



# **Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión**

**Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica**

**Escuela Profesional de Ingeniería Química**

**Obtención de un adsorbente a partir de los residuos de cáscara de  
naranja para la adsorción de colorantes orgánicos**

**Tesis**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico**

**Autor:**

**Aime Cordova Merino**

**Asesor:**

**Dr. Víctor Raúl Coca Ramírez**

  
**VÍCTOR RAÚL COCA RAMÍREZ**  
**INGENIERO QUÍMICO**  
**Reg. del Colegio de Ingenieros N° 48044**

**Huacho – Perú**

**2026**



**Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

**Reconocimiento:** Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



**UNIVERSIDAD NACIONAL**  
**JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN**

**LICENCIADA**

*(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)*

**FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y METALURGICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUIMICA**

<b>DATOS DEL AUTOR (ES):</b>		
<b>NOMBRES Y APELLIDOS</b>	<b>DNI</b>	<b>FECHA DE SUSTENTACIÓN</b>
Aime Cordova Merino	73589586	30/04/2026
<b>DATOS DEL ASESOR:</b>		
<b>NOMBRES Y APELLIDOS</b>	<b>DNI</b>	<b>CÓDIGO ORCID</b>
Víctor Raúl Coca Ramírez	15601160	<a href="https://orcid.org/0000-0002-2287-7060">https://orcid.org/0000-0002-2287-7060</a>
<b>DATOS DE LOS MIEMROS DE JURADOS – PREGRADO/POSGRADO-MAESTRÍA-DOCTORADO:</b>		
<b>NOMBRES Y APELLIDOS</b>	<b>DNI</b>	<b>CODIGO ORCID</b>
Máximo Tomas Salcedo Meza	15602588	<a href="https://orcid.org/0000-0003-1993-2513">https://orcid.org/0000-0003-1993-2513</a>
Alberto Irhaam Sanchez Guzman	15758117	<a href="https://orcid.org/0000-0003-1575-8466">https://orcid.org/0000-0003-1575-8466</a>
Edwin Guillermo Gálvez Torres	15592688	<a href="https://orcid.org/0000-0002-7421-4453">https://orcid.org/0000-0002-7421-4453</a>

# Cordova Merino Aime 2025 - 105584

## Obtención de un adsorbente a partir de los residuos de cáscara de naranja para la adsorción de colorantes orgánicos

 UNIDAD DE INVESTIGACION FIQyM - PREGRADO-2026

 Unidad de Investigación de la FIQyM - 2026

 Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3510303891

Fecha de entrega

18 mar 2026, 12:26 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

18 mar 2026, 8:34 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS\_FINAL\_CASCARA\_DE\_NARANJA.docx

Tamaño del archivo

3.2 MB

88 páginas

16.409 palabras

90.374 caracteres

## 17% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...


### Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

### Fuentes principales

15%  Fuentes de Internet

2%  Publicaciones

7%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## **Dedicatoria**

A mi papá, por cada amanecer trabajado con el alma, por enseñarme que los sueños se construyen con esfuerzo y valentía. Gracias por ser mi ejemplo silencioso, fuerte y constante. Todo lo que soy te lleva en cada paso.

A mi mamá, por no soltar mi mano nunca, ni en los días más largos ni en las noches más inciertas. Tu amor fue mi refugio, tu presencia mi luz, y tu fe en mí, mi mayor impulso.

A los dos, con todo el amor de su única hija, les dedico este logro que también es suyo.

## **Agradecimientos**

A mis docentes, quienes con entrega, paciencia y vocación me guiaron a lo largo de este camino académico.

Gracias por compartir no solo sus conocimientos, sino también su compromiso, sus consejos y su ejemplo. Cada clase, cada palabra y cada gesto dejaron una marca en mí que hoy se refleja en este logro.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento.

Esta tesis también es fruto de su labor.

## Índice de Contenido

<b>Dedicatoria .....</b>	<b>iv</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de Contenido .....</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Tablas .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Figuras.....</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Ecuaciones.....</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Anexos .....</b>	<b>xvi</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>xvii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>xviii</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>xix</b>
<b>Capítulo I. Planteamiento del Problema.....</b>	<b>20</b>
<b>1.1. Descripción de la Realidad Problemática.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2. Formulación del Problema .....</b>	<b>20</b>
<b>1.2.1. Problema General.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2.2. Problemas Específicos .....</b>	<b>21</b>
<b>1.3. Objetivos de la Investigación .....</b>	<b>21</b>
<b>1.3.1. Objetivo general.....</b>	<b>21</b>
<b>1.3.2. Objetivos específicos.....</b>	<b>21</b>
<b>1.4. Justificación de la Investigación.....</b>	<b>21</b>
<b>1.4.1. Justificación Teórica .....</b>	<b>21</b>
<b>1.4.2. Justificación Práctica .....</b>	<b>22</b>
<b>1.4.3. Justificación Metodológica.....</b>	<b>22</b>

1.4.4.	<b>Justificación de Relevancia Social.....</b>	<b>23</b>
1.5.	<b>Delimitaciones del Estudio.....</b>	<b>23</b>
1.6.	<b>Viabilidad del Estudio.....</b>	<b>23</b>
	<b>Capítulo II. Marco Teórico.....</b>	<b>25</b>
2.1.	<b>Antecedentes de la Investigación.....</b>	<b>25</b>
2.1.1.	<b>Investigaciones Internacionales.....</b>	<b>25</b>
2.1.2.	<b>Investigaciones Nacionales.....</b>	<b>26</b>
2.2.	<b>Bases Teóricas.....</b>	<b>27</b>
2.2.1.	<b>Proceso de Adsorción.....</b>	<b>27</b>
2.2.2.	<b>Bioadsorción.....</b>	<b>31</b>
2.2.3.	<b>Biosorbente.....</b>	<b>32</b>
2.2.4.	<b>Tipos de Biosorbentes.....</b>	<b>32</b>
2.2.5.	<b>Colorantes.....</b>	<b>32</b>
2.2.6.	<b>Clasificación de Colorantes.....</b>	<b>33</b>
2.2.7.	<b>Los cítricos.....</b>	<b>35</b>
2.2.8.	<b>Descripción Botánica.....</b>	<b>36</b>
2.2.9.	<b>Descripción General de la Especie.....</b>	<b>36</b>
2.2.10.	<b>Distribución de la Naranja.....</b>	<b>38</b>
2.2.11.	<b>Propiedades Físico-Químicas de la Naranja.....</b>	<b>39</b>
2.2.12.	<b>Usos de la Cáscara de Naranja.....</b>	<b>41</b>
2.2.13.	<b>Carbón Activado.....</b>	<b>43</b>
2.2.14.	<b>Métodos de Activación.....</b>	<b>46</b>

2.2.15.	Activación Física .....	47
2.2.16.	Activación Química: .....	47
2.2.17.	Característica Químicas del Carbón Activado .....	48
2.2.18.	Tipos de Carbón Activado .....	51
2.2.19.	Aplicaciones del Carbón Activado .....	51
2.3.	Definiciones Conceptuales .....	53
2.4.	Formulación de Hipótesis .....	56
2.4.1.	Hipótesis general.....	56
2.4.2.	Hipótesis específicas .....	56
2.5.	Operacionalización de Variables e Indicadores.....	56
<b>Capítulo III. Metodología.....</b>		<b>57</b>
3.1.	Diseño Metodológico .....	57
3.1.1.	Enfoque.....	57
3.1.2.	Tipo de Investigación .....	57
3.1.3.	Nivel de Investigación.....	57
3.2.	Población y Muestra.....	58
3.2.1.	Población .....	58
3.2.2.	Muestra.....	58
3.3.	Recursos Empleados en la Etapa Experimental.....	59
3.3.1.	Reactivos Químicos .....	59
3.3.2.	Materia Prima.....	59
3.3.3.	Equipos y Materiales .....	59

3.3.4.	Seguridad y Limpieza.....	60
3.4.	Procedimiento Experimental.....	60
3.4.1.	Recolección y Preparación de la Materia Prima .....	60
3.4.2.	Secado .....	61
3.4.3.	Triturado y Tamizado .....	61
3.4.4.	Calcinación o Carbonización.....	61
3.4.5.	Activación Química .....	61
3.4.6.	Lavado y Neutralización .....	62
3.4.7.	Secado Final .....	62
3.4.8.	Almacenamiento .....	62
3.5.	Técnicas de Recolección de Datos .....	62
3.5.1.	Acidez Volátil.....	63
3.5.2.	Porcentaje de Humedad.....	63
3.5.3.	Porcentaje de Cenizas .....	64
3.5.4.	Concentración del Azul de Metileno.....	65
3.5.5.	Porcentaje de Remoción de Azul de Metileno.....	66
3.6.	Técnicas para el Procesamiento de la Información.....	66
3.7.	Diseño experimental .....	67
	<b>Capítulo IV. Análisis de Resultados.....</b>	<b>70</b>
4.1.	Caracterización de la Materia Prima (Cáscara de Naranja) .....	70
4.1.1.	Acidez Volátil.....	70
4.1.2.	Porcentaje de Humedad.....	70

