg/L en el estudio de Castellar et al. (2016), indicaron que n es una constante de la intensidad de adsorción.

De Langmuir, tomando en cuenta, R_L= 0, el proceso de adsorción es irreversible (teóricamente), si el R_L es mayor que 0 y menor que 1 el proceso es favorable. Si R_L es

igual a 1 el proceso es lineal. Por otro lado, R_L es mayor que 1 la adsorción es desfavorable (Hincapié et al., 2018). El valor de R_L (factor de separación), de los tratamientos 1 y 2, se obtuvo 1.075×10^{-18} y 1.339×10^{-18} respectivamente. La isoterma de Langmuir es la que mejor describe la adsorción del RG ($R^2 = 1$), sugiriendo que la adsorción se caracteriza como homogénea (monocapa), además se determinaron las capacidades de adsorción máxima ($q_{\max} = 0.108, 0.134, 0.753$ y 5.589) mg/g de los tratamientos, por el modelo se considera no despreciable ya que es considerado azoica el compuesto naturalmente. (Sejie, & Nadiye, 2016).

Un valor de $R^2 = 1$ implica una relación lineal perfecta entre los parámetros ajustados y los datos experimentales, lo que indica que el modelo explica el 100% de la varianza observada. (Gupta, 2024). En análisis de isotermas, un $R^2 = 1$ podría resultar de datos muy limitados, errores en el ajuste o parámetros optimizados para los puntos particulares medidos (Chicco, 2021). Cuando se trabaja con modelos como Langmuir, el $R^2 = 1$ puede ser confiable si hay datos suficientes bien distribuidos, pero en casos con pocos o específicos puntos puede ser engañoso (Dal, 2024). El factor de correlación esta dado por el ajuste a los datos usados, con poca variabilidad o un número reducido de observaciones. Las constantes K_L cercanas a cero pueden indicar que la isoterma predice una saturación casi inmediata o débil interacción (Razi et al., 2025).



CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

PRIMERA: Se determinó las características de los adsorbentes como S_{BET} ; (13.42 ± 0.28 , 13.42 ± 0.8 y 12.88 ± 1.5) m^2/g , del BCAM, Q y P respectivamente, se logró obtener una $\lambda_{max} = 494$ nm, se determinaron los grupos funcionales de los adsorbentes. La concentración de C fue mayor en los adsorbentes analizados, sin detección de S en Q. Asimismo, en el análisis de absorbancia del colorante RG con un R^2 de 0.9916, en el cual se obtuvo la remoción solo del BCAM de 34.6% de R y 25.5 % de R del BCA.

SEGUNDA: Se analizó la efectividad del adsorbente sobre el colorante RG a diferentes concentraciones dentro de ellos, los mejores resultados en la remoción se dieron en las siguientes concentraciones bajo ciertas condiciones: adsorbente a 60 mg, en una concentración de 40 mg/L del colorante en un tiempo de contacto de 120 min, obteniéndose 95.68% de remoción, concluyéndose la interacción a estos parámetros tiene un impacto importante sobre la capacidad del adsorbato y adsorbente.

TERCERA: Las condiciones óptimas de la remoción del colorante RG a través del diseño experimental 2^3 (activación química), llegó a remover un 70 % ($p < 0.05$), después del análisis ANOVA y la obtención del modelo significativo. Se analizó la significancia optimizándose cada factor, con una $C_A = 40.5$ mg de adsorbente a una $C_{oRG} = 48.67$ mg/L y a un tiempo $t = 120$ min.

CUARTA: Para todos los tratamientos (T1 a T4), los resultados presentaron mejor ajuste al modelo de Langmuir ($K_L = 1.075 \times 10^{-18}$, 2.232×10^{-18} , 4.38×10^{-19} y 9.31×10^{-18}) L/g respectivamente. El modelo cinético de pseudo segundo orden presentó mejor ajuste obteniendo ($k_2 = 3.43$, 5.41, 1.12 y 1.08) g/mg.min respectivamente, invalidándose las cinéticas de pseudo primer orden por reportar valores negativos. Se estima que el proceso

adsortivo se desarrolla mediante la formación de una monocapa y sin interacciones entre el colorante.



5.2.Recomendaciones

Las recomendaciones a partir de las conclusiones del estudio son:

- Modificar el bagazo de caña de azúcar de carga aniónica a catiónica mediante una activación con agentes químicos o poder ajustar a un pH menor de 4 para que el bagazo tenga menos carga negativa y el colorante aniónico puede adsorberse mejor por interacciones electrostáticas débiles.
- Establecer las condiciones de mayor remoción como punto de referencia para futuros estudios de optimización del proceso. Además, se sugiere replicar estas condiciones en sistemas a mayor escala, así como en condiciones variables de pH y temperatura, con el fin de evaluar la estabilidad y desempeño del adsorbente en escenarios más representativos de aguas residuales industriales.
- Ejecutar tratamientos de adsorción mediante los parámetros y niveles más significativos con los adsorbentes modificados, removiendo aguas de efluente textil de campo, para así evaluar la utilización en las industrias.
- Realizar tratamientos para profundizar sobre la adsorción en el mecanismo para mejorar datos estadísticos, lo que indica las cinéticas de adsorción.

6. REFERENCIAS

Abo Farha, E.S.; Mousa, A.E.; Badawy, A.N.; Yousef, I.R. (2016). Removal of some organic dyes from aqueous solution by peanut husk. *Int. J. Adv. Research* 4(6): p. 1995-2010.

Alarcón, M. A. (2023). Diseño de un sistema de cavitación hidrodinámica para la remoción del colorante rojo-G y proceso de bio-adsorción con subsecuente filtración por membranas para el tratamiento de efluentes textiles. Arequipa.

Alarcon, G., Sanchez, C. G., Gomez, E. O., & Cortez, L. A. B. (2006). Caracterización del bagazo de la caña de azúcar. Parte I: características físicas. *Proceedings of the VI Encontro Energia no Meio Rural AGRENER*.

Alarcon, M. A., Arenas, Bustos, M. A., & Kiara & Tanaka, D. (2022). Intensification of Red-G dye degradation used in the dyeing of alpaca wool by advanced oxidation processes assisted by hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*.

Ali, H. (2010). Biodegradation of synthetic dyes—a review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 213, 251-273.

Allen, S. J., & Koumanova, B. (2005). Decolourisation of water/wastewater using adsorption. *Journal of the university of chemical technology and metallurgy*, 40(3), 175-192.

Álvarez Rico. M, Pérez Marín, A.; Álvarez Rico, G. I. (2002). Los problemas del régimen económico-financiero del dominio público hidráulico.

Aramesh, N., & Bagheri, A. R. (2021). Chitosan-based hybrid materials for adsorptive removal of dyes and underlying interaction mechanisms. *International Journal of*

Biological

Macromolecules,

23.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.04.158>

Aranda, G.E. (2010). Biosorción de cromo y níquel por la cáscara de bellota de encino (*Quercus crassipes* Humb. and Bonpl.). Tesis para optar por el título de Maestro en Ciencias Quimicobiológicas. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F.
Online: <http://www.tesis.ipn.mx>

Bakar, A. A., Azmi, N. F., Daud, N. M., Ali, K. A., Badrealam1, S., & Hamzah, N. (2022). The Removal of Dye from Synthetic Wastewater using Hybrid Modified Sugarcane Bagasse-Banana Stem. *Earth and Environmental Science*.
doi:10.1088/1755-1315/1135/1/012010

Banerjee, S., & Sharma, Y. C. (2013). Equilibrium and kinetic studies for removal of malachite green from aqueous solution by a low cost activated carbon. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(4), 1099-1105.

Blanco Castro, J., Bonelli, P. R., Cerrella, E. G., & Cukierman, A. L. (1999). Activación química de bagazo de caña de azúcar para la obtención de carbones activados. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 3.

Barrera, J. H. (2012). Metodología de La Investigación, Guía para la comprensión Holística de la Ciencia. Bogotá: Quirón.

Basha, D. B., Ahmed, S., Ahmed, A., & Gondal, M. A. (2023). Recent advances on nitrogen doped porous carbon micro-supercapacitors: new directions for wearable electronics. *Journal of Energy Storage*, 60, 106581.

Belda Anaya, R. (2023). Evaluación de pululano como polímero susceptible de ser electrohilado para la funcionalización de superficies.

- Beltrán, R. (2015). Aplicación de un diseño experimental factorial en el estudio de la adsorción de fenol y nitrofenoles con nanofibras de carbono. Lima.
- Bermello, A., Díaz, D., Martínez, R., Quintana, G., Mieres, G., & Leal, J. A. (2008). Estudio de un material compuesto de partículas de bagazo de caña y matriz de polietileno mediante espectrometría FTIR. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 42(1-3), 106-111.
- Bolívar, G. (16 de Enero de 2021). Quitosano. Obtenido de <https://www.lifeder.com/quitosano/>
- Box, G. E. P., Hunter, J. S., & Hunter, W. G. (2019). Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery (2nd ed.). Wiley.
- Bozoudi, D., & Tsaltas, D. (2018). The multiple and versatile roles of Aureobasidium pullulans in the vitivinicultural sector. Fermentation, 4(4), 85.
- Broche Galindo, M. H., Rodríguez Rico, I. L. y Alea Martínez, Y. R. (2022). Caracterización de residuos agroindustriales y su aplicación en la remoción de azul de metileno de soluciones acuosas por adsorción. Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry, 79(597), 467-473.
- Broche-Galindo, M. H., Rodríguez-Rico, I. L., Villar, M. M. P., & Prieto-García, J. O. (2022). Equilibrio y modelos cinéticos en la adsorción de azul de metileno sobre residuos agroindustriales. Tecnología Química, 42(3), 420-434.
- Calixto, N. J., Carrillo, Soto, G. A. y Bonilla, C. (2022). Fundamentos de la contaminación de aguas subterráneas. Bogotá - Ecoe Ediciones S.A.S.
- Castro, S., Cerda, R., Betanco, N., Canelo, F., López, X., García, A., & Benavente, M. (2013). Estudio del equilibrio y cinética de adsorción de Cd (II), Ni (II) y Cr (VI)

usando Quitosano y Quitosano modificado con cobre. Nexo Scientific Journal, 26(2), 56-68.

Castellar-Ortega, G., Mendoza, E., Angulo, E., Paula, Z., Rosso, M., & Jaramillo, J. (2019). Equilibrio, cinética y termodinámica de la adsorción del colorante DB-86 sobre carbón activado de la cáscara de yuca. Revista MVZ Córdoba, 24(2), 7231-7238.

Challco Hihui, A. V. (2024). Eficiencia del lodo crudo con modificación térmica y química proveniente de una depuradora de agua como adsorbente en la remoción de un colorante textil (Pardo B) en Arequipa, Perú.

Chi, Z., Wang, F., Chi, Z., Yue, L., Liu, G., & Zhang, T. (2009). Bioproducts from *Aureobasidium pullulans*, a biotechnologically important yeast. Applied microbiology and biotechnology, 82, 793-804.

Chicco, D. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative and truthful than other metrics. PeerJ Comput. Sci. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8279135/>

Celador, L., & Rivas, R. (2015). *Aureobasidium pullulans* visto con microscopio óptico. *Aureobasidium pullulans* visto con microscopio óptico. SALAMANCA. Obtenido de <https://bibbiologia.usal.es/imagenes/picture.php?/1729>

Colpas, F., Tarón, A., & González, R. (2017). Área superficial de carbones activados y modificados obtenidos del recurso agrícola *Saccharum officinarum*. Revista de Ciencias Agrícolas, 34(2), 62-72.

Contreras, R. E., Hernández, I., González, R. O., García, A., & Arriaga, M. (2013). Remoción de azul de metileno en medio acuoso mediante el uso de bagazo de

caña de azúcar y rastrojo de maíz modificados con iones SO_4^{2-} y PO_4^{3-} . Avances en Ciencias e Ingeniería, 4(1), 29-37.

Crespo Santiago, D. (2006). Biogerontología. Colección Textos Universitarios. Santander: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria.

Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review. Bioresource technology, 97(9), 1061-1085.

Da Silva, C. G., & Frollini, E. (2020). Unburned sugarcane bagasse: bio-based phenolic thermoset composites as an alternative for the management of this agrowaste. Journal of Polymers and the Environment, 28(12), 3201-3210.

Dal, M.C. (2024). Modeling of the Linear Equations of Langmuir Isotherm. Tr. J. Nature Sci., 13(3), 67-72. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/3339280>

DGC. (2024). El impacto de la producción textil y de los residuos. *Artículo*, 7. Obtenido de https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2020/12/story/20201208STO93327/20201208STO93327_es.pdf.

Diario el Pueblo, 1. (07 de Septiembre de 2010). *Adelante Arequipa*. Obtenido de <https://adelantearequipa.blogspot.com/2010/09/arequipa-tiene-las-3-empresas-textiles.html>

Dopico-Ramírez, D., Díaz-López, C., León-Fernández, V., Cámara-Pérez, A., Trujillo-del Bosque, A., & San Juan-Rodríguez, A. N. (2019). Estudio de las condiciones óptimas para la adsorción de azul de metileno sobre el meollo del bagazo de la caña de azúcar.

- Ejaz, U., Wasim, A. A., Khan, M. N., & Mahmoud, S. F. (2021). Use of Ionic Liquid Pretreated and Fermented Sugarcane Bagasse as an Adsorbent for Congo Red Removal. *Sustainable Polymeric Materials from Renewable Resource*. doi:<https://doi.org/10.3390/polym13223943>
- Espinozaa, F. A., & Mejía, I. M. (2020). Removal of azo dyes in aqueous solutions using magnetized and chemically modified chitosan beads. *Materials Chemistry and Physics*. doi:<https://doi.org/10.37761/rsqp.v84i1.161>
- Figuerola, D., Moreno, A., & Hormaza, A. (2015). Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(26), 105-120.
- Galindo, M. H. B., Rico, I. R., & Martínez, Y. A. (2022). Caracterización de residuos agroindustriales y su aplicación en la remoción de azul de metileno de soluciones acuosas por adsorción. *Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, 79(597), 467-473.
- Gao, Y.; Xu, S.; Ortaboy, S.; Kan, Y.; Yue, Q.; Gao, B. 2016. Preparation of well developed mesoporous activated carbon with high yield by ammonium polyphosphate activation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 66:394 - 399.
- Gea, S., Siregar, A. H., Zaidar, E., Harahap, M., Indrawan, D. P., & Perangin-Angin, Y. A. (2020). Isolation and characterisation of cellulose nanofibre and lignin from oil palm empty fruit bunches. *Materials*, 13(10), 2290.
- Gómez, O. R., Escudero, A. M., & Gamarra, H. Z. (2012). Tratamiento de efluentes textiles con luz ultravioleta solar. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, 7.

