



## INGENIERÍA AMBIENTAL

**OBTENCIÓN DE BIOCARBÓN A PARTIR DE RESIDUOS  
ORGANICOS DEL SECTOR AGRÍCOLA Y SU EVALUACIÓN EN LA  
REMOCIÓN DEL COLOR DEL AGUA COMO TRATAMIENTO  
AVANZADO EN LA INDUSTRIA TEXTIL**

**SANTIAGO CORRALES RENDON  
ANDRES FELIPE AGUDELO ALZATE**



**Universidad<sup>®</sup>  
Católica  
de Manizales**

VIGILADA Mineducación

*Obra de Iglesia  
de la Congregación*



**Hermanas de la Caridad  
Dominicas de La Presentación  
de la Santísima Virgen**



**Obtención de carbón activado a partir de residuos orgánicos del sector  
doméstico y su evaluación en la remoción del color del agua como tratamiento  
avanzado en la industria textil**

**Santiago Corrales Rendón  
Andrés Felipe Agudelo Alzate**

**Universidad Católica de Manizales  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Ingeniería Ambiental  
Manizales, Colombia 2023**

**Obtención de carbón activado a partir de residuos orgánicos del sector doméstico y su  
evaluación en la remoción del color del agua como tratamiento avanzado en la  
industria textil**

**Santiago Corrales Rendón  
Andrés Felipe Agudelo Alzate**

Trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniera Ambiental**

Directora:  
**MARIA FERNANDA ORTIZ REVELO**  
Ingeniera Química  
Especialista en Ingeniería Sanitaria y Ambiental  
Directora del Programa de Ingeniería Ambiental  
Universidad Católica de Manizales

Tutor:  
**JUAN SEBASTIAN ARCILA HENAO<sup>1</sup>**  
Ingeniero Químico, PhD Ingeniería Ambiental  
Docente-Investigador Universidad Católica de Manizales

Línea de Investigación:  
**Asistencia de Investigación**

Grupo de Investigación:  
**TECNOLOGÍAS AVANZADAS EN SANEAMIENTO AMBIENTAL**

**Universidad Católica de Manizales  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Ingeniería Ambiental  
Manizales, Colombia 2023**

1. ORCID ASESOR: 0000-0002-8890-472X

## AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar este espacio para expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental en el desarrollo de mi tesis y en mi formación académica. Sin su apoyo y guía, este logro no hubiera sido posible.

En primer lugar, quiero agradecer de todo corazón a mis padres, Fernando Corrales y Rocío Rendón. Su amor incondicional, su constante apoyo y su dedicación han sido una fuente de inspiración para mí. Siempre estuvieron a mi lado, brindándome su aliento y confianza en cada etapa de este camino. Gracias por creer en mí y por ser mis pilares en todo momento.

También quiero extender mi gratitud a mi familia en general. Su presencia y ánimo positivo fueron fundamentales para mantenerme motivado durante todo el proceso. A mis hermanos, tíos, primos y demás seres queridos, gracias por su comprensión, por alentarme en los momentos difíciles y por celebrar mis logros con alegría.

Asimismo, deseo expresar mi reconocimiento a las directivas y al personal docente de este semestre. Agradezco a la dirección de programa y a la facultad de ingeniería y arquitectura por proporcionarme los recursos necesarios para llevar a cabo mi investigación. Especialmente, quiero agradecer a la directora del programa de ingeniería ambiental, María Fernanda Ortiz, por su orientación y valiosos aportes en el desarrollo de mi tesis.

Por último, pero no menos importante, quiero dar las gracias al profesor Juan Sebastián Arcila. Su dedicación, conocimiento y compromiso fueron clave para el éxito de este proyecto.

¡Gracias de todo corazón!

## TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN .....	7
2. INTRODUCCIÓN .....	9
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
4. OBJETIVOS .....	13
4.1 OBJETIVO GENERAL .....	13
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
5. JUSTIFICACIÓN .....	14
6. MARCO TEÓRICO.....	17
6.1 Residuos aprovechables .....	18
6.2 Pirolisis.....	19
6.3 Variables que afectan la pirólisis .....	20
6.4 Tipo de pirólisis.....	20
6.5 Activación química .....	21
6.6 Horno pirolítico.....	22
6.8 Carbón activado.....	23
6.9 Biocarbon .....	24
6.9.1 Características fisicoquímicas .....	24
6.9.2 Isotermas .....	25

Curvas de adsorción de Freundlich y Langmuir .....	25
Ecuaciones de Freundlich y de Langmuir .....	26
Ecuación linealizada de Isotherma de Freundlich.....	28
Impacto del rojo de metilo como colorante.....	29
Propiedades absorbentes de los residuos.....	30
Activación del biocarbon .....	31
7. METODOLOGÍA .....	33
7.1 SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LA MATERIA ORGANICA .....	33
7.2 PROCESO DE PIROLISIS.....	36
7.3 PRUEBAS DE ADSORCIÓN .....	39
7.3.1 Preparación y curva de calibración de la muestra patrón.....	39
7.3.2 Evaluación de eficiencia y parametros de adsorción del biomaterial. ....	42
7.3.3 Construcción de curvas de cinéticas de adsorción .....	44
7.3.4 Construcción de isothermas de adsorción .....	46
8. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	53
8.1 Evaluación del carbón activado y biochart basado en la masa .....	53
8.2 Evaluación comparativa de Biochart y diversos biocarbones derivados de materiales orgánicos para la eliminación de colorantes. ....	60
8.2.1 Evaluación del biochart y biocarbon a base de cascara de mani.....	60
8.2.2 Evaluación del Biochart y el fique .....	62

8.2.3 Evaluación del Biochart y residuos agrícolas .....	64
8.3 Evaluación del Biochart a diferentes concentraciones de colorante rojo de metilo	65
9. CONCLUSIONES .....	68
10. ANEXOS .....	70
11. REFERENCIA .....	71

## **INDICE DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1. Diseño del horno Pirolítico.....	37
Ilustración 2. Construcción del horno pirolítico.....	37
Ilustración 3. Mineralización del biocarbon .....	39
Ilustración 4. Solución madre rojo de metilo .....	41
Ilustración 5. Pruebas tipo batch .....	42

## **INDICE DE GRAFICOS**

Gráfico 1. Rango mediable del espectrofotómetro al diluir la muestra madre de rojo de metilo.....	40
Gráfico 2. Isotherma de Langmuir para carbón activado en el intervalo de 90 minutos .....	46
Gráfica 3. Isotherma de Freundlich para carbón activado en el intervalo de 90 minutos .....	47

Gráfica 4. Isoterma de Langmuir para Biochart en el intervalo de 120 minutos.....	47
Gráfica 5. Isoterma de Freundlich para el para Biochart en el intervalo de 120 minutos...	48
Gráfica 6. Isoterma de Langmuir para biochart en el intervalo de 120 minutos .....	51
Gráfica 7. Isotermas de Freundlich para biochart en el intervalo de 120 minutos .....	51
Grafica 8. Curva de cinética de adsorción para carbón activado .....	54
Grafica 9. Curva de cinética de adsorción para Biochart.....	55
Grafica 10. Curva de cinética de adsorción para Biochart a diferentes concentraciones de colorantes rojo de metilo .....	66

#### **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Clasificación de colorantes.....	17
Tabla 2. Condiciones de proceso para pruebas de adsorción.....	43
Tabla 3. Datos obtenidos en el laboratorio al realizar las pruebas de absorbancia para el carbón activado.....	44
Tabla 4 Datos obtenidos en el laboratorio al realizar las pruebas de absorbancia del Biocarbón.....	45
Tabla 5. Constantes de isotermas de Langmuir y freundlich para diferentes adsorbentes .....	49
Tabla 6. Resultados prueba experimental variación de la concentración del colorante para evaluar el biochart .....	50

Tabla 7. Constantes de isothermas de Langmuir y freundlich para diferentes adsorbentes .....	52
Tabla 8. Constantes de isothermas de Langmuir y freundlich para diferentes adsorbentes. .....	59
Tabla 9. Comparación del biochart obtenido y un biocarbon a base de cascara de maní .....	60
Tabla 10. Comparación del biochart obtenido y un biocarbon a base de fique .....	62
Tabla 11. Comparación del biochart obtenido y un biocarbon a base de residuos agrícolas .....	64
Tabla 12. Cuadro comparativo Biocarbon de cascara de cacao frente al biochart de residuos orgánico.....	66

## 1. RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar el potencial adsorbente de los residuos orgánicos, específicamente las cáscaras de cebolla, cáscaras de arveja y hojas de lechuga, obtenidos de la plaza de mercado de la ciudad de Manizales. Se realizaron pruebas tipo batch por lotes utilizando el biocarbón obtenido a partir de una pirólisis térmica controlada de los residuos previamente secados. Se evaluó la eficiencia del biocarbón para remover el colorante rojo de metilo en solución, utilizando concentraciones de 166,67 mg/L.

Se aplicaron las isotermas de adsorción de Freundlich y Langmuir para evaluar el potencial de remoción del biocarbón y compararlo con el carbón activado. La espectrometría se utilizó como herramienta para determinar las concentraciones removidas por el adsorbente. Los resultados mostraron que el modelo de Langmuir se ajusta mejor a los experimentos realizados en el laboratorio.

Al comparar las constantes de la ecuación linealizada de Langmuir, se encontró que el carbón activado tiene una mayor capacidad de retención de partículas de colorante rojo de metilo en su superficie en comparación con el biocarbón. El carbón activado mostró una eficiencia máxima del 94% en la remoción del colorante, mientras que el biocarbón alcanzó una eficiencia máxima del 68%. Es importante destacar que el biocarbón obtenido a partir de residuos orgánicos no se sometió a una activación química en este estudio. Sin embargo, los resultados indican que si se realiza una activación química, las propiedades adsorbentes del biocarbón podrían ser similares a las del carbón activado.

*Palabras claves: Potencial adsorbente, residuos orgánicos, biochar, colorantes, horno pirolítico.*

## ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the adsorbent potential of organic wastes, specifically onion peels, pea peels and lettuce leaves, obtained from the market place of the city of Manizales. Batch tests were carried out using the biochar obtained from a controlled thermal pyrolysis of the previously dried waste. The efficiency of the biochar to remove the methyl red dye in solution was evaluated, using concentrations of 166.67 mg/L.

Freundlich and Langmuir adsorption isotherms were applied to evaluate the removal potential of biochar and compare it with activated carbon. Spectrometry was used as a tool to determine the concentrations removed by the adsorbent. The results showed that the Langmuir model best fits the experiments performed in the laboratory.

By comparing the constants of the linearized Langmuir equation, activated carbon was found to have a higher capacity to retain methyl red dye particles on its surface compared to biochar. Activated carbon showed a maximum efficiency of 94% in dye removal, while biochar reached a maximum efficiency of 68%. It is important to note that biochar obtained from organic waste was not subjected to chemical activation in this study. However, the results indicate that if chemical activation is performed, the adsorptive properties of biochar could be similar to those of activated carbon.

Key words: Adsorbent potential, organic wastes, biochar, dyes, pyrolytic oven.

## 2. INTRODUCCIÓN

La calidad del agua es fundamental para el medio ambiente y nuestra salud. El agua es un recurso natural esencial y su calidad debe conservarse para garantizar el correcto funcionamiento de los ecosistemas y la supervivencia de todas las formas de vida. El 22 de marzo de cada año es el Día Mundial del Agua, una ocasión para concienciar sobre la importancia de este recurso. La calidad del agua es una variable descriptora del medio hídrico, tanto para evaluar su caracterización ambiental como para medir su salubridad. El mantenimiento de una adecuada calidad del agua es esencial para la salud y el desarrollo, por ello, hay que invertir en abastecimiento de agua, saneamiento, mejora de la calidad y aprovechamiento racional. Además, es necesario tomar medidas para mejorar la calidad del agua en nuestro entorno, ahorrando agua en casa y en la comunidad.

Uno de los factores que afectan la calidad del agua es la descarga de colorantes a las fuentes hídricas, modificando sus propiedades fisicoquímicas. La contaminación por colorantes es uno de los mayores problemas ambientales relacionados con la industria textil. Estos compuestos se diseñan para ser altamente resistentes, incluso a la degradación microbiana, lo que resulta en una fuerte concentración de colorantes azoicos en el agua. Esto impide la penetración de la luz en el fondo marino, lo que afecta negativamente la vida acuática. Además, el uso de productos químicos para purificar el agua es extremadamente costoso, por lo que muchas industrias no realizan tratamiento alguno. La biosorción se ha planteado como una alternativa económica para la extracción de colorantes del agua, pero el problema de la contaminación por colorantes sigue siendo un gran desafío ambiental. Por lo tanto, las industrias textiles deben comprometerse a reducir la contaminación de los cuerpos de agua mediante el desarrollo de tecnologías más respetuosas con el medioambiente

Muchas empresas utilizan distintos métodos para remover los colorantes del agua. Uno de los métodos más comunes es el tratamiento de coagulación química, en el que se agregan coagulantes para aglomerar los colorantes y otras partículas en el agua, permitiendo que sean eliminadas fácilmente. Otro método es el tratamiento de filtración, en el que se usan filtros de carbón para absorber los colorantes. También hay métodos más avanzados, como el tratamiento de electrocoagulación y absorción, que utilizan electricidad y polímeros sintéticos para eliminar los colorantes del agua. Los métodos más modernos también incluyen la destrucción y mineralización de los colorantes. Estas técnicas modernas son muy efectivas para remover los colorantes y otros contaminantes del agua y hacerla más limpia y segura para su uso. Además, las empresas también necesitan aplicar políticas antidegradación para evitar los riesgos ambientales y garantizar que el tratamiento de aguas residuales cumpla con los estándares de calidad.

Teniendo en cuenta lo anterior como alternativa sostenible se encuentra el biocarbón, en cual su formación estaba basada de desechos orgánicos. El biocarbón es un material altamente eficaz para remover los colorantes de las aguas. Esto se debe a su alta porosidad, gran superficie y grupos funcionales presentes en su estructura. Estas características permiten la adsorción y retención de los colorantes presentes en el agua. Esto hace que el biocarbón sea una alternativa sostenible, rentable y eficaz para eliminar los colorantes de las aguas contaminadas. Además, el uso del biocarbón como material adsorbente es una estrategia que contribuye a un desarrollo sostenible, ya que se trata de un material que se obtiene a partir de la combustión de la biomasa. Por lo tanto, el biocarbón puede ser una herramienta útil para mejorar la calidad del agua, reduciendo la carga contaminante y mejorando la salud y el bienestar de las personas. En el presente proyecto se pone a prueba la eficacia del biocarbón como agente de remoción del colorante a través de isotermas de adsorción las cuales nos facilitan el análisis y el comportamiento de dicho biocarbón.

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las industrias textiles generan millones de descargas de aguas residuales cargadas altamente con desechos tóxicos peligrosos, que contienen compuestos colorantes, químicos orgánicos y demás agentes químicos como tintes, jabones, compuestos de cromo y metal, agentes fijadores, suavizantes, y demás.

Los contaminantes presentes en el efluente y su alta concentración de colorantes aumentan la turbidez, generan un mal aspecto y olor e impiden la correcta entrada de luz solar que es necesaria para que se pueda realizar el proceso eficiente de la fotosíntesis lo que representa un gran problema pues esto interfiere con el mecanismo de transferencia de oxígeno en el sistema aire-agua lo que trae consigo un agotamiento del oxígeno disuelto en el efluente que es de alta importancia para el desarrollo de la vida en el medio.

La problemática que hemos evidenciado en este trabajo se deriva en varios aspectos, identificando varios problemas como la alta demanda hídrica que hay actualmente, la gestión de residuos sólidos urbanos y los tratamientos para la remoción de colorantes en las aguas residuales de como por ejemplo la industria textil siendo un claro generador de aguas altamente contaminadas como se mencionó antes.

En las últimas décadas el aumento de la contaminación hídrica se ha convertido en uno de los grandes problemas a nivel mundial, planteando este como el problema central de nuestra investigación, siendo altamente perjudicial para la salud pública y el medio ambiente. Además de generar una alta demanda del agua potable para el consumo humano o para la elaboración de comida que va ligado a la malnutrición a nivel mundial, puesto que realizar actividades agrícolas para tener una seguridad alimentaria requiere garantizar un abastecimiento de agua tratada para todas las etapas de los cultivos con el fin de generar productos saludables y óptimos para toda la población generando un estrés hídrico lo que conlleva a más problemas en cadena.

De estos problemas en cadena que conlleva la alta demanda de agua para satisfacer las necesidades del ser humano y su cultura consumista se puede mencionar la contaminación de cuerpo de aguas como una de tantas debido a que después de ser utilizadas en procesos de producción a nivel industrial o local se vierten sin un previo tratamiento o con uno ineficiente

cuando el generador de estas no cumple con la normativa respectivas para sus actividades llegando a contaminar cualquier cuerpo de agua como ríos, lagos, cuencas, entre otros.