4.1.3.	<b>Porcentaje de Cenizas .....</b>	<b>70</b>
4.2.	<b>Determinación del Porcentaje de Remoción de Azul de Metileno .....</b>	<b>71</b>
4.2.1.	<b>Curva de Calibración de para medir la Concentración de Azul de Metileno.....</b>	<b>71</b>
4.2.2.	<b>Determinación de la Concentración de Azul de Metileno en cada Tratamiento con las Muestras de Carbón Activado. ....</b>	<b>73</b>
	<b>Capítulo V. Discusión de Resultados.....</b>	<b>77</b>
5.1.	<b>Materia Prima (Cáscara de Naranja Seca).....</b>	<b>77</b>
5.1.1.	<b>Análisis de Acidez Volátil .....</b>	<b>77</b>
5.1.2.	<b>Análisis del Porcentaje de Humedad .....</b>	<b>77</b>
5.1.3.	<b>Análisis del Porcentaje de Cenizas.....</b>	<b>77</b>
5.2.	<b>Curva de Calibración para Medición de la Concentración de Azul de Metileno.....</b>	<b>78</b>
5.2.1.	<b>Evaluación de la Curva de Calibración.....</b>	<b>78</b>
5.2.2.	<b>Evaluación de los Residuos .....</b>	<b>78</b>
5.3.	<b>Diseño Factorial Multinivel .....</b>	<b>79</b>
5.3.1.	<b>Resumen del Modelo del Modelo Factorial Multinivel.....</b>	<b>79</b>
5.3.2.	<b>Análisis de Varianza del Modelo Factorial Multinivel .....</b>	<b>79</b>
5.3.3.	<b>Ecuación de Regresión Empírica del Modelo Factorial Multinivel.....</b>	<b>79</b>
5.3.4.	<b>Análisis de Residuos del Modelo Factorial Multinivel.....</b>	<b>80</b>
	<b>Capítulo VI. Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>81</b>
6.1.	<b>Conclusiones.....</b>	<b>81</b>

<b>6.2.</b>	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>82</b>
	<b>Referencias .....</b>	<b>83</b>
	<b>Anexos .....</b>	<b>85</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Composición fisicoquímica aproximada de la cáscara de naranja ( <i>Citrus sinensis</i> L. Obseck) .....	39
<b>Tabla 2</b> Algunos Usos de la Cáscara de Naranja.....	41
<b>Tabla 3</b> Tipo de Poro de Acuerdo al tamaño .....	43
<b>Tabla 4</b> Principales Parámetros con los que se Especifica un Carbón Activado Granular para el Tratamiento de Agua. ....	50
<b>Tabla 5</b> Variables Independientes.....	67
<b>Tabla 6</b> Resumen del Diseño Factorial Multinivel.....	67
<b>Tabla 7</b> Tabla Aleatorizada de Diseño Codificada .....	68
<b>Tabla 8</b> Matriz de Diseño Experimental (Factorial Completo Multinivel) .....	68
<b>Tabla 9</b> Acidez Volátil de la Cáscara de Naranja .....	70
<b>Tabla 10</b> Porcentaje de Humedad de la Cáscara de Naranja .....	70
<b>Tabla 11</b> Porcentaje de Cenizas de la Cáscara de Naranja .....	70
<b>Tabla 12</b> Absorbancia de las Muestras Patrón para Medir la Concentración de Azul de Metileno.....	71
<b>Tabla 13</b> Resumen del Modelo de Regresión Lineal de la Curva de Calibración de Azul de Metileno.....	71
<b>Tabla 14</b> Análisis de Varianza para el Modelo de Regresión Lineal de la Curva de Calibración de Azul de Metileno.....	72
<b>Tabla 15</b> Absorbancia de las Muestras Tratadas con el Carbón Activado Obtenido con los Diferentes Ensayos. ....	74
<b>Tabla 16</b> Resumen del Modelo Factorial Multinivel.....	74
<b>Tabla 17</b> Análisis de Varianza del Modelo Factorial Multinivel .....	75

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Vías del Proceso de Adsorción. ....	29
<b>Figura 2</b> <i>Modelo de Isotermas de Adsorción por Foo y Hameed.</i> .....	31
<b>Figura 3</b> Partes de una Naranja.....	36
<b>Figura 4</b> Estructura Molecular de la Lignina.....	40
<b>Figura 5</b> Estructura Molecular Básica de la Pectina.....	41
<b>Figura 6</b> .....	47
<b>Figura 7</b> Modelo de Regresión Lineal de la Curva de Calibración de Azul de Metileno (Concentración vs Absorbancia) .....	72
<b>Figura 8</b> Gráfica de Residuos para el Modelo de Regresión Lineal de la Curva de Calibración de Azul de Metileno.....	73
<b>Figura 9</b> Diagrama de Efectos Estándar (Pareto) para el Modelo de Regresión Factorial Multinivel .....	75
<b>Figura 10</b> Gráficas de residuos para el Modelo de Regresión Factorial Multinivel.....	76

## Índice de Ecuaciones

<b>Ecuación 1</b> Acidez Volátil de la Cáscara de Naranja .....	63
<b>Ecuación 2</b> Porcentaje de Humedad de la Cáscara de Naranja .....	64
<b>Ecuación 3</b> Porcentaje de Remoción del Carbón Activado Preparado a Partir de Cáscara de Naranja.....	66
<b>Ecuación 4</b> Ecuación de la Curva de Calibración del Azul de Metileno.....	74
<b>Ecuación 5</b> Ecuación de la Curva de Calibración del Azul de Metileno.....	75

## Índice de Anexos

<b>Anexo 1</b> Secado de la Cáscara de Naranja .....	85
<b>Anexo 2</b> Molienda y Tamizado de la Cáscara de Naranja Seca.....	85
<b>Anexo 3</b> Calcinación de la Cáscara de Naranja en Polvo. ....	86
<b>Anexo 4</b> Activación Química del Carbón .....	87
<b>Anexo 5</b> Lavado, Filtrado y Secado del Carbón Activado.....	89

## Resumen

El presente estudio plantea que un residuo cotidiano —la cáscara de naranja— puede convertirse en una solución práctica para la contaminación por colorantes: el objetivo general fue desarrollar y evaluar un carbón activado a partir de cáscara de naranja para la remoción de azul de metileno. La investigación se llevó a cabo como un estudio aplicado, tecnológico y de nivel explicativo con enfoque cuantitativo, utilizando un diseño experimental factorial multinivel (3 temperaturas de calcinación  $\times$  2 dosis de  $H_3PO_4$ ), donde la población estuvo constituida por soluciones contaminadas preparadas en el laboratorio y la muestra comprendió seis tratamientos experimentales replicados, sumando 18 corridas en total. Mediante carbonización y activación química se caracterizó la biomasa (acidez volátil 0.36 g de ácido acético/100 g; humedad 14.81%; cenizas 6.97%) y se evaluó la adsorción por espectrofotometría; los resultados mostraron que la condición óptima (500 °C y 2 mL/g de  $H_3PO_4$ ) alcanzó una remoción de 89.8%, y el modelo estadístico explicó aproximadamente 96.7% de la variabilidad ( $R^2$ ;  $R^2$  ajustado  $\approx$  94.39%), indicando que temperatura y dosis del activador son factores determinantes y que su interacción también influye en el rendimiento. Se concluye que la cáscara de naranja constituye un precursor viable, económico y sostenible para producir un bioadsorbente eficaz; en consecuencia, se recomienda optimizar el secado previo, estudiar la regeneración del material, ampliar ensayos a otros contaminantes y avanzar hacia pruebas piloto que permitan validar su aplicación en contextos industriales.

**Palabras Claves:** carbón activado; cáscara de naranja; adsorción; azul de metileno; activación química; diseño factorial; residuos agroindustriales; tratamiento de aguas.

## Abstract

This study proposes that a common waste —orange peel— can become a practical solution to dye pollution: the main objective was to develop and evaluate activated carbon from orange peel for methylene blue removal. The research was conducted as an applied, technological, explanatory-level study with a quantitative approach, using a factorial multilevel experimental design (3 calcination temperatures  $\times$  2 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> dosages), where the population consisted of laboratory-prepared contaminated solutions and the sample comprised six experimental treatments replicated to yield 18 runs in total. Through carbonization and chemical activation, the biomass was characterized (volatile acidity 0.36 g acetic acid/100 g; moisture 14.81%; ash 6.97%) and adsorption was measured by spectrophotometry; results showed that the optimal condition (500 °C and 2 mL/g H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) achieved 89.8% removal, and the statistical model explained about 96.7% of the variability ( $R^2$ ; adjusted  $R^2 \approx 94.39\%$ ), indicating that temperature and activator dose are decisive factors and that their interaction affects performance. It is concluded that orange peel is a viable, low-cost, and sustainable precursor for an effective bioadsorbent; therefore, it is recommended to optimize pretreatment drying, investigate adsorbent regeneration, test other pollutants, and move to pilot trials to validate industrial application.

**Keywords:** activated carbon; orange peel; adsorption; methylene blue; chemical activation; factorial design; agro-industrial waste; wastewater treatment.

## Introducción

La presencia de colorantes orgánicos en cuerpos de agua es un problema ambiental con alcance local y global: más allá del impacto estético que provocan en ríos y lagunas, estos compuestos interfieren con los procesos ecológicos, reducen la penetración de luz, alteran la fotosíntesis en organismos acuáticos y pueden generar efectos toxicológicos en cadenas tróficas y en la salud humana. Muchos colorantes sintéticos son químicamente estables y resistentes a la biodegradación, lo que dificulta su eliminación mediante los tratamientos convencionales de aguas residuales. Esto plantea un desafío técnico y social para regiones con actividad industrial relevante —desde la textilería hasta la industria alimentaria y cosmética— donde la gestión inadecuada de efluentes compromete recursos hídricos y comunidades.

Frente a esta realidad, la búsqueda de soluciones sostenibles ha impulsado el desarrollo de tecnologías verdes que combinan eficiencia, bajo costo y compatibilidad con modelos de economía circular. Entre estas estrategias, la producción de adsorbentes a partir de biomasa y residuos agroindustriales ha ganado atención por su potencial para transformar desechos locales en materiales funcionales capaces de capturar contaminantes. El aprovechamiento de subproductos orgánicos no solo disminuye la presión sobre vertederos y plantas de tratamiento, sino que también genera alternativas de bajo costo que pueden ser adaptadas a contextos urbanos y rurales.

Investigar y optimizar procesos de preparación, activación y caracterización de estos materiales es clave para entender sus limitaciones y potencialidades. Esto implica integrar conocimientos de química de superficies, ingeniería de procesos y análisis estadístico para definir condiciones de producción replicables y evaluar el desempeño frente a compuestos modelo

## **Capítulo I. Planteamiento del Problema**

### **1.1.Descripción de la Realidad Problemática**

La contaminación del agua por colorantes orgánicos es un problema ambiental significativo que afecta a ecosistemas acuáticos y a la salud humana. Estos colorantes, utilizados ampliamente en industrias como la textil, alimentaria y cosmética, son difíciles de eliminar mediante métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Además, muchos de estos compuestos son tóxicos y persistentes, lo que genera la necesidad de desarrollar tecnologías efectivas y sostenibles para su remoción.