- Granados Suárez, K., Sánchez, C., Salazar Cano, J. R., Gómora Herrera, D. R., & Santana Cruz, A. (2023). Obtención de papel a partir de bagazo de caña para el aprovechamiento de residuos agroindustriales.
- Guediri, A., Bouguettoucha, A., Chebli, D., Chafai, N., & Amrane, A. (2020). Molecular dynamic simulation and DFT computational studies on the adsorption performances of methylene blue in aqueous solutions by orange peel-modified phosphoric acid. *Journal of Molecular Structure*, 1202, 127290.
- Gutiérrez-Ruiz, S. C., Cortes, H., González-Torres, M., Almarhoon, Z. M., Güreş, E. S., Sharifi-Rad, J., & Leyva-Gómez, G. (2024). Optimize the parameters for the synthesis by the ionic gelation technique, purification, and freeze-drying of chitosan-sodium tripolyphosphate nanoparticles for biomedical purposes. *Journal of Biological Engineering*, 18(1), 12.}
- Gupta, A. (2024). Determining a Meaningful R-squared Value in Clinical Medicine. *Academic Medical Surgery*. <https://academic-med-surg.scholasticahq.com/article/125154>
- Haerifar, M., & Azizian, S. (2013). Mixed surface reaction and diffusion-controlled kinetic model for adsorption at the solid/solution interface. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117, 8310-8317.
- Hamzah, S., Abdullah, S. N., Mohammad, N. A., Che, M. H., Hairom, N. H., Azmi, A. A., & Yatim, N. I. (2023). Integration of Chitosan and Sugar Cane Bagasse as Adsorbent for Remazol Red Dyes Removal. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 12. doi:<https://doi.org/10.33263/BRIAC132.137>

- Heras Mozos, R. (2022). Envases activos basados en el anclaje covalente reversible de compuestos antimicrobianos en quitosano [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/188950>
- Herazo, M. Á., Romero, A. A., & Anaguano, A. H. (2011). Removal of basic red from a simulated textile effluent: A rice husks application case. *Producción + Limpia*, 6.
- Hincapié Mejía, G., Cardona Cuervo, S., & Ríos, L. A. (2018). Estudio termodinámico de la adsorción de un colorante azóico por medio de un residuo lignocelulósico en medio acuoso. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(1), 97-118.
- Hinojosa, Y. (2014). Efecto de la Estructura de Microesferas Porosas de Quitosano Sobre la Adsorción de Proteínas. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Hermosillo, Sonora, México.
- Ita Balta, Y. A., & López Mendéz, D. A. (2020). Evaluación de la capacidad de adsorción del colorante reactivo Synozol Red K-3BS utilizando como adsorbente una arcilla modificada térmicamente.
- Iqbal, M., Bhatti, H. N., & Shahzad, A. (2021). Efficient removal of toxic metals from wastewater using novel low-cost biosorbents: Interactions and mechanisms. *Environmental Pollution*, 268, 116982. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116982>
- Jang, M., Kim, Y., & Park, H. (2021). Application of response surface methodology for optimization of adsorption parameters for the removal of emerging contaminants. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101769. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101769>

- Jirón-García, E. G., Rodríguez-Mora, K., & Bernal-Samaniego, C. (2022). Obtención de nanocelulosa a partir de raquis de palma africana y bagazo de caña. *Revista Tecnología En Marcha*, 35(2), 167-181.
- Kausar, A., Ijaz, S., Rafiqat, M., Dahshan, A., Latif, A. A., Bibi, S., & Iqbal, M. (2023). Chitosan-cellulose composite for the adsorptive removal of anionic dyes: Experimental and theoretically approach. *Journal of Molecular Liquids*, 391, 123347.
- Khaliha, S., Jones, D., Kovtun, A., et al. (2023). "The removal efficiency of emerging organic contaminants, heavy metals and dyes: intrinsic limits at low concentrations." *Environmental Science: Water Research & Technology*.
<https://doi.org/10.1039/D2EW00644H>
- Kim, T. Y., Park, S. S., & Cho, S. Y. (2012). Adsorption characteristics of Reactive Black 5 onto chitosan beads cross-linked with epichlorohydrin. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18(4), 1458-1464.
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.02.006>
- Kon, K. (2018). Molécula de pululano, ilustración. *Molécula de pululano, ilustración*.
Obtenido de <https://www.alamy.com/pullulan-molecule-illustration-image471734184.html>
- Kumar, G.; Dora, D. T. K.; Jadav, D.; Naudiyal, A.; Singh, A.; Roy, T. (2021). Utilization and regeneration of waste sugarcane bagasse as a novel robust aerogel as an effective thermal, acoustic insulator, and oil adsorbent. *J. Clean*, 298, 126744,
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126744>.
- Li, J., Liu, X., Wang, Y., & Zhang, Y. (2022). Optimized removal of heavy metals by bio-based adsorbents using response surface methodology. *Journal of*

Environmental Chemical Engineering, 10(3), 107089.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107089>

Liu, X., & Zhang, L. (2015). Removal of phosphate anions using the modified chitosan beads: Adsorption kinetic, isotherm and mechanism studies. *Powder Technology*, 277, 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.02.055>

Liu, D., Qiu, F., Liu, N., Cai, Y., Guo, Y., Zhao, B., & Qiu, Y. (2022). Pore structure characterization and its significance for gas adsorption in coals: A comprehensive review. *Unconventional Resources*, 2, 139-157.

López Martínez, A., Bolio López, G. I., Veleza, L., Solórzano Valencia, M., Acosta Tejada, G., Hernández-Villegas, M. M., & Córdova-Sánchez, S. (2016). Obtención de celulosa a partir de bagazo de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). *Agroproductividad*, 9(7), 41-46.

Lu P., Hsieh Y.L. (2010). *Carbohydrate Polymers* 82, 329-336

Magdy, A., Mostafa, M. R., Moustafa, S. A., Mohamed, G. G., & Fouad, O. A. (2024). Kinetics and adsorption isotherms studies for the effective removal of Evans blue dye from an aqueous solution utilizing forsterite nanoparticles. *Scientific Reports*, 14(1), 24392.

Mahmoud, M. E., & Nabil, G. M. (2020). Batch and continuous adsorption of dyes using agricultural and industrial wastes: A critical review of recent developments. *Separation and Purification Technology*, 236, 116287. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116287>

Manals-Cutiño, E. M., Penedo-Medina, M. M., & Salas-Tort, M. D. (2015). Characterization of the cane bagasse like vegetable biomass. *Tecnología Química*.

- Martínez-Nodal, P. D. L. C., Rosa-Domínguez, E., Rodrigué-Rico, I., & Leiva-Mas, J. (2017). Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña natural utilizado como biosorbente en la remoción de hidrocarburos en agua. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 51(2), 35-39.
- Metrica. (2 de Agosto de 2023). *IMP* . Obtenido de <https://impmetrica.com/guia-completa-sobre-efluentes-industriales-y-su-tratamiento/>
- MINAM. (2005). Ley general del ambiente. Ley N 28611.
- MINAM. (2021). Política Nacional del Ambiente al 2030.
- MINAM. (2017). Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. Lima Perú.
- Montgomery, D. C. (2020). *Design and Analysis of Experiments* (10th ed.). Wiley.
- Morán J.I., Vera A., Cyras V.P., Vázquez A. (2008). *Cellulose* 15,149-159.
- Moreno Choconta, L. N. (2024). Aprovechamiento del bagazo de la caña procedente de la industria panelera, a través del tratamiento hidrotermal (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- Moreno, D. F., & Hormaza, A. (2014). Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16.
- Noreen, S., Bhatti, H. N., Iqbal, M., & Hussain, F. (2020). Chitosan, starch, polyaniline and polypyrrole biocomposite with sugarcane bagasse for the efficient removal of Acid Black dye. *International Journal of Biological Macromolecules*, 13. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.257>

- Nguyen, T. A. H., Fu, C. C., & Juang, R. S. (2020). Comparative removal of heavy metals by activated carbon derived from agricultural wastes: Equilibrium, kinetics, and mechanism. *Journal of Environmental Management*, 270, 110735. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110735>
- Orjuela-Palacio, J. M., Pérez-Calderón, J., & Zaritzky, N. E. (2023). Síntesis de nanoencapsulados de quitosano como sistemas portadores de fitosanitarios. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(1).
- Ortega, G. C. C., Arrieta, B. M. C., Guerrero, J. F. S., & Taboada, J. E. V. (2013). Adsorción por lote y en una columna de lecho fijo del colorante B39 sobre carbón activado granular. *Prospectiva*, 11(1), 66-75.
- Peralta, M. E. (2021). Desarrollo de nanopartículas magnéticas con aplicaciones en medioambiente y nanomedicina (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).
- Pérez-Calderón, J. F., Santos, M. V., & Zaritzky, N. E. (2017). Desarrollo de partículas a base de quitosano para la adsorción de un colorante azoico en efluentes de la industrial textil.
- Pérez Calderón, J. F., Marín Silva, D. A., Zaritzky, N. E., & Pinotti, A. N. (2022). Adsorbente eco-compatible de PVA/quitosano para la remoción de colorantes sintéticos: Estudio del equilibrio, cinética de adsorción y estabilidad.
- Pinero, M. P. (2023). Caña de azúcar: valor nutricional y propiedades. Obtenido de <https://mejorconsalud.as.com/cana-azucar/>

- Prasongsuk, S., Lotrakul, P., Ali, I., Bankeeree, W., & Punnapayak, H. (2018). The current status of *Aureobasidium pullulans* in biotechnology. *Folia microbiologica*, 63, 129-140.
- Prehu, I. (2024). 5 impactos ambientales de la industria textil y 3 formas de ser más sostenible. *Water Treatment Magazine* logo. Obtenido de <https://watertreatmentmagazine.com/es/impactos-industria-textil/#:~:text=%C2%BFC%C3%B3mo%20la%20industria%20textil%20causa%20contaminaci%C3%B3n%20en%20el,de%20la%20industria%20textil%20en%20los%20clientes%20>
- Qi, X., Zeng, Q., Tong, X., Su, T., & Xie, L. (2021). Polydopamine/montmorillonite-embedded pullulan hydrogels as efficient adsorbents for removing crystal violet. *Materials, Journal of Hazardous*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123359>
- Qi, L., Xu, Z., Jiang, X., Hu, C., & Zou, X. (2004). Preparation and antibacterial activity of chitosan nanoparticles. *Carbohydrate Research*, 339, 2693-2700. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2004.09.007>
- Qian, C., Li, Q., Zhang, Z., Wang, X., Hu, J., & Cao, W. (2020). Prediction of higher heating values of biochar from proximate and ultimate analysis. *Fuel*, 265, 116925.
- Razi, A. et al. (2025). Evaluation of the various adsorption isotherm models for the photocatalytic removal of methylene blue from the wastewater by graphene oxide/TiO₂/SiO₂. *Journal* Name. https://arwww.razi.ac.ir/article_2845_5fefe8b910a1d2239cd4ef52ef4f5b78.pdf

- Real Huamaní, C. P. (2019). *“Reducción de la concentración del colorante industrial textil azul BRL, aplicando nanopartículas de plata sintetizadas con extracto de Petroselinum crispum.* Lima. Obtenido de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/42463/Real_HCP.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Reyna, V. (2014). Evaluación de Propiedades Bioactivas de una Matriz Porosa Nanoestructurada de Quitosano. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Hermosillo, Sonora, México.
- Rodríguez, A. et al. (2014). Estructura química del bagazo de caña de azúcar y sus aplicaciones en la adsorción de colorantes. *Revista Colombiana de Química*, 43(2), 71–83.
- Saborit Pino, K. Z. (2015). Micropartículas porosas nanoestructuradas de quitosano acarreadoras de moléculas bioactivas.
- Sailema Masapuncho, J. L., & Venegas Ruiz, M. E. (2024). Síntesis de fibras de carbono a partir de bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*).
- Sala Gascón, A. (2022). Síntesis y caracterización avanzada de materiales zeolíticos mediante el empleo de nuevos agentes orgánicos directores de estructura [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/186873>
- Sejie, F. P., & Nadiye-Tabbiruka, M. S. (2016). Removal of methyl orange (MO) from water by adsorption onto modified local clay (kaolinite). *Physical Chemistry*, 6(2), 39-48.

Sierra, D. M., Orozco, C. P., Rodríguez, M. A., & Villa, W. A. (2013). Optimización de un protocolo de extracción de quitina y quitosano desde caparazones de crustáceos. *Scientia Et Technica*, 18(1), 260-266.
<https://doi.org/10.22517/23447214.7555>

Singh, R. (2021). *Producción de Polulano*. India: Nuestro Connocimiento.

Sivaram, N.M., Gopal, P.M y Debabrata Barik, (2019). Chapter 4 - Toxic Waste From Textile Industries, In Woodhead Publishing Series in Energy, Energy from Toxic Organic Waste for Heat and Power Generation, Woodhead Publishing, Pages 43-54, ISBN 9780081025284, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102528-4.00004-3>.

Sócrates, G. (2001). Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts, 3rd ed. John Wiley & Sons.

Suárez, L. C. (2002). *Introducción a la catálisis heterogénea*. (T. one, Ed.) Bogotá.

Sumantri, I. (2021). Langmuir and Freundlich isotherm adsorption using activated charcoal.
https://docpak.undip.ac.id/id/eprint/10977/1/Budhiary_2021_IOP_Conf._Mater._Sci._Eng._1053_012113.pdf

Taipe, G. M., Marilú, I. M., & Gomez, A. L. (2017). *Preparación de perlas de quitosano magnetizadas y modificadas químicamente para remover colorantes textiles*. Lima: Universidad de Lima, Instituto de Investigación Científica.

Tejada Tovar, C., Villabona Ortiz, A. y Garcés Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *TecnoLógicas*, 18(34), 109-123. From

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992015000100010&lng=en&tlng=es.

- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and applied chemistry*, 87(9–10), 1051–1069.
- Tören, E., & Mazari, A. A. (2024). Pullulan/collagen scaffolds promote chronic wound healing via mesenchymal stem cells. In *Micro* (Vol. 4, No. 4, pp. 599-620). MDPI.
- Torres Perez, J. (2021). Residuos Agrícolas (Cáscara de Nuez) como Material Adsorbente para la Eliminación de Colorante Rojo Allura. Instituto de Ciencias Biomédicas.
- Torres Galindo, A. L., & Vanegas López, G. J. (2018). Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y borra de café (*Coffea arabica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF.
- Trombotto Herfert, K. (2023). Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el desarrollo de sistemas adsorbentes para el tratamiento de efluentes de la industria textil (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).
- Valencia, Y. Y. (2017). *Síntesis de hidrogeles termosensibles para la remoción de colorantes de tipo azoico en la industria textil de Arequipa*. Arequipa.
- Vargas, N., Zara, J., Navas, P., Márquez-Riquel, M., Yegres, F., & Cubillan, L. (2017). Empleo de la Espectroscopia Infrarroja (FT-IR-ATR) como herramienta para la Caracterización del bagazo de caña proveniente de la Sierra Falconiana. *Química Viva*, 16(3), 17-24.

- Vargas, M., Rozada, F., Morán, A., & García, A. (2006). Producción de adsorbentes a partir de bagazo de caña de azúcar para la eliminación de colorantes en fase acuosa. *REVISTA AMBIENTAL AGUA, AIRE Y SUELO*, 1(1), 48–53.
<https://doi.org/10.24054/aaas.vi1.2048>
- Vargas-Radillo, J. J., Salazar-Ríos, E., Barrientos-Ramírez, L., Pérez-Centeno, A., Rentería-Urquiza, M., Rodríguez-Rivas, A., ... & Rutiaga-Quñones, J. (2015). Pasta blanqueada y azúcares fermentables a partir de médula de bagazo de caña. *Madera y bosques*, 21(2), 117-130.
- VIVIENDA. (2019). Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA, que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domesticas en sistema de alcantarillado sanitario. Lima, Perú.
- Wang, X., Jiang, J., & Gao, W. (2022). Reviewing textile wastewater produced by industries: characteristics, environmental impacts, and treatment strategies. *Water Sci Technol* (2022) 85 (7): 2076–2096. doi:<https://doi.org/10.2166/wst.2022.088>
- Yang, X., Zhang, H., Cheng, S., & Zhou, B. (2022). Optimization of the adsorption and removal of Sb (iii) by MIL-53 (Fe)/GO using response surface methodology. *RSC advances*, 12(7), 4101-4112.
- Yang, J., Ren, Y., Chen, S., Zhang, Z., Pang, H., Wang, X., & Lu, J. (2023). Thermally activated drinking water treatment sludge as a supplementary cementitious material: Properties, pozzolanic activity and hydration characteristics. *Construction and Building Materials*, 365, 130027.
- Yue, Y., Han, J., Han, G., Aita, G. M., & Wu, Q. (2015). Cellulose fibers isolated from energycane bagasse using alkaline and sodium chlorite treatments: Structural, chemical and thermal properties. *Industrial Crops and Products*, 76, 355-363.

Zalar, P., Gostinčar, C., Hoog, G. d., V. Uršič, I. S., & Gunde-Cimerman, y. N. (2008).