Ahora bien, otro problema que trae consigo grandes consecuencias es la alta generación de residuos sólidos y la mala gestión que este tiene. La gestión integral de los residuos sólidos urbanos se ha convertido en unos de los problemas más fundamentales que se tienen que abordar para generar un desarrollo sostenible. La ineficiencia en el sistema de gestión de los residuos urbanos en Colombia deriva una variedad de impactos ambientales de los cuales es de alta y actual preocupación la sobrecarga de los rellenos sanitarios. Estos sistemas son altamente usados en países de Latinoamérica presentándose como una salida fácil y económica para la gestión de los residuos, sin embargo, en Colombia, estos han venido presentando una sobrecarga llegando cada vez a estar más cerca de su punto de vida máxima debido en gran parte a que el modelo de gestión se enfoca en un sistema más lineal donde se pierden la mayoría de los residuos aprovechables y orgánicos en los rellenos sanitarios reduciendo la capacidad de estos.

Por último, dentro de la problemática general también se trata el aspecto de las aguas residuales generadas en la industria textil donde es usual encontrar aguas residuales con altos parámetros de turbidez y color muy elevados siendo un gran problema para el medio donde son vertidos si no se cuentan con un tratamiento adecuado, donde en muchos casos en realidad se presentan tratamientos con ineficiencias o óptimos, pero con altos costos en el montaje y mantenimiento del sistema. Cabe aclarar que la industria textil requiere una alta demanda de agua para el correcto funcionamiento de sus procesos productivos. Se estima que cerca de 100 a 200 L de agua se necesitan para producir un kilogramo de productos textiles lo que genera altas cantidades de aguas para ser tratadas y posteriormente vertidas. El problema de estos tratamientos es garantizar una remoción de los colorantes o agentes químicos de las aguas de este sector y más, teniendo en cuenta de que estos procesos requieren altas cantidades de agua y el marketing y el modelo de venta impulsa esto para que realmente las cantidades de agua utilizadas sean exorbitantes debido a su modelo de producción y economía lineal donde el enfoque de sostenibilidad y aprovechamiento de residuos es escaso y se basan más en una visión consumista que busca crear tendencias y generar más productos a lo largo de los años lo que genera cada vez más un mayor uso del agua para este sector y un ciclo de vida cada vez más para los productos que este genera, creando un círculo vicioso que solo empeora el problema.

## 4. OBJETIVOS

### 4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el potencial adsorbente de los residuos orgánicos de la industria agrícola provenientes de la plaza de mercado de la ciudad de Manizales a través de modelos de isothermas de adsorción de Freundlich y Langmuir por medio de pruebas por lotes (Batch) aplicado al colorante rojo de metilo.

### 4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener biocarbón a partir de residuos orgánicos generados por el sector agrícola mediante pirólisis térmica.
- Evaluar la eficiencia de adsorción del biocarbón sobre el colorante rojo de metilo empleando la metodología de isothermas de adsorción de Freundlich y Langmuir.
- Determinar los parámetros de adsorción basados en pruebas de isothermas en condiciones por lotes (batch).

## 5. JUSTIFICACIÓN

En las últimas décadas el aumento de la contaminación hídrica se ha convertido en uno de los grandes problemas a nivel mundial, dejando como consecuencias no solo en el ámbito ambiental sino en el ámbito humanitario, ya que el agua es indispensable para el desarrollo y proveer una seguridad alimentaria. (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, 2021).

Según un informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2016), "El 50% de toda la malnutrición se debe a la falta de agua, de saneamiento y de higiene. Es por eso que se debe priorizar el saneamiento adecuado de los cuerpos de agua." El preocupante aumento de la contaminación en las aguas superficiales de Asia, África y América Latina también amenaza con dañar fuentes vitales de alimentos y perjudicar las economías de esos continentes. Es por eso, que para lograr cumplir los objetivos de desarrollo sostenible que van dirigidos a la seguridad alimentaria (objetivo 2 "Hambre cero") es importante proveer una buena calidad del agua.

Debido al aumento industrial indiscriminado y al aumento poblacional, se han requerido altas demandas del recurso, teniendo como consecuencias la contaminación de cuerpos de agua, debido al no tratamiento de estos vertimientos. Las principales causas del preocupante aumento de la contaminación de las aguas superficiales en Asia, África y América Latina son el crecimiento demográfico, el aumento de la actividad económica, la expansión e intensificación de la agricultura y la mayor cantidad de aguas residuales no tratadas que se descargan en los ríos y lagos.

Por otro lado, la alta generación de residuos sólidos se ha convertido en uno de los problemas más fundamentales que se tienen que abordar para generar un desarrollo sostenible. Generan una gran variedad de impactos ambientales, pero el más importante y es una preocupación actual, es la sobrecarga de los rellenos sanitarios. Los rellenos sanitarios son muy aplicados en países que no cuentan con tecnologías suficientes para aprovechar los residuos, es por eso que es de vital importancia implementar e investigar tecnologías económicas para el aprovechamiento de

estos residuos. Colombia, no es ajeno a esta problemática, según el conpes 3874 para el año 2035 más del 90% de los rellenos sanitarios van a llegar a su punto máximo de vida, a finales de esta década. Además, afirman que más del 60% de los residuos que ingresan a los rellenos sanitarios son residuos orgánicos, aumentando la carga de estos. Es por esto que es fundamental encontrar una forma de aprovechar estos residuos orgánicos, para evitar la sobrecarga a los rellenos sanitarios y poder reingresarlos a la cadena económica, fomentando la economía circular.

“Debido al aumento exponencial de la población, la demanda textil aumentó según el Instituto para la Exportación y la Moda” (Inexmoda, 2022). El consumo en moda en el país alcanzó \$27,7 billones en 2021, 21% más que en 2020 y 5% más que en 2019. Generando diferentes impactos ambientales. La industria textil es una cadena lineal, puesto que el porcentaje de retorno de los residuos es casi nulo y debido a las nuevas tendencias de “fast fashion” el cual supone un ciclo de vida más corto, debido al cambio de diseños en un poco tiempo. Esto supone un aumento en los agentes químicos que necesita la industria en su proceso de tinturado para realizar sus prendas.

En el proceso de tinturado, la utilización de metales pesados como el mercurio, cobre, arsénico, plomo, cadmio, níquel, cobalto y cromo, además de productos químicos nocivos, como azufre, agentes de fijación a base de formaldehído, nitratos, ácido acético, suavizantes, naftol, productos químicos enjabonados y otros auxiliares hacen que el efluente sea altamente tóxico, además solo el 50% de los tintes en realidad se adhiere a la tela, el otro 50% es lavado (Kant, 2012).

En la industria textil es usualmente encontrar los parámetros de turbidez y color muy elevados, debido al uso de colorantes, los cuales pueden bloquear la difusión de la luz solar requerida para el proceso de fotosíntesis en los ecosistemas acuáticos, que, a su vez, inciden en las dinámicas dentro de estos ecosistemas (Khattab et al., 2019).

Existen procesos avanzados que pueden lograr la remoción de estas altas concentraciones de color del agua, como lo es la oxidación avanzada, ozonización, tecnología de membrana, técnicas electroquímicas, pero pueden resultar inviables, debido a los altos costos que tienen estos procesos avanzados, tanto en adquisición y construcción de su infraestructura, como también en su mantenimiento. Según (Aymart, 2017) afirma: “pocas son las industrias, situadas sobre todo en

países emergentes, que se encargan de depurar sus aguas residuales, o de controlar los gases sobrantes, vertiéndose directamente agua sin tratar a los ríos o gases al ambiente. Estos se incorporan a la cadena alimentaria y se filtran a los suelos y acuíferos subterráneos”.

Es por eso que existe una necesidad de encontrar alternativas tecnológicas económicas, para tratar estas aguas. Los procesos de adsorción proponen proyectos ambiciosos que puedan aportar a esta problemática, como lo son las tecnologías de las columnas de adsorción. Estas columnas son procesos económicos y eficientes para la remoción de color del agua, además no solo proponen aportar soluciones de problemas ambientales, sino también, a darle valor a los residuos, e ingresarlos a la cadena económica nuevamente, aportando a la economía circular, sin generar un costo elevado en su procedimiento. Reintroducir estos residuos a la cadena económica, genera que no sean enviados directamente a los rellenos sanitarios, aportando a la problemática de las sobrecargas de estos mismo.

## 6. MARCO TEÓRICO

Dentro la industria textil se genera a través del proceso varios impactos ambientales los cuales afectan directamente las propiedades fisicoquímicas y la composición del agua, debido que de dichos procesos se realizan descargas de tiñes a los conductos de aguas residuales de las cuales en su mayoría no cuentan con un correcto tratamiento.

Actualmente los colorantes textiles son de origen sintético los cuales no son biodegradables en el medio ambiente, a punto de aumentar el impacto ambiental. Dicha problemática ha motivado a realizar estudios y prácticas de eliminación de estos contaminantes, para lo cuales se necesita saber el proceso inicial de producción. En el caso de los textiles se inicia una serie de operaciones unitarias que emplean diferentes materias primas como: algodón, lanas, fibras y colorantes.

<i>Familia</i>	<i>Descripción</i>
Azoicos	Es el más importantes dentro la industria textil con una elaboración de 70% de colorantes orgánicos
Antranquinonas	Son derivadas del antraceno que contienen hidroxilo
Ftalocianina	Están formados por cuatro grupos de isoindol
Ion arilcarbonio	Están conformados por un átomo carbonilo unidos a tres anillos aromáticos
Sulfuro	Son totalmente insolubles en agua, pero solubilizados por reducción. Son colores bajos y apagados
Polimentino	Son tintes neutros, catiónicos y aniónicos
Nitro	Son colorantes incoloros cuando se encuentran aislados

**Tabla 1.** Clasificación de colorantes

En la actualidad hay una extensa variedad de procesos para el procedimiento de las aguas residuales provenientes de la industria textil. Se ha utilizado el método de la incorporación de microorganismos lo cual ha presentado resultados variados según el tipo de colorante. Como métodos principales de utilizan reactivo de Fenton, ozonización, oxidación fotoquímica, oxidación

electroquímica, entre otros. Dichos métodos se basan en la oxidación química en condiciones de presión y temperatura ambiente, con la cual se puede llegar hasta la mineralización completa de los contaminantes (POAs).

## 6.1 Residuos aprovechables

El Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia define el concepto de residuo sólido de la siguiente manera. “Cualquier objeto, material, sustancia o elemento principalmente sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador presenta para su recolección por parte de la persona prestadora del servicio público de aseo. Igualmente, se considera como residuo sólido, aquel proveniente del barrido y limpieza de áreas y vías públicas, corte de césped y poda de árboles.

Por otra parte, la Guía Técnica Colombiana GTC 53-7 lo explica como “Aquellos Materiales sólidos o semisólidos de origen animal, humano o vegetal que se abandonan, botan, desechan, descartan o rechazan y son susceptibles de biodegradación incluyendo aquellos considerados como subproductos orgánicos provenientes de los procesos industriales”.

Se agrega además que el instituto colombiano de normas técnicas y certificaciones define a los Residuos aprovechables como. “Son aquellos desechos que no tienen ningún valor para quien lo origine, pero se puede reincorporar en un proceso productivo como el reciclaje. En este grupo pertenecen todo tipo de papel, plástico y metales”.

## 6.2 Pirolisis

Según (Escalante, 2016): “El proceso de pirólisis involucra una red compleja de reacciones asociadas a la descomposición de los principales constituyentes de la biomasa, como son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, que se caracterizan por su reactividad diferente. La celulosa es uno de los componentes importantes de los residuos agrícolas, por ello resulta interesante observar cuál es su cambio durante la pirólisis. Su degradación térmica entre 250 y 350 °C da lugar a muchos compuestos volátiles (vapores de agua y alquitrán, hidrocarburos, ácidos, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO y CO<sub>2</sub>) quedando una matriz de carbono amorfa y rígida (Novak et al., 2009). Al aumentar la temperatura, se incrementa la proporción relativa de carbono aromático por la pérdida de compuestos volátiles y se lleva a cabo la conversión de carbonos, de oxialquilos a arilos y oxiarilos cuyas estructuras son semejantes a la del furano (Baldock y Smernik, 2002). A 330 °C las láminas de grafeno poliaromático empiezan a crecer lateralmente, a expensas de la fase de carbono amorfo y eventualmente coalescen. A 600 °C, el proceso dominante es la carbonización, lo que provoca la remoción de la mayoría de átomos no carbonosos como Ca, Mg, K, que se mantienen en la materia original por lo que aumenta aún más la proporción relativa de carbono, que puede ser mayor del 90% en peso en los biocarbonos de materias primas de madera (Gronli, 2003). (Novak, 2010) investigaron la química superficial de un biocarbón derivado de cáscara de nuez y revelaron que los principales grupos funcionales existentes eran hidroxil fenólico, C = O aromático, grupos alifáticos, entre otros. “La caracterización de un biocarbón no fresco reveló que contiene una gran fracción de benceno y cantidades significativas de otros compuestos aromáticos como tolueno, benzonitrilo e hidrocarburos aromáticos policíclicos, además de éteres y ésteres metílicos aromáticos dentro de su estructura” (Kaal et al., 2008).

En resumen, es comúnmente aceptado que cada partícula de biocarbón consiste de dos fracciones estructurales principales: láminas juntas de grafeno cristalino y estructuras aromáticas amorfas ordenadas, ambas asociadas con enlaces de carbono en forma de anillos de tipo benceno con oxígeno o hidrógeno (Joseph, 2009). Estos enlaces entre estructuras aromáticas de C-O y C-H gobiernan la estabilidad del biocarbón y son usados para medir su grado de aromaticidad (Hammes et al., 2006). También tiene estructuras de carbono oxidadas y alifáticas muy fácilmente degradables.”

### 6.3 Variables que afectan la pirólisis

Diversas variables afectan el mecanismo y la cinética de las reacciones de pirólisis. Estas variables, incluyen la composición del sustrato, el intervalo de calentamiento, la temperatura y presión de la cama, atmósfera ambiental presente y uso de catalizadores, por lo que deben ser completamente comprendidas y apreciadas. Entre otras cosas, estas variables tienen un efecto profundo en la secuencia y cinética de las reacciones y por tanto, en el rendimiento de los productos formados. Al entender la influencia de estas variables en el proceso, las condiciones de pirólisis pueden ser anticipadas y controladas para reducir las reacciones secundarias no deseadas y promover la formación de productos deseables, ya que las cantidades de fracciones sólida, líquida y gaseosa dependen marcadamente de tales variables (Sadaka, 2007).

### 6.4 Tipo de pirólisis

**Pirólisis lenta:** La pirólisis convencional o lenta se caracteriza por lapsos de calentamiento de la biomasa pausados, temperaturas bajas y largos tiempos de residencia de los sólidos y el gas. De acuerdo al sistema, los lapsos de calentamiento son cerca de 0.1 a 2 °C por segundo y prevalecen las temperaturas alrededor de los 500 °C. El tiempo de residencia del gas puede ser mayor de 5 s, mientras que para la biomasa puede ser de minutos a días (Sadaka, 2007). Según Gheorghe et al. (2009) este sería el proceso con el más alto rendimiento de biocarbón.

**Pirólisis rápido:** El calentamiento es mayor a 200 °C s<sup>-1</sup> y las temperaturas que prevalecen son usualmente mayores a los 550 °C. Debido al corto tiempo de residencia del vapor, los productos son de alta calidad, principalmente son líquidos, como los bioaceites y gases ricos en etileno que podrían ser usados para producir alcoholes o gasolina. La producción de carbón y alquitrán es mucho menor en este proceso (Farang et al., 2007). “El tratamiento provoca la ruptura

de los polímeros de los componentes de la biomasa en vapores condensables que forman bioaceite. Además, potencialmente podría ser un método seguro de eliminación de materias primas contaminadas por toxinas” (Mullen et al., 2010).

**Pirólisis ultrarrápida:** La pirólisis ultrarrápida se caracteriza porque las temperaturas a las que se lleva a cabo el proceso son moderadas (400-600 °C) y las tasas de calentamiento son rápidas ( $>2$  °C s<sup>-1</sup>). Los tiempos de residencia del vapor son usualmente menores a 2 s. En este sistema se produce considerablemente menos alquitrán y gas. Sin embargo, los productos aceitosos obtienen su máximo rendimiento (75 y 80%) (Sadaka D. , 2009).

## 6.5 Activación química

El carbón activado es un material altamente útil que se genera a partir del carbono, este presenta una estructura interna porosa, alta área superficial y puede tener una gran variedad de grupos funcionales en la superficie dependiendo del tipo de biomasa y el tratamiento que se le dé a este. El carbón activado tiene un amplio espectro de aplicaciones, entre las cuales están la remediación de aguas y la remoción de compuestos orgánicos volátiles presentes en el aire.