Por otro lado, la generación de residuos agrícolas, como las cáscaras de naranja, representa un desafío en la gestión de desechos. Estos residuos, a menudo subutilizados, poseen propiedades que pueden ser aprovechadas para la producción de materiales adsorbentes. La conversión de cáscaras de naranja en un adsorbente no solo contribuiría a la mitigación de la contaminación del agua, sino que también promovería la economía circular al dar un nuevo valor a los residuos.

Sin embargo, existen limitaciones en el conocimiento sobre la eficacia de los adsorbentes derivados de cáscaras de naranja en la eliminación de colorantes orgánicos y sobre los métodos óptimos para su preparación y caracterización. Por lo tanto, es crucial investigar y desarrollar un adsorbente eficiente a partir de estos residuos, así como evaluar su rendimiento en la adsorción de colorantes.

### **1.2.Formulación del Problema**

#### ***1.2.1. Problema General***

¿Cómo desarrollar un adsorbente a partir de residuos de cáscara de naranja para la adsorción de colorantes orgánicos?

### ***1.2.2. Problemas Específicos***

¿Cuál es el método de preparación más apropiado para la producción de un adsorbente a partir de residuos de cáscara de naranja?

¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas del adsorbente obtenido a partir de cáscaras de naranja?

¿Cuál es la eficacia de adsorción del material en la remoción de diferentes colorantes orgánicos?

## **1.3. Objetivos de la Investigación**

### ***1.3.1. Objetivo general***

Desarrollar un adsorbente a partir de residuos de cáscara de naranja para la adsorción de colorantes orgánicos.

### ***1.3.2. Objetivos específicos***

Identificar el método de preparación más apropiado para la producción de un adsorbente a partir de residuos de cáscara de naranja.

Determinar las propiedades fisicoquímicas del adsorbente obtenido a partir de cáscaras de naranja.

Evaluar la eficacia de adsorción del material en la remoción de diferentes colorantes orgánicos.

## **1.4. Justificación de la Investigación**

### ***1.4.1. Justificación Teórica***

La investigación se fundamenta en teorías de adsorción y química ambiental. La adsorción es un fenómeno físico-químico que permite la eliminación de contaminantes de soluciones acuosas mediante la interacción entre el contaminante y la superficie del adsorbente. La literatura científica ha demostrado que los materiales bioadsorbentes, como los derivados de residuos agrícolas, pueden ser efectivos en la remoción de colorantes orgánicos debido a su composición química rica en grupos funcionales que favorecen estas interacciones. Al estudiar la obtención y caracterización de un adsorbente a partir de cáscaras de naranja, esta investigación contribuirá al cuerpo de conocimiento existente sobre el uso de biomateriales en la remediación ambiental, proporcionando información valiosa sobre su eficacia y propiedades.

#### ***1.4.2. Justificación Práctica***

Desde una perspectiva práctica, la investigación aborda un problema ambiental crítico: la contaminación del agua por colorantes orgánicos. La implementación de un adsorbente derivado de cáscaras de naranja no solo ofrecería una solución efectiva para la remoción de estos contaminantes, sino que también promovería el aprovechamiento de residuos agrícolas, contribuyendo a la reducción de desechos y al desarrollo de procesos sostenibles. Además, la producción de este adsorbente podría ser escalable y adaptable a diferentes contextos industriales, lo que facilitaría su integración en sistemas de tratamiento de aguas residuales.

#### ***1.4.3. Justificación Metodológica***

La metodología propuesta para la obtención y caracterización del adsorbente se basa en técnicas reconocidas en la ingeniería de procesos, como la carbonización y activación química, que han demostrado ser efectivas en la producción de materiales adsorbentes. La investigación incluirá un enfoque experimental que permitirá evaluar de manera sistemática la influencia de diferentes parámetros en la capacidad de adsorción del material obtenido.

Esto no solo asegurará la validez de los resultados, sino que también proporcionará un marco replicable para futuras investigaciones en este ámbito. La combinación de métodos analíticos y experimentales garantizará una comprensión profunda del comportamiento del adsorbente frente a colorantes orgánicos.

#### ***1.4.4. Justificación de Relevancia Social***

La relevancia social de esta investigación radica en su potencial para contribuir a la mejora de la calidad del agua y, por ende, a la salud pública. La contaminación por colorantes orgánicos afecta a comunidades que dependen de fuentes de agua contaminadas, lo que puede derivar en problemas de salud y deterioro del ecosistema. Al desarrollar un adsorbente a partir de un residuo agrícola, la investigación no solo aborda un problema ambiental, sino que también fomenta la economía circular y la sostenibilidad, promoviendo el uso responsable de los recursos naturales. Además, al involucrar a comunidades locales en la producción y aplicación de este adsorbente, se puede generar conciencia sobre la gestión de residuos y la protección del medio ambiente, fortaleciendo el tejido social y económico de la región.

#### **1.5. Delimitaciones del Estudio**

El presente estudio espacialmente se llevará a cabo dentro de los alrededores de la localidad de Huacho y de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, y temporalmente entre los meses de Julio a diciembre del año 2024. Nos servirá como modelo de aplicación para el uso eficiente y manejo adecuado de los residuos de naranja generados en los negocios locales.

#### **1.6. Viabilidad del Estudio**

La viabilidad de esta tesis se ve respaldada por el acceso del estudiante a recursos financieros suficientes para cubrir los costes que conlleva la realización de la investigación.

Además, el estudiante tiene acceso a información relevante y actualizada, que contribuirá a garantizar un progreso constante a lo largo del proyecto. También dispondrá de la orientación de expertos, que le proporcionarán un valioso apoyo durante el proceso de desarrollo. Para completar el proyecto con eficacia y sin contratiempos significativos, será esencial una planificación y organización adecuadas del tiempo disponible.

## Capítulo II. Marco Teórico

### 2.1. Antecedentes de la Investigación

#### 2.1.1. Investigaciones Internacionales

Lucín García & Ramírez Mendez (2021), cuya investigación está enfocada en la determinación de la evaluación eficaz de metales pesados Cadmio y Plomo con biomasas de frutas cítricas naranja (*Citrus sinensis*) y mandarina (*Citrus reticulada*) pre-tratadas con NaOH (desmetoxilación) y con CaCl<sub>2</sub> (reticulación). Se han considerado como variables independientes los 2 bioadsorbentes cascara de naranja y mandarina con sus respectivas dosis 4, 8, 12 g/L y 3, 7, 11 g/L para determinar el porcentaje de remoción de Cadmio y Plomo en las muestras de agua. De las 7 pruebas realizadas se obtuvo la mayor remoción en Cadmio con los tratamientos de ambas biomasas, siendo la más eficaz con 3 gramos de mandarina removiendo un 90,33%. En los parámetros fisicoquímico como pH, turbidez, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto se logró una disminución, estando dentro de los parámetros de la normativa ambiental vigente, mientras que en el parámetro de sólidos disueltos totales se notó un aumento debido a que la muestra entró en contacto con la biomasa pulverizada. Para la remoción del parámetro Plomo no se obtuvieron resultados eficaces y esto se debe al pH de las biomasas que se obtuvo de 7 (pH neutro), en lo cual se debe considerar cambiar el pH, el más óptimo entre 4-5 (pH ácido).

Vásquez Valenzuela (2023) realizó un estudio sobre la producción de carbón activado a partir de cáscara de naranja amarga (*Citrus × aurantium*) y su eficiencia en la adsorción de cobre (II) en aguas residuales. Inicialmente, se secaron tres lotes de 1 kg de cáscara húmeda, obteniéndose alrededor de un 43 % de masa seca. Este material fue triturado y tratado con ácido fosfórico al 30 % (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) para su activación química. Posteriormente, las cáscaras tratadas fueron carbonizadas en atmósfera inerte a 450 °C durante tres horas. El carbón resultante se enjuagó con agua destilada para eliminar

residuos ácidos y luego se secó a 60 °C durante 24 horas. En la fase final, se evaluaron las condiciones de pH óptimo y concentración de CuSO<sub>4</sub> (26, 42, 90, 170 y 260 ppm; pH 3, 4 y 5), encontrándose un rango óptimo de pH entre 4 y 5. Finalmente, se aplicaron los modelos de isoterma de Langmuir y Freundlich para analizar la capacidad de adsorción, resultando el modelo de Langmuir como el que mejor se ajustó a los datos experimentales (Vásquez Valenzuela, 2023).

### **2.1.2. Investigaciones Nacionales**

Ruiz Menéndez (2018) llevó a cabo una investigación donde se elaboró carbón activado a partir de cáscara de naranja dulce (*Citrus sinensis*), usando ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) como agente activante. Primero se analizaron características del material como la humedad, contenido de cenizas y carbono fijo. Luego, se estudió cómo la relación entre el ácido y la cáscara influía en el rendimiento del carbón, obteniéndose un promedio cercano al 32 %. Después de activado, el carbón fue probado en la adsorción de plomo (II) en agua, evaluando distintos pH y concentraciones. Los resultados mostraron que bajo condiciones óptimas se logró remover más del 98 % del plomo, lo cual demuestra que este residuo agroindustrial tiene un gran potencial como adsorbente, aunque el proceso todavía puede mejorarse en escala mayor.