Redefinición de *Aureobasidium pullulans* y sus variedades. *Micology*. doi:doi:

10.3114/sim.2008.61.02



ANEXOS

Anexo 1. Constancia de acreditación de realización del proyecto



Universidad Católica
de Santa María

CONSTANCIA DE ACREDITACIÓN DE USO Y REALIZACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE TESIS

Universidad Católica de Santa María
Laboratorio de Ciencias de los Materiales
Pabellón F-406

Arequipa

Por medio de la presente, se certifica que el estudiante Sebastian Mauricio Azurin Figueroa, identificado con DNI 71469794, ha llevado a cabo la investigación correspondiente a su tesis titulada: *"Eficiencia de la adsorción del bagazo de caña de azúcar modificado por adición de quitosano y pululano en la remoción del colorante rojo-G en muestras sintéticas"*, en el Laboratorio de Ciencias de los Materiales, ubicado en el Pabellón F-406 de la Universidad Católica de Santa María.

Durante el desarrollo de su proyecto de investigación, el tesista utilizó diversos equipos y materiales especializados para realizar los experimentos requeridos en su estudio, que se detallan a continuación:

Equipos utilizados:

- Horno BINDER BD
- Mufla Thermolyne (Barnsfeed)
- Analizador elemental Flash Smart
- Espectrómetro infrarrojo Thermo Scientific (Nicolet Summit)
- Agitador magnético
- Sortómetro Anton Parr Nova 600
- Balanza analítica Radwas AS 220

La investigación se ha realizado siguiendo las normas y procedimientos establecidos por la Institución, con un manejo adecuado de los equipos y materiales mencionados, respetando en todo momento las normativas de seguridad y los protocolos técnicos del laboratorio.

Este documento se expide a solicitud del interesado para fines pertinentes.

Atentamente,

Dr. Colina Andrade, Gilberto de Jesús
Coordinador del Laboratorio de Ciencias de los Materiales-F-406
Universidad Católica de Santa María



Dr. Colina Andrade, Gilberto de Jesús
CE: 002957143
gcolina@ucsm.edu.pe

Anexo 2. Constancia de calibración del equipo Sortometro (Anton Parr Nova 600)



Calibration Certificate

Part No (P/N) 230147
 Serial No (S/N) 1050040053
 Quartz Rod (ID) 4213
 Quartz Rod Calibration (Volume cm³) 12.2599

Dear Customer

With this certificate the manufacturer declares, that this equipment was calibrated in accordance with our quality management system and the applicable calibration procedures.

Manifold Calibration	Model Series	Lower Limit	Result	Upper Limit
	800	25.500		25.798
Manifold Calibration (volume ml)	600	24.008	24.268	24.313

Certified BAM-P115 Analysis Data (BET UNITS N/A)	Sample Weight (g)	Surface Area < 2-sx (147.3 +/- 7.3)	Pore Volume (.214 +/- .007)	Average Surface Area < 1-sx	Variance (between stations) < 2%	Isotherm Data @ 0.3 + (.005 x Actual TPV) Openness (%) +/- .5 *Not Applicable for BET units
1	0.1312	150.522	0.2146	150.8	0.177	0.426
2	0.1147	151.056	0.2146			0.405
3						
4						

BET Analysis Data (SARM 2005)		Surface Area m2/g			
Station	Sample Weight (g)	Sample Lot #	Lower Limit	Result	Upper Limit
1	0.1459	5020	90.970	97.500	106.030
2	0.1348	5020	90.970	98.654	106.030
3					
4					

All results are within the tolerance

Anton Paar QuantaTec Inc.
 1900 Corporate Drive
 Boynton Beach, Florida 33426
 USA

Inspector:
 Inspection date:
 Form:

SPU2464
10/03/2025
I04AF008EN-B

Anexo 3. Constancia de calibración del equipo Analizador elemental (Flash Smart)



CONSTRUIMOS
SOLUCIONES
INTEGRALES

CERTIFICADO DE VERIFICACIÓN OPERACIONAL

Declaración obtenida del resultado de la Verificación Operacional del sistema Analizador Organico Elemental FlashSMART

Compañía: Universidad Católica de Santa María

Equipo: FlashSMART

Marca: Thermo Scientific

Código de equipo:

I. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO INSTALADO

EQUIPO INSTALADO			
Descripción	Aplica	Modelo	Número de Serie
Analizador Orgánico Elemental	☒	FlashSmart	2023.FLS0260
Autosampler	☒	MAS PLUS	2023.MAS 0364
Otros	☐	-	-

II. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

- * El equipo: Analizador Orgánico Elemental FlashSMART
De la marca Thermo Scientific, cumplió con la verificación Operacional
- * Las pruebas realizadas a cada módulo del equipo se adjuntan como anexo a este reporte de servicio.

Fecha de Verificación Operacional : viernes, 27 de junio de 2025

Próxima Verificación Operacional (o después de una reparación mayor) : 27 de junio de 2026

Responsable RPA : Pamela Garate


 PAMELA GARATE G.
 RPA
 Superior Técnico

Az. Guardia Civil N°657-661 / 6to piso / San Borja

→ rgara@rpaperu.com

→ (511) 451 3457 / 545 0785

→ rpaperu.com

Anexo 4. Constancia de calibración del equipo Espectrómetro infrarrojo Thermo Scientific (Nicolet Summit)



CONSTRUIMOS
SOLUCIONES
INTEGRALES

CERTIFICADO DE VERIFICACIÓN OPERACIONAL

Declaración obtenida del resultado de la Verificación Operacional del sistema de THERMO FT-IR

COMPañÍA: UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA

EQUIPO: THERMO FT-IR **MARCA:** THERMO SCIENTIFIC **CÓDIGO:** SUMMIT

I. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO INSTALADO

INFORMACIÓN DE LOS MÓDULOS INSTALADOS

MÓDULO DE EQUIPAMIENTO INSTALADO	MODELO	NÚMERO DE SERIES
SOFTWARE	OMNIC PARADIGM	1.7
ESPECTROFOTOMETRO FT-IR	SUMMIT	BDM2110151
ACCESORIO 1	ID1 TRANSMISSION	40-5001167
ACCESORIO 2	NO APLICA	

II. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

* El equipo: THERMO FT-IR De la marca THERMO SCIENTIFIC , Si cumple con la verificación Operacional

* Las pruebas realizadas a cada módulo del equipo se adjuntan como anexo a este reporte de servicio.

Fecha de Verificación Operacional : martes, 1 de agosto de 2023

Próxima Verificación Operacional (o después de una reparación mayor) : jueves, 1 de agosto de 2024

Responsable RPA: PAMELA GARATE GONZALES

Responsable RPA:

FECHA: martes, 1 de agosto de 2023

FIRMA: 

NOMBRE: PAMELA GARATE GONZALES

Av. Guardia Civil N°657-661 / 6to piso / San Isidro

→ rpacat@rpaperu.com

→ (511) 451 2457 / 561 0781

→ rpaperu.com

Anexo 5. Constancia de calibración del equipo Espectrómetro infrarrojo Thermo Scientific (Nicolet Summit)



CONSTRUIMOS
SOLUCIONES
INTEGRALES

PRUEBA DE VERIFICACIÓN PREVIO AL CAMBIO DEL ESPEJO 1

SISTEMA DE VALIDACION
GENESYS 150

Cliente : **UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA**

Sistema : **ESPECTROFOTOMETRO UV-VIS GENSYS 150**
Nro de Serie: **9A5X354048**

Set de Estándares de Longitud de Onda : RM-HG Número de Serie: 43163
Fecha de Calibración: 22 de enero del 2024

Set de Estándares de Absorbancia : RM-1N2N3N Número de Serie: 43163
Fecha de Calibración: 22 de enero del 2024

SISTEMA DE VALIDACION

EXACTITUD Y PRECISION DE LONGITUD DE ONDA

Tipo de Filtro	Posicion nominal del Pico	Rango	Tolerancia del Filtro	Tolerancia del Equipo	Rango Permitido (nm)	Valor Medido	Pasa/Falla
Holmium	278.68 nm	270 a 290	0.11	0.5	278.07 - 279.29	278.39	Pasa
Holmium	287.79 nm	280 a 290	0.11	0.5	287.18 - 288.40	287.45	Pasa
Holmium	333.79 nm	330 a 340	0.11	0.5	333.18 - 334.40	334.01	Pasa
Holmium	360.60 nm	355 a 365	0.11	0.5	359.99 - 361.21	360.52	Pasa
Holmium	417.5 nm	415 a 425	0.11	0.5	416.99 - 418.21	417.22	Pasa
Holmium	447.64 nm	445 a 455	0.11	0.5	447.03 - 448.25	447.47	Pasa
Holmium	537.22 nm	530 a 540	0.11	0.5	536.61 - 537.83	537.19	Pasa
Holmium	641.6 nm	634 a 644	0.11	0.5	640.99 - 642.21	641.23	Pasa

EXACTITUD Y PRECISION FOTOMETRICA

Filtro	Longitud de Onda	Valor Nominal	Tolerancia del Filtro	Tolerancia del Equipo	Rango Permitido (Abs)	Valor Medido	Pasa/Falla
131138	440.0 nm	1.0037	0.0027	0.0040	0.997 - 1.010	1.006	Pasa
	465.0 nm	0.9469	0.0027	0.0040	0.940 - 0.954	0.948	Pasa
	546.1 nm	1.0026	0.0027	0.0040	0.996 - 1.009	1.005	Pasa
	590.0 nm	1.1147	0.0027	0.0040	1.108 - 1.121	1.116	Pasa
125464	440.0 nm	1.1004	0.0027	0.0040	1.094 - 1.107	1.102	Pasa
	465.0 nm	0.7038	0.0027	0.0040	0.697 - 0.711	0.703	Pasa
	546.1 nm	0.6648	0.0027	0.0040	0.658 - 0.672	0.664	Pasa
	590.0 nm	0.7012	0.0027	0.0040	0.695 - 0.708	0.701	Pasa
127722	440.0 nm	0.7766	0.0027	0.0040	0.770 - 0.783	0.775	Pasa
	465.0 nm	0.7659	0.0027	0.0040	0.759 - 0.773	0.765	Pasa
	546.1 nm	0.5606	0.0027	0.0040	0.554 - 0.567	0.558	Pasa
	590.0 nm	0.5228	0.0027	0.0040	0.516 - 0.530	0.520	Pasa

Ing. de Servicio : **Pamela Gárate Gonzales** Firma:

Cliente : **Ruly Terán** Firma:

Reporte de Servicio : **ST2025-391** Fecha : **Jueves 22 de mayo del 2025**



CONSTRUIMOS
SOLUCIONES
INTEGRALES

PRUEBA DE VERIFICACIÓN POSTERIOR AL CAMBIO DEL ESPEJO 1

SISTEMA DE VALIDACION
GENESYS 150

Cliente : **UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA**

Sistema : **ESPECTROFOTOMETRO UV-VIS GENSYS 150**
Nro de Serie: **9A5X354048**

Set de Estándares de Longitud de Onda : RM-HG Número de Serie: 43163
Fecha de Calibración: 22 de enero del 2024

Set de Estándares de Absorbancia : RM-1N2N3N Número de Serie: 43163
Fecha de Calibración: 22 de enero del 2024

SISTEMA DE VALIDACION

EXACTITUD Y PRECISION DE LONGITUD DE ONDA

Tipo de Filtro	Posicion nominal del Pico	Rango	Tolerancia del Filtro	Tolerancia del Equipo	Rango Permitido (nm)	Valor Medido	Pasa/Falla
Holmium	278.68 nm	270 a 290	0.11	0.5	278.07 - 279.29	278.58	Pasa
Holmium	287.79 nm	280 a 290	0.11	0.5	287.18 - 288.40	287.64	Pasa
Holmium	333.79 nm	330 a 340	0.11	0.5	333.18 - 334.40	334.25	Pasa
Holmium	360.60 nm	355 a 365	0.11	0.5	359.99 - 361.21	360.70	Pasa
Holmium	417.5 nm	415 a 425	0.11	0.5	416.99 - 418.21	417.40	Pasa
Holmium	447.64 nm	445 a 455	0.11	0.5	447.03 - 448.25	447.59	Pasa
Holmium	537.22 nm	530 a 540	0.11	0.5	536.61 - 537.83	537.27	Pasa
Holmium	641.6 nm	634 a 644	0.11	0.5	640.99 - 642.21	641.72	Pasa

EXACTITUD Y PRECISION FOTOMETRICA

Filtro	Longitud de Onda	Valor Nominal	Tolerancia del Filtro	Tolerancia del Equipo	Rango Permitido (Abs)	Valor Medido	Pasa/Falla
131138	440.0 nm	1.0037	0.0027	0.0040	0.997 - 1.010	1.006	Pasa
	465.0 nm	0.9469	0.0027	0.0040	0.940 - 0.954	0.948	Pasa
	546.1 nm	1.0026	0.0027	0.0040	0.996 - 1.009	1.005	Pasa
	590.0 nm	1.1147	0.0027	0.0040	1.108 - 1.121	1.117	Pasa
125464	440.0 nm	1.1004	0.0027	0.0040	1.094 - 1.107	1.102	Pasa
	465.0 nm	0.7038	0.0027	0.0040	0.697 - 0.711	0.703	Pasa
	546.1 nm	0.6648	0.0027	0.0040	0.658 - 0.672	0.664	Pasa
	590.0 nm	0.7012	0.0027	0.0040	0.695 - 0.708	0.701	Pasa
127722	440.0 nm	0.7766	0.0027	0.0040	0.770 - 0.783	0.775	Pasa
	465.0 nm	0.7659	0.0027	0.0040	0.759 - 0.773	0.765	Pasa
	546.1 nm	0.5606	0.0027	0.0040	0.554 - 0.567	0.558	Pasa
	590.0 nm	0.5228	0.0027	0.0040	0.516 - 0.530	0.520	Pasa

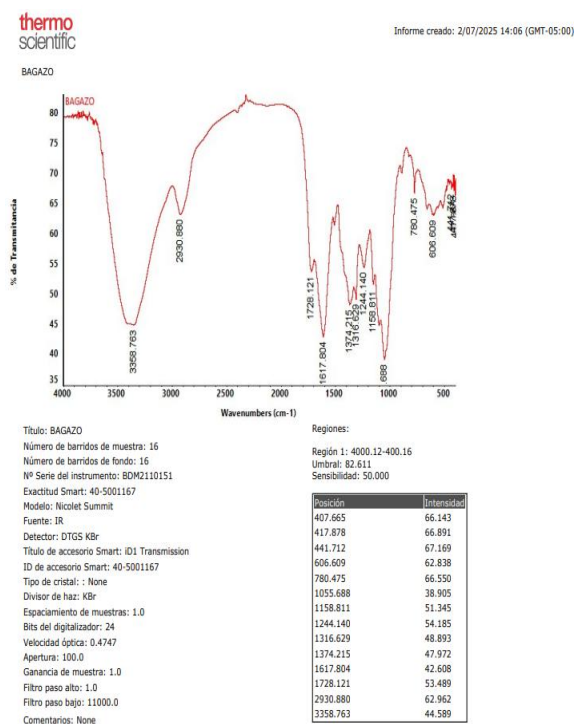
Ing. de Servicio : **Pamela Gárate Gonzales** Firma:

Cliente : **Ruly Terán** Firma:

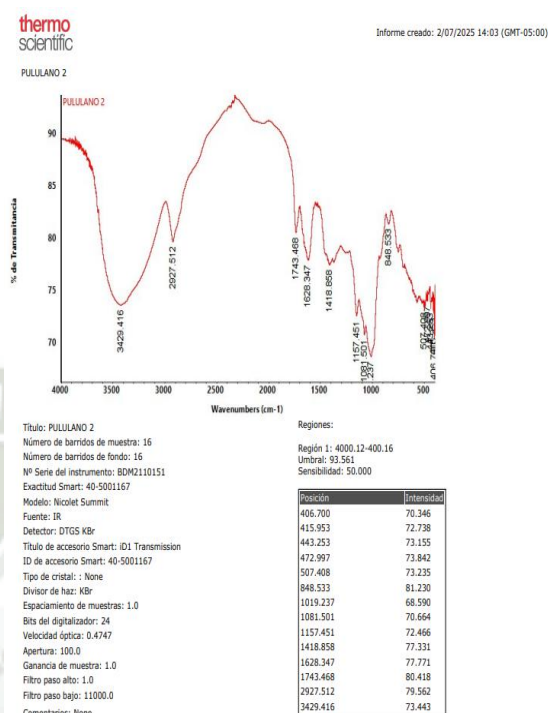
Reporte de Servicio : **ST2025-391** Fecha : **Jueves 22 de mayo del 2025**

Anexo 6. Grupos funcionales de los adsorbentes

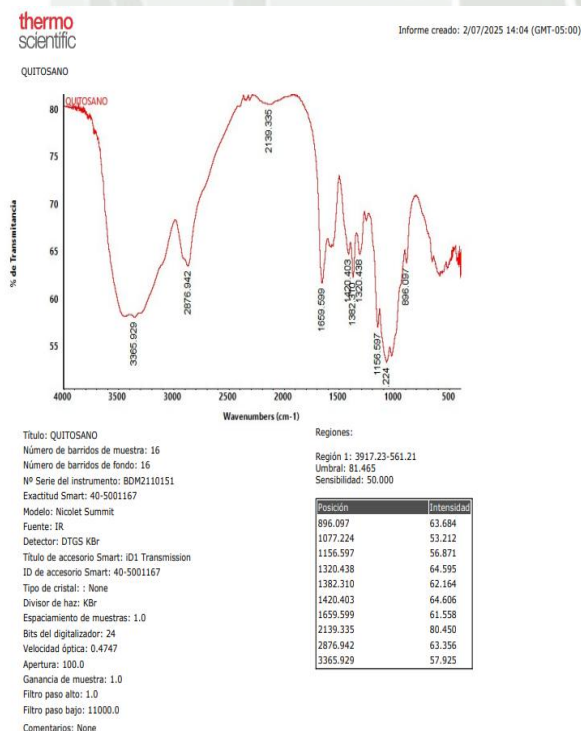
(A)



(B)



(C)



Nota. (A) corresponde al bagazo de caña de azúcar modificado, (B), pululano y (C) quitosano.