La activación del precursor carbonoso se realiza por método químico o físico. La activación física es parecida a una gasificación en el sentido de que ocurre reacción del sólido carbonoso con un gas oxidante, pero el objetivo en la activación es obtener un sólido poroso. Las temperaturas de activación empleadas son mayores a 700 °C, y los gases comúnmente utilizados son CO<sub>2</sub>, aire, vapor de agua o mezcla de estos. La activación química incluye una pirólisis del sólido a menor temperatura. En este caso el sólido primero se impregna con sustancias oxidantes como NaOH, KOH, ZnCl<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> y se lleva a temperaturas entre 400 °C - 600 °C.

Tradicionalmente el carbón activado se ha presentado en polvo, actualmente se han hecho comunes los conformados en granos, pellets, monolitos, y su aplicación como fibras y en

membranas. El carbón activado en polvo es el más económico, tiene tamaños de partículas inferiores a 1 mm, muy útil para adsorciones rápidas en estado acuoso, sin embargo, no es implementado en adsorción de gases debido a las altas caídas de presión; además, es un material difícil de recuperar. En general, en los carbones activados conformados en granos y en pellets se logra conservar una alta área superficial y adecuados volúmenes de poro, ganando en resistencia mecánica. Las ventajas de estas conformaciones son su fácil manejo con menores pérdidas de material cuando se va a utilizar en empaquetamiento, y con menores caídas de presión de los fluidos que pasan a través de ellos.

## 6.6 Horno pirolítico

Para realizar la transformación del material orgánico a mineral, se tiene que realizar una transformación de la materia. Para lograr la mineralización del material se tienen contemplados varios métodos, en este proyecto se trabajará por medio de pirólisis. Para lograr la pirólisis se necesita una temperatura determinada, y para lograr estas temperaturas se diseñará un horno pirolítico. El horno propuesto es del tipo retorta con cámara doble. Una externa de combustión y una interna de pirólisis. Para dimensionar el horno, se siguió las indicaciones y diseño propuesto por el departamento de montes de la FAO.

Como lo afirma (Iglesias, 2020)“Para realizar el saneamiento del horno con la primera quema y se desecha el producto resultante, y se prepara el material” (p.4). Se realizó ese procedimiento previo para tener las mejores condiciones del horno, además identificar cual es el tiempo y temperatura promedio que el residuo debe estar presente en el mismo para su mineralización.

## 6.8 Carbón activado

Según (Rodríguez): El carbón activado es un material de carbón que se prepara en la industria para que tenga una elevada superficie interna y así poder adsorber (retener sobre su superficie) una gran cantidad de compuestos muy diversos, tanto en fase gaseosa como en disolución. Son dos las características fundamentales en las que se basan las aplicaciones del carbón activado: elevada capacidad y baja selectividad de retención. La elevada capacidad de eliminación de sustancias se debe a la alta superficie interna que posee, si bien porosidad y distribución de tamaño de poros juegan un papel importante. En general, los microporos (tamaño inferior a 2nm) le confieren la elevada superficie y capacidad de retención, mientras que los mesoporos (tamaño comprendido entre 2-50nm) y macroporos (tamaño >50nm) son necesarios para retener moléculas de gran tamaño, como pueden ser colorantes o coloides, y para favorecer el acceso y la rápida difusión de las moléculas a la superficie interna del sólido. Por otra parte, el carbón activado tiene escasa especificidad ante un proceso de retención, es un adsorbente “universal”. No obstante, por su naturaleza apolar y por el tipo de fuerzas implicadas en el proceso de adsorción, retendrá preferentemente moléculas apolares y de alto volumen molecular (hidrocarburos, fenoles, colorantes...), mientras que sustancias como el nitrógeno, oxígeno y agua prácticamente no se retienen por el carbón a temperatura ambiente. De ahí que más de 190.000 Tm/año (de las 375.000 producidas) se destinen a la eliminación de contaminantes procedentes de sectores muy variados, tanto en fase gas (sulfuro de hidrógeno, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, vapores de gasolinas...) como líquida (aguas potables, industriales y residuales, tintorerías...). Las propiedades adsorbentes de un carbón activado no dependen únicamente de la superficie y porosidad.

Las sustancias polares se retienen débilmente sobre la superficie (apolar) del carbón. En estos casos, la fijación al carbono de “heteroátomos”, principalmente oxígeno e hidrógeno, formando estructuras o grupos funcionales tipo ácido carboxílico, lactonas, carbonilo, etc, eleva la afinidad de las sustancias polares por la superficie del adsorbente, pudiendo imprimir un carácter ácido-base al carbón. Finalmente, cuando la sustancia a eliminar tiene una polaridad apreciable, bajo volumen molecular y está muy diluida en aire la retención a temperatura ambiente por el carbón sólo es efectiva si se impregna con reactivos específicos o se aprovechan las propiedades

catalíticas del carbón. De esta manera, tras la adsorción se producen unas reacciones químicas que transforman los productos tóxicos en inertes que se desorben o quedan retenidos en la porosidad del carbón.”(p.1)

## **6.9 Biocarbon**

El biocarbón es el producto de la descomposición térmica de materiales orgánicos (biomasa) con escaso o limitado suministro de oxígeno (pirólisis), a temperaturas relativamente bajas (inferiores a los 700 °C) y que es destinado a uso agrícola, lo que hace que sea diferente al carbón usado como combustible y al carbón activado. La International Biochar Initiative o IBI (2012) en su “Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar that is Used in Soil”, define al biocarbón como “un material sólido obtenido de una conversión termoquímica de biomasa en un ambiente limitado de oxígeno”.

El biocarbón puede ser recalcitrante debido a su estructura, así que estos compuestos pueden permanecer por un largo tiempo en el suelo, o en el medio en donde estén, sin ser afectados por cualquier tipo de microorganismo o compuesto químico, es por eso, que pueden ser ideales para tratar el agua, en un caso específico, las aguas residuales de la industria textil. En estudios como (hrestha et al.,2010Major, 2010) indican que los biocarbones son compuestos altamente recalcitrantes, confirmando una vez más, su potencial para tratar agua residual.

### **6.9.1 Características fisicoquímicas**

Las características fisicoquímicas del biocarbón van directamente relacionadas con el tipo de pirólisis que se implementa (rápida o lenta) y el tiempo. El biocarbón está compuesto por diferentes partículas de diferentes tamaños, dependiendo directamente del tipo de biomasa que se

haya utilizado y del tamaño de la misma, como lo describe (Lehmann, J.) 2007. en su estudio Bio-energy in the black.(p. 381-387.) Los macroporos, que están dentro del carbón activado provienen directamente de la biomasa que se utiliza, permitiendo el transporte de los sorbatos, para posteriormente su difusión en el volumen de los microporos, aportando al transporte de moléculas concentradas (Martínez et al., 2006).

Los microporos son generados por medio de la pirólisis, si se aumenta la temperatura de este proceso se aumenta la microporosidad. Estos microporos están asociados directamente a la adsorción de compuestos líquidos, gaseosos y sólidos (Verheijen et al., 2009).

### **6.9.2 Isotermas**

Isotermas de adsorción: Cuando se establece una afinidad entre el carbón activado y el AM, este último es atraído hacia el sólido, mediante diferentes mecanismos, hasta que se alcance un equilibrio entre ambos. Este equilibrio se describe mediante modelos matemáticos, mejor conocidos como isotermas de adsorción, que relaciona la cantidad de AM removido y la que permanece en disolución cuando se alcanza el equilibrio, a una temperatura constante (Ho et al.2002). Varios modelos de equilibrio se han desarrollado para ajustar los datos experimentales a las isotermas de adsorción.

#### **Curvas de adsorción de Freundlich y Langmuir**

Las curvas de adsorción de Freundlich y Langmuir se utilizan para predecir y entender los procesos de adsorción y eficacia del biocarbón como agente de remoción del colorante rojo de metilo en el recurso hídrico.(Guerrero,2016)

Para este proceso se utilizó los datos obtenidos experimentalmente y se graficaron gracias a la software de excel para su interpretación. En la curva de adsorción de Freundlich, se grafica la cantidad de colorante rojo de metilo adsorbido en función de la concentración del agente removedor en este caso el biocarbón. La curva se ajusta a una ecuación empírica que describe la adsorción en términos de una constante de adsorción y un exponente, lo que indica la no idealidad del proceso de adsorción.

La gráfica de adsorción de Langmuir representa la cantidad de colorante rojo de metilo en función de la presión del gas o de la concentración de la solución en equilibrio con un biocarbón sólido. La curva de Langmuir muestra una región de saturación, donde la cantidad de colorante rojo de metilo en la superficie del biocarbón alcanza un valor máximo, y una región de baja presión o concentración, donde la adsorción es insignificante. La gráfica también puede ser interpretada en términos de la constante de equilibrio de Langmuir, que proporciona información sobre la afinidad entre el colorante rojo de metilo y el bicarbon.

La principal diferencia entre las gráficas de adsorción de Freundlich y Langmuir es que la gráfica de Freundlich es una curva de isoterma de adsorción que muestra la cantidad de colorante rojo de metilo en función de la concentración del biocarbón en solución, mientras que la gráfica de Langmuir es una curva de isoterma de adsorción que muestra la cantidad de colorante rojo de metilo adsorbido en función de la presión parcial del biocarbón en la fase gaseosa o la concentración del colorante rojo de metilo en solución a concentraciones muy bajas. (Guerrero, 2016)

Según (Guerrero, 2016) “La ecuación de Langmuir se basa en la suposición de que la superficie del adsorbente es homogénea, mientras que la ecuación de Freundlich se basa en la suposición de que la superficie del adsorbente es heterogénea.”

### **Ecuaciones de Freundlich y de Langmuir**

La ecuación de Freundlich se interpreta como un modelo matemático que nos describe la absorción del colorante rojo de metilo. En su forma más común, la ecuación de Freundlich se expresa como:

$$q = k * C^n$$

Ecuación linealizada de Freundlich

$$\ln q = \ln K + \frac{1}{n} * \ln C_e$$

Donde  $q$  es la cantidad de colorante rojo de metilo adsorbido en la superficie,  $C$  es la concentración del soluto en la fase líquida,  $k$  es una constante de proporcionalidad y  $n$  es un exponente que refleja la intensidad de la adsorción.

La ecuación de Freundlich indica que a medida que aumenta la concentración del soluto en la fase líquida, la cantidad adsorbida en la superficie sólida también aumenta, pero a una tasa decreciente. El valor de  $n$  es una medida de la no-linealidad de la relación entre la cantidad adsorbida y la concentración del soluto. Si  $n$  es mayor que 1, la adsorción es más intensa a altas concentraciones del soluto, mientras que si  $n$  es menor que 1, la adsorción es más intensa a bajas concentraciones. (Danilo Figueroa, 2014)

La ecuación de Langmuir es un modelo matemático que describe la absorción de un soluto en una superficie sólida. La ecuación se expresa como:

$$q = \frac{Q * (b * c)}{(1 + b * c)}$$

Donde  $q$  es la cantidad del colorante rojo de metilo adsorbido en la superficie,  $C$  es la concentración del colorante rojo de metilo en la fase líquida,  $Q$  es la cantidad máxima del colorante rojo de metilo que se puede adsorber en la superficie y  $b$  es una constante de equilibrio que refleja la afinidad del soluto por la superficie.

La ecuación de Langmuir indica que a medida que aumenta la concentración del soluto en la fase líquida, la cantidad adsorbida en la superficie sólida aumenta y se aproxima a un valor máximo de  $Q$ , que representa la capacidad de adsorción máxima de la superficie. El valor de la constante  $b$  refleja la energía de la interacción entre el soluto y la superficie sólida, siendo un valor más alto de  $b$  una indicación de una mayor afinidad del soluto por la superficie. (Sandoval-Ibarra, 2015)

En resumen, según (Sandoval-Ibarra, 2015) “la ecuación de Langmuir describe una relación de saturación entre la cantidad de soluto adsorbido y la concentración del soluto en la fase líquida, y proporciona información sobre la capacidad y afinidad de la superficie para adsorber el soluto.”

## Ecuación linealizada de Isoterma de Freundlich

Para este modelo se utilizan los datos iniciales indicados en una tabla de datos (cuáles datos o número de tabla). La ecuación de Freundlich es la siguiente:

$$q = K * C^n$$

La ecuación de Freundlich linealizada es la siguiente:

$$\text{Log } q = \text{log } Kf + 1/n \text{log } Ce$$

Ecuación de la recta

$$y = ax + b$$

Donde “ $\text{Log } q$ ” será (x), “ $\text{Log } kf$ ” será la ordenada del origen,  $1/n$  será la pendiente y “ $\text{Log } ce$ ” será el valor de (y) con el fin de obtener una isoterma linealizada para ellos se grafica teniendo los lados de “ $\text{Log } ce$ ” como eje (y) y “ $\text{Log } q$ ” como eje (x).

Obtenida la gráfica se seleccionan los datos de la gráfica lineal donde se obtiene una línea de tendencia con su coeficiente de determinación R.

Para resolver los puntos de la gráfica de Freundlich se debe tener en cuenta la ecuación lineal donde tendremos la pendiente y la ordenada al origen. Para obtener la constante “n” se divide 1 sobre la pendiente lo cual nos da la velocidad de la reacción, para resolver “kf” se eleva 10 al valor de la ordenada de origen, lo cual nos da como resultado la cantidad adsorbida cuando (ce) concentración inicial o en equilibrio es igual a 1 y para obtener “q” se realiza una regresión lineal a partir de la representación  $\text{Log } q$  en función de  $\text{Log } ce$  dando como resultado la cantidad adsorbida por unidad en peso de adsorbente.

$n$ =velocidad de la reacción

$K$ =cantidad adsorbida cuando (ce) concentración inicial o en equilibrio es igual a 1

$q$  =cantidad adsorbida por unidad en peso de adsorbente.

## Ecuación linealizada de Isoterma de Langmuir

Para el modelo de Langmuir se debe tener en cuenta la siguiente fórmula

$$q = q_m * (b * c) / (1 + b * c)$$

La ecuación linealizada de Langmuir es la siguiente :

$$1/q = 1/q_m + (K / q_m) * C_e$$

Donde  $1/q$  será el eje (y),  $1/q_m$  será la ordenada al origen,  $1/(K q_m)$  será la pendiente y  $C_e$  será la ordenada. Para obtener la gráfica se selecciona  $C_e$  como eje (x) y  $1/q$  como eje (y), obteniendo como resultado una gráfica lineal con coeficiente de determinación R.

Para resolver la ecuación de Langmuir se tiene que tener en cuenta la ecuación lineal dada en la gráfica donde el valor que acompaña la (x) es la pendiente y el valor que lo suma es la ordenada al origen. Para hallar el valor de “ $q_m$ ” se debe dividir la ordenada sobre el valor de la ordenada dando como resultado la cantidad máxima adsorbida en  $g/l$  de adsorbente.

$q_m$ =cantidad máxima adsorbida en  $mg/g$  de adsorbente  $g/l$

Para definir cuál de los dos métodos es más eficaz o donde se evidencia una mayor adsorción se debe tener en cuenta el valor de coeficiente de determinación dado que entre mayor sea el valor de R el valor será la eficacia gracias a su alto nivel de ajuste

## Impacto del rojo de metilo como colorante

La estructura del colorante rojo de metilo puede ser tóxica para el medio ambiente si se descarga por descuido o error en el agua. Los efectos que puede tener en el medio ambiente incluyen la contaminación de los recursos hídricos, la reducción de los recursos de agua potable y la destrucción de los hábitats de la fauna y de la flora acuática. Esto puede afectar a la población

de la zona, ya que el uso de agua contaminada con colorantes artificiales puede tener efectos negativos en la salud humana. Además, la contaminación de los recursos hídricos también puede reducir el valor recreacional del lugar, ya que los ríos y los lagos contaminados por el colorante rojo de metilo no serán aptos para la natación ni para la pesca.

$$q = \frac{KCe1}{n}$$

### Propiedades absorbentes de los residuos

**Cebolla:** La cebolla es un absorbente natural gracias a su composición química y estructura. Contiene una cantidad significativa de compuestos nitrogenados, como el ácido sulfúrico, el ácido cianhídrico y el ácido fosfórico. Estos compuestos pueden absorber los componentes químicos disueltos en el agua, como los colorantes. Por ello, pueden servir para eliminar los colorantes del agua además de sus propiedades absorbentes, la cebolla también contiene una cantidad significativa de ácido cítrico. Según (Pérez Sáez, 2020):

”Esto ayuda a neutralizar los efectos del ácido en el agua, lo que reduce la acidez de la misma. Esto hace que la cebolla sea un remedio natural muy eficaz para remover los colorantes del agua.”