Palomino Falconi (2023) investigó el uso de cáscaras de limón como bioadsorbente para la remoción de colorantes presentes en las aguas residuales de la industria textil, una de las más contaminantes debido al uso intensivo de compuestos químicos. El estudio aplicó un diseño factorial 2<sup>3</sup> para evaluar la influencia combinada de tres variables independientes: tamaño de partícula, tiempo de contacto y concentración del adsorbente, realizando ocho combinaciones experimentales. Se utilizó azul de metileno (AM) como colorante modelo, obteniéndose una remoción máxima del 50.22 % bajo condiciones óptimas: partículas de 1 mm, 120 minutos de contacto y 1 g de adsorbente. Estos resultados,

aunque moderados, son relevantes al tratarse de un residuo agroindustrial de bajo costo y amplia disponibilidad. La estructura porosa de la cáscara de limón y la presencia de grupos funcionales como carboxilos e hidroxilos en su superficie favorecen la adsorción de contaminantes, lo que la convierte en una alternativa viable para el tratamiento de efluentes. Además, se promueve la valorización de residuos agrícolas como estrategia sostenible y accesible para mitigar la contaminación hídrica, alineándose con los principios de economía circular. El estudio demuestra que, bajo condiciones adecuadas, la cáscara de limón puede funcionar como un bioadsorbente eficaz en contextos rurales o de recursos limitados, y alienta futuras investigaciones para optimizar su rendimiento y ampliar su aplicación en sistemas de tratamiento de aguas residuales.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Proceso de Adsorción**

Durante el proceso de adsorción es importante tener presente algunos términos que se usan bastante cuando se habla del tema. Estos conceptos ayudan a comprender mejor lo que ocurre en el tratamiento de contaminantes y cómo se aplican los métodos de adsorción en la práctica. Aunque a veces parecen confusos o técnicos, entenderlos es clave para poder interpretar los datos obtenidos en los experimentos y para el análisis de resultados. En esta parte se van a mencionar algunos de esos términos que están relacionados directamente con el proceso de adsorción y que son necesarios para continuar con el desarrollo del trabajo (Singh, Nagpal, Agrawal, & Rachna, 2018).

**Adsorción.** La adsorción es básicamente cuando una sustancia, ya sea gas o líquido, se queda pegada en la superficie de otro material que puede ser sólido o también líquido. A la sustancia que se adhiere se le llama adsorbato, y al material que la atrapa se le llama adsorbente. Se forma como una capa muy delgadita en esa superficie. Dependiendo de cómo se unan esas sustancias, hay dos tipos de adsorción: una más débil llamada física, y otra más

fuerte que se conoce como química, o también llamadas fisisorción y quimisorción. Según lo explicado por Singh, Nagpal, Agrawal y Rachna (2018), estas diferencias dependen del tipo de interacciones que se dan entre el adsorbente y el adsorbato.

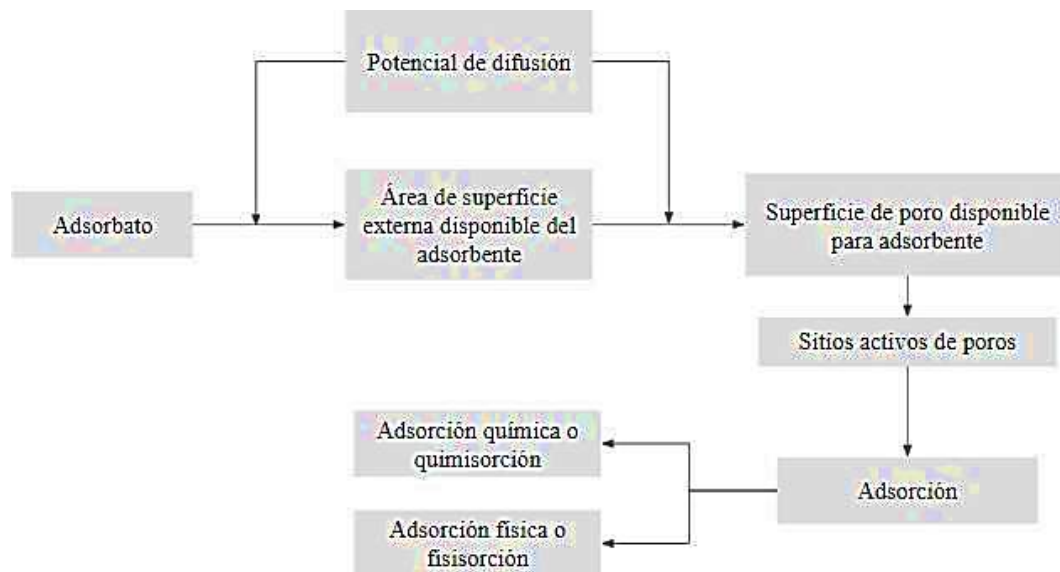
***Adsorbato.*** La sustancia que se queda acumulada o concentrada sobre la superficie del otro material se conoce como adsorbato, ya que es la que está siendo atrapada durante el proceso (Singh, Nagpal, Agrawal, & Rachna, 2018).

***Adsorbente.*** El material en donde ocurre el proceso de adsorción, o sea, donde se pega la sustancia, se llama adsorbente, ya que es el que retiene al adsorbato en su superficie (Singh, Nagpal, Agrawal, & Rachna, 2018).

***Isoterma de Adsorción.*** Cuando se hace un gráfico que indica cuánta cantidad del adsorbato se queda en el adsorbente, dependiendo de la presión (si es gas) o de la concentración (si es una disolución), y todo eso a una misma temperatura, a ese gráfico se le llama isoterma de adsorción (Singh, Nagpal, Agrawal, & Rachna, 2018).

En el tratamiento del agua, las moléculas o iones se eliminan de la fase líquida por adsorción en fase sólida y se ha demostrado como un proceso eficiente de eliminación de contaminantes.

En el tratamiento del agua, los contaminantes como moléculas o iones pueden ser eliminados desde la fase líquida usando un sólido que los atrapa, y se ha comprobado que este método es bastante útil para limpiar el agua. El proceso de adsorción pasa por varios pasos, como se muestra en la Figura 1 (Lata & Samadder, 2016). Además, es importante tener en cuenta las bases fisicoquímicas del proceso, ya que existen tres tipos distintos de adsorción que debemos diferenciar.

*Vías del Proceso de Adsorción.*

En el tratamiento del agua, los contaminantes, ya sean moléculas o iones, pueden ser removidos de la fase líquida a través del proceso de adsorción en un sólido. Este mecanismo ha demostrado ser bastante eficiente para eliminar diversas sustancias dañinas. La Figura 1 muestra cómo se desarrolla este proceso en varias etapas. Primero, el adsorbato se mueve gracias al potencial de difusión, lo que le permite llegar a la superficie externa disponible del adsorbente. Luego, si el adsorbente posee poros abiertos y activos, estos sitios son los responsables de permitir la adsorción. Según las características del contacto entre ambos, este proceso puede ser físico o químico. En ese sentido, existen tres formas principales de adsorción: una es la adsorción por intercambio iónico, donde los iones del adsorbato se concentran en la superficie del adsorbente debido a fuerzas de atracción electrostática; esta es una forma de adsorción de tipo eléctrico. Otra es la fisisorción, que ocurre cuando la molécula se mantiene en la superficie sin estar fijada a un sitio específico y se sostiene por fuerzas de Van der Waals. Finalmente, si se forman enlaces fuertes y localizados en los sitios activos del adsorbente, se trata de quimisorción, una adsorción con naturaleza química que genera una nueva especie química en la

superficie del adsorbente (Tejada, Villabona y Garcés, 2015). Conocer estas diferencias es importante para seleccionar el tipo de material adsorbente más adecuado según el contaminante a tratar.

En la purificación del agua se pueden usar varios tipos de materiales adsorbentes. Según Singh, Nagpal, Agrawal y Rachna (2018), estos se pueden clasificar en varias categorías, como por ejemplo los naturales, los que provienen de biomasa, también están los que vienen de residuos agrícolas e industriales, y por último los sintéticos. Cada uno tiene propiedades distintas y puede servir mejor dependiendo del tipo de contaminante en el agua o del proceso que se quiera usar.

***Isotermas de Adsorción.*** Una isoterma de adsorción es básicamente una gráfica que ayuda a entender cómo una sustancia se queda (o se libera) de un medio acuoso hacia una superficie sólida, manteniendo constantes la temperatura y el pH (Limousin et al., 2007). El equilibrio de este proceso se alcanza cuando el adsorbato ha estado en contacto con el adsorbente durante bastante tiempo. Para construir esta curva, se comparan las concentraciones iniciales del adsorbente con las que quedan después del proceso. Como se verá en la Figura II, existen distintos modelos de isotermas que parten de diferentes suposiciones y teorías (Foo & Hameed, 2010).