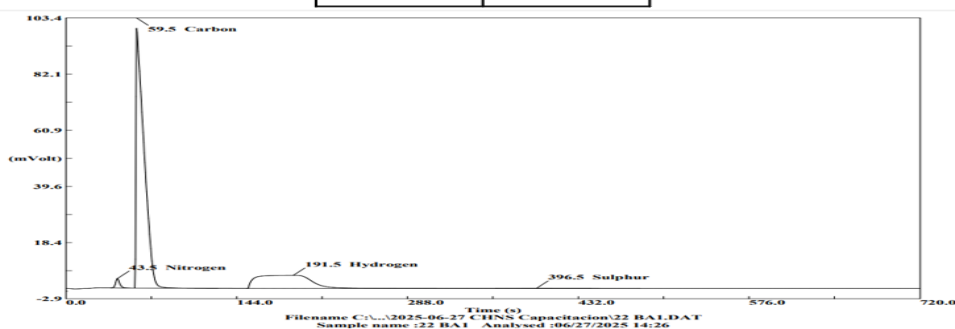
Anexo 7. Cromatografía de los adsorbentes del análisis elemental

(A)

CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\...\Capacitacion Jun 2025\2025-06-25 CHNS Capcitacion\2025-06-25 CHNS Capcitacion
Chromatogram :	14 UNK SULF 01
Operator ID :	
Company Name :	
Analysed :	06/25/2025 16:27
Printed :	6/27/2025 14:21
Sample ID :	14 UNK SULF 01 (# 13)
Instrument N. :	Instrument #1
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.05
Calib. method :	using 'Least Squares to Linear fit'

Element Name	
-----	-----
Nitrogen	1.9013
Carbon	42.5905
Hydrogen	4.6835
Suphur	0.1284
Totals	49.3038

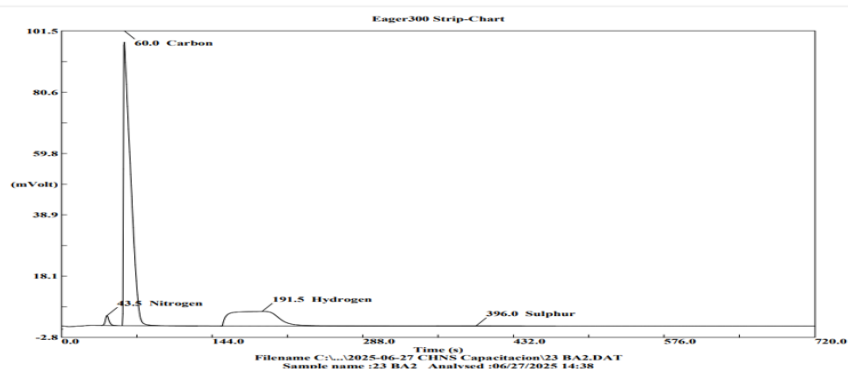


CHNS

(B)

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\...\Capacitacion Jun 2025\2025-06-25 CHNS Capcitacion\2025-06-25 CHNS Capcitacion
Chromatogram :	14 UNK SULF 01
Operator ID :	
Company Name :	
Analysed :	06/25/2025 16:27
Printed :	6/27/2025 14:21
Sample ID :	14 UNK SULF 01 (# 13)
Instrument N. :	Instrument #1
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.05
Calib. method :	using 'Least Squares to Linear fit'

Element Name	
-----	-----
Nitrogen	1.8265
Carbon	41.4618
Hydrogen	4.6709
Suphur	0.1465
Totals	48.1057

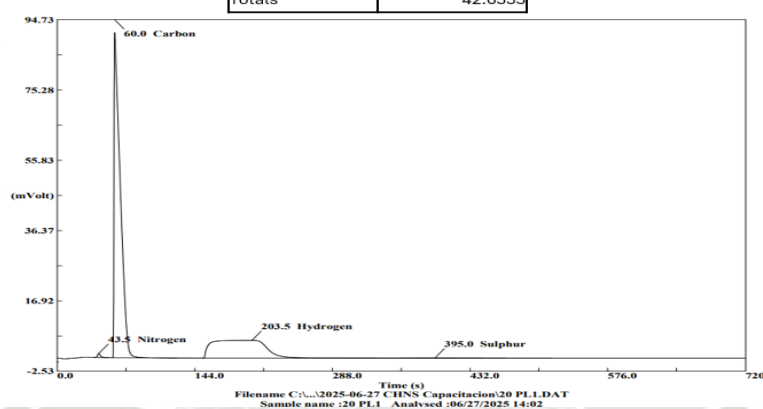


(C)

CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\...\Capacitacion Jun 2025\2025-06-25 CHNS Capcitacion\2025-06-25 CHNS Capcitacion
Chromatogram :	14 UNK SULF 01
Operator ID :	
Company Name :	
Analysed :	06/25/2025 16:27
Printed :	6/27/2025 14:21
Sample ID :	14 UNK SULF 01 (# 13)
Instrument N. :	Instrument #1
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.05
Calib. method :	using 'Least Squares to Linear fit'

Element Name	
-----	-----
Nitrogen	0.5243
Carbon	36.3373
Hydrogen	5.6219
Suphur	0.1719
Totals	42.6555

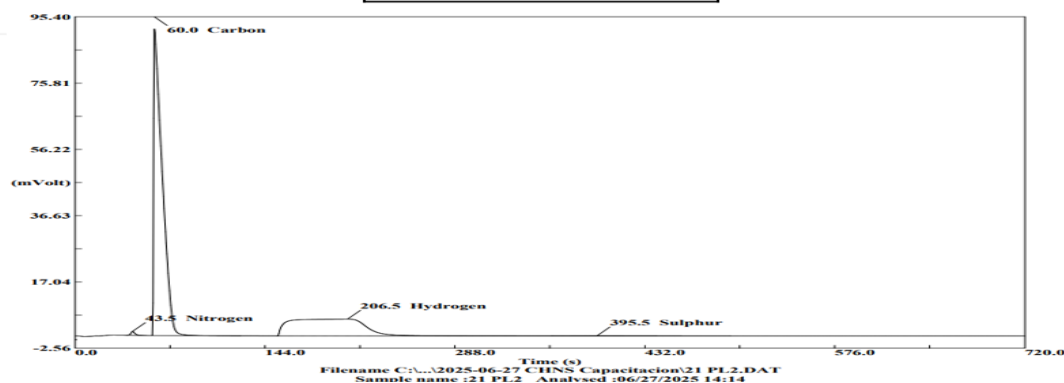


(D)

CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\...\Capacitacion Jun 2025\2025-06-25 CHNS Capcitacion\2025-06-25 CHNS Capcitacion
Chromatogram :	14 UNK SULF 01
Operator ID :	
Company Name :	
Analysed :	06/25/2025 16:27
Printed :	6/27/2025 14:21
Sample ID :	14 UNK SULF 01 (# 13)
Instrument N. :	Instrument #1
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.05
Calib. method :	using 'Least Squares to Linear fit'

Element Name	
-----	-----
Nitrogen	0.5802
Carbon	40.0089
Hydrogen	6.2360
Suphur	0.1843
Totals	47.0095

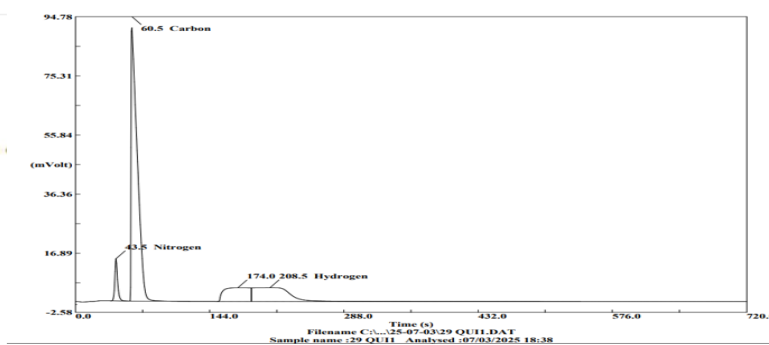


(E)

CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\...\Capacitacion Jun 2025\2025-06-25 CHNS Capcitacion\2025-06-25 CHNS Capcitacion
Chromatogram :	14 UNK SULF 01
Operator ID :	
Company Name :	
Analysed :	06/25/2025 16:27
Printed :	6/27/2025 14:21
Sample ID :	14 UNK SULF 01 (# 13)
Instrument N. :	Instrument #1
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.05
Calib. method :	using 'Least Squares to Linear fit'

Element Name	
-----	-----
Nitrogen	6.675
Carbon	40.960
Hydrogen	3.898
Suphur	0.000
Totals	51.5323

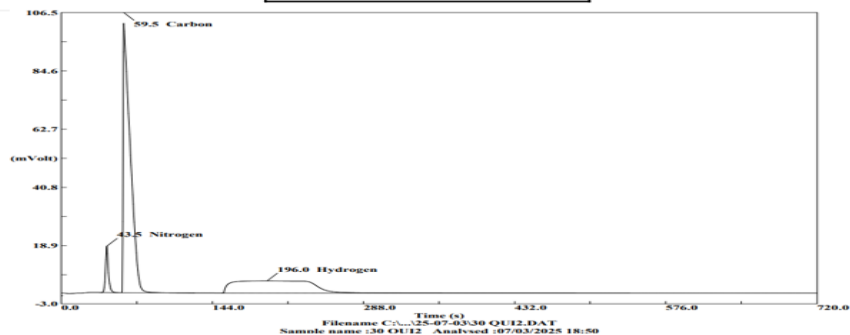


(F)

CHNS

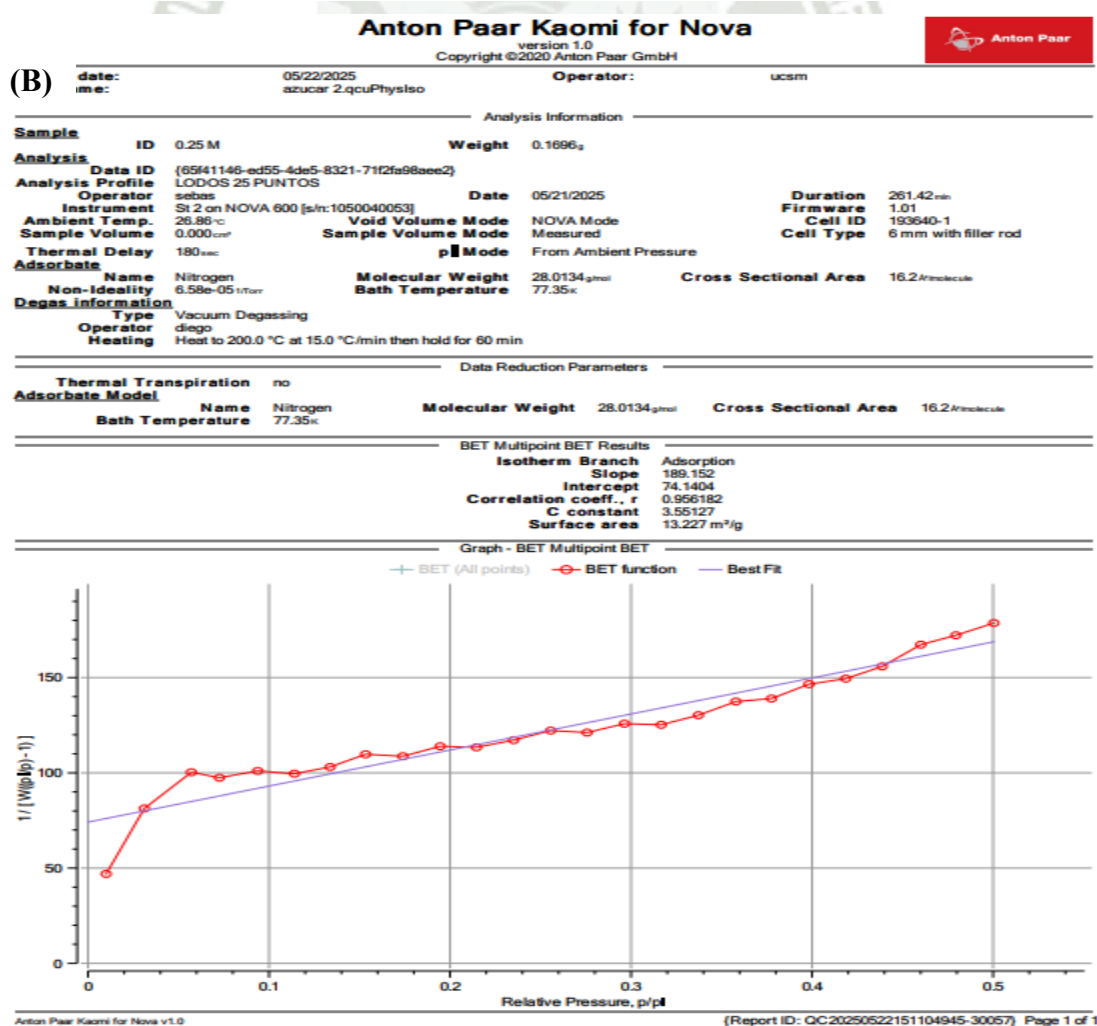
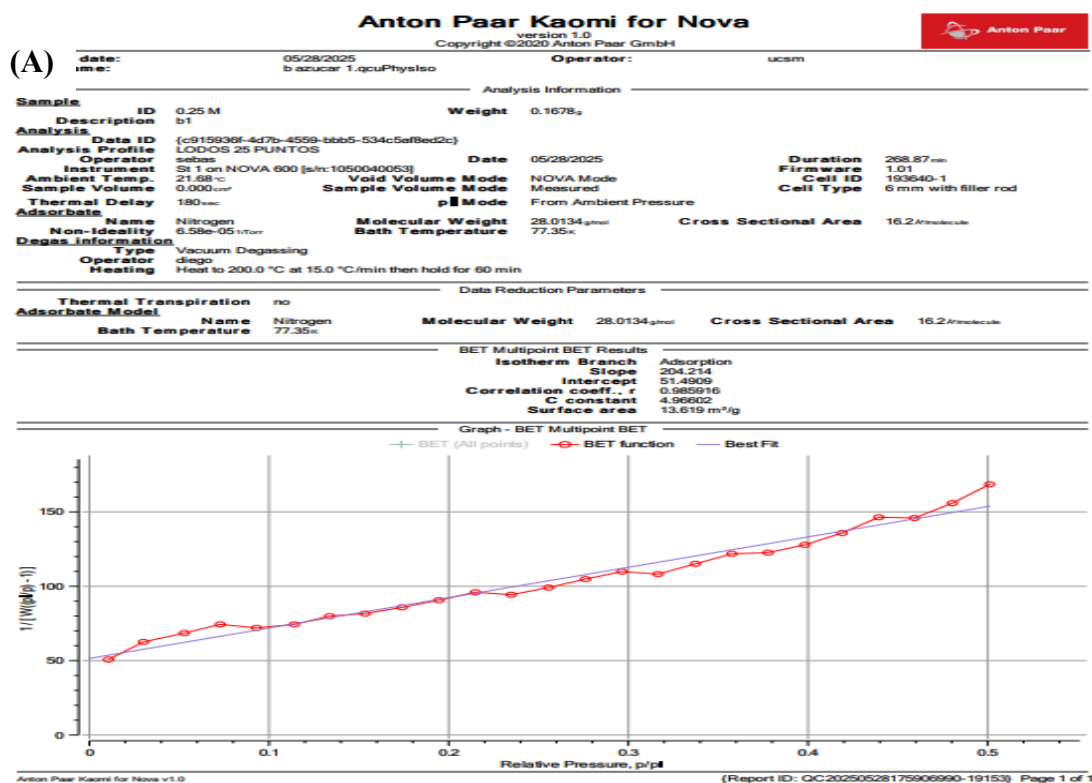
Method Name :	CHNS
Method File :	C:\...\Capacitacion Jun 2025\2025-06-25 CHNS Capcitacion\2025-06-25 CHNS Capcitacion
Chromatogram :	14 UNK SULF 01
Operator ID :	
Company Name :	
Analysed :	06/25/2025 16:27
Printed :	6/27/2025 14:21
Sample ID :	14 UNK SULF 01 (# 13)
Instrument N. :	Instrument #1
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.05
Calib. method :	using 'Least Squares to Linear fit'