**Alverja:** La arveja es una alternativa natural bastante utilizada para remover los colorantes del agua debido a sus propiedades absorbentes. Según (VELA, 2022):

“Esta planta contiene una variedad de polisacáridos y almidones que actúan como agentes quelantes con una alta capacidad para absorber y retener las trazas de colorantes.” Además, los polisacáridos contenidos en la arveja son capaces de absorber y neutralizar los iones metálicos, los cuales son responsables de la decoloración del agua. Por consiguiente, la arveja puede ser una alternativa natural económica para la remoción de los colorantes en el agua.

**Lechuga:** recientemente se ha descubierto que la lechuga puede usarse para remover los colorantes en el agua, como el cloruro de metilo y el azul de metileno. Esto se debe a sus propiedades absorbentes, que le permiten atraer partículas de los colorantes a través de sus capas. Según (Brayan, 2017):

” Los científicos han encontrado que las hojas de lechuga contienen una sustancia llamada pectina, que es un polímero natural que forma una capa protectora alrededor de la lechuga.” Esta capa actúa como un sistema de filtración, atrayendo partículas de colorantes en el agua. La pectina también contiene una gran cantidad de ácidos orgánicos, que ayudan a disolver y absorber los colorantes del agua. Además, la lechuga contiene un alto contenido de fibra, que, al igual que la pectina, ayuda a atraer partículas de los colorantes. La fibra ayuda a formar una matriz de soporte que mantiene los colorantes en la superficie de la lechuga, lo que aumenta la eficacia de la absorción.

### **Activación del biocarbon**

Para este proyecto del biochar o biocarbón se activó de manera física dicho proceso implica someter el biocarbón a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, lo que resulta en la formación de poros y un aumento de la superficie específica.(Schmidt et al., 2014)

Para dicho proceso se realizó una preparación previa del material orgánico o biomasa siguiendo los siguientes pasos:

1. Selección y preparación de la materia orgánica: Se recolecta y se junta la materia orgánica para su correcta selección.
2. Secado de la materia orgánica: Al ser seleccionada se realiza un secado al aire libre para la pérdida de humedad.
3. Preparación del horno pirolítico: Al estar ya seca se procede a introducir en el horno pirolítico previamente preparado. Dicho horno se utiliza con una relación 3:1 es decir tres partes de materia prima por una de carbón.
4. Transformación de la biomasa a biocarbon: El proceso de transformación de la biomasa a biocarbon tarda aproximadamente 30 minutos con el fin de garantizar una pirólisis óptima

5. Mineralización: La mineralización es el punto clave para la activación del biocarbón, este proceso consiste en humedecer la biomasa ya incinerada.
6. Secado: Esta etapa se realiza con el fin de eliminar la humedad generada por la mineralización, este secado se realiza en un horno con una temperatura entre 270 grados a 300
7. Trituración: Con la mineralización del biocarbón se procede a triturar con el fin de realizar las pruebas tipo batch

### **Estructura del colorante rojo de metilo**

La estructura química del colorante rojo de metilo es un anillo aromático bicíclico compuesto de seis átomos de carbono ( $C_6H_4$ ) que contiene un grupo metilo ( $CH_3$ ). Esta estructura molecular es un compuesto aromático estable. (Cartagena, 2022)

Esta sustancia se absorbe en la superficie de los materiales particulados presentes en el agua, como el carbón y el biocarbon. Esta absorción ocurre como resultado de la formación de puentes de hidrógeno entre las moléculas del colorante y los átomos de carbono del biocarbono. Esto provoca que se formen enlaces químicos entre los dos. Esta adsorción permite eliminar el colorante y los demás contaminantes presentes en el agua, mejorando así la calidad del agua para uso humano. (Schmidt et al., 2014)

El biocarbono es un material con una estructura porosa y altamente absorbente. Esto le permite adsorber compuestos químicos como colorantes, metales pesados y otros contaminantes. El colorante rojo de metilo es un compuesto orgánico que contiene varios átomos como oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y carbono. Estos átomos tienen una carga eléctrica, que es atraída por los sitios de adsorción del biocarbono. (Escalante Rebolledo, 2016)

El biocarbono se une a estos compuestos orgánicos y los retiene, eliminando así el colorante del agua. Los sitios de adsorción en el biocarbono también se unen a partículas sólidas y a otros contaminantes. Esto significa que el biocarbono es un material extremadamente útil para la eliminación de colorantes y contaminantes del agua.

## **7. METODOLOGÍA**

### **7.1 SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LA MATERIA ORGANICA**

#### **Selección de la materia orgánica**

Para la preparación de la materia orgánica, se seleccionaron cuidadosamente los residuos de cebolla, cascaras de alverja y lechuga. Estos residuos se eligieron debido a su alto contenido de materia orgánica, alta porosidad y capacidad de adsorción de colorantes (Rincón Vallejo, 2016)

Los residuos se recolectaron tanto de la plaza de mercado de la ciudad de Manizales como de nuestros hogares, con el fin de obtener una muestra representativa de diferentes fuentes.

#### **Caracterización de los residuos**

Se utilizaron residuos orgánicos de la plaza de mercado de la ciudad de Manizales, para evaluar su potencial adsorbente. Dentro de la caracterización de estos, los residuos más comunes son cáscaras de cebolla, cáscaras de arveja, lechuga, entre otro tipo de residuos orgánicos, pero en menor cantidad. La composición de estos residuos depende de las cosechas actuales y la comercialización de estas, debido a las diferentes cosechas durante el año. En el tiempo que se recolectaron muestras de residuos de la plaza de mercado, las cosechas que más abundaban eran de arveja, cebolla y lechuga, es por eso, que los residuos se caracterizan por tener grandes cantidades de estas 3 verduras.

Algunos artículos sugieren que el biochart proveniente de biomasa de leguminosa tiene grandes propiedades adsorbentes como en (Igwegbe et al, 2016). Donde evalúan algunas leguminosas, dentro de las cuales hacen referencias al frijol, donde se evaluaba en la remoción del colorante “Vat Yellow G”, teniendo un gran potencial en la eliminación de este compuesto. La arveja por su parte es una leguminosa, la cual contiene gran concentración de hidratos de carbono, calcio, hierro, zinc entre otros componentes, la hace una biomasa viable para la adsorción de colorantes.

Los residuos de cebolla, arveja y lechuga, son excelentes para la producción de biocarbon para la remoción de colorantes en el agua. Estos residuos se destacan por su gran contenido en materia orgánica, alta porosidad y capacidad de adsorción de colorantes. Además, los residuos orgánicos son relativamente baratos y fáciles de obtener. (Rebolledo1, 2019)

Estos residuos también son biodegradables, por lo que no generan residuos tóxicos al entrar en contacto con el agua, esto los hace una solución ecológica para el tratamiento de colorantes en el agua.

### **Separación y recolección de residuos**

Los residuos seleccionados se apartaron de otros desechos presentes y se recolectaron en una bolsa plástica. Este paso se llevó a cabo para asegurar la pureza de la materia orgánica y evitar cualquier posible contaminación con otros materiales o sustancias.

### **Limpieza de los residuos**

Los residuos recolectados en la bolsa plástica se sometieron a un proceso de limpieza exhaustiva. Esto se realizó con el objetivo de eliminar cualquier suciedad, residuos químicos o contaminantes presentes en la superficie de los residuos. La limpieza se llevó a cabo utilizando métodos adecuados, como un lavado a mano con agua, para garantizar la integridad de la materia orgánica y evitar la alteración de sus propiedades.

La limpieza de la materia orgánica antes de la pirólisis puede ayudar a mejorar la calidad del producto final. Al eliminar las impurezas, se reduce la presencia de compuestos no deseados o contaminantes en los productos de pirólisis, como el biochar o los gases producidos. (Ramirez Mas, 2018)

### **Secado de la materia orgánica**

Una vez limpios, los residuos se sometieron a un proceso de secado a una temperatura constante de 110 °C durante un período de 24 horas atrás de un horno de laboratorio de convección forzada.

Este paso fue crucial para eliminar toda la humedad presente en los residuos y alcanzar un peso constante. El secado cuidadoso permitió obtener una materia orgánica seca y lista para su posterior utilización.

**Proporciones de alverja, cebolla y lechuga:**

Considerando la importancia de mantener una composición equilibrada, se dispuso la materia orgánica preparada en proporciones iguales de alverja, cebolla y lechuga. Esta igualdad de proporciones permitió asegurar una mezcla homogénea de los diferentes residuos y sentó las bases para el siguiente paso del proceso (la pirolisis).

## **7.2 PROCESO DE PIROLISIS**

Con la materia orgánica preparada y dispuesta en proporciones iguales, se procedió al proceso de pirólisis. Esta etapa del proyecto consistió en someter la mezcla de residuos a altas temperaturas en un entorno controlado.

El objetivo de la pirólisis fue la descomposición térmica de los componentes orgánicos, generando productos volátiles y no volátiles que podrían ser evaluados en términos de su capacidad para remover los colorantes contaminantes. (Monroy Peña, 2013)

### **Selección del método de mineralización**

En este proyecto, se ha elegido trabajar con el método de pirólisis lenta para lograr la mineralización del material. La pirólisis implica calentar la biomasa en ausencia de oxígeno a temperaturas que oscilan entre 200 A 300 °C. Se utilizará un enfoque de pirólisis lenta, donde el calentamiento se lleva a cabo durante un intervalo cercano a los 30 minutos hasta observar una carbonización del material.

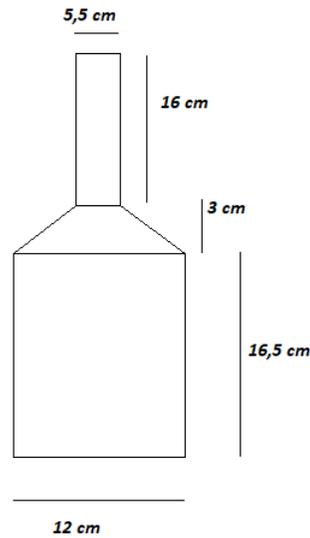
### **Proceso de pirólisis**

El proceso de pirólisis se realizará calentando la biomasa en la cámara interna del horno a las temperaturas adecuadas (200 A 300 °C). Durante este proceso, es importante asegurar que no haya presencia de oxígeno, esto se da gracias a la compresión de la biomasa dentro del reactor. Al finalizar la pirólisis, se llevará a cabo un choque térmico para cristalizar la biomasa mediante un enfriamiento con agua.

### **Diseño del horno pirolítico**

Para alcanzar las temperaturas requeridas, se diseñará un horno pirolítico. El horno propuesto es del tipo retorta con cámara doble, que consta de una cámara externa de combustión y una cámara interna de pirólisis. El dimensionamiento del horno se basó en las indicaciones y el diseño propuesto por el departamento de montes de la FAO (FAO, 1999)

El diseño del reactor se basó en la metodología propuesta por el departamento de montes de la FAO. Se empleó un tanque metálico reciclable de 311 cm<sup>3</sup> como recipiente principal y un tanque reciclable de aerosol de pintura de 130 cm<sup>3</sup> para la chimenea. La relación de altura entre el tanque y la chimenea se estableció en 1:1 para asegurar temperaturas máximas dentro del reactor. El objetivo es ingresar al menos 207 cm<sup>3</sup> de biomasa al reactor.



*Ilustración 1. Diseño del horno pirolítico*



*Ilustración 2. Construcción del horno pirolítico*

## **Relación de biomasa y combustible**

Se estableció una relación de biomasa-combustible de 3:1 (volumen- volumen) para ingresar al reactor. Esto implica 1 parte de combustible (carbón) y 3 partes de biomasa seca. Se compactará la biomasa dentro del reactor para asegurar que no haya espacios vacíos y que todo el oxígeno dentro del reactor se desplace hacia afuera.

## **Condiciones del proceso**

Las condiciones del proceso de pirólisis incluyen un tiempo estimado de 30 minutos hasta que se observe una completa carbonización del biomaterial. La temperatura se mantendrá entre 200 y 300 °C. Se utilizará un enfoque de pirólisis lenta para garantizar una descomposición eficiente. Se prestará especial atención a mantener bajas concentraciones de oxígeno dentro del reactor.

Una vez completados los pasos anteriores, se procederá a la preparación del material para las pruebas tipo batch, que constituye el siguiente paso del proyecto.

## **Preparación del material para las pruebas tipo batch**

### **Tamizado del material**

Para preparar el material para las pruebas tipo batch, se utiliza un tamizador mediante un colador casero. Este paso se realiza con el objetivo de retener las partículas más gruesas del material. Se ha observado en un experimento previo que el uso completo del ripio del material genera turbiedad en el agua, por lo que se requiere eliminar las partículas más pequeñas.



*Ilustración 3. Mineralización del biocarbon*

## 7.3 PRUEBAS DE ADSORCIÓN

### 7.3.1 Preparación y curva de calibración de la muestra patrón

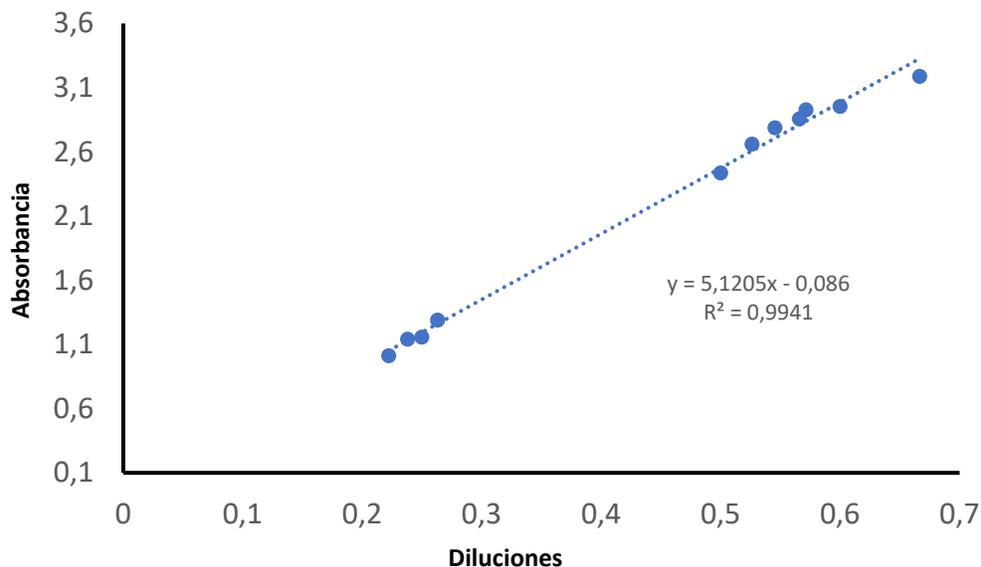
Para la construcción de la curva de calibración se utilizará el método de cromatografía, la cual se realiza para hacer un análisis instrumental con el objetivo de obtener una respuesta instrumental proporcional a la concentración del analito, se siguieron los pasos los cuales propone el laboratorio AGQ de Chile (AGQ, 2017).

Se llevaron a cabo preparaciones de disoluciones comenzando con una relación de 1/10 y se midió la absorbancia hasta alcanzar el límite máximo detectable por el espectrofotómetro. La concentración de la muestra madre fue de  $250 \frac{mg}{L}$ .

Una vez concluido el experimento, se procedió a representar gráficamente los datos obtenidos. En el eje x se asignaron las diluciones del colorante rojo de metilo como variable independiente, mientras que en el eje y se registraron los valores medios de absorbancia obtenidos mediante el espectrofotómetro. Posteriormente, se determinó la ecuación de la recta y se calculó el coeficiente

de determinación (R cuadrado) con el fin de evaluar la fiabilidad de los datos (R cuadrado mayor a 0,99).

Todos los datos experimentales obtenidos en esta prueba de calibración del espectrofotómetro se condensan en la tabla numero 8 ubicada en los anexos



**Gráfica 1.** Rango medible del espectrofotómetro al diluir la muestra madre de rojo de metilo.

La realización de estas pruebas de calibración resulta fundamental para garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos durante el posterior análisis de adsorción de residuos orgánicos utilizando el colorante rojo de metilo como indicador. Al establecer el rango medible del espectrofotómetro para este compuesto específico, se asegura que las mediciones de absorbancia se encuentren dentro de un margen óptimo, minimizando así posibles errores experimentales.

Además, estas pruebas permiten evaluar la sensibilidad y linealidad del espectrofotómetro frente a diferentes concentraciones de colorante rojo de metilo. Esto es esencial para determinar la capacidad del instrumento para detectar cambios en la concentración del colorante, lo cual es vital en la cuantificación precisa de la adsorción de residuos orgánicos.