**Figura 2**

*Modelo de Isotermas de Adsorción por Foo y Hameed.*

Isotermas	Nonlinear form	Linear form	Plot
		$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ_D} + \frac{C_e}{Q_D}$	$\frac{C_e}{q_e}$ vs $C_e$
		$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q_D} + \frac{1}{bQ_D C_e}$	$\frac{1}{q_e}$ vs $\frac{1}{C_e}$
Langmuir	$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e}$	$q_e = Q_D - \frac{q_e}{b C_e}$	$q_e$ vs $\frac{q_e}{C_e}$
		$\frac{q_e}{C_e} = b Q_D - b q_e$	$\frac{q_e}{C_e}$ vs $q_e$
Freundlich	$q_e = K_f C_e^{1/n}$	$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e$	$\log q_e$ vs $\log C_e$
Dubinin-Radushkevich	$q_e = (q_s) \exp(-k_{ad} \varepsilon^2)$	$\ln q_e = \ln(q_s) - k_{ad} \varepsilon^2$	$\ln q_e$ vs $\varepsilon^2$
Temkin	$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln A_T C_e$	$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln A_T + \frac{RT}{b_T} \ln C_e$	$q_e$ vs $\ln C_e$
Flory-Huggins	$\frac{\mu}{C_e} = K_{FH} (1 - \theta)^{n_H}$	$\log \frac{\mu}{C_e} = \log K_{FH} + n_H \log(1 - \theta)$	$\log \frac{\mu}{C_e}$ vs $\log(1 - \theta)$
Hill	$q_e = \frac{n_H C_e^{n_H}}{K_D + C_e^{n_H}}$	$\log \left( \frac{q_e}{n_H - q_e} \right) = n_H \log(C_e) - \log K_D$	$\log \left( \frac{q_e}{n_H - q_e} \right)$ vs $\log(C_e)$
Redlich-Peterson	$q_e = \frac{K_R C_e}{1 + a_P C_e^P}$	$\ln \left( K_R \frac{C_e}{q_e} - 1 \right) = g \ln(C_e) + \ln(a_P)$	$\ln \left( K_R \frac{C_e}{q_e} - 1 \right)$ vs $\ln(C_e)$
Sips	$q_e = \frac{K_S C_e^{2.5}}{1 + a_S C_e^{2.5}}$	$\beta_S \ln C_e = -\ln \left( \frac{K_S}{q_e} \right) + \ln(a_S)$	$\ln \left( \frac{K_S}{q_e} \right)$ vs $\ln(C_e)$
Toth	$q_e = \frac{K_T C_e}{(a_T + C_e)^{1/T}}$	$\ln \left( \frac{q_e}{K_T} \right) = \ln(C_e) - \frac{1}{T} \ln(a_T + C_e)$	$\ln \left( \frac{q_e}{K_T} \right)$ vs $\ln(C_e)$
Koble-Corrigan	$q_e = \frac{AC^g}{1 + bC^g}$	$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{AC^g} + \frac{b}{A}$	-
Khan	$q_e = \frac{a_1 b_1 C_e}{(1 + b_1 C_e)^{a_1}}$	-	-
Radke-Prausnitz	$q_e = \frac{a_{RP} b_{RP} C_e^{2.5}}{a_{RP} + b_{RP} C_e^{2.5} - 1}$	-	-
Frenkel-Halsey-Hill	$\ln \left( \frac{C_e}{C_s} \right) = -\frac{\alpha}{RT} \left( \frac{a_1}{q_e a} \right)^2$	-	-
MacMillan-Teller	$q_e = q_s \left( \frac{k}{a_1(C_s - C_e)} \right)^{1/3}$	-	-

Fuente: Foo y Hamed (2010)

Existen varios modelos que ayudan a entender cómo ocurre la adsorción, es decir, cómo las sustancias se **adhieren** a la superficie de un material. Cada modelo parte de diferentes suposiciones: algunos consideran que la superficie del adsorbente es uniforme y que todos los sitios tienen la misma capacidad de retención, mientras que otros creen que hay zonas donde se **adhieren** más o menos partículas. En la **Tabla 1** se presentan varios de estos modelos, como los de **Langmuir**, **Freundlich**, **Temkin**, entre otros. Se muestran tanto sus fórmulas no lineales como las formas lineales que se usan para hacer gráficos. Estos modelos permiten comparar los datos obtenidos en el laboratorio y así determinar cuál se ajusta mejor a los resultados experimentales. Como no todos funcionan igual para todos los casos, es importante probar varios de ellos (Foo & Hameed, 2010).

**2.2.2. Bioadsorción**

Según Cabrera (2017), es una de las tecnologías medioambientales más estudiadas e importante para la remoción de metales pesados de aguas residuales, método alternativo no convencional usado en el tratamiento de aguas residuales con alta cantidad de metales pesados, mediante el uso de diferentes biomásas vivas o muertas, residuos orgánicos tanto industriales como agrícolas.

### **2.2.3. Biosorbente**

Taípe et al. (2019) en su trabajo de preparación y caracterización de biosorbente, define que son materiales originarios de microorganismos, bacterias, hongos, algas marinas, plantas u otros polímeros naturales. Los biosorbentes son sólidos que adhieren en su superficie componentes que son sólidos, líquidos y gases, necesitan ser pretratados químicamente para requerir una mejor capacidad de adsorción en el desarrollo de aplicación como remoción de metales pesados o recuperación de especies metálicas en solución.

### **2.2.4. Tipos de Biosorbentes.**

La lista de los diferentes materiales orgánicos que han sido usados como bioadsorbente es muy amplia y diversos estudios realizados muestran uso de componentes que van desde la corteza de árbol hasta residuos de tabaco, Cabrera (2017) afirma:

Los bioadsorbente pueden ser a base de materia viva como bacterias, hongos, algas o a su vez pueden estar constituidas por biomasa muerta como la mayoría que provienen de residuos agrícolas, taninos y materiales con lignina. También se usan adsorbentes no orgánicos como carbón activado, zeolitas, arcillas, gel de sílice, alúmina activada, biopolímeros o resinas sintéticas y diversos derivados de residuos industriales y municipales (p.60).

### **2.2.5. Colorantes**

Cuando hablamos de colorantes, es común confundir los tintes con los pigmentos, ya que ambos tienen la función de dar color. Sin embargo, su comportamiento frente a los materiales es diferente. Por un lado, los tintes tienen la capacidad de adherirse directamente a los materiales gracias a ciertas interacciones físicas o químicas, dependiendo de las características de ambas sustancias. Por otro lado, los pigmentos no se fijan por sí solos, sino que se mantienen sobre la superficie gracias a un componente llamado aglutinante, que los ayuda a quedarse en su lugar (Gürses et al., 2016, citado en Nambela, Haule y Mgani, 2020).

A pesar de sus diferencias, ambos comparten algo en común: tienen estructuras responsables del color. Estas estructuras se conocen como cromóforos, que contienen enlaces dobles conjugados que permiten que los electrones se muevan y así puedan absorber luz visible. Junto a ellos, están los auxocromos, que influyen en la intensidad y el tipo de color que se observa (Christie, 2014).

#### ***2.2.6. Clasificación de Colorantes***

Los colorantes se pueden dividir según su origen en dos grandes grupos: naturales y sintéticos. Actualmente, los colorantes sintéticos dominan el mercado principalmente por su fácil disponibilidad y porque su aplicación es más sencilla (Christie, 2014).

Los colorantes naturales provienen directamente de fuentes naturales y no suelen sufrir modificaciones químicas o procesos complejos. Estos colorantes no solo se emplean en textiles, sino también en alimentos, cosméticos, cuero, plásticos, madera y productos farmacéuticos (Shahid, Shahid-Ul-Islam y Mohammad, 2013). Vankar (2016) indica que la clasificación de estos colorantes puede hacerse según su origen, componentes químicos, método de aplicación o color. Sin embargo, la más utilizada es la que se basa en el origen y en sus componentes químicos (Nambela et al., 2020).

En cuanto a su origen, Vankar (2016) divide los colorantes naturales en cuatro grupos: de plantas o vegetales, de insectos o animales, minerales y microbianos. Por otro lado, Saxena (2014) propone una clasificación basada en la estructura química, agrupando los colorantes en carotenoides, índigoides, óxidos de quinona, flavonoides, taninos, dihidropiranos y betalaínas (Nambela et al., 2020).

En lo que respecta al método de aplicación, los colorantes naturales pueden aplicarse sobre distintos materiales textiles como fibras, hilos, telas o prendas. Sin embargo, estos colorantes generalmente presentan baja afinidad por el sustrato, por lo que se usan mordientes para mejorar la fijación y la solidez del color. Los mordientes forman un complejo insoluble con el colorante y el sustrato, ayudando a que el color se mantenga (Manhita et al., 2011). La revisión bibliográfica realizada por diversos autores señala que el uso de mordientes naturales y sintéticos puede producir distintos tonos. La modificación química de los tintes naturales puede minimizar el cambio de color provocado por el mordiente, mejorando así la afinidad y solidez. Sin embargo, el tipo de mordiente, la tela y el complejo formado pueden afectar el tono final (Tang, Tang y Yang, 2010).

Por otro lado, los colorantes sintéticos para la industria textil se pueden clasificar según su estructura química, su aplicación, el método de aplicación y el tipo de fibra. Según Waring y Hallas (2013), los métodos más comunes de clasificación se basan en la química del colorante y en su aplicación (Nambela et al., 2020).

La clasificación química agrupa los colorantes según sus propiedades y estructuras. Entre los colorantes orgánicos más importantes destacan los azo y carbonilo, además de los nitro, ftalocianina, polimetina, estilbeno, azufre y trifenilmetano (Allen, 2013).

Si la clasificación se basa en el uso o método de aplicación, se agrupan en tintes ácidos, mordientes, premetalizados, directos, reactivos, de tina, dispersos y básicos (Christie, 2014).

Aunque los colorantes sintéticos son más económicos y técnicamente avanzados, tienen desventajas importantes. Su producción depende de materias primas no renovables, no son amigables con el medio ambiente y requieren mucha energía para su fabricación. Además, algunos metabolitos, como los derivados de colorantes azo, son potencialmente cancerígenos (Saxena et al., 2017). Por estas razones, el futuro de los colorantes sintéticos está condicionado a la disponibilidad de recursos fósiles y a la búsqueda de alternativas sostenibles.

#### **2.2.7. Los cítricos**

Según Palacios (2005), los cítricos son arbustos perennes de desarrollo variable que presentan hojas verdes y brillantes durante todo el año, flores aromáticas, troncos robustos y ramas principales bien distribuidas, adoptando generalmente formas esféricas o elípticas; en algunas especies pueden ser ovoides, dependiendo del portainjerto y de factores ecológicos como el suelo y el clima. Esta descripción resalta la importancia de la estructura y adaptación morfológica del árbol. En contraste, Gilman y Watson (publicado por UF/IFAS) describen los cítricos como pequeños árboles o arbustos densos, con copas redondeadas de follaje perenne y flores blancas muy fragantes, enfatizando su uso en paisajismo y el impacto de su porte y densidad foliar en la estética de jardines.

Ambas fuentes coinciden en el carácter perenne y fragante del follaje y flores, pero mientras Palacios enfoca su definición en la morfología influenciada por el portainjerto y las condiciones ecológicas, Gilman y Watson se centran en las características estructurales aplicadas al entorno urbano. Esta combinación de enfoques ofrece una visión completa del

cítrico, que abarca tanto su biología adaptativa como sus aplicaciones prácticas en paisajismo.