Element Name	
-----	-----
Nitrogen	6.685
Carbon	41.970
Hydrogen	6.799
Suphur	0.000
Totals	55.4540

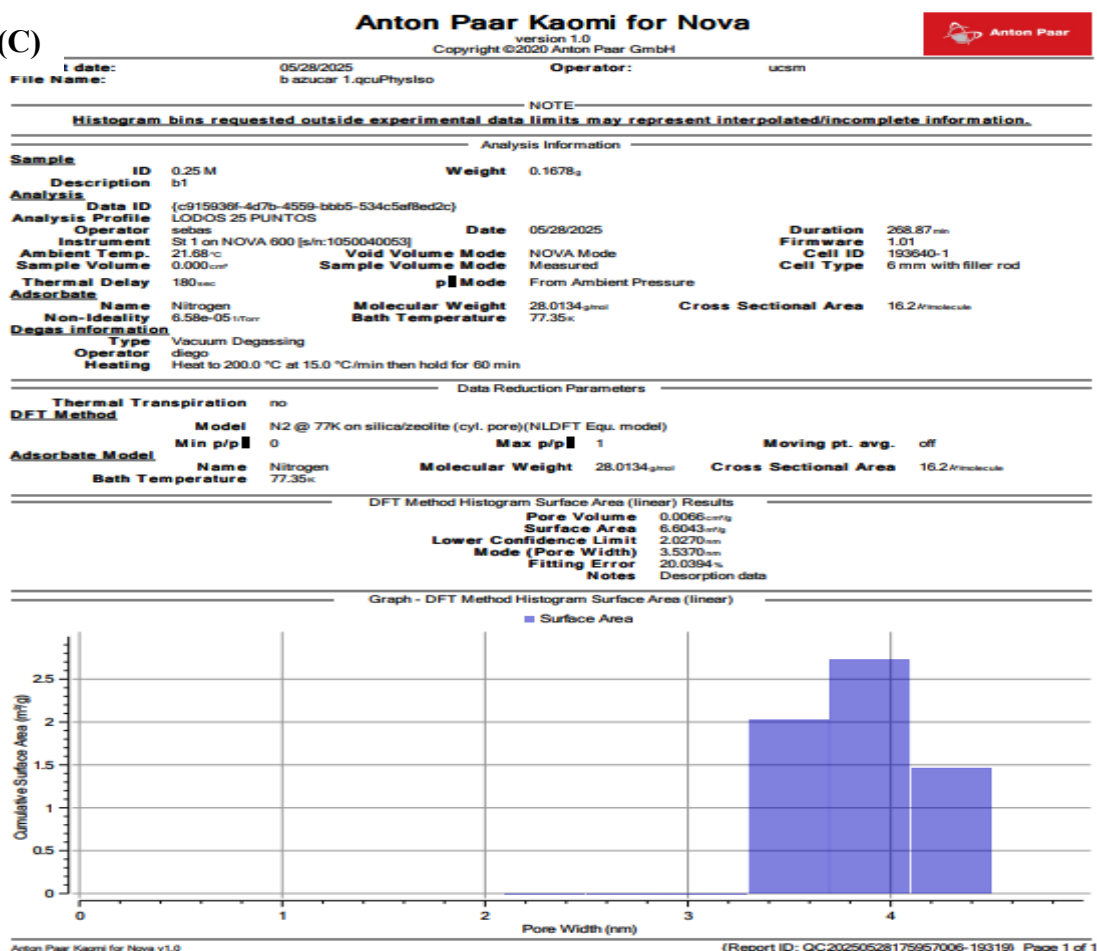


Nota. (A – B) corresponde al bagazo de caña de azúcar modificado, (C - D), pululano y (E – F) a quitosano

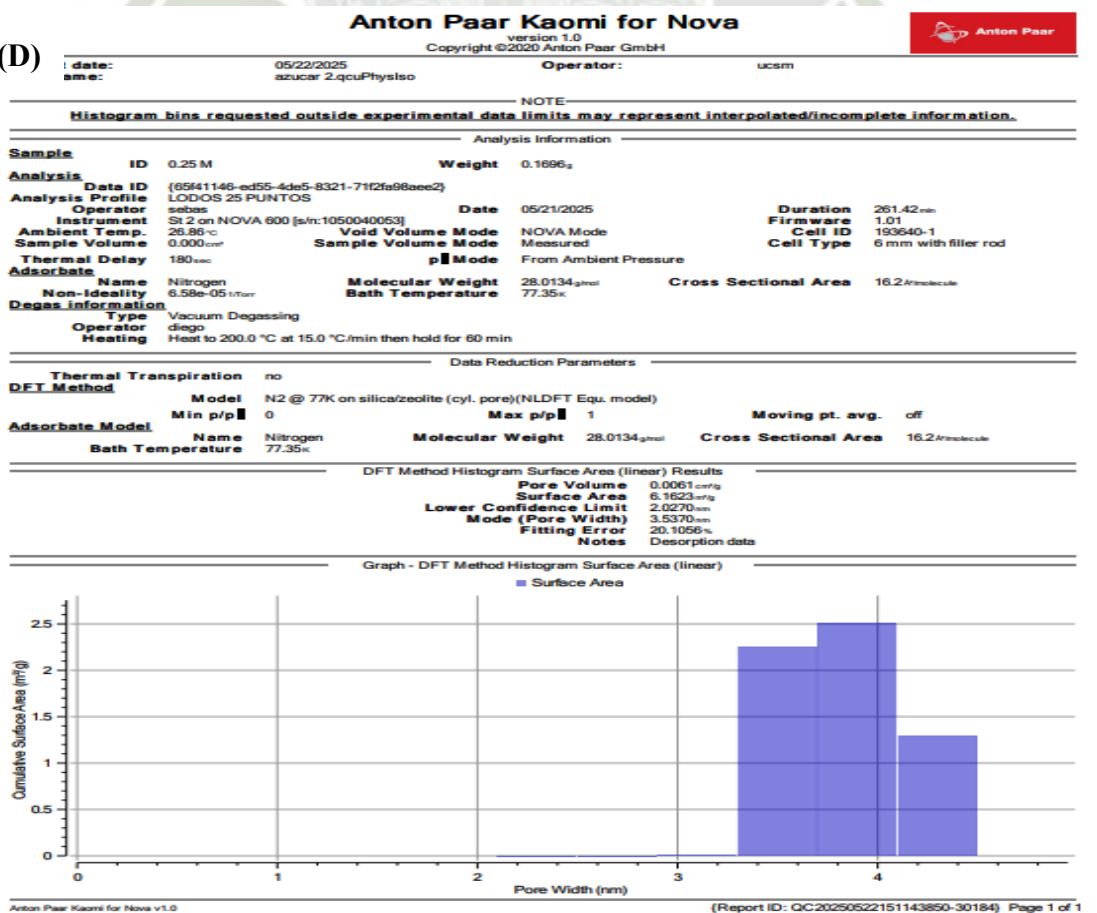
Anexo 8. Características superficiales del bagazo de caña de azúcar

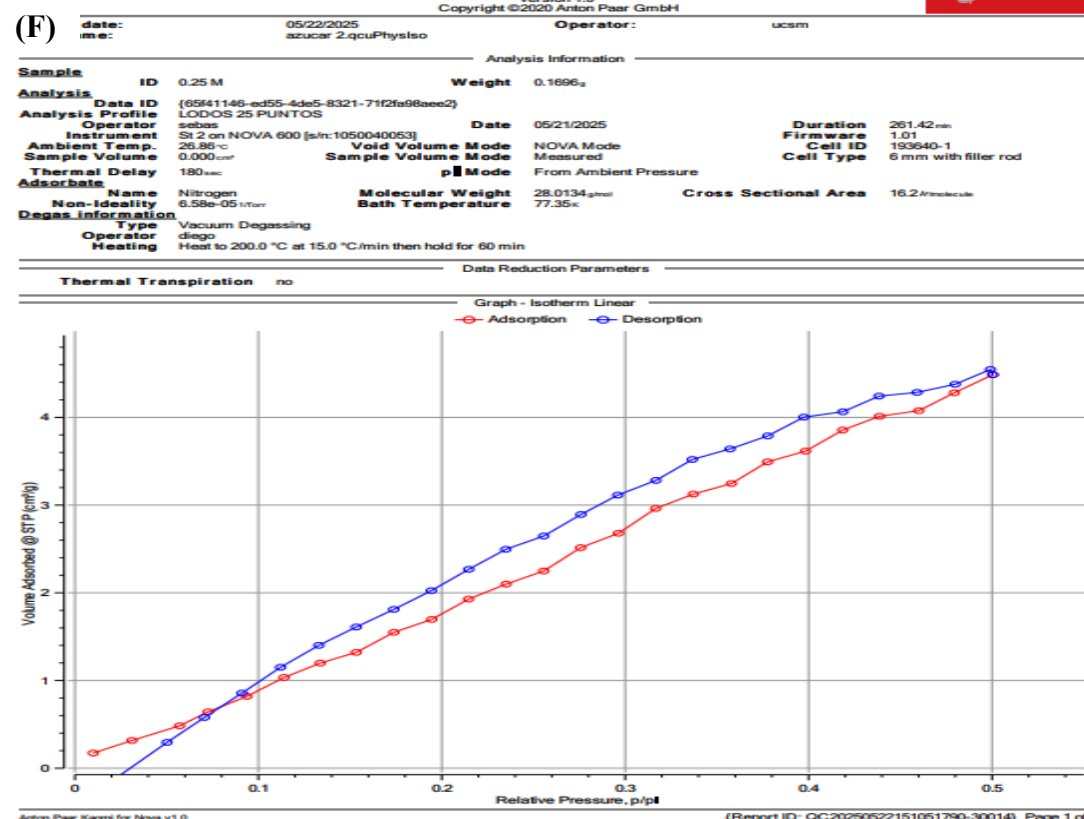
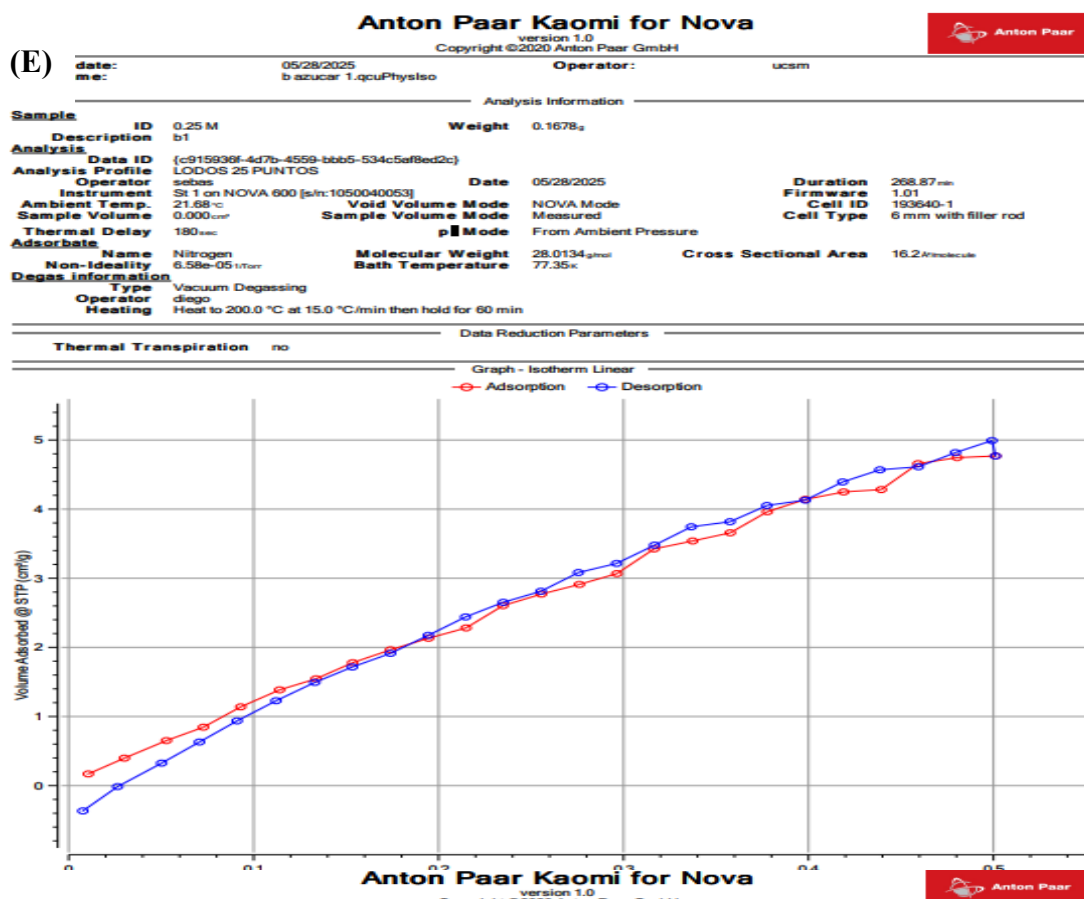


(C)