En resumen, la realización de las pruebas de calibración con el espectrofotómetro y el colorante rojo de metilo sirvió para establecer el rango medible, evaluar la sensibilidad y linealidad del instrumento, y garantizar la calidad de los datos obtenidos en el análisis de adsorción de residuos orgánicos. Estas etapas iniciales son fundamentales para asegurar la validez y rigor científico de mi investigación

Se realizaron disolución de la muestra madre del colorante rojo de metilo por triplicado para identificar el rango medible del espectrofotómetro como se muestra en la tabla 2 ubicada en los anexos. Con esto se pudo identificar que la relación 6/7 de colorante y agua respectivamente, es donde se puede lograr un valor máximo medible del espectrofotómetro. Esta relación se utilizó para los siguientes experimentos de adsorción, teniendo como base la absorbancia por parte del espectrofotómetro de 3,187 unidades de absorbancia o una concentración de  $166,67 \frac{mg}{L}$ . Por otra parte, cuando se superaban disoluciones por encima de la máxima identificada, superaban el rango del espectrofotómetro, por el cual, resultaba imposible identificar el nivel de absorbancia, es por eso, que esos datos se obviaron.



*Ilustración 4. Solución madre rojo de metilo*

### 7.3.2 Evaluación de eficiencia y parametros de adsorción del biomaterial.

#### Evaluación de distintas masas de adsorbente en el estudio de adsorción.

Se realizaron evaluaciones de diferentes concentraciones de masa del adsorbente tanto para el biochart y el carbón activado (5 g, 7 g, 8.5 g y 10 g), utilizando un volumen constante de 250 ml de disolución de colorante rojo de metilo, con una concentración de 166,67 mg/L, con el objetivo de analizar la concentración de equilibrio del adsorbente.

La metodología del experimento fue la siguiente:

1. Se pesaron las masas requeridas (en gramos) y se introdujeron en los frascos ámbar para evitar la interferencia de la luz y proteger la sensibilidad fotosensible del colorante. Cada prueba de masa se realizó por triplicado para garantizar la fiabilidad de los datos.
2. Luego, se agregaron 250 ml de disolución de rojo de metilo a diferentes concentraciones del colorante en cada muestra, y se colocaron en el agitador orbital a una velocidad de 100 RPM en agitación constante.
3. Una vez en el agitador orbital, se tomaron muestras de absorbancia en el espectrofotómetro en intervalos de tiempo específicos: 30, 60, 90, 120 y 180 minutos, respectivamente.



*Ilustración 5. Pruebas tipo batch*

Para este experimento, se establecieron las siguientes condiciones operativas:

CONDICIONES OPERATIVAS	
PARAMETRO	VALOR
PRESIÓN	23,1 atm
TEMPERATURA	9-10 °C
pH	6,5
CONCENTRAICÓN MADRE DEL COLORANTE ROJO DE METILO	250 mg/L
CONCENTRAICÓN INICIAL DEL COLORANTE	166,67 mg/L
VALOR DE ABSORBANCIA DE LA CONCENTRACIÓN INICIAL DEL COLORANTE	3,187 (UA-unidades de absorbancia)
LUGAR DEL EXPERIMENTO	Manizales (caldas)
ALTITUD DEL LUGAR DEL EXPERIMENTO	2160 msnm
TIEMPO DE AGITACIÓN	180 minutos
VALORES DE MASA DE ADSORBENTE	5-7-8,5-10 g (gramos)
NUMERO DE PRUEBAS	Triplicado para cada valor de masa del adsorbente

**Tabla 2.** *Condiciones de proceso para pruebas de adsorción*

### 7.3.3 Construcción de curvas de cinéticas de adsorción

#### Datos obtenidos para el carbón activado

El procedimiento para determinar las isotermas y constantes se encuentra detallado en las páginas 30 y 31 del marco teórico.

Tiempo de retención	Masa	PROMEDIO absorbancia	Concentración (mg/L)	% Desviación estandar	%Remocion	% Desviación estandar	%remoción respecto a la prueba anterior
30 MINUTOS	5	1,328	69,51562814	0,075301205	58,29	0,054	58,29
	7	0,786	41,14403894	0,127226463	75,31	0,042	75,31
	8,5	0,764	39,99242462	0,130890052	76,01	0,041	76,01
	10	0,691	36,17115892	0,1447178	78,30	0,014	78,30
60 MINUTOS	5	0,693	36,27585113	0,144300144	78,23	0,040	19,94
	7	0,564	29,52320352	0,177304965	82,29	0,038	6,97
	8,5	0,502	26,27774497	0,199203187	84,23	0,037	8,23
	10	0,494	25,85897613	0,4048583	84,48	0,074	6,19
90 MINUTOS	5	0,367	19,21102073	0,272479564	88,47	0,036	10,24
	7	0,319	16,69840766	0,313479624	89,98	0,035	7,69
	8,5	0,287	15,02333229	0,696864111	90,99	0,069	6,75
	10	0,184	9,631683417	0,543478261	94,22	0,033	9,74
120 MINUTOS	5	0,412333333	21,58404418	0,485044462	87,05	0,072	-1,42
	7	0,259333333	13,57509003	0,385604113	91,86	0,034	1,87
	8,5	0,231	12,09195038	0,432900433	92,74	0,034	1,76
	10	0,230333333	12,05705297	0,434153401	92,77	0,034	-1,46
180 MINUTOS	5	0,531	27,79578204	0,188323917	83,32	0,346	-3,73
	7	0,419	21,93301822	0,238663484	86,84	0,120	-5,01
	8,5	0,394	20,62436558	0,253807107	87,63	0,045	-5,12
	10	0,439	22,97994033	0,227790433	86,21	0,036	-6,55

**Tabla 3.** Datos obtenidos en el laboratorio al realizar las pruebas de absorbancia para el carbón activado.

### Datos obtenidos de adsorción para Biochart

Tiempo de retención	Masa	PROMEDIO absorbancia	% Desviación estandar	Concentración (mg/L)	%Remocion	% Desviación estandar	%remoción respecto a la prueba anterior
30 MINUTOS	5	1,826	0,432616542	95,58398869	42,65	0,093	42,65
	7	1,754	0,14347842	91,8150691	44,91	0,109	44,91
	8,5	1,705	0,089590923	89,25010992	46,45	0,064	98,98
	10	1,673	0,124427137	87,57503455	47,46	0,014	99,00
60 MINUTOS	5	1,405	0,148161281	73,54627827	55,87	0,024	13,22
	7	1,335	0,149812734	69,88205088	58,07	0,087	13,16
	8,5	1,316	0,151975684	68,88747487	58,67	0,035	12,22
	10	1,271	0,163781747	66,53190013	60,08	0,719	12,63
90 MINUTOS	5	1,387	0,150084066	72,60404837	56,44	0,036	0,57
	7	1,254	0,166002073	65,64201633	60,62	0,049	2,54
	8,5	1,198	0,17376177	62,71063442	62,37	0,035	3,71
	10	1,083	0,192212927	56,69083229	65,99	0,033	5,90
120 MINUTOS	5	1,247	0,166933921	65,27559359	60,84	0,092	4,40
	7	1,187	0,17537203	62,13482726	62,72	0,064	2,10
	8,5	1,076	0,193463383	56,32440955	66,21	0,084	3,83
	10	1,004	0,207337251	52,55548995	68,47	0,044	2,48
180 MINUTOS	5	1,549	0,134387734	81,08411746	51,35	0,346	-9,48
	7	1,487	0,139990989	77,83865892	53,30	0,065	-9,42
	8,5	1,287	0,16174561	67,36943781	59,58	0,045	-6,63
	10	1,281	0,162503201	67,05536118	59,77	0,016	-8,70

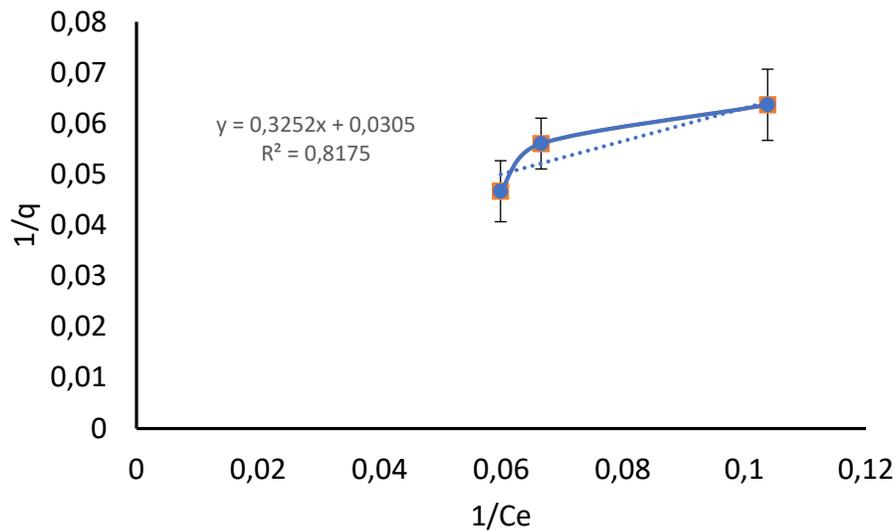
**Tabla 4.** Datos obtenidos en el laboratorio al realizar las pruebas de absorbancia del Biocarbón.

### 7.3.4 Construcción de isotermas de adsorción

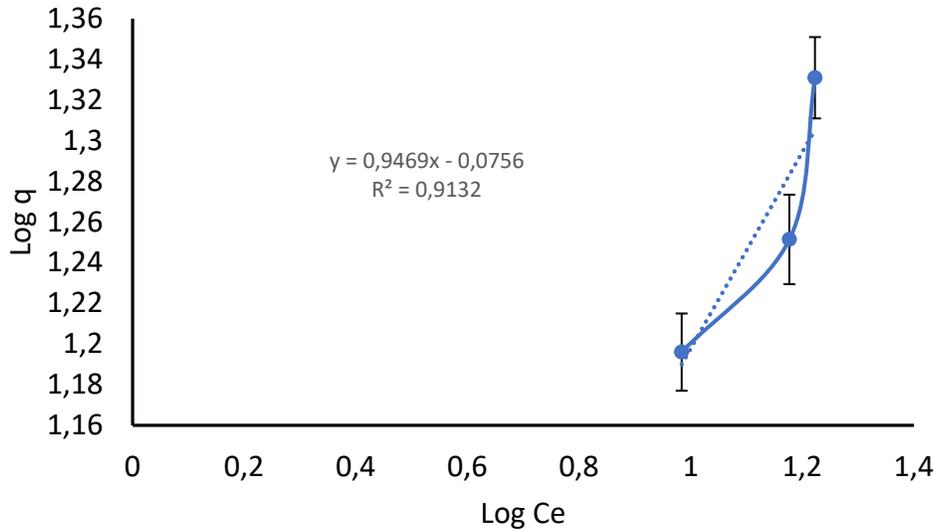
#### Isoterma de adsorción del modelo de Langmuir y Freundlich para carbón activado

Los datos para la construcción de las isotermas de adsorción se encuentran contenidos en la tabla número 3.

El procedimiento para determinar las isotermas y constantes se encuentra detallado en las páginas 30 y 31 del marco teórico.



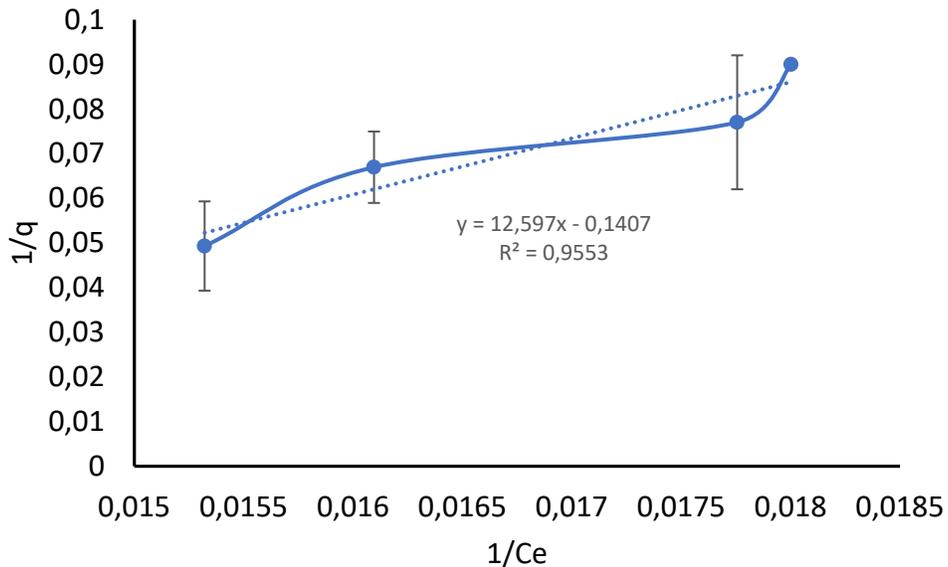
**Gráfica 2.** Isoterma de Langmuir para carbón activado en el intervalo de 90 minutos



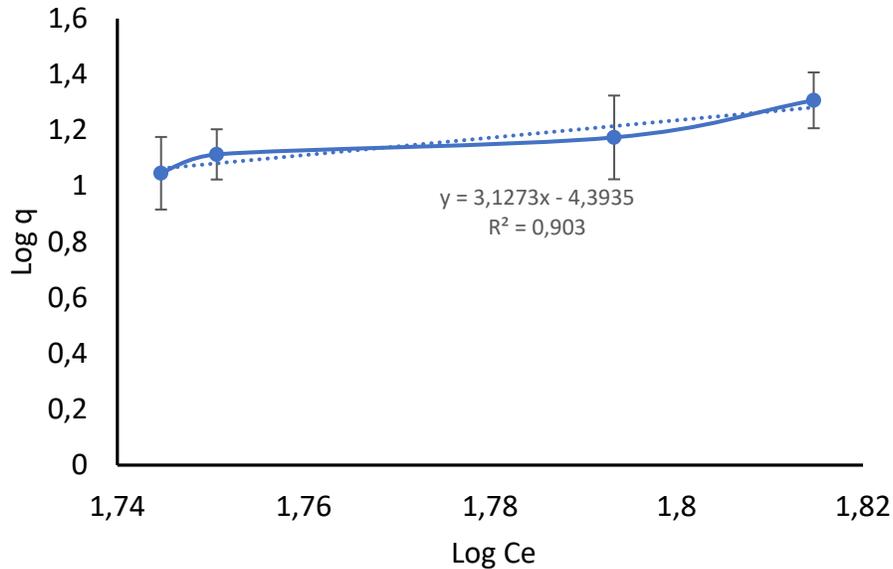
**Gráfica 3.** Isoterma de Freundlich para carbón activado en el intervalo de 90 minutos.

### Isoterma de adsorción del modelo de Langmuir y Freundlich para Biochart

Los datos para la construcción de las isotermas de adsorción se encuentran contenidos en la tabla número 4. El procedimiento para determinar las isotermas y constantes se encuentra detallado en las páginas 30 y 31 del marco teórico.



**Gráfica 4.** Isoterma de Langmuir para Biochart en el intervalo de 120 minutos



**Gráfica 5.** Isoterma de Freundlich para Biochart en el intervalo de 120 minutos

### 7.3.5 Determinación de parámetros de las isotermas de Langmuir y freundlich para carbón activado y biochart

Tipo de adsorbente	Isoterma Langmuir		Isoterma Freundlich		%Remoción
	qm	Kl	KF	N	
Carbón activado	32,7868852	0,09378844	0,84023351	1,05607773	94
Biochart	7,10732054	0,0111782	0,000404	0,31976465	68
<b>Cascara de yuca</b>					
Castellar-Ortega, G., Mendoza, E., Angulo, E., Paula, Z., Rosso, M., & Jaramillo, J. (2018). Equilibrio, cinética y termodinámica de la adsorción del colorante DB-86 sobre carbón activado de la cáscara de yuca.	6,2	0,008			90
<b>Residuos agrícolas</b>					
Ensuncho, A. E., Robles, J. R., & Carriazo, J. G. (2015). Sunset yellow dye adsorption from aqueous	6,3	0,015			57

solutions using activated carbons derived from agricultural waste.					
<b>Fique</b>					
Castro Murcia, M.F. & Salazar Arroyo, V. (2020). Evaluación de la remoción del colorante RB46 mediante carbón activado partiendo de fique a nivel laboratorio.			4,1	0,76	99
<b>Cascara de mani</b>					
Valenzuela-Padilla, A. A., & Torres-Pérez, J. (2020). Azoic dyes (A5 and R40) removal by activated carbon from pecan nut shells.			5,88	0,89	90

**Tabla 5.** Constantes de isotermas de Langmuir y freundlich para diferentes adsorbentes.

#### 7.4 Evaluación del adsorbente (Biochart) a diferentes concentraciones del colorante rojo de metilo

Todos los datos experimentales obtenidos en esta prueba para biochart se condensan en la tabla numero 11 ubicada en los anexos

Se evaluo el adsorbente (Biochart) a diferentes concentraciones de colorante rojo de metilo de la siguiente manera:

Se realizaron evaluaciones de diferentes concentraciones de colorante, utilizando un volumen constante de 250 ml de diluciones de colorante rojo de metilo, a una masa constante de adsorbente (10 g).