### **2.2.8. Descripción Botánica**

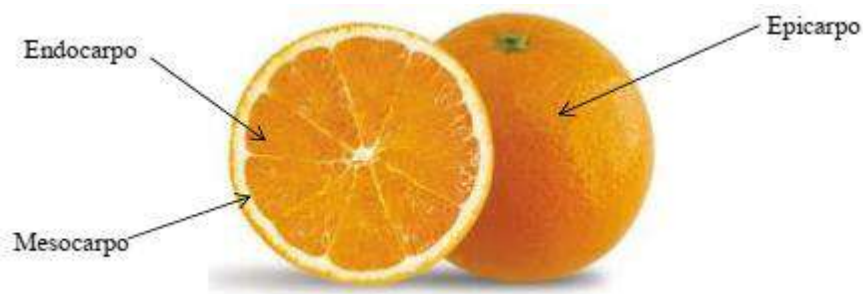
La presente investigación emplea como precursor para la obtención de carbón activado a la variedad Valencia de *Citrus sinensis* L. Obseck, cuya clasificación botánica se detalla de la siguiente manera: pertenece al Reino Plantae, División Magnoliophyta, Orden Geraniales, Familia Rutaceae, Subfamilia Aurantioideae, Género *Citrus* y Especie *Citrus sinensis*. Esta categorización taxonómica sigue la propuesta clásica de Swingle (1946), ampliamente utilizada en estudios relacionados con cítricos y su aprovechamiento industrial.

### **2.2.9. Descripción General de la Especie**

La variedad Valencia de naranja es conocida como "la reina de las naranjas", ya que representa aproximadamente el 60 % del total de los naranjales a nivel mundial (Palacios, 2005). Esta variedad es ampliamente utilizada en la industria alimentaria, especialmente en la producción de jugos, proceso en el cual entre el 23 % y el 40 % del peso de la fruta corresponde a la cáscara, considerada un subproducto o desecho (Marulanda, 2001). La acumulación de este residuo genera problemas ambientales debido a su disposición inadecuada (Cerón, 2011). En la **Figura 3** se ilustran las secciones principales del fruto de la naranja. De acuerdo con Palacios (2005) y Primo (1997), el fruto del naranjo se clasifica como una baya policarpelear y carnosa, compuesta por dos partes claramente diferenciables.

### **Figura 3**

*Partes de una Naranja*



**Fuente:** Infoagro (2012).

El fruto de la naranja presenta una estructura interna bien definida, compuesta por tres partes principales que se pueden observar en la **Figura 1**. La capa más externa se denomina epicarpo o flavedo, y corresponde a la cáscara del fruto. Esta parte es de color anaranjado intenso y contiene numerosas vesículas que almacenan aceites esenciales y compuestos lipídicos. Además, en ella se concentran los carotenoides, pigmentos naturales responsables del color característico de la cáscara, la pulpa y el jugo de la fruta. Estos compuestos aumentan durante el proceso de maduración y tienen propiedades antioxidantes. Debajo del epicarpo se encuentra el mesocarpo, también conocido como albedo. Esta capa es blanca, de textura esponjosa, y está estrechamente unida a la cáscara externa. Está formada principalmente por fibras vegetales como celulosa, hemicelulosa y pectinas, lo que la hace especialmente útil en la industria alimentaria y en procesos de valorización de residuos. Además, contiene importantes cantidades de vitamina C y flavonoides, compuestos que tienen efectos positivos sobre la salud humana. Por último, en el centro del fruto se localiza el endocarpo, que es la parte carnosa y comestible. Esta sección está formada por compartimentos llamados gajos, o técnicamente mericarpos, que almacenan el jugo y, en algunos casos, las semillas.

En estudios sobre la composición del fruto, Izquierdo y Sendra (2003) encontraron que la cáscara de naranja está compuesta por aproximadamente un 10 % de flavedo (parte externa coloreada), un 25 % de albedo (la porción blanca interna), y cerca del 50 % constituido por las vesículas de jugo o pulpa. Esta distribución indica que solo una fracción

de la fruta es necesaria para consumo directo, mientras que el restante—especialmente la piel y el albedo—representan una cantidad significativa de residuos. Dado que el albedo y el flavedo contienen fibras, aceites esenciales y compuestos bioactivos, estos subproductos ofrecen oportunidades para ser reutilizados en procesos industriales, alimentarios o de producción de compuestos funcionales, en lugar de desecharlos.

#### **2.2.10. Distribución de la Naranja**

La temperatura es uno de los factores más importantes que limita el cultivo de la naranja. Según Soler (2006), los cítricos se desarrollan mejor cuando la temperatura está entre los 23 °C y 34 °C, aunque pueden aguantar hasta cerca de 39 °C como máximo y unos 13 °C como mínimo. Si el clima tiene mucha humedad, los frutos suelen tener cáscara más fina, son más jugosos y en general tienen mejor calidad. En cambio, el viento puede hacer bastante daño, desde secar las hojas hasta botar los frutos o frenar su crecimiento. También afecta la calidad que se obtiene al final de la cosecha.

Las heladas son otro problema, pueden dañar parte de los frutos o incluso hacer que se pierda toda la cosecha. El granizo, por su parte, no siempre daña por dentro pero sí deja la fruta con mala apariencia, lo que hace que se pague menos. A pesar de eso, los cítricos no son muy exigentes con el tipo de suelo. En general, pueden crecer en casi cualquier terreno (Soler, 2006).

En cuanto a la producción, la naranja es el cítrico que más se produce en el mundo. En el año 2013, según la Sociedad de Exportadores de Fruta Fresca del hemisferio sur, se produjeron unos 72,5 millones de toneladas. Los países que más producen son China, Brasil y Estados Unidos. Sin embargo, datos más actuales de FAO (2022) muestran que también hay otros países como India o México que vienen aumentando su producción y están ganando lugar en el mercado.

Otras investigaciones como la de González-Molina et al. (2010) indican que los cítricos son más sensibles al frío cuando están floreciendo o cuando el fruto está empezando a crecer, lo que hace que en esas etapas haya que tener más cuidado. Además, aunque el suelo no es un gran problema para este cultivo, sí es importante que tenga buen drenaje y no esté salinizado (Ríos & García, 2014).

### **2.2.11. Propiedades Físico-Químicas de la Naranja**

El análisis químico en seco revela que los carbohidratos solubles y los polisacáridos estructurales, como la celulosa y hemicelulosa, son componentes significativos de la cáscara de naranja. La presencia de pectina, que representa el 42,5 %, destaca como uno de los elementos más abundantes, lo cual es especialmente relevante por su amplia aplicación en la industria alimentaria como agente gelificante. Aunque la lignina es menos representativa (0,84 %), sigue siendo parte importante de la fracción estructural, junto con las fibras. Otros componentes, como proteínas, grasas y cenizas, complementan la composición, lo que embona con el perfil multifuncional de este residuo agroindustrial. Estos datos indican que la cáscara de naranja es un recurso valioso para la obtención de compuestos bioactivos, fibras funcionales y posible producción de biomasa activada.

**Tabla 1**

*Composición aproximada de cáscara de naranja en base seca.*

<b>Componente</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor (%)</b>
Azúcares solubles	% (base seca)	16,9
Almidón	% (base seca)	3,75
Celulosa	% (base seca)	9,21
Hemicelulosas	% (base seca)	10,5
Lignina	% (base seca)	0,84

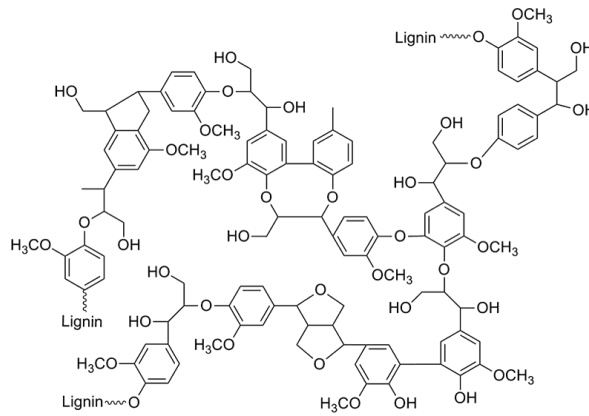
<b>Componente</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor (%)</b>
Pectinas	% (base seca)	42,5
Cenizas	% (base seca)	3,5
Grasas	% (base seca)	1,95
Proteínas	% (base seca)	6,50

**Fuente:** adaptado de Rivas, Torrado y Torre (2008).

La lignocelulosa forma parte integral de la estructura de las paredes celulares en plantas y vegetales, actuando como un componente compacto y resistente. Este tipo de biomasa, por su composición rica en carbono y su carácter renovable, se considera una de las alternativas más prometedoras frente a la creciente demanda de materias primas sostenibles y fuentes de energía limpias (Álvarez et al., 2012). Está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa, lignina y pectinas, todos ellos polisacáridos y polímeros estructurales que otorgan rigidez y funcionalidad a la célula vegetal. En el caso específico de la cáscara de naranja, como se muestra en la **Tabla 1**, destacan especialmente sus contenidos de pectina y lignina, lo que la convierte en una materia prima valiosa para procesos de transformación como la producción de biocombustibles sólidos, adsorbentes o materiales funcionales.

#### **Figura 4**

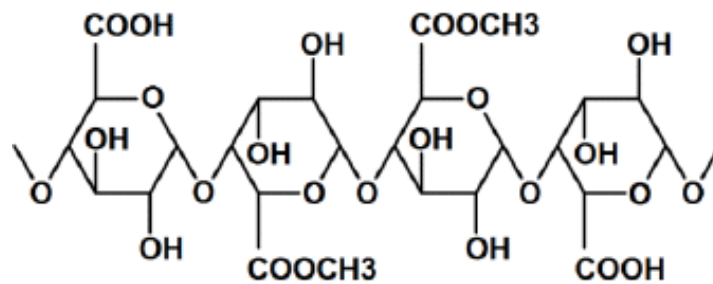
*Estructura Molecular de la Lignina*



**Fuente:** Vanholme, et al. (2010)

**Figura 5**

*Estructura Molecular Básica de la Pectina*



**Fuente:** Zegada (2015)

### 2.2.12. Usos de la Cáscara de Naranja

En la Tabla 2 se pueden observar algunos de los usos de la cáscara de naranja.