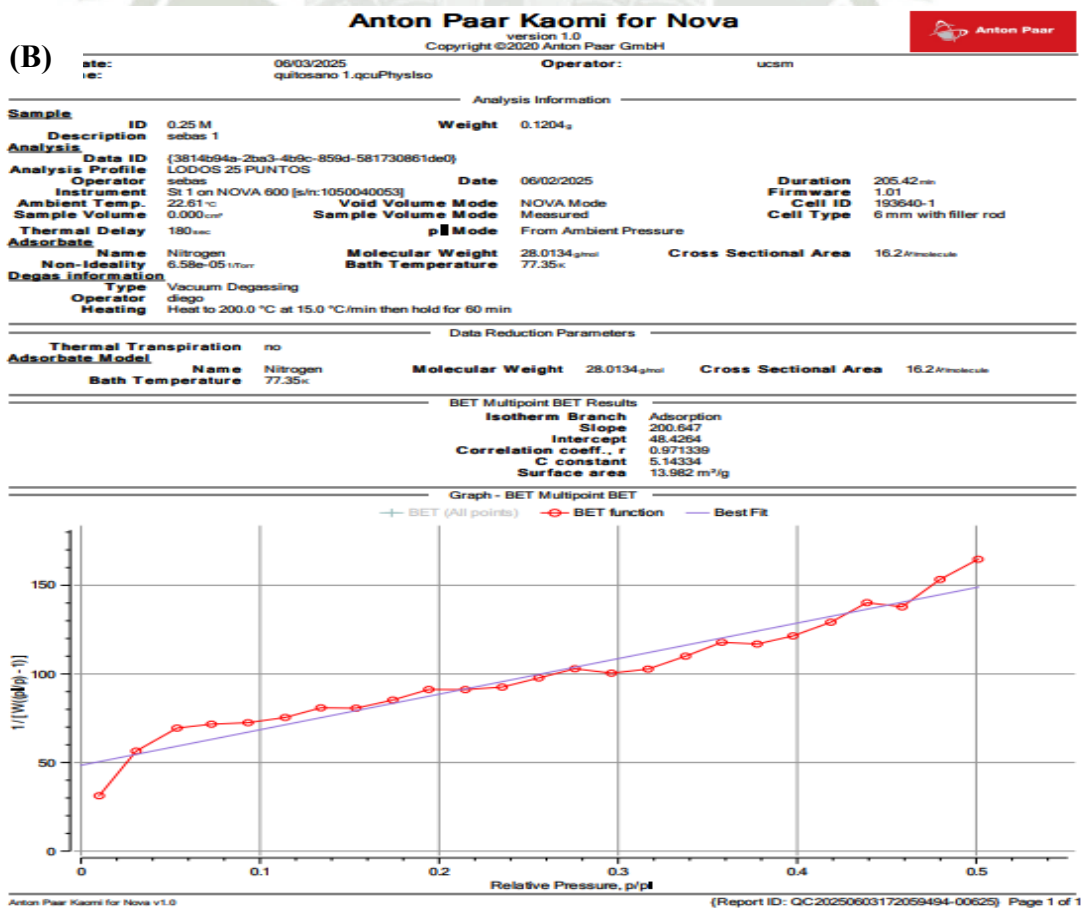
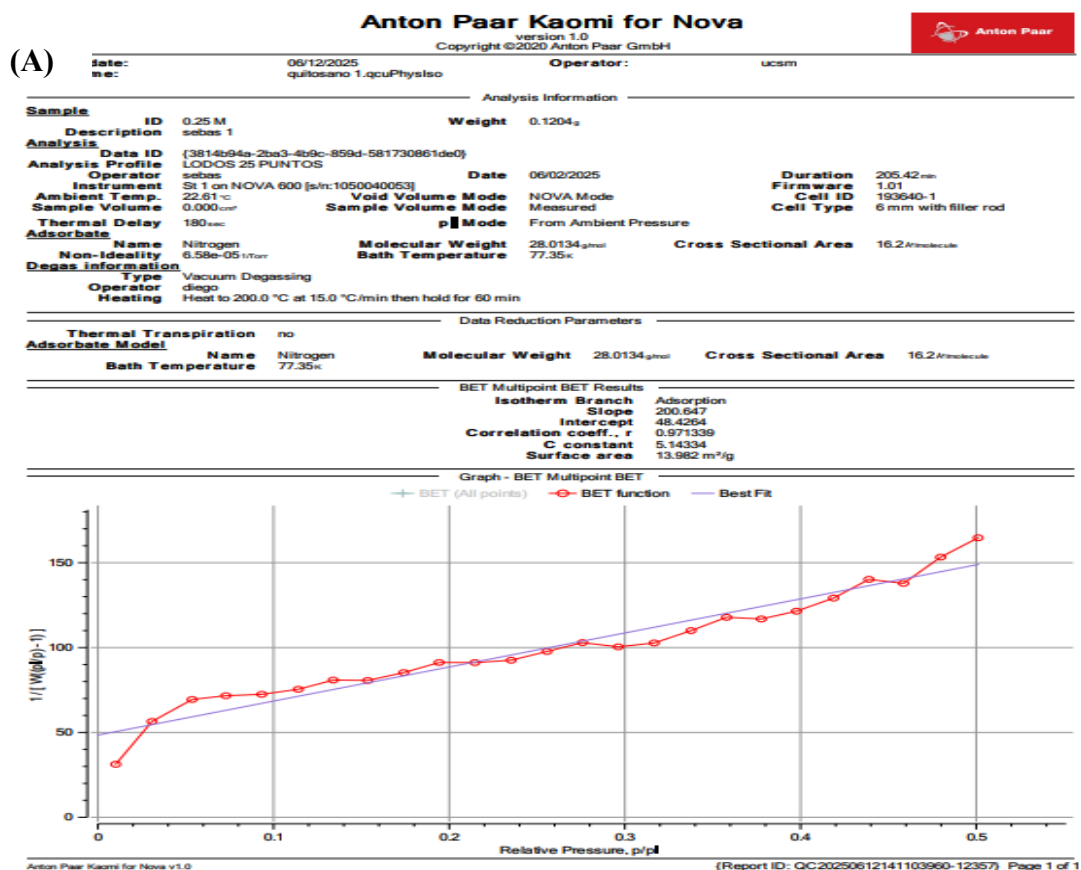
(D)



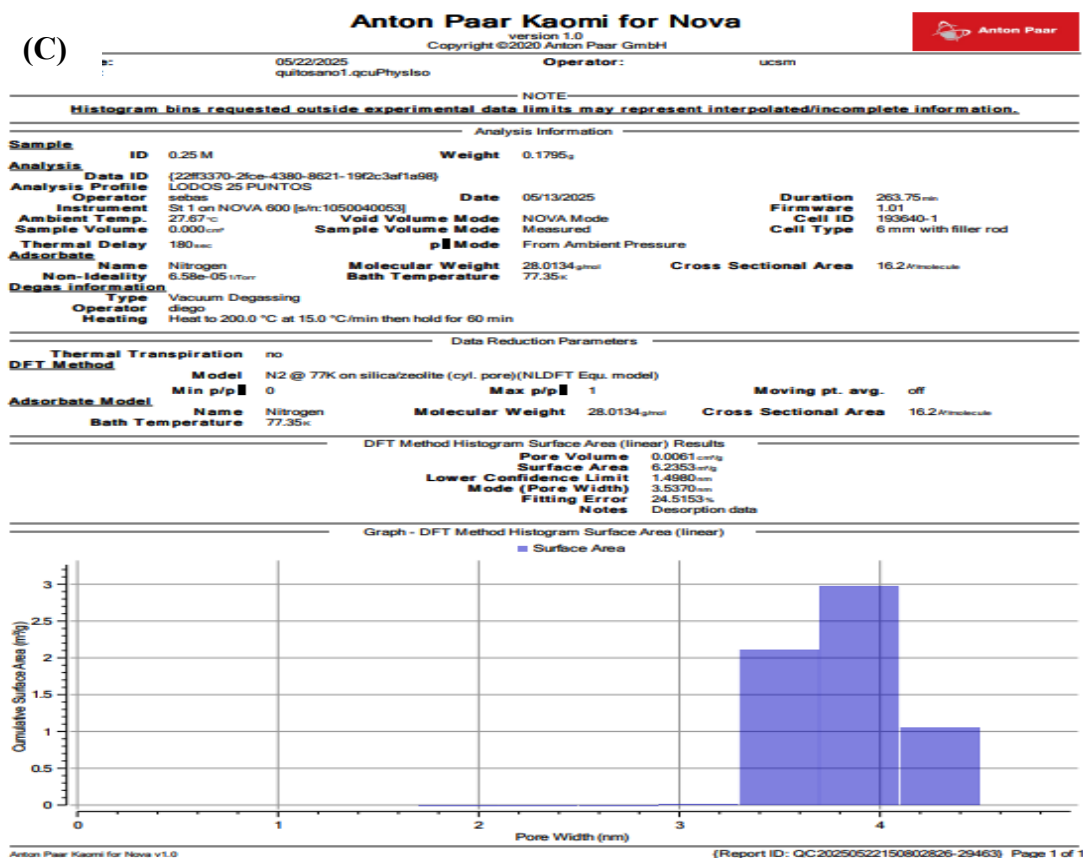


Nota. Donde A – B: corresponde a los ensayos del área superficial del bagazo de caña de azúcar. C – D: corresponde a los ensayos de ancho de poro y volumen de poro. E – F Isothermas de adsorción de los ensayos.

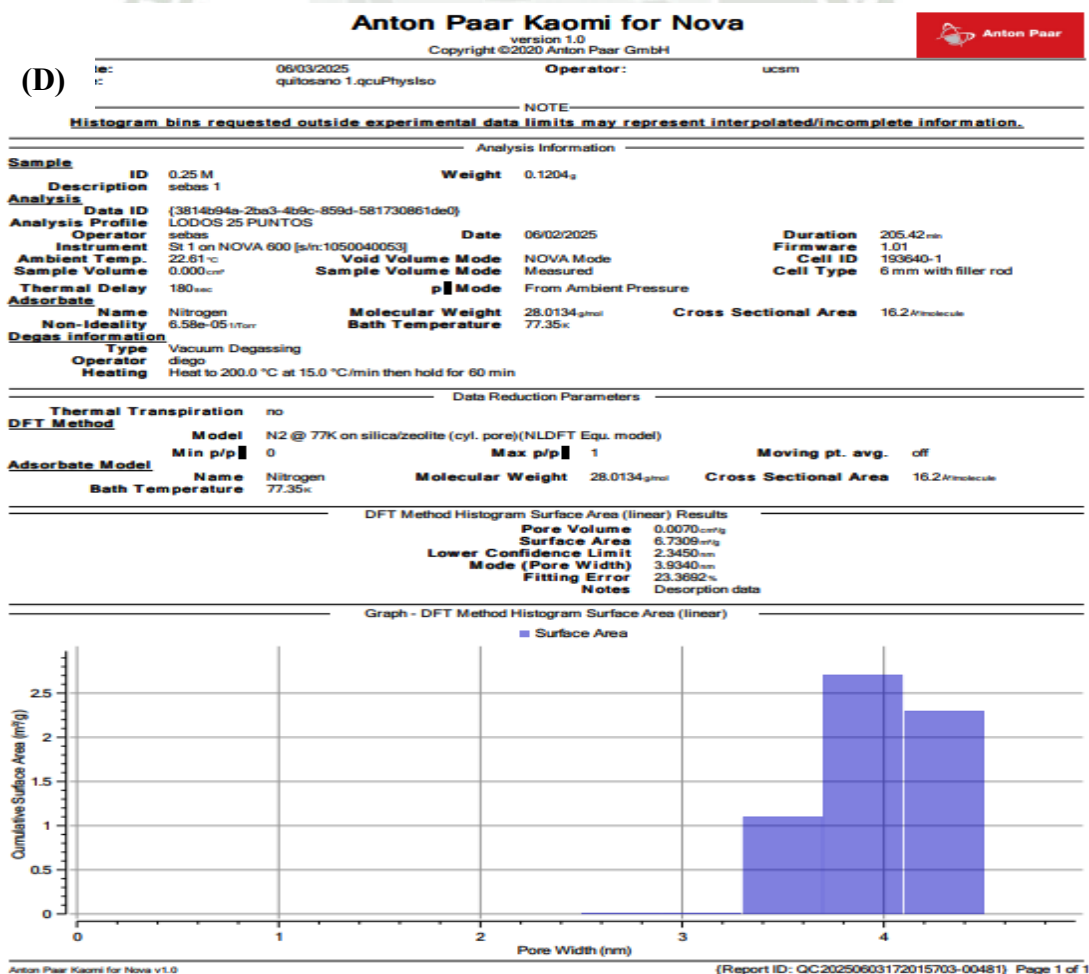
Anexo 9. Características superficiales del quitosano

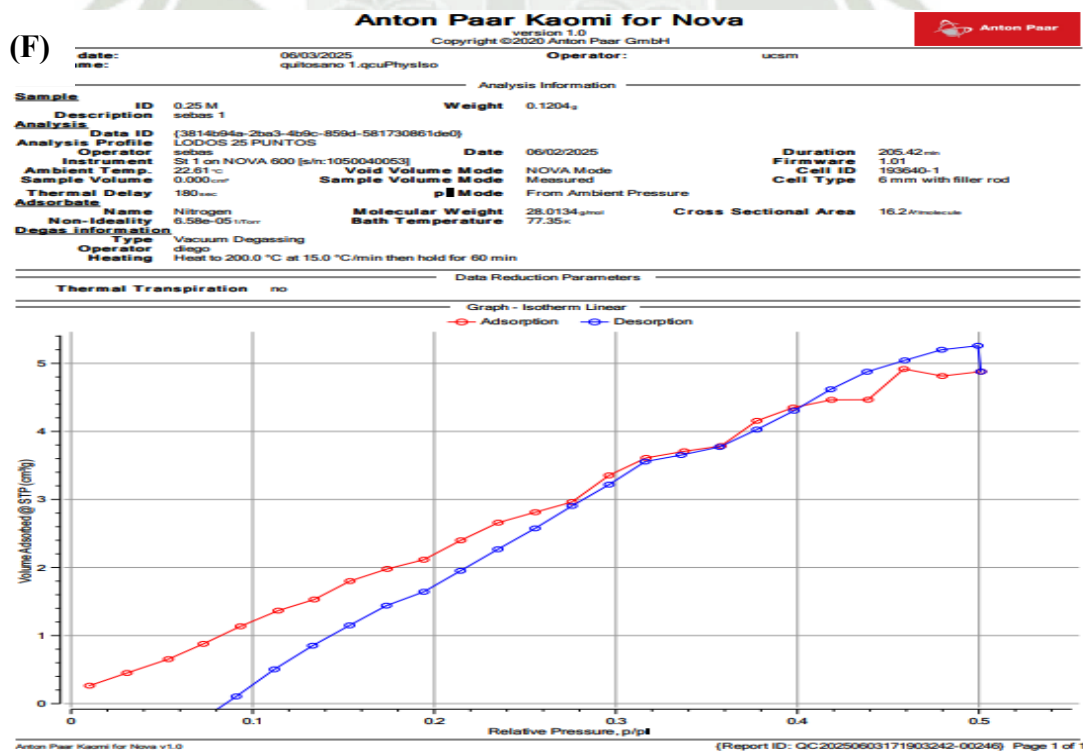
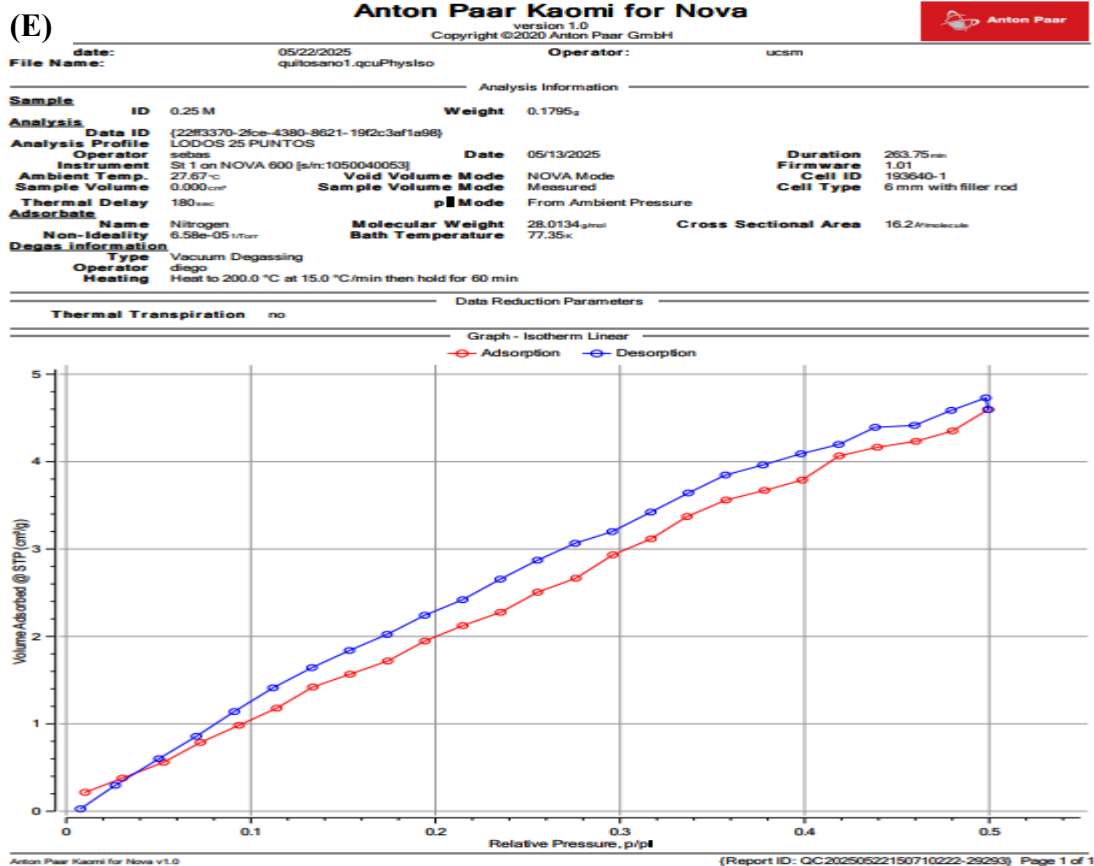