La metodología del experimento fue la siguiente:

1. Se realizaron diluciones del colorante rojo de metilo hasta alcanzar la concentración máxima la cual es 166,67 mg/L. Se introdujeron 250 ml de cada dilución en los en los frascos ámbar para evitar la interferencia de la luz y protege la sensibilidad fotosensible del colorante. Cada prueba se realizó por triplicado para garantizar la fiabilidad de los datos.

1. Luego, se agregaron 10 gramos del adsorbente en este caso el biochart en cada dilución del colorante y se colocaron en el agitador orbital a una velocidad de 100 RPM en agitación constante.
2. Una vez en el agitador orbital, se tomaron muestras de absorbancia en el espectrofotómetro en intervalos de tiempo específicos: 30, 60, 90, 120 y 180 minutos, respectivamente.

### Datos obtenidos de adsorción para el biochart

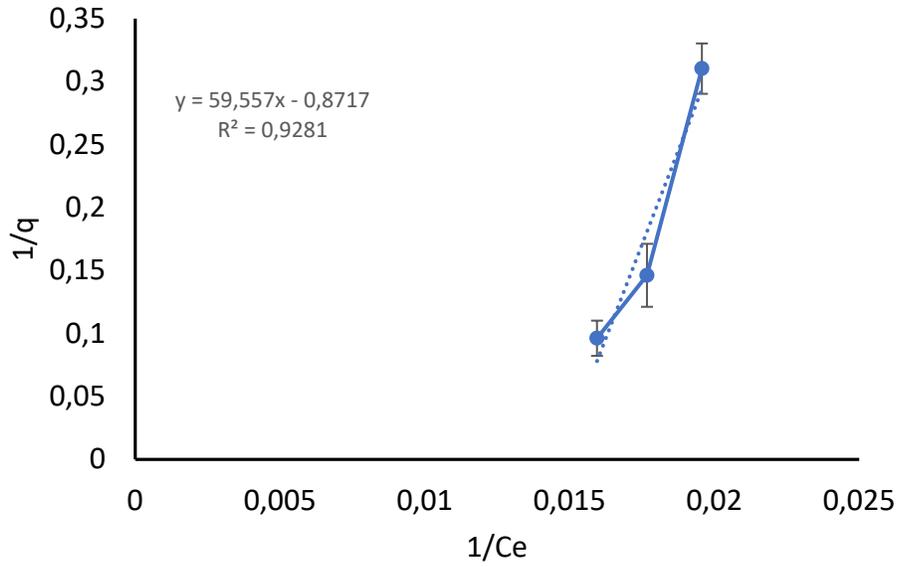
Tiempo en minutos									
30		60		90		120		180	
absorbancia	Concentración en mg/L	absorbancia	Concentración en mg/L	absorbancia	Concentración en mg/L	absorbancia	Concentración en mg/L	absorbancia	Concentración en mg/L
976	46,00301659	0,998	47,03996983	1,106	52,13046757	1,123	52,93174962	1,298	61,18024133
003	51,91511387	1,026	53,10559006	1,109	57,40165631	1,12	57,97101449	1,3	67,28778468
098	57,86256324	1,101	58,02065767	1,124	59,23271501	1,182	62,28920742	1,299	68,45489039
099	76,96078431	1,128	78,99159664	1,129	79,06162465	1,198	51,1029823	1,245	82,10944121
457	74,61081524	1,421	72,76730848	1,32	67,59524785	1,105	56,58541581	1,268	64,93240475
598	83,64740369	1,492	78,09882747	1,412	73,91122278	1,198	62,70938023	1,202	62,91876047

**Tabla 6.** Resultados prueba experimental variación de la concentración del colorante para evaluar el biochart

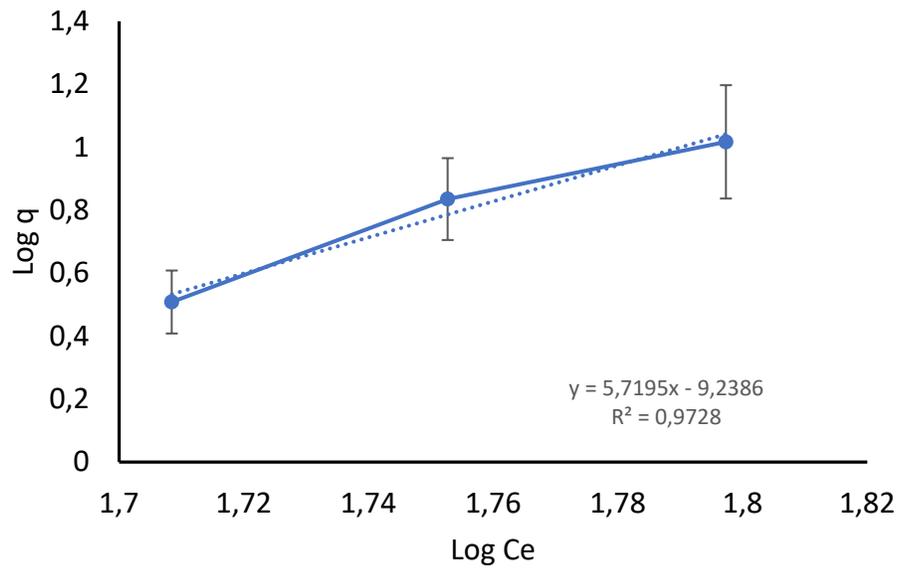
### Isoterma de adsorción del modelo de Langmuir y Freundlich para Biochart

Todos los datos experimentales obtenidos en esta prueba para biochart se condensan en la tabla número 11 ubicada en los anexos

El procedimiento para determinar las isotermas y constantes se encuentra detallado en las páginas 30 y 31 del marco teórico.



**Gráfica 6.** Isoterma de Langmuir para Biochart en el intervalo de 120 minutos



**Gráfica 7.** Isoterma de Freundlich para Biochart en el intervalo de 120 minutos

## Determinación de parámetros de las isothermas de Langmuir y freundlich para biochart

Tipo de adsorbente	Isotherma Langmuir		Isotherma Freundlich		%Remoción
	qm	Kl	KF	N	
Biochart	1,14718366	0,0146364	5,8E-10	0,17484046	62
<b>Cascara de aguacate</b>  Rodríguez Calderón, A. G. (2019). Obtención de carbón activado a partir de cáscara de aguacate para remoción de fluoruros de soluciones acuosas.			0,032281	0,427235	65
<b>Cascara de cacao</b>  Llumiquina, G., & Mishel, C. (2022). Evaluación de la capacidad de adsorción de biocarbón de Theobroma Cacao del colorante sintético tartrazina presente en aguas residuales de la empresa Extractos Andinos CA (Bachelor's thesis, Quito: UCE).	0,03602	0,0108			41

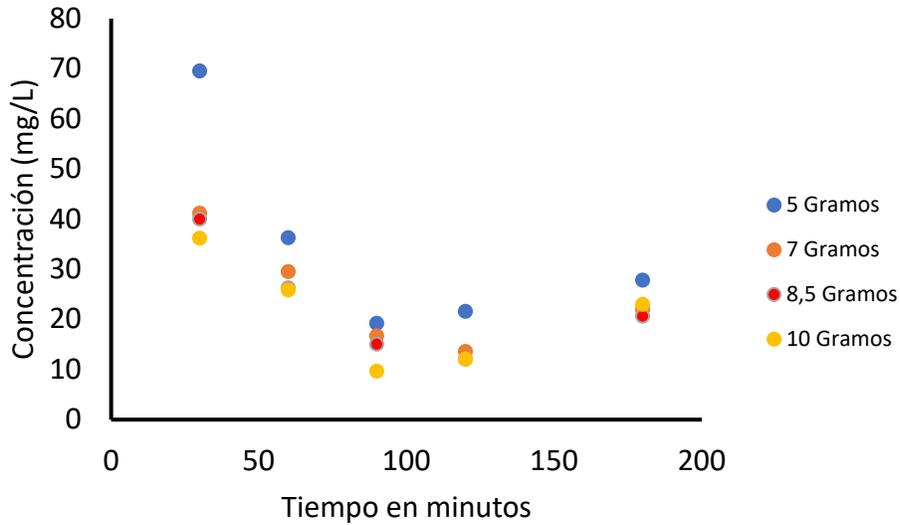
**Tabla 7.** Constantes de isothermas de Langmuir y freundlich para diferentes adsorbentes.

## 8. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 8.1 Evaluación del carbón activado y biochart basado en la masa

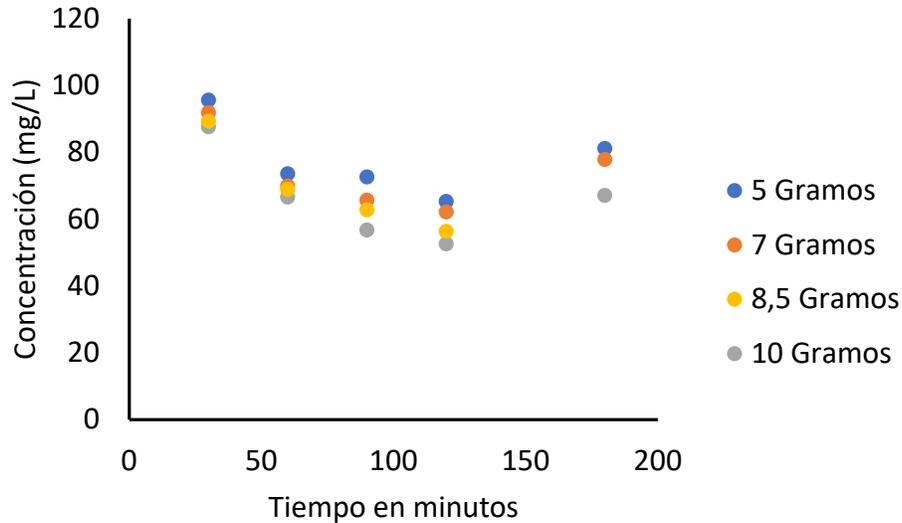
En este análisis de resultados, se evaluó la eficiencia de dos adsorbentes, el carbón activado industrial y el biocarbón obtenido a partir de residuos orgánicos, para la adsorción del colorante rojo de metilo. Se llevaron a cabo experimentos utilizando diferentes concentraciones de adsorbente y se analizó el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio dinámico en cada caso. Además, se construyeron isotermas de adsorción utilizando los modelos de Langmuir y Freundlich, y se determinaron las constantes correspondientes. Se compararon aspectos clave, como la capacidad de remoción, la estructura molecular, el método de preparación y la naturaleza de los adsorbentes, con el objetivo de evaluar el desempeño de del adsorbente y proporcionar una comprensión más completa de su eficiencia en la remoción del colorante rojo de metilo. A continuación, se presentarán y discutirán los resultados obtenidos en cada uno de estos aspectos

La remoción máxima del colorante rojo de metilo por parte del adsorbente (carbón activado) fue de aproximadamente el 94% dentro de un intervalo de tiempo de 90 minutos. Durante este intervalo, se alcanza una condición de equilibrio en el sistema, lo que indica que la capacidad de adsorción del carbón activado está cerca de su límite máximo. Sin embargo, después de los 120 minutos, se observa una disminución en la eficiencia de remoción del colorante, lo cual se atribuye a un proceso de desorción, donde el colorante previamente adsorbido comienza a liberarse y la concentración del colorante en la solución comienza a aumentar. Esto sugiere que el equilibrio alcanzado previamente se rompe y el sistema comienza a regresar a un estado menos adsorbido. Esto se evidencia en la gráfica 8.



**Gráfica 8.** Curva de cinética de adsorción para el carbón activado

La remoción máxima del colorante rojo de metilo por parte del adsorbente (Biochart) fue de aproximadamente el 68% dentro de un intervalo de tiempo de 120 minutos. Durante este intervalo, se alcanza una condición de equilibrio en el sistema, lo que indica que la capacidad de adsorción del Biochart está cerca de su límite máximo. Sin embargo, después de los 180 minutos, se observa una disminución en la eficiencia de remoción del colorante, lo cual se atribuye a un proceso de desorción, donde el colorante previamente adsorbido comienza a liberarse y la concentración del colorante en la solución comienza a aumentar. Esto sugiere que el equilibrio alcanzado previamente se rompe y el sistema comienza a regresar a un estado menos adsorbido. Esto se evidencia en la gráfica 9.



**Gráfica 9.** Curva de cinética de adsorción para el Biochart

La diferencia en la remoción de los dos adsorbentes, el carbón activado y el biocarbon, puede ser atribuida a varias características distintivas. El carbón activado es un adsorbente industrial diseñado específicamente para la adsorción de sustancias contaminantes, lo que le confiere propiedades superiores en términos de capacidad de adsorción y selectividad, esto se evidencia en diferentes estudios previos de remoción de colorante a partir de carbón activado, obteniendo resultados satisfactorios en donde se valores de remoción de colorantes por encima del 95% como se evidencia en Castellar O, G.C., Viloria C, C.A., Morrinson B, C.A., Angulo M, E.R., & Zambrano A, M.A. (Año). Evaluation of a commercial activated carbon in the removal of the dye DB2. Su estructura porosa y alta superficie específica proporcionan una mayor cantidad de sitios de adsorción, lo que facilita la remoción eficiente del colorante rojo de metilo. Por otro lado, el biocarbon generado a partir de residuos orgánicos puede presentar una estructura menos uniforme y una menor superficie específica, lo que limita su capacidad para adsorber el colorante de manera efectiva

Por otro lado, el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio dinámico puede estar relacionado con las propiedades de los adsorbentes. El carbón activado, debido a su estructura porosa y alta capacidad de adsorción, puede alcanzar el equilibrio en un tiempo más corto. Esto se evidencia en

los resultados, donde se observa que la remoción máxima del colorante rojo de metilo utilizando el carbón activado se logra en aproximadamente 90 minutos como se logra identificar en la gráfica número 8. En diferentes estudios de las propiedades del carbón activado el tiempo para alcanzar este equilibrio dinámico no es tan alto y es inferior a los 100 minutos como en Castellar, G., Angulo, E., Zambrano, A., & Charri, D. (2013). Adsorption equilibrium of methylene blue dye on activated carbon. Según investigaciones previas, se ha observado que el biocarbón derivado de materia orgánica, especialmente residuos agrícolas, requiere un tiempo mayor a los 90 minutos para alcanzar su equilibrio dinámico en procesos de adsorción. Estos hallazgos coinciden con nuestros resultados, donde se observó una tendencia similar en el tiempo requerido para que el biocarbón alcanzara su estado de equilibrio con el colorante rojo de metilo Smith, J., Johnson, R., & Brown, A. (2020). Production of High-Quality Activated Carbon from Biomass for Water Treatment Applications. Por otro lado, el biocarbon puede requerir más tiempo para alcanzar el equilibrio debido a su estructura menos uniforme y menor capacidad de adsorción, como se refleja en los resultados obtenidos en 120 minutos grafica número 9.

Es importante hacer énfasis en la estructura molecular de los adsorbentes, ya que pueden influir en su capacidad de adsorción. El carbón activado, al ser un material inorgánico, tiene una estructura porosa y una alta superficie específica debido a su proceso de activación. Esto le permite tener una mayor cantidad de sitios de adsorción disponibles para el colorante rojo de metilo, lo que resulta en una mayor eficiencia de remoción. En contraste, el biocarbon generado a partir de residuos orgánicos puede tener una estructura menos uniforme y una menor superficie específica, lo que limita el número de sitios de adsorción y, por lo tanto, su capacidad de remoción.

Otro aspecto importante es el método de preparación de los adsorbentes, ya que puede afectar significativamente sus propiedades de adsorción. El carbón activado utilizado en este estudio es un producto industrial que ha sido sometido a un proceso de activación para aumentar su porosidad y superficie específica. Esto mejora su capacidad de adsorción y selectividad para el colorante rojo de metilo. En contraste, el biocarbon se generó a través de la pirolisis lenta de residuos orgánicos, lo que puede resultar en una estructura y porosidad menos uniformes en comparación con el carbón activado. Esto puede limitar su eficiencia de adsorción. Esto se evidencia en estudios donde se han

realizado el método de gasificación, un método más eficiente para transformar la biomasa, obteniendo resultados donde remueven más del 90% del colorante del agua, como en Castellar, G., Angulo, E., Zambrano, A., & Charri, D. (2013). Adsorption equilibrium of methylene blue dye on activated carbon. Otros estudios sugieren que el proceso de pirolisis y su impacto en la capacidad de adsorción de los biocarbones ha indicado que el tipo de pirolisis desempeña un papel crucial en su capacidad de adsorción. Se ha sugerido que una pirolisis realizada a temperaturas más altas y con tiempos de residencia más prolongados puede generar estructuras más uniformes en los biocarbones, lo cual se traduce en una mayor capacidad de adsorción de colorantes. Estos estudios resaltan la importancia de las condiciones de pirolisis para obtener biocarbones con propiedades óptimas de adsorción como se especifica en Seto, C., Chang, B. P., Tzoganakis, C., & Mekonnen, T. H. (2021). Lignin derived nano-biocalbon and its deposition on polyurethane foam for wastewater dye adsorption. *International Journal of Biological Macromolecules*.