**Tabla 2**

*Principales Usos de la Cáscara de Naranja*

Aplicación	Detalle del Proceso	Fuente
Extracción de carotenoides	Se han obtenido altos rendimientos de carotenoides antioxidantes usando solventes como acetona y hexano/acetona (1:1 v/v). La acetona resultó especialmente eficaz, recuperando hasta el 89 % de los pigmentos.	Aravantinos-Zafirris et al. (1992)
Carotenoides con solventes verdes	Con solventes verdes como mezclas hidrofóbicas tipo mentol:eucaliptol y extracción asistida por	Gómez-Urios et al. (2023)

<b>Aplicación</b>	<b>Detalle del Proceso</b>	<b>Fuente</b>
Extracción de pectina	ultrasonido, se lograron extracciones superiores (359 mg/100 g peso fresco). Utilizando ácido bajo (pH ≈ 1–3), temperatura elevada (80–100 °C) y tiempos prolongados (60–120 min), se alcanzan rendimientos de pectina entre 13 % y 30 %, optimizados con metodología RSM.	Fakayode & Abobi (2018)
Pectina con solventes acuosos	La extracción con agua a 95 °C durante 90 min también produjo pectinas, con rendimientos cercanos al 17,9 %; valores similares (20–30 %) se han logrado en otros cítricos.	Mdpi (2020)
Producción ecológica de pectina	Ensayos con ácido y ultrasonido han reportado rendimientos de pectina superiores (hasta 28 %) y muestran que pH y temperatura son variables críticas en la extracción eficiente.	Baonthong (2021)
Extracción ultrarrápida de carotenoides	Se ha optimizado la extracción de carotenoides usando ultrasonido y aceite de oliva como solvente, obteniéndose 1,85 mg por 100 g de cáscara seca con condiciones suaves (42 °C, 35 min).	Savic Gajic (2020)

La cáscara de naranja ha sido ampliamente estudiada por su alto contenido de carotenoides y pectinas, mediante procesos cada vez más sostenibles y eficientes. Aravantinos-Zafiris et al. (1992) demostraron que el uso de acetona, sola o combinada con hexano, permite recuperar hasta un 89 % de los carotenoides presentes en la cáscara, lo que evidencia su alto potencial antioxidante. De forma más reciente, Gómez-Urios et al. (2023) lograron extraer pigmentos en altas concentraciones (359 mg/100 g de peso fresco) empleando solventes verdes como mentol y eucaliptol, junto con ultrasonido. Por su parte, Fakayode y Abobi (2018), así como Mdpi (2020), reportaron que la extracción de pectinas puede optimizarse mediante métodos de superficie de respuesta (RSM) bajo condiciones de pH ácido (1–3), temperatura alta (80–100 °C) y tiempos prolongados, alcanzando rendimientos entre 13 % y 30 %. Alternativamente, el uso de agua caliente (≈95 °C) durante 90 minutos también demostró ser eficaz para obtener pectinas de buena calidad. Otros enfoques sostenibles, como la extracción asistida por ultrasonido, han alcanzado hasta un

28 % de rendimiento, siendo el pH y la temperatura factores clave. Finalmente, Savic Gajic (2020) demostró que la extracción de carotenoides con aceite de oliva y ultrasonido en condiciones suaves (42 °C, 35 min) permite obtener 1,85 mg por cada 100 g de cáscara seca, destacando como un método ecológico con potencial industrial.

### ***2.2.13. Carbón Activado***

El carbón activado es un material de origen carbonoso que ha sido sometido a tratamientos físicos o químicos para desarrollar una estructura porosa altamente desarrollada, lo que se traduce en una gran superficie interna y una notable capacidad de adsorción (Martínez, 2012). Esta superficie está compuesta por una red intrincada de microporos, mesoporos y macroporos, cuyas dimensiones y características físicas permiten atrapar diversas sustancias, tanto orgánicas como inorgánicas.

Una de las particularidades clave del carbón activado es la presencia de numerosos poros, donde se generan fuerzas de Van der Waals intensas debido a la cercanía de las paredes carbonosas. Estas fuerzas son responsables del fenómeno de adsorción que hace tan valioso a este material en procesos de purificación o separación (Marsh, 2006).

El carbón activado está compuesto principalmente de carbono, aunque también puede contener pequeñas proporciones de hidrógeno, oxígeno y otros elementos residuales. Durante su producción, al someter el material precursor a altas temperaturas, se eliminan compuestos volátiles, lo cual incrementa significativamente su porosidad y superficie específica (González, 2004). La compleja estructura porosa que se forma es una de las propiedades más importantes del carbón activado, ya que determina su eficacia en distintas aplicaciones industriales y ambientales.

Según la clasificación propuesta por la IUPAC, los poros presentes en el carbón activado se agrupan en tres categorías principales, las cuales se detallan en la Tabla 3 (Menéndez, 2006).

**Tabla**

**3**

*Tipo de Poro de Acuerdo al tamaño*

<b>Tipo de poro</b>	<b>Tamaño (nm)</b>
Macroporos	Por encima 50
Mesoporos	Entre < 50 – 2 >
Microporos	Inferior < 2

**Fuente:** Adaptado de Menéndez (2006).

Con frecuencia relacionamos que superficies específicas mayores son un indicativo de que el carbón activado tendrá mejores propiedades o características para el proceso de adsorción, obviando el tamaño o geometría de los poros, ya que esto pueden funcionar como un “tamiz molecular” o una especie de filtro siendo de esta forma no accesible para estas moléculas que se quieren remover (Menéndez, 2008).

De acuerdo con Menéndez (2008) cualquier material con alto contenido de carbono puede ser transformado en carbón activado. Sin embargo, desde el punto de vista estructural, estos materiales presentan una geometría molecular desordenada e isotrópica, lo cual es deseable para obtener una buena porosidad. No obstante, cuando el precursor atraviesa un estado fluido o pseudofluido durante la carbonización, este desorden estructural se pierde. Al resolidificarse, las moléculas tienden a reorganizarse en estructuras más ordenadas, lo que reduce significativamente la porosidad del material y, por ende, su capacidad adsorbente. Por esta razón, no se recomienda el uso de carbones coquizables como materia prima para la producción de carbón activado.

Para llevar a cabo este proceso, Bastidas (2009) señala como fundamental el uso de materia prima de calidad con propiedades definidas, como abundancia, dureza, una estructura porosa inherente, alto contenido de carbono, bajo contenido de ceniza y un buen rendimiento en masa durante la carbonización.

Marsh y Rodríguez-Reinoso (2006) indica que los carbones activados suelen producirse a partir de maderas duras, cáscaras de coco, huesos de frutas, carbones minerales y sistemas macromoleculares sintéticos. Por su parte, Prías (2011) afirma que las propiedades intrínsecas del carbón activado dependen directamente del tipo de materia prima utilizada.

En cuanto a los materiales lignocelulósicos, Wan (2004) sostiene que la microestructura del carbón activado derivado de estos precursores está fuertemente influenciada por el contenido de lignina y celulosa. En particular, si se busca obtener un carbón activado con una cantidad significativa de mesoporos y macroporos, es preferible utilizar precursores con alto contenido de lignina. Finalmente, Molina, Rodríguez y Sánchez (2004) describen que una composición típica de materiales lignocelulósicos comprende aproximadamente un 48% de carbono, 6% de hidrógeno, 45% de oxígeno, y un bajo contenido de ceniza.

Además de su estructura física, la química del carbón activado también es muy importante para definir cómo funciona. Menéndez-Díaz y Martín-Gullón (2006) explican que en la superficie del carbón hay diferentes grupos químicos que pueden variar en cantidad y tipo, y esto puede influir bastante en su capacidad para atraer y retener otras sustancias. Dąbrowski et al. (2005) agregan que el pH de la solución donde se usa el carbón también puede cambiar cómo se comportan estos grupos, afectando si el carbón actúa de forma más ácida o más básica y, por lo tanto, su eficiencia en el proceso de adsorción.

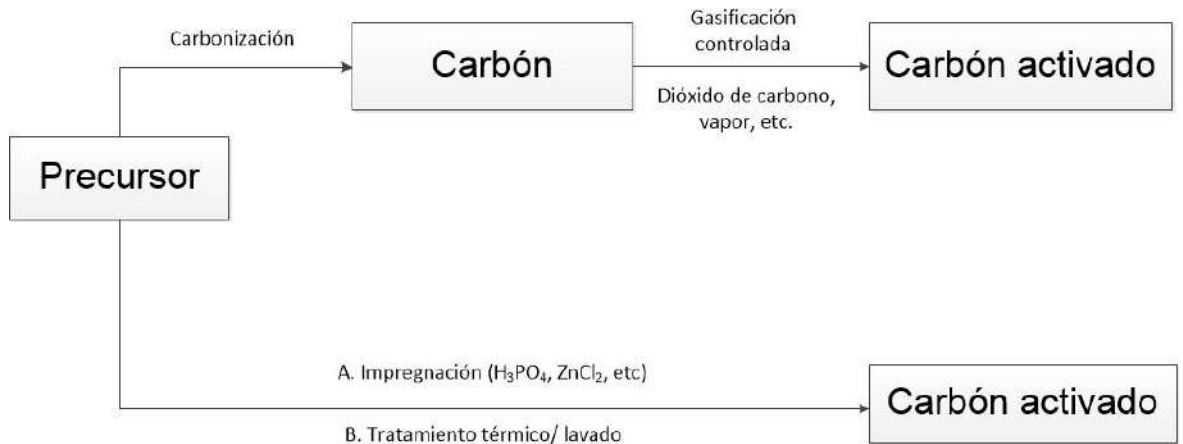
Por otro lado, Marsh y Rodríguez-Reinoso (2006) señalan que, para usar el carbón activado de forma efectiva en la industria, es necesario conocer bien su estructura interna, el tamaño de sus poros, la composición química de su superficie y cómo se comporta durante el proceso de adsorción. Finalmente, Fombuena (2009) describe al carbón activado como un material muy versátil, capaz de atrapar muchos tipos diferentes de sustancias, por lo que se le considera un adsorbente casi “universal”.