(C)



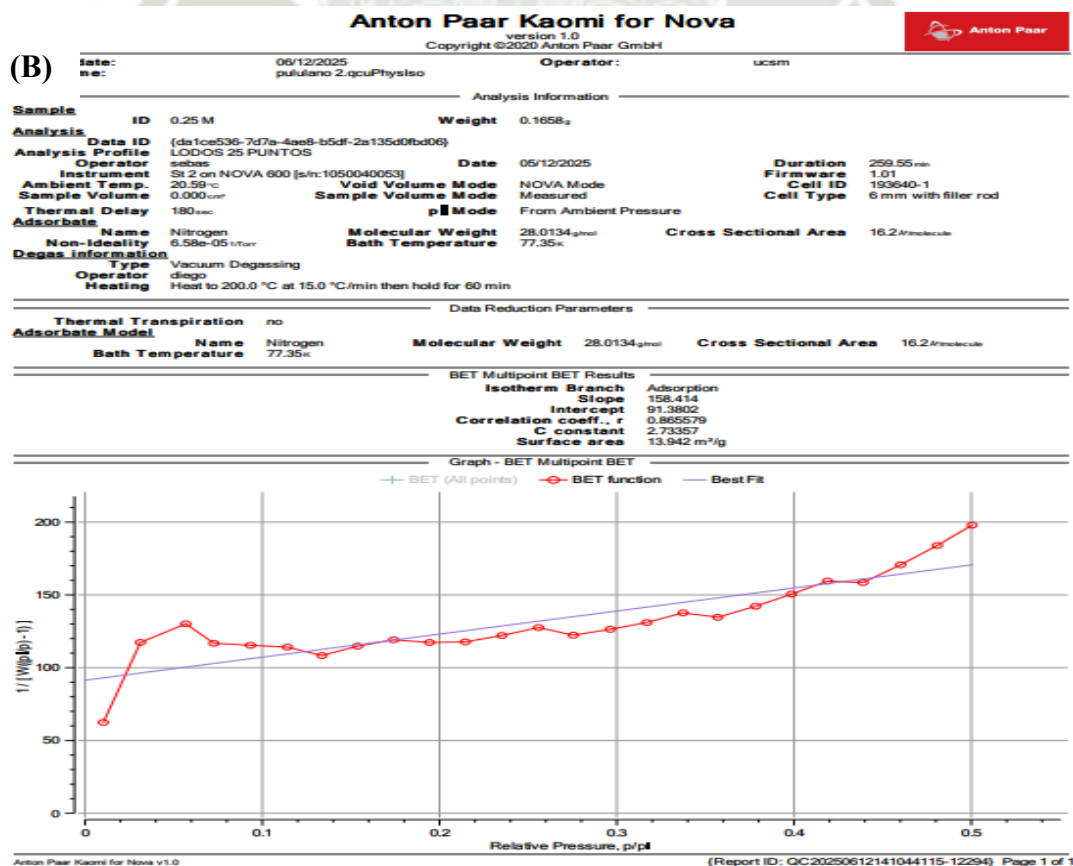
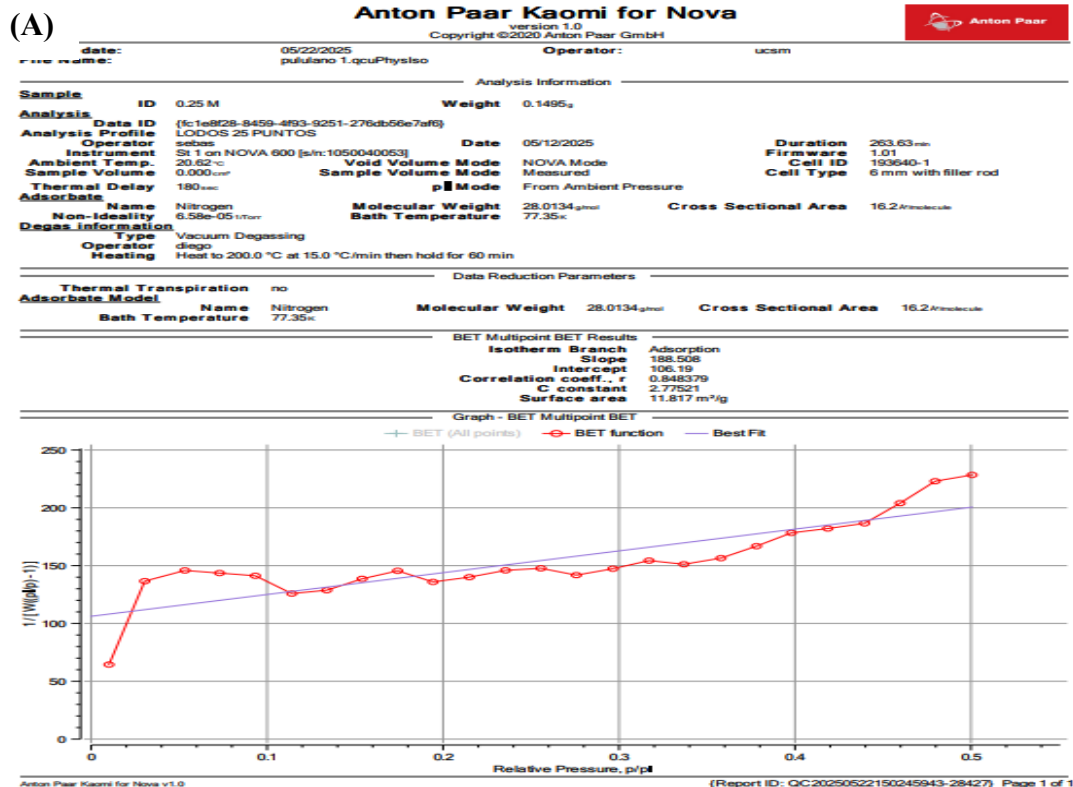
(D)



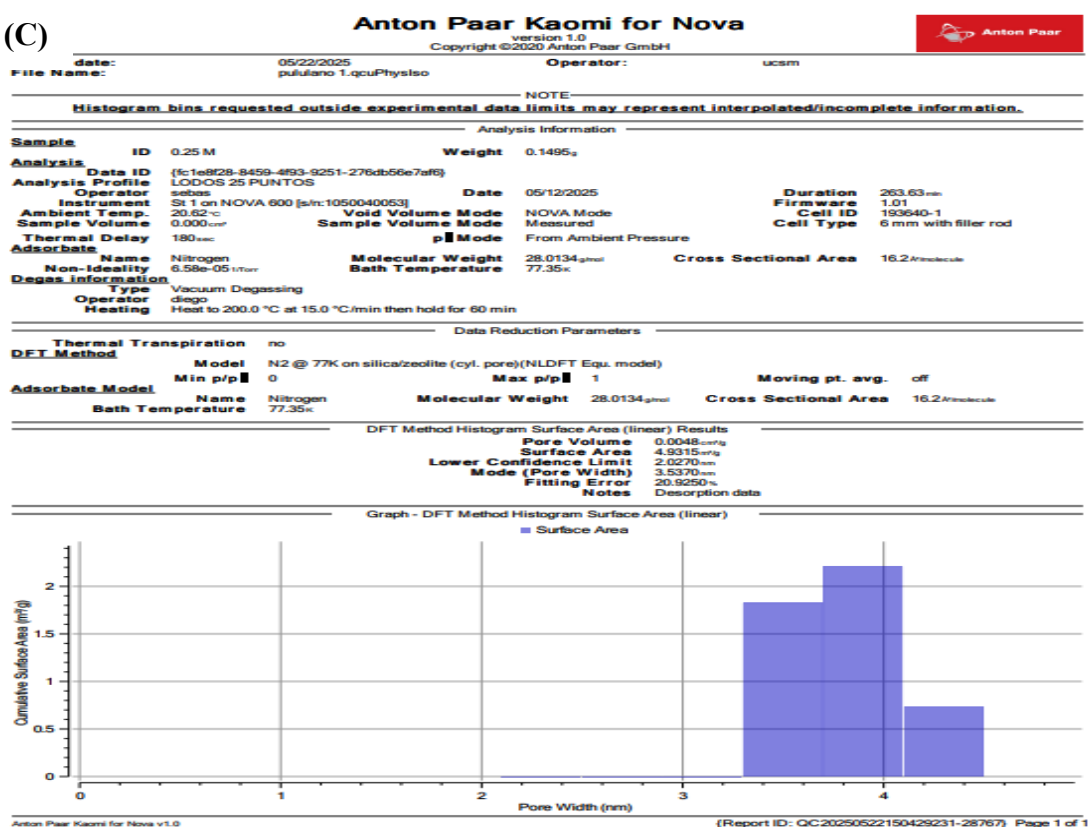


Nota. Donde A – B: corresponde a los ensayos del área superficial del quitosano. C – D: corresponde a los ensayos de ancho de poro y volumen de poro. E – F Isothermas de adsorción de los ensayos.

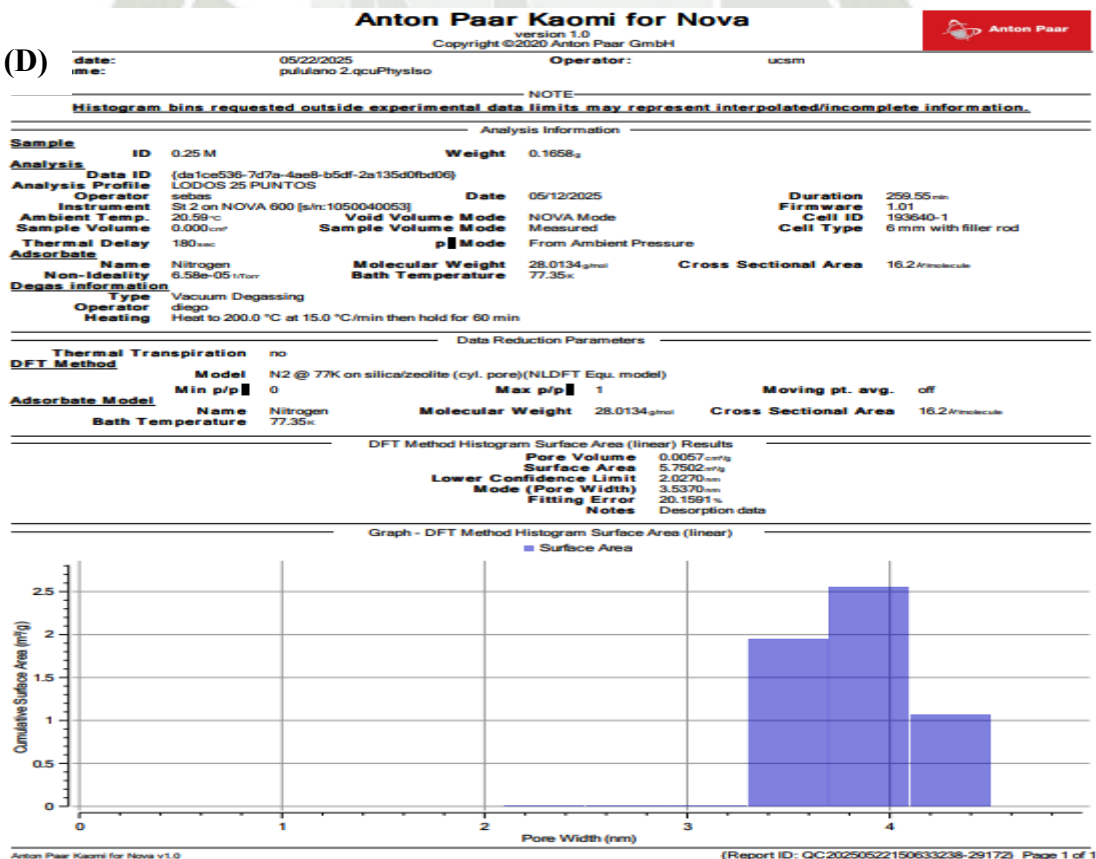
Anexo 10. Características superficiales del pululano



(C)

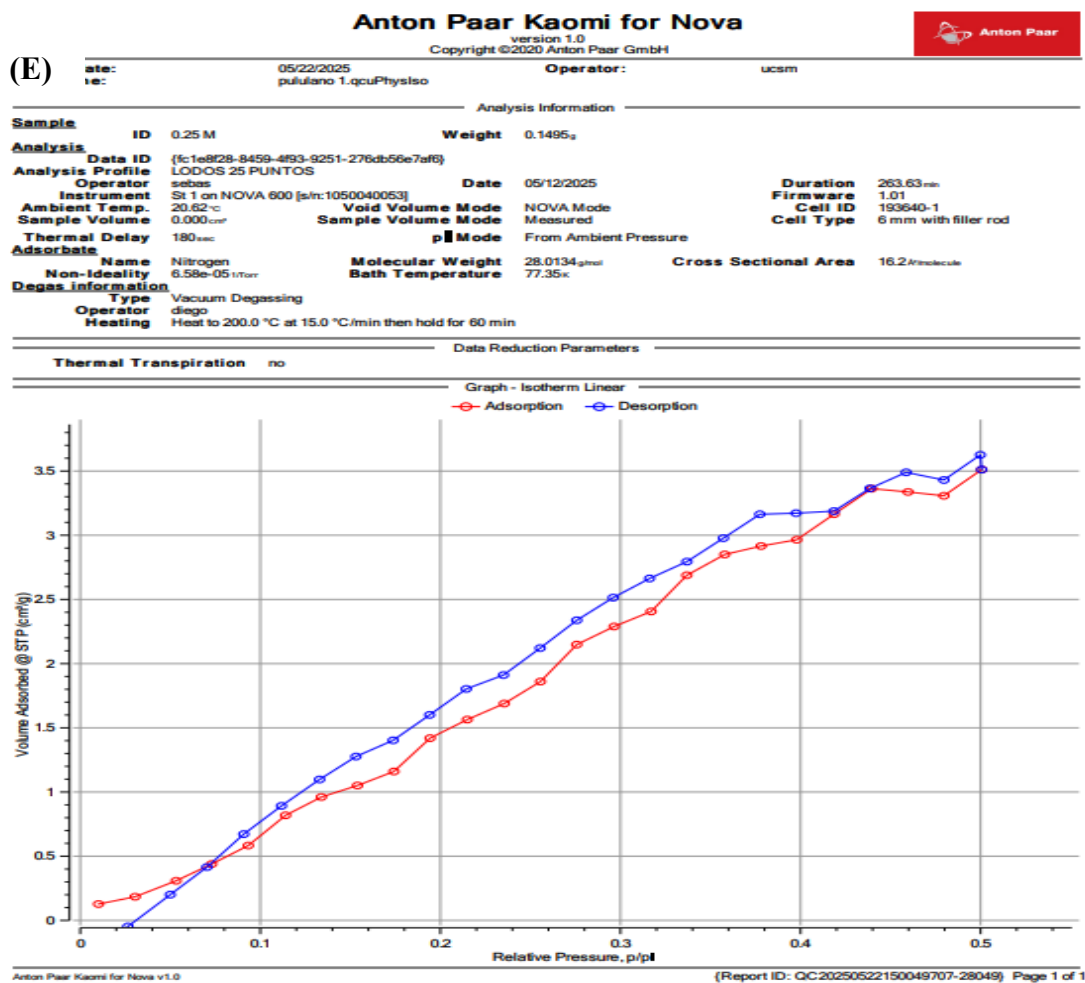


(D)