La naturaleza de los adsorbentes también puede influir en su capacidad de adsorción. El carbón activado es un material inorgánico que exhibe una mayor estabilidad y resistencia química, lo que lo hace adecuado para la adsorción de contaminantes orgánicos, como el colorante rojo de metilo. Además, su estructura porosa y su alta superficie específica permiten una interacción más efectiva con el colorante, facilitando su adsorción. Por otro lado, el biocalbon, al ser de origen orgánico, puede presentar una mayor afinidad por ciertos compuestos orgánicos, pero su estructura y superficie específica más limitadas pueden limitar su capacidad de adsorción en comparación con el carbón activado. La literatura científica ha señalado que la estructura molecular y la naturaleza del adsorbente están estrechamente vinculadas a su capacidad de adsorción de contaminantes. Se ha observado que características específicas, como la procedencia del adsorbente, pueden influir en su capacidad para retener contaminantes. Estos estudios destacan la importancia de comprender las propiedades intrínsecas de los adsorbentes y cómo pueden afectar la interacción con los contaminantes en procesos de adsorción como en Giménez-Mañogil, J., López-Muñoz, M. J., Espínola, F., & Gómez, M. (2018). Adsorption of dyes on mineral-based activated carbons: Effect of carbon pore structure and dye structure.

## Constantes de las isotermas

Las constantes obtenidas en las isotermas de Langmuir y Freundlich proporcionan información adicional sobre las propiedades de adsorción de los adsorbentes. En el caso del carbón activado, las constantes  $q_m$  y  $K_L$  del modelo de Langmuir fueron mayores en comparación con el biocarbon como se observa en la tabla número 3. Esto indica que el carbón activado tiene una mayor capacidad de adsorción y una mayor afinidad por el colorante rojo de metilo en comparación con el biocarbon. En cuanto al modelo de Freundlich, el carbón activado también mostró un valor más alto para la constante  $K_f$ , lo que sugiere una mayor capacidad de adsorción en comparación con el biocarbon. Sin embargo, los valores de  $N$  para ambos adsorbentes fueron cercanos a 1, indicando una adsorción favorable en ambos casos.

Tipo de adsorbente	Isotherma Langmuir		Isotherma Freundlich		%Remoción
	$q_m$	$K_L$	$K_f$	$N$	
Carbón activado	32,7868852	0,09378844	0,84023351	1,05607773	94
Biochart	7,10732054	0,0111782	0,000404	0,31976465	68
<b>Cascara de yuca</b>					
Castellar-Ortega, G., Mendoza, E., Angulo, E., Paula, Z., Rosso, M., & Jaramillo, J. (2018). Equilibrio, cinética y termodinámica de la adsorción del colorante DB-86 sobre carbón activado de la cáscara de yuca.	6,2	0,008			90
<b>Residuos agrícolas</b>					
Ensuncho, A. E., Robles, J. R., & Carriazo, J. G. (2015). Sunset yellow dye adsorption from aqueous solutions using activated carbons derived from agricultural waste.	6,3	0,015			57
<b>Fique</b>					
Castro Murcia, M.F. & Salazar Arroyo, V. (2020). Evaluación de la remoción del colorante RB46 mediante carbón			4,1	0,76	99

activado partiendo de fique a nivel laboratorio.					
<b>Cascara de mani</b>					
Valenzuela-Padilla, A. A., & Torres-Pérez, J. (2020). Azoic dyes (A5 and R40) removal by activated carbon from pecan nut shells.			5,88	0,89	90

**Tabla 8.** Constantes de isothermas de Langmuir y freundlich para diferentes adsorbentes.

Estos resultados indican que tanto el carbón activado como el biocarbón tienen capacidad de adsorción para el colorante rojo de metilo. El carbón activado mostró una mayor eficiencia de remoción y mayor capacidad de adsorción (valores de  $q_m$  y  $k_l$  más altos) en comparación con el biocarbón. Sin embargo, el biocarbón también demostró su potencial como adsorbente, especialmente considerando que no se realizó una activación química en su preparación.

En resumen, la diferencia en la remoción de los dos adsorbentes se debe a la estructura molecular, el método de preparación y la naturaleza de los adsorbentes. El carbón activado industrial muestra una mayor eficiencia en la remoción del colorante rojo de metilo debido a su estructura más uniforme, mayor superficie específica y mayor capacidad de adsorción. Las constantes obtenidas en las isothermas respaldan estos hallazgos, ya que el carbón activado muestra valores más altos para las constantes de adsorción en comparación con el biocarbon.

## 8.2 Evaluación comparativa de Biochart y diversos biocarbones derivados de materiales orgánicos para la eliminación de colorantes.

Se realiza un análisis comparativo del biocarbon generado en esta investigación con otros biocarbones similares reportados en la literatura. El objetivo principal es examinar las propiedades y el rendimiento del biocarbon obtenido en términos de capacidad de adsorción y remoción de contaminantes. Al realizar esta comparación, se busca identificar las fortalezas y debilidades del biocarbon generado en esta investigación, así como su viabilidad y potencial adsorbente.

### 8.2.1 Evaluación del biochart y biocarbon a base de cascara de mani

	Biocarbon a base de cáscara de maní	Biochart a partir de residuos orgánicos
Proceso de pirolisis	Temperatura > 800°C, 80 minutos	Pirolisis lenta, > 30 minutos a 250°C
Tiempo de sorción	4320 minutos	120 minutos
Remoción del colorante	90%	68%
Constante de Freundlich (KF)	5,88	0,0004
(N)	0,89	0,3

**Tabla 9.** Comparación del biochart obtenido y un biocarbon a base de cascara de mani

Los resultados del biocarbon se obtuvieron de: Valenzuela-Padilla, A. A., & Torres-Pérez, J. (2020). Azoic dyes (A5 and R40) removal by activated carbon from pecan nut shells.

Se observan diferencias significativas en varios aspectos clave. Los datos se evidencian en la tabla numero 5

#### Proceso de pirolisis

- Biocarbon a base de cáscara de maní: Se sometió a una pirolisis a una temperatura superior a 800 °C por 80 minutos.

- Biochart a partir de residuos orgánicos: Se realizó una pirolisis lenta por más de 30 minutos a una temperatura promedio de 250 °C.

El biocarbon a base de cáscara de maní fue sometido a una pirolisis a una temperatura mucho más alta y durante un tiempo más prolongado en comparación con el biocarbon a partir de residuos orgánicos

### **Tiempo en alcanzar el equilibrio dinámico**

- Biocarbon a base de cáscara de maní: El tiempo de equilibrio dinámico del material se llevó a cabo durante 4320 minutos.
- Biochart a partir de residuos orgánicos: El tiempo de equilibrio dinámico del material se realizó durante 120 minutos.

El biocarbon a base de cáscara de maní tuvo un tiempo de sorción significativamente más largo en comparación con el biochart a partir de residuos orgánicos.

Remoción del colorante:

- Biocarbon a base de cáscara de maní: Se logró una remoción del colorante rojo Allura del 90%.
- Biochart a partir de residuos orgánicos: Se logró una remoción del colorante rojo de metilo del 68%.

El biocarbon a base de cáscara de maní mostró una mayor eficacia en la remoción del colorante en comparación con el Biochart a partir de residuos orgánicos.

### **Constantes de Freundlich**

Las constantes de Freundlich de la tabla # indican que el biocarbon a base de cáscara de maní presenta una mayor capacidad de adsorción y una mayor afinidad por el colorante en comparación con el biocarbon a partir de residuos orgánicos.

El valor de KF representa la capacidad de adsorción del adsorbente, donde un valor más alto indica una mayor capacidad. En este caso, el biocarbon a base de cáscara de maní tiene una constante de Freundlich significativamente mayor (5,88) en comparación con el biocarbon a partir de residuos

orgánicos (0,0004). Esto sugiere que el biocarbon a base de cáscara de maní tiene una capacidad de adsorción mucho más alta para el colorante respectivo.

La constante N, refleja la intensidad de la adsorción. Un valor más alto de N indica una mayor intensidad y afinidad de adsorción. En este caso, el biocarbon a base de cáscara de maní muestra un valor de N de 0,89, mientras que el biocarbon a partir de residuos orgánicos tiene un valor de N de 0,3. Esto sugiere que el biocarbon a base de cáscara de maní tiene una mayor afinidad y capacidad de adsorción específica para el colorante. En resumen, el biocarbon a base de cáscara de maní mostró un mejor desempeño en términos de remoción del colorante y capacidad de adsorción en comparación con el biocarbon a partir de residuos orgánicos. Esto puede atribuirse a la pirolisis a una temperatura más alta y prolongada, generando estructuras más estables, además de los microporos y macroporos, el tiempo de sorción más prolongado y las constantes de Freundlich más altas obtenidas en el caso del biocarbon a base de cáscara de maní. Estos factores influyeron en la mayor eficacia en la remoción del colorante y una capacidad de adsorción más alta del biocarbon a base de cáscara de maní en comparación con el biocarbon a partir de residuos orgánico.

### 8.2.2 Evaluación del Biochart y el fique

	Biocarbon a base de Fique	Biochart a partir de residuos orgánicos
Proceso de pirolisis	Pirolisis a >500°C por 80 minutos, activación química con H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Pirolisis lenta, > 30 minutos a 250°C
Tiempo de sorción	240 minutos	120 minutos
Remoción del colorante	99%	68%
Constante de Freundlich (KF)	4,1	0,0004
(N)	0,76	0,3

**Tabla 10.** Comparación del biochart obtenido y un biocarbon a base de fique

Los resultados del biocarbon se obtuvieron de: Castro Murcia, M.F. & Salazar Arroyo, V. (2020). Evaluación de la remoción del colorante RB46 mediante carbón activado partiendo de fique a nivel laboratorio.

La tabla 6 muestra una comparación entre el biocarbon a base de fique y el biocarbon a partir de residuos orgánicos en términos de su proceso de producción, tiempo de sorción, remoción del colorante y las constantes de Freundlich obtenidas. El biocarbon a base de fique se obtuvo mediante una pirolisis a una temperatura superior a 500°C durante 80 minutos, seguido de una activación química con H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Por otro lado, el biocarbon a partir de residuos orgánicos se produjo mediante una pirolisis lenta durante más de 30 minutos a una temperatura promedio de 250°C.

En cuanto al tiempo de sorción, se observa que el biocarbon a base de fique tuvo un tiempo en alcanzar el equilibrio dinámico de 240 minutos, mientras que el biocarbon a partir de residuos orgánicos tuvo un tiempo de 120 minutos.

En términos de remoción del colorante, el biocarbon a base de fique mostró una remoción del colorante rojo allura del 99%, mientras que el biocarbon a partir de residuos orgánicos logró una remoción del colorante rojo de metilo del 68%.

En relación con las constantes de Freundlich, se obtuvo un valor de KF de 4.1 y N de 0.76 para el biocarbon a base de fique, mientras que el biochart a partir de residuos orgánicos presentó una constante de Freundlich (KF) de 0.0004 y N de 0.3.

Estos resultados sugieren que el biocarbon a base de fique muestra una mayor eficiencia en términos de tiempo de sorción, remoción del colorante y valores de las constantes de Freundlich en comparación con el biocarbon a partir de residuos orgánicos. La pirolisis a alta temperatura y específicamente la activación química podrían haber mejorado las propiedades del biocarbon a base de fique, lo que resulta en una mayor capacidad de adsorción y remoción de colorantes.

### 8.2.3 Evaluación del Biochart y residuos agrícolas

	Biocarbon a base de residuos agrícolas	Biochart a partir de residuos orgánicos
Proceso de pirolisis	Pirolisis a 500°C	Pirolisis lenta, > 30 minutos a 250°C
Tiempo de sorción	300 minutos	120 minutos
Remoción del colorante	57 %	68%
Constante de Langmuir (qm)	6,3	7,107
kl	0,015	0,0111782

**Tabla 11.** Comparación del biochart obtenido y un biocarbon a base de residuos agrícolas

Los resultados del biocarbon se obtuvieron de: Ensuncho, A. E., Robles, J. R., & Carriazo, J. G. (2015). Sunset yellow dye adsorption from aqueous solutions using activated carbons derived from agricultural waste.

El Biochart a base de residuos agrícolas se sometió a una temperatura superior a 500°C, mientras que el biocarbon a partir de residuos orgánicos se pirolizó a una temperatura promedio de 250°C. La temperatura de pirolisis puede afectar la estructura y la superficie del biocarbon, lo cual puede tener un impacto en su capacidad de adsorción.

El tiempo de sorción del biocarbon a base de residuos agrícolas fue de 300 minutos, mientras que para el Biochart a partir de residuos orgánicos fue de 120 minutos. El tiempo de sorción está relacionado con la velocidad de adsorción del material y puede variar según las características del biocarbon y el colorante, en este caso el Biochart puede tener una mayor velocidad de sorción del colorante rojo de metilo a comparación de el biocarbon a base de residuos agrícolas.

El biocarbon a base de residuos agrícolas logró una remoción del colorante amarillo anaranjado del 57%, mientras que el Biochart a partir de residuos orgánicos tuvo una remoción del colorante rojo de metilo del 68%. La eficiencia de remoción del colorante puede estar influenciada por la capacidad de adsorción del biocarbon y las interacciones entre el colorante y la superficie del adsorbente.

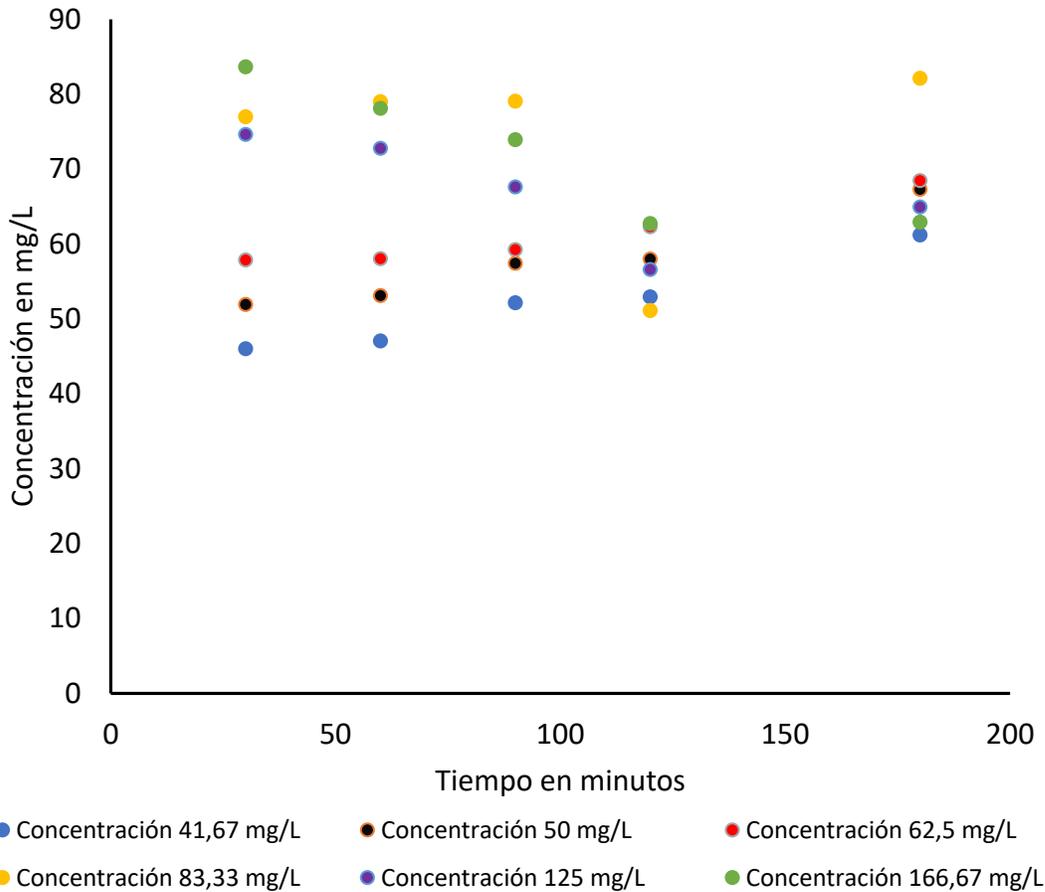
## Constantes de Langmuir

En el caso del biocarbon a base de residuos agrícolas, se obtuvieron las constantes de Langmuir  $q_m = 6.3$  y  $k_l = 0.015$ , mientras que para el Biochart a partir de residuos orgánicos se obtuvieron las constantes  $q_m = 7.10$  y  $k_l = 0.0111782$ . Estas constantes representan la capacidad máxima de adsorción y la afinidad del adsorbente por el colorante, claramente el biochart tiene una mejor capacidad de adsorción para el colorante rojo de metilo.

En general, se observa que el biocarbon a partir de residuos orgánicos tuvo una mayor remoción del colorante y mostró mayores valores en las constantes de Langmuir en comparación con el biocarbon a base de residuos agrícolas. Esto sugiere que el Biochart a partir de residuos orgánicos puede tener una mayor capacidad de adsorción y una mayor afinidad por el colorante rojo de metilo. Por otra parte, es importante resaltar la procedencia del biochart, las características de este pueden tener mejores propiedades como adsorbentes.

### 8.3 Evaluación del Biochart a diferentes concentraciones de colorante rojo de metilo

La eficacia máxima de remoción del colorante rojo de metilo utilizando el adsorbente Biochart se logró alcanzar alrededor del 62% en un periodo de 120 minutos, a una concentración inicial del colorante de 166,67 mg/L. Durante este intervalo de tiempo, se observó que las concentraciones más altas (83-125 y 166,67 mg/L) alcanzaron un estado de equilibrio, lo cual indica que se alcanzó una adsorción máxima y estable del colorante por parte del adsorbente. Sin embargo, en las tres primeras diluciones (41-50-62 mg/L), en lugar de disminuir, la concentración del colorante aumentó, lo cual puede deberse a una menor disponibilidad de sitios de adsorción en el adsorbente a concentraciones más bajas del colorante. Después de los 120 minutos, se observó un incremento en la concentración del colorante en todas las diluciones, lo cual puede indicar una desorción parcial del colorante previamente adsorbido. Esto se evidencia en la tabla 10



**Gráfica 10.** Curva de cinética de adsorción para el Biochart a diferentes concentraciones de colorante rojo de metilo

	Biocarbon a base de residuos agricolas	Biochart a partir de residuos orgánicos
Proceso de pirolisis	Pirolisis a 650°C 15 min	Pirolisis lenta, > 30 minutos a 250°C
Tiempo de sorción	220minutos	120 minutos
Remoción del colorante	41 %	62%
Constante de Langmuir (qm)	0,03602	1,147
kl	0,018	0,0146

**Tabla 12.** Cuadro comparativo Biocarbon de cascara de cacao frente al biochart de residuos orgánico

El Biocarbon a base de cáscara de cacao logró una remoción del 41% del colorante sintético tartrazina, mientras que el Biocarbon a partir de residuos orgánicos logró una remoción del 62% del colorante rojo de metilo. Esto indica que el Biocarbon a partir de residuos orgánicos fue más efectivo en la remoción del colorante utilizado en comparación con el Biocarbon a base de cáscara de cacao.

### **Constantes de Langmuir**

Los resultados obtenidos de las constantes de Langmuir ( $q_m$  y  $k_l$ ) revelan que el Biochart derivado de residuos orgánicos presenta una mayor capacidad de adsorción ( $q_m$ ) y una menor constante de afinidad ( $k_l$ ) en comparación con el Biocarbono a base de cáscara de cacao. Estos hallazgos indican que el Biochart derivado de residuos orgánicos tiene una mayor eficacia para adsorber el colorante utilizado, lo que sugiere su potencial como un adsorbente más efectivo en comparación con el Biocarbono a base de cáscara de cacao, quizás esto se deba, al origen de la materia prima utilizada para estos biocarbonos, el biochart podría tener mejor potencial como adsorbente.

## 9. CONCLUSIONES

En general, los resultados indican que el carbón activado industrial tiene un mejor desempeño en términos de remoción del colorante rojo de metilo en comparación con el biocarbon obtenido a partir de residuos orgánicos. El carbón activado muestra una mayor capacidad de adsorción, alcanza el equilibrio dinámico más rápido y presenta una estructura molecular más uniforme y una mayor superficie específica. Además, las constantes de las isothermas de adsorción respaldan estos hallazgos, cuando se comparan constantes en el modelo de Langmuir como “ $q_m$ ” la cual indica la cantidad máxima adsorbida, el carbón activado tiene valores mucho más altos en comparación del biochart.

En cuanto a la comparación entre el biochart obtenido en esta investigación y otros biocarbones derivados de materiales orgánicos reportados en la literatura, se observan diferencias significativas. El proceso de pirolisis, el tiempo de sorción, la remoción del colorante y las constantes de adsorción varían entre los diferentes biocarbones. En particular, el biochart generado en esta investigación muestra un tiempo de sorción de 120 minutos y una remoción del colorante del 68%, mientras que un biocarbon a base de cáscara de maní reportado en otro estudio muestra un tiempo de sorción de 4320 minutos y una remoción del colorante del 90%. Estas diferencias pueden atribuirse a las condiciones de pirolisis y las propiedades intrínsecas de los materiales utilizados.

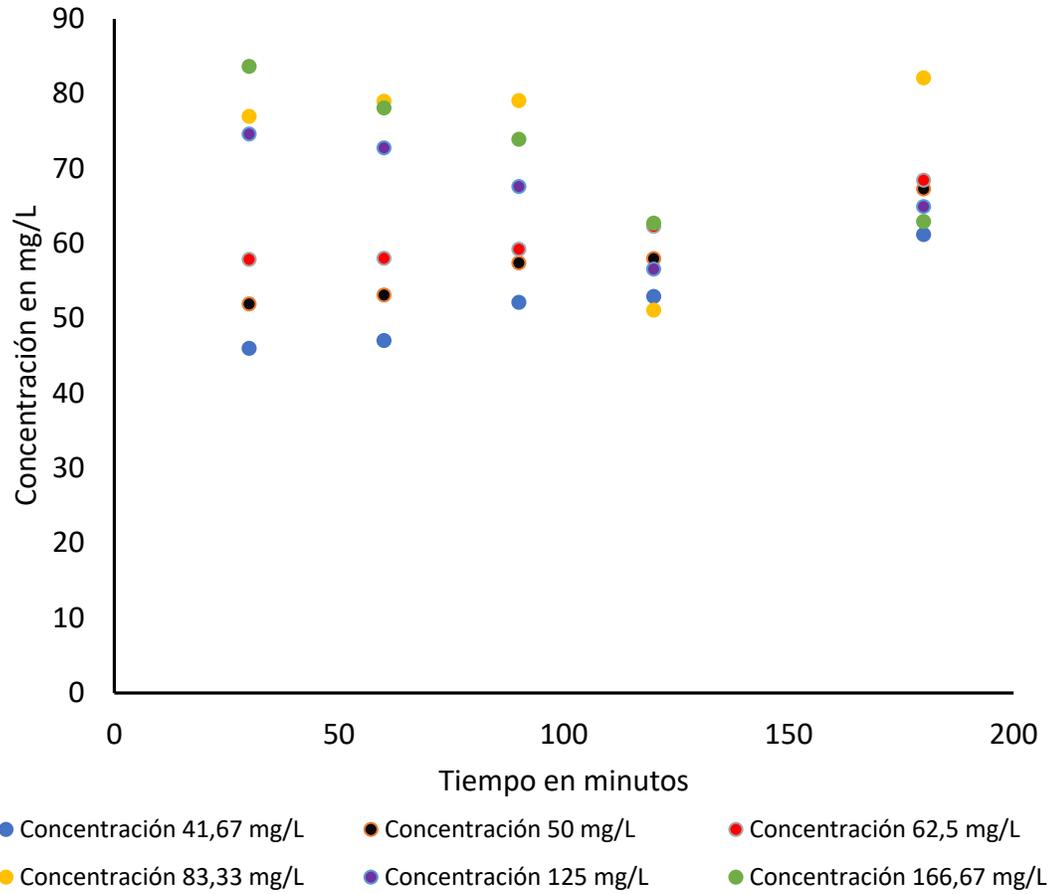
En resumen, el carbón activado industrial muestra una mayor eficiencia y capacidad de adsorción en comparación con el biocarbon obtenido a partir de residuos orgánicos. Sin embargo, el biocarbon también demuestra su potencial como adsorbente, especialmente considerando que no requiere un proceso de activación química en su preparación. La comparación con otros biocarbones muestra que las propiedades y el rendimiento pueden variar significativamente dependiendo de las condiciones de pirolisis y las características del material utilizado.

Para futuras investigaciones es de vital importancia evaluar el Biochart obtenido mediante procesos de pirólisis a temperaturas más elevadas y activación química. Estos enfoques podrían mejorar las propiedades del biocarbon, como su capacidad de adsorción y su estabilidad estructural, lo que resultaría en un material de adsorción más eficiente y versátil. La pirólisis a

mayor temperatura permitiría una mayor eliminación de componentes volátiles y la generación de una estructura porosa más desarrollada, lo cual podría aumentar significativamente la capacidad de adsorción del biocarbón. Por otro lado, la activación química, a través del uso de agentes químicos específicos, podría introducir grupos funcionales en la estructura del biocarbón, mejorando así su afinidad para la adsorción de determinados contaminantes. Al evaluar estas modificaciones en el biocarbón, se podrían obtener materiales de adsorción altamente efectivos y sostenibles, con un potencial significativo para aplicaciones medioambientales y de tratamiento de aguas residuales.

Por último, el modelo de Freundlich se ajusta de manera más adecuada a los resultados experimentales del carbón activado debido a su capacidad para describir la adsorción de solutos en superficies heterogéneas, como las presentes en el carbón activado. Por otro lado, el modelo de Langmuir resulta más apropiado para describir la adsorción en el biocarbón obtenido, ya que se basa en la suposición de una monocapa de adsorbato en una superficie homogénea, lo cual es más acorde con las características del biocarbón.

## 10. ANEXOS



- 8.
9. **Gráfica 10.** Curva de cinética de adsorción para el Biochart a diferentes concentraciones de colorante rojo de metilo

## 11. REFERENCIA

Lu, S. (2021). Efecto de la aplicación de biocarbón de sarmientos sobre las propiedades fisicoquímicas de un suelo de vid.

Sinchire Pogo, H. D., & Topa Jaya, D. W. (2020). *Diseño y simulación de un horno pirolítico de 200 litros para la generación de Biochar* (Bachelor's thesis).

Escalante Rebolledo, Ariadna, et al. "Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo." *Terra Latinoamericana* 34.3 (2016): 367-382.

Gonzalez Montealgre, J. A. (2021). Análisis de factibilidad en síntesis de un Composite a partir de Biochar derivado de la semilla del aguacate con alumina extraída de aluminio post consumo.

Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367-382.

Ardila-Leal, L. D. (2021). Producción a escala piloto (10 L) y caracterización de un concentrado enzimático de rPOXA 1B para la remoción de colorantes.

Castellar, G., Angulo, E., Zambrano, A., & Charris, D. (2013). Equilibrio de adsorción del colorante azul de metileno sobre carbón activado. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 263-271.

Escalante Rebolledo, Ariadna, et al. "Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo." *Terra Latinoamericana* 34.3 (2016): 367-382.

Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367-382.

Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367-382.

Márquez Delgado, D. L., Hernández Santoyo, A., Márquez Delgado, L. H., & Casas Vilardell, M. (2021). La educación ambiental: evolución conceptual y metodológica hacia los objetivos del desarrollo sostenible. *Revista Universidad y sociedad*, 13(2), 301-310.

Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367-382.

Salinas-Cabrera, D. (2016). Educación ambiental para el desarrollo y consumo sustentable en Chile. Una revisión bibliográfica. *Revista Electrónica Educare*, 20(2), 41-55.

Lehmann, J. 2007. Bio-energy in the black. *Front. Ecol. Environ.* 5: 381-387.

Verheijen, F. G. A., S. Jeffery, A. C. Bastos, M. van der Velde, and I. Diafas. 2009. Biochar application to soils - A critical scientific review of effects on soil properties. Processes and Functions. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities. Luxembourg.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2021). *El 50% de toda la malnutrición se debe a la falta de agua, de saneamiento y de higiene*. <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2021/es>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2016). *El preocupante aumento de la contaminación en las aguas superficiales de Asia, África y América Latina también amenaza con dañar fuentes vitales de alimentos y perjudicar las economías de esos continentes*. <https://cutt.ly/vCK1YEh>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2016). *Las principales causas del preocupante aumento de la contaminación de las aguas superficiales en Asia, África y América Latina son el crecimiento demográfico, el aumento de la actividad económica, la expansión e intensificación de la agricultura y la mayor cantidad de aguas residuales no tratadas que se descargan en los ríos y lagos*. <https://cutt.ly/vCK1YEh>

Gregory, P., Murphy, J., Farrar, N., Shafer, T., Greer, L., & Mowbray, J. (2020). Chemical Circularity in Fashion Chemical Circularity in Fashion.

Kant, R. (2012). Textile dyeing industry an environmental hazard. *Natural Science*, 04(01), 22–26. <https://doi.org/10.4236/ns.2012.41004>

Khattab, T. A., Abdelrahman, M. S., & Rehan, M. (2019). Textile dyeing industry: environmental impacts and remediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 3803–3818. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07137-z>

Présiga-López, D., Rubio-Clemente, A., & Pérez, J. F. (2021). Uso del biocarbón como material alternativo para el tratamiento de aguas residuales contaminadas. *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), 121-134.

Smith, J., Johnson, R., & Brown, A. (2020). Production of High-Quality Activated Carbon from Biomass for Water Treatment Applications. [Preparación de carbón activado a partir de biomasa

y sus aplicaciones en la depuración de aguas y gases, una revisión]. *Journal of Environmental Science*, Digital Object Identifier

Rodríguez, A., González, E., Martínez, M., & Fernández, J. (2016). Utilización de carbón mineral para la remoción eficiente de colorantes en menos de 90 minutos. [Remoción de colorantes]. *Revista de Química Aplicada*

Giménez-Mañogil, J., López-Muñoz, M. J., Espínola, F., & Gómez, M. (2018). Adsorption of dyes on mineral-based activated carbons: Effect of carbon pore structure and dye structure. *Journal of Molecular Liquids*, 253, 275-285.

Li, J., Zhu, X., Wang, Y., Jiang, G., & Sun, H. (2011). Preparation and characterization of activated carbon from lignite by chemical activation and its application in dye adsorption. *Fuel Processing Technology*, 92(9), 1725-1730.

Seto, C., Chang, B. P., Tzoganakis, C., & Mekonnen, T. H. (2021). Lignin derived nano-biocrbon and its deposition on polyurethane foam for wastewater dye adsorption. *International Journal of Biological Macromolecules*, 185, 629-643.

Flores Policarpo, M. A., & Gutierrez Calero, M. S. (2019). Efecto del pH en la adsorción y desorción de Cromo (VI) mediante biocrbón aplicado en efluentes de la industria de Curtiembre 2019.

Grey Cecilia, C. O., Carlos Andres, V. C., Carlos Andres, M. B., Edgardo Ramon, A. M., & Alejandra María, Z. A. (2017). Evaluación de un carbón activado comercial en la remoción del colorante DB2. *Revista Colombiana de Ciencia Animal-RECIA*, 9(2).

Valenzuela-Padilla, A. A., & Torres-Pérez, J. (2020). Azoic dyes (A5 and R40) removal by activated carbon from pecan nut shells. *Journal Name*, Volume(Issue), 40-60

Castro Murcia, M. F., & Salazar Arroyo, V. (2020). Evaluación de la remoción del colorante RB46 mediante carbón activado partiendo de fique a nivel laboratorio. *Revista Nombre*, Volumen(Issue), 100-120

Ensuncho, A. E., Robles, J. R., & Carriazo, J. G. (2015). Sunset yellow dye adsorption from aqueous solutions using activated carbons derived from agricultural waste. *Journal Name*, Volume(Issue), 20-50.

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.

Ensuncho, A. E., Robles, J., & Carriazo, J. G. SUNSET YELLOW DYE ADSORPTION FROM AQUEOUS SOLUTIONS USING ACTIVATED CARBONS DERIVED FROM AGRICULTURAL WASTE.



# Universidad<sup>®</sup> Católica de Manizales

VIGILADA MINEDUCACIÓN

*Obra de Iglesia  
de la Congregación*



Hermanas de la Caridad  
*Dominicas de La Presentación*  
de la Santísima Virgen

*Universidad Católica de Manizales*  
Carrera 23 # 60-63 Av. Santander / Manizales - Colombia  
PBX (6)8 93 30 50 - [www.ucm.edu.co](http://www.ucm.edu.co)