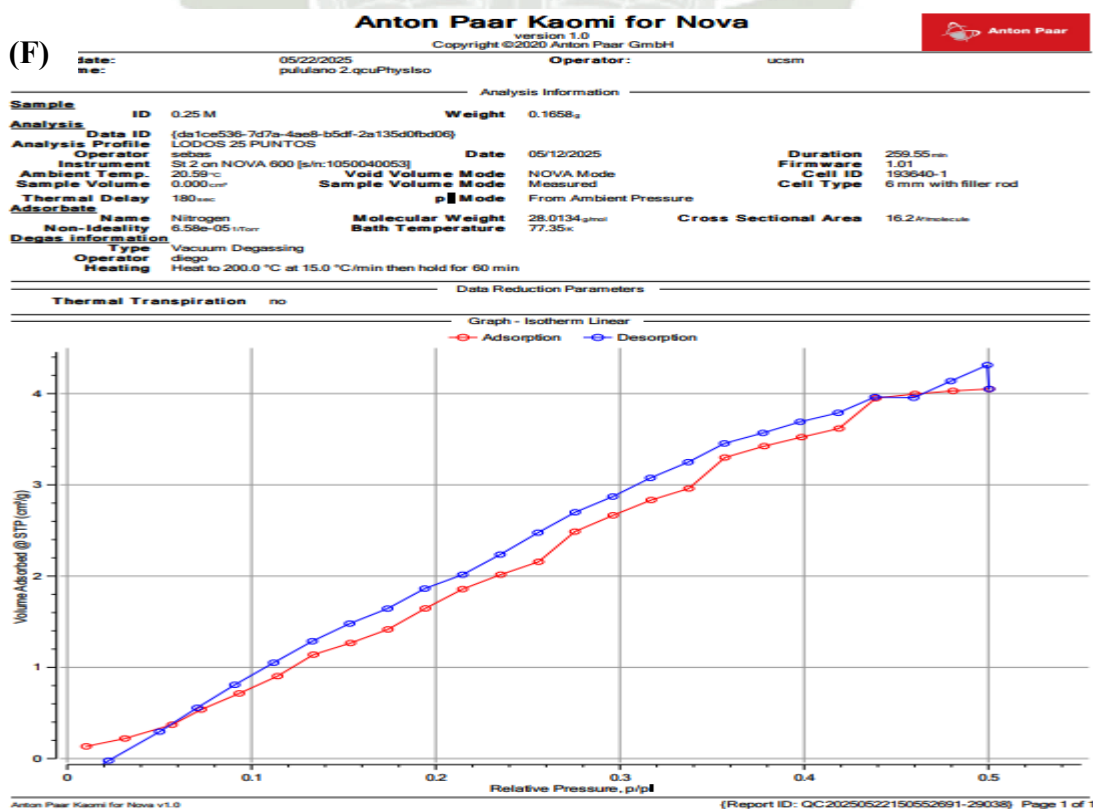


Nota. Donde A – B: corresponde a los ensayos del área superficial del pululano. C – D: corresponde a los ensayos de ancho de poro y volumen de poro. E – F Isotermas de adsorción de los ensayos.

(E)



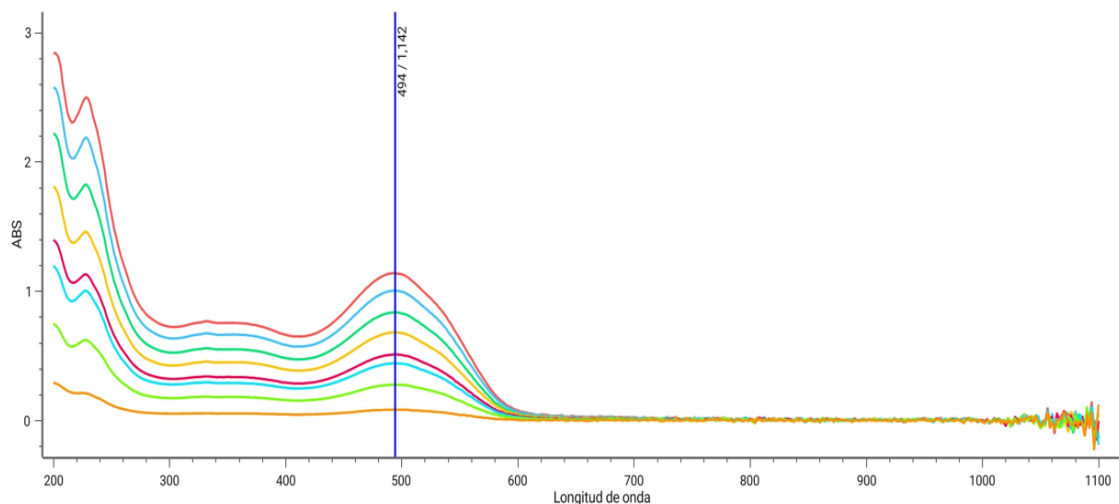
(F)



Anexo 11. Diagrama del proceso de la industria textil



Anexo 12. Barrido espectral del colorante RG en el análisis de espectroscopia UV-VIS



Anexo 13. Datos experimentales de la recta de calibración del RG a $\lambda_{max-RG} = 494 \text{ nm}$

Concentración de RG (mg/L)	Absorbancia			Absorbancia $\bar{x}$
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	
10	0.177	0.086	0.132	0.132
20	0.232	0.28	0.256	0.256
30	0.392	0.444	0.422	0.419
40	0.492	0.513	0.519	0.508
50	0.757	0.685	0.721	0.721
60	0.897	0.838	0.868	0.868
80	1.14	1.006	1.073	1.073
100	1.444	1.142	1.293	1.293

Anexo 14. Datos de tratamientos del BCA en el colorante RG

Tiempo (min)	Absorbancias			Absorbancia $\bar{x}$	C_R	C_O/C_F	DS	CV	R (%)
	1	2	3						
0	0.51	0.51	0.51	0.51	38.42	1.0	0.00	0.00	0.00
10	0.46	0.46	0.44	0.45	33.78	0.9	0.01	2.37	12.09
20	0.44	0.45	0.43	0.43	32.89	0.9	0.01	2.46	14.39
30	0.44	0.44	0.42	0.43	32.26	0.8	0.01	2.49	16.04
60	0.42	0.43	0.42	0.40	30.32	0.8	0.00	0.76	21.10
120	0.36	0.38	0.39	0.38	28.62	0.7	0.02	4.60	25.50

Anexo 15. Datos obtenidos de los tratamientos del BCAM en el colorante RG

Tiempo (min)	Absorbancias			Absorbancia $\bar{x}$	C_R	Co/ C_F	DS	CV	R (%)
	1	2	3						
0	0.51	0.51	0.51	0.51	38.42	1.0	0.00	0.00	0.00
10	0.46	0.46	0.44	0.45	33.78	0.9	0.01	2.37	1.06
20	0.44	0.45	0.43	0.43	32.89	0.9	0.01	2.46	1.96
30	0.44	0.44	0.42	0.43	32.26	0.8	0.01	2.49	8.74
60	0.42	0.43	0.42	0.40	30.32	0.8	0.00	0.76	25.55
120	0.36	0.38	0.4	0.38	28.80	0.7	0.02	5.34	34.60

Anexo 16. Datos experimentales con 40 mg de adsorbente a 30 mg/L de RG

Tiempo (min)	Absorbancias			Absorbancia $\bar{x}$	C_R	Co/ C_F	DS	CV	R (%)
	1	2	3						
0	0.29	0.30	0.30	0.30	22.36	1.0	0.00	1.02	0.00
10	0.22	0.23	0.22	0.22	17.01	0.8	0.01	2.57	23.94
20	0.17	0.17	0.18	0.17	13.20	0.6	0.01	4.98	40.99
30	0.14	0.14	0.13	0.14	10.27	0.5	0.00	3.49	54.09
60	0.03	0.03	0.03	0.03	2.34	0.1	0.00	4.98	89.55
120	0.02	0.02	0.02	0.02	1.28	0.1	0.00	3.46	94.29

Anexo 17. Datos experimentales a 40 mg de adsorbente a 60 mg/L de RG

Tiempo (min)	Absorbancias			Absorbancia $\bar{x}$	C_R	Co/ C_F	DS	CV	R (%)
	1	2	3						
0	0.49	0.49	0.50	0.49	37.19	1.0	0.00	0.96	0.00
10	0.44	0.45	0.44	0.44	33.68	0.9	0.00	0.57	9.44
20	0.41	0.41	0.46	0.41	31.15	0.8	0.03	1.11	16.23
30	0.36	0.36	0.36	0.36	27.31	0.7	0.00	0.70	26.55
60	0.27	0.27	0.27	0.27	20.42	0.5	0.00	0.93	45.09
120	0.22	0.23	0.22	0.22	16.88	0.5	0.01	2.55	54.60

Anexo 18. *Datos experimentales con 60 mg de adsorbente a 30 mg/L de RG*

Tiempo (min)	Absorbancias			Absorbancia $\bar{x}$	C_R	Co/ C_F	DS	CV	R (%)
	1	2	3						
0	0.45	0.45	0.45	0.45	34.23	1.0	0.00	0.34	0.00
10	0.27	0.27	0.28	0.27	20.72	0.6	0.00	0.56	39.47
20	0.22	0.22	0.21	0.22	16.40	0.5	0.00	1.41	52.08
30	0.17	0.17	0.17	0.17	12.92	0.4	0.00	1.22	62.26
60	0.11	0.12	0.11	0.11	8.55	0.2	0.00	1.85	75.02
120	0.02	0.02	0.02	0.02	1.48	0.0	0.00	2.99	95.68

Anexo 19. *Datos experimentales con 60 mg de adsorbente a 60 mg/L de RG*

Tiempo (min)	Absorbancias			Absorbancia $\bar{x}$	C_R	Co/ C_F	DS	CV	R (%)
	1	2	3						
0	0.59	0.60	0.60	0.60	44.80	2.7	0.00	0.70	0.00
10	0.42	0.42	0.42	0.42	31.39	2.4	0.00	0.50	29.93
20	0.37	0.38	0.38	0.38	28.24	2.2	0.00	1.08	36.98
30	0.32	0.33	0.33	0.33	24.45	1.9	0.00	1.11	45.42
60	0.22	0.21	0.21	0.21	16.13	1.2	0.00	1.50	64.00
120	0.06	0.07	0.06	0.06	4.75	0.4	0.00	3.17	89.39

Anexo 20. Datos de las cinéticas de C_{ORG} 60 mg/L a 40 mg de C_A

Tiempo, min	qt, mg/g	t/qt	Log _(qe-qt)
0	0.00	0.00	2.71
10	87.75	0.11	2.62
20	150.88	0.13	2.55
30	246.84	0.12	2.42
60	419.19	0.14	1.95
120	507.58	0.24	-

Anexo 21. Datos de las cinéticas de C_{ORG} 60 mg/L a 60 mg de C_A

Tiempo (min)	qt (mg/g)	t/qt	Log _(qe-qt)
0	0.00	0	2.82
10	223.48	0.04	2.65
20	276.11	0.07	2.59
30	339.18	0.09	2.52
60	477.86	0.13	2.28
120	667.50	0.18	-

Anexo 22. Datos de las cinéticas de C_{ORG} 30 mg/L a 60 mg de C_A

Tiempo, min	qt, mg/g	t/qt	Log _(qe-qt)
0	0.00	0.00	2.74
10	225.17	0.04	2.51
20	297.14	0.07	2.40
30	355.22	0.08	2.28
60	428.03	0.14	2.07
120	545.88	0.22	-

Anexo 23. Datos de las cinéticas de C_{ORG} 30 mg/L a 40 mg de C_A

Tiempo (min)	qt (mg/g)	t/qt	Log _(qe-qt)
0	0.00	0.00	2.72
10	133.84	0.07	2.59
20	229.17	0.09	2.47
30	302.40	0.10	2.35
60	500.63	0.12	1.42
120	527.15	0.23	-

Anexo 24. Datos para las isotermas del tratamiento 1

Freundlich		Langmuir	
Log (Ce)	Log q	1/q	1/ce
1.9433	0.9749	0.1059	0.0114
2.1786	1.2103	0.0616	0.0066
2.3924	1.4241	0.0377	0.0041
2.6224	1.6541	0.0222	0.0024
2.7055	1.7372	0.0183	0.0020

Anexo 25. Datos para las isotermas del tratamiento 2

Freundlich		Langmuir	
Log (Ce)	Log q	1/q	1/ce
2.3492	1.4761	0.0334	0.0045
2.4411	1.5679	0.0270	0.0036
2.5304	1.6573	0.0220	0.0029
2.6793	1.8062	0.0156	0.0021
2.8245	1.9513	0.0112	0.0015

Anexo 26. Datos para las isotermas del tratamiento 3

Freundlich		Langmuir	
Log (Ce)	Log q	1/q	1/ce
2.3525	1.5962	0.0253	0.0044
2.4730	1.7167	0.0192	0.0034
2.5505	1.7942	0.0161	0.0028
2.6315	1.8752	0.0133	0.0023
2.7371	1.9808	0.0105	0.0018

Anexo 27. Datos para las isotermas del tratamiento 4

Freundlich		Langmuir	
Log (Ce)	Log q	1/q	1/ce
2.127	1.379	0.007	0.042
2.360	1.613	0.004	0.024
2.481	1.733	0.003	0.018
2.700	1.952	0.002	0.011
2.722	1.974	0.002	0.011

Anexo 28. Materiales y pesos de adsorbentes para análisis elemental



Nota. (A) pentóxido de vanadio, (B) adsorbentes, (C) peso de pentóxido de vanadio y (D) peso de los adsorbentes

Anexo 29. Analizador elemental Flash Smart



Anexo 30. *Sortometro (Anton Parr Nova 600)*



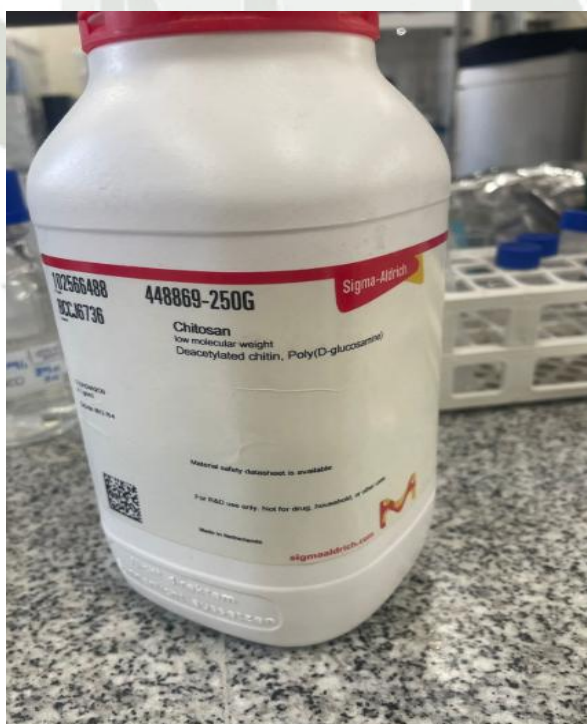
Anexo 31. *Mufla Thermolyne (Barnsfeed)*



Anexo 32. Pululano



Anexo 33. Quitosano industrial



Anexo 34. *Bagazo de caña de azúcar tamizado*



Nota. (A), bagazo de caña de azúcar tamizado a 250 µm. (B) bagazo de caña de azúcar activado a 200 °C

Anexo 35. *Pululano y quitosanos activados*