#### ***2.2.14. Métodos de Activación***

El comportamiento del carbón activado —tanto su textura como su química en la superficie— depende del tipo de materia prima (precursor) y del método usado para activarlo (Delgadillo, 2011). El proceso de activación, ya sea por medios físicos (como CO<sub>2</sub> o vapor) o químicos (con agentes como KOH, ZnCl<sub>2</sub> o H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), genera la estructura porosa que hace al carbón útil para adsorber sustancias. Variables como el tipo de precursor, el pretratamiento, la temperatura, el agente activador y el tiempo son claves para definir su porosidad, área superficial y química en la superficie (Martínez, 2012)

**Figura 6**

*Flujograma General para la Producción de Carbón Activado*



**Fuente:** Rodríguez-Reinoso (2002).

### 2.2.15. Activación Física

Este método, también llamado activación térmica (Delgadillo, 2011), se realiza en dos etapas. Primero, se hace la carbonización del precursor a unos 800 °C en una atmósfera sin oxígeno para eliminar sustancias volátiles y producir un carbón intermedio, llamado *char* (Dias et al., 2007). En esta fase se elimina hidrógeno y oxígeno y queda un sólido rico en carbono.

Luego se lleva a cabo la activación del char, mediante una gasificación controlada con un oxidante suave como vapor de agua o CO<sub>2</sub>, a temperaturas entre 800 y 1100 °C. Este proceso crea y amplía los poros del material, resultando en un carbón activado muy poroso (Dias et al., 2007).

### 2.2.16. Activación Química:

Hay varios compuestos que se usan para activar el carbón, pero los más comunes a nivel industrial son el cloruro de zinc (ZnCl<sub>2</sub>), el ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) y el hidróxido de

potasio (KOH). En este tipo de activación, la materia prima se somete a temperaturas más bajas (entre 450 y 900 °C) en comparación con la activación física (Dias et al., 2007).

El  $ZnCl_2$  ha caído en desuso debido a los problemas ambientales que genera, principalmente por su toxicidad y el tratamiento de los residuos (Molina-Sabio & Rodríguez-Reinoso, 2004).

El ácido fosfórico se usa frecuentemente para tratar residuos orgánicos. Durante la impregnación, el ácido rompe parcialmente las fibras de celulosa y lignina, provocando una hinchazón del material, lo que facilita la formación de poros, aunque también disminuye su resistencia mecánica. Se suele usar con residuos vegetales como madera, cáscara de coco o huesos de aceituna, y en proporciones ácido:precursor de 1:5, con rendimientos que rondan el 50 % (Molina-Sabio & Rodríguez-Reinoso, 2004).

En cuanto al KOH, este permite obtener lo que se conoce como “carbones superactivados”, con áreas superficiales muy altas, de hasta 3000 m<sup>2</sup>/g. Para esto, se prefieren precursores con poco contenido volátil y alto carbono, como carbones minerales de alto rango o coque de petróleo (Sevilla et al., 2011).

Según Lillo-Ródenas et al. (2004), la activación química tiene varias ventajas frente a la física: se realiza a menor temperatura, en una sola etapa, y da un mayor rendimiento. También permite controlar mejor la microporosidad, reducir el contenido de minerales, y alcanzar áreas superficiales más altas.

Sin embargo, como mencionan Teng y Lin (1998), uno de los inconvenientes es que el proceso es corrosivo y requiere una etapa de lavado posterior para eliminar los restos de los agentes activantes.

### ***2.2.17. Característica Químicas del Carbón Activado***

La idoneidad del carbón activado para su uso en el tratamiento de aguas se evalúa mediante diferentes parámetros. Estos permiten establecer su calidad y desempeño en procesos de adsorción. En el Tabla 5 se presentan los rangos de valores típicos asociados a cada uno de estos parámetros.

**Densidad Aparente.** Este valor representa la densidad del carbón activado completamente seco, medida en gramos por centímetro cúbico. Es un parámetro clave para estimar el volumen de lecho necesario para contener una cantidad determinada de carbón granular. Asimismo, influye en el caudal de agua requerido para realizar un retrolavado adecuado del material filtrante.

**Contenido de Humedad.** El contenido de humedad en el carbón activado indica la cantidad de agua presente en su estructura. A mayor humedad, menor será la proporción de material seco disponible para adsorber compuestos, lo que disminuye la eficiencia operativa del proceso. Sin embargo, según Hassler (1988), la humedad no afecta directamente el poder de adsorción del carbón activado, ya que, una vez seco, conserva sus propiedades adsorbentes. Por lo tanto, aunque un alto contenido de humedad puede representar una menor cantidad de carbón activo efectivo por unidad de masa, no compromete la calidad del material desde el punto de vista funcional.

**Contenido de Material Volátil.** Según la ASTM (1976), el contenido de volátiles en el carbón activado corresponde a la pérdida de peso por liberación de gases durante su calentamiento, excluyendo el vapor de agua. Este valor indica la presencia de compuestos no carbonosos en la muestra.

**Contenido de Ceniza.** Hassler (1988) señala que la cantidad y composición de la ceniza en el carbón activado pueden afectar tanto sus propiedades como su capacidad de adsorción. En el caso específico del tratamiento de agua, destaca que un mayor contenido de

cenizas implica una menor proporción de carbón activado efectivo, reduciendo así su eficiencia en el proceso.

**Contenido de Carbono Fijo.** Según la norma ASTM D-1762, el carbono fijo en el carbón activado no se mide directamente, sino que se calcula restando del total el porcentaje de materiales volátiles y el contenido de cenizas. Este valor representa principalmente carbono, aunque también incluye pequeñas proporciones de otros elementos como azufre, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno. Por su parte, Hassler (1988) destaca que el contenido de carbono fijo está influenciado por el nivel de lignina presente en la materia prima, ya que esta contribuye significativamente a la formación del carbón, además de otros subproductos como alquitranes y gases.

**pH.** Cuando el carbón activado se obtiene mediante activación con ácido fosfórico, es común que contenga restos de fosfatos que, al disolverse en agua, generan compuestos ácidos que disminuyen el pH. Según la Dirección General de Normas del Servicio de Comercio y Fomento Industrial (DGNSCFI, s.f.), si el pH del extracto acuoso del carbón coincide con el del agua que se va a tratar, no habrá alteraciones. En cambio, si difiere, el cambio de pH afectará solo a los primeros volúmenes de agua tratada. Para evitarlo, se puede ajustar el pH mediante la adición de ácidos o bases, o bien lavar el carbón hasta estabilizarlo, aunque este último método puede requerir grandes cantidades de agua).

#### **Tabla 4**

*Principales Parámetros con los que se Especifica un Carbón Activado Granular para el Tratamiento de Agua.*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Rango típico</b>
Área superficial	m <sup>2</sup> /g	500 – 1200
Densidad aparente	g/cm <sup>3</sup>	0,26 – 0,65

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Rango típico</b>
Tamaño efectivo de partícula	mm	0,4 – 3,3
Contenido de cenizas totales	% base seca	3 – 15
pH del extracto acuoso	-	2 – 11
Humedad (al empacar)	%	2 – 15

**Fuente:** Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y Fomento Industria Mexicano. (s.f.)

### **2.2.18. Tipos de Carbón Activado**

Los carbones activados pueden clasificarse según el tamaño de partícula en dos tipos principales: carbón activado en polvo, con un tamaño entre 15 y 25  $\mu\text{m}$ , y carbón activado granular, con un tamaño de entre 1 y 5 mm. Según la ASTM (1976), el carbón activado en polvo se utiliza principalmente en sistemas líquidos, mientras que el tipo granular se aplica tanto en medios líquidos como gaseosos.

**Granular.** Está compuesto por partículas de mayor tamaño que las que pasan por la malla N.º 80. Este tipo de carbón es comúnmente utilizado en procesos de flujo continuo, especialmente en la descontaminación de líquidos.

**En Polvo.** Se caracteriza por partículas más finas que la malla N.º 80. Su uso principal es en sistemas por lotes, también orientados a la depuración de líquidos.

Además, Menéndez (2008) menciona la existencia de otras formas adsorbentes conocidas como carbones activados conformados o de forma específica, dentro de las cuales se incluyen fibras, telas, filtros, estructuras monolíticas, membranas de carbón activado y aglomerados. Estas presentaciones se diseñan para aplicaciones particulares, ofreciendo ventajas específicas en su desempeño como adsorbentes.

### **2.2.19. Aplicaciones del Carbón Activado**

De la producción mundial de carbón activado cerca del 40 % se emplea en la industria alimentaria, química y farmacéutica; otro 40% se utiliza en tratamiento de potabilización y descontaminación de aguas residuales, en combinación con otros procesos físico-químicos o biológicos; aproximadamente un 5% se utiliza como soporte para catalizadores (Auer *et al.*, 1998; Torné, 2006; Rey *et al.*, 2009). El resto de la producción se emplea en sectores como la minería, electrodeposición, almacenamiento de energía, etc. (Concheso *et al.*, 2006).

Martínez (2012) señala las siguientes aplicaciones del carbón activado:

Como adsorbente

Como catalizador

Como soporte catalítico

Según diversos autores, cerca del 40 % de la producción mundial de carbón activado se destina a sectores como el alimentario, químico y farmacéutico. Otro 40 % se emplea principalmente en procesos de potabilización de agua y tratamiento de aguas residuales, ya sea de manera independiente o combinado con otras tecnologías físico-químicas o biológicas (Auer *et al.*, 1998; Torné, 2006; Rey *et al.*, 2009). El porcentaje restante se utiliza en aplicaciones industriales específicas como la minería, procesos de electrodeposición y almacenamiento de energía (Concheso *et al.*, 2006).

Martínez (2012) clasifica los principales usos del carbón activado en tres grandes categorías: como adsorbente, como catalizador y como soporte para catalizadores. En función del medio en el que se aplican, también se distinguen características diferentes. Por ejemplo, los carbones usados para purificar gases suelen tener una estructura altamente microporosa y áreas superficiales mayores a los 1000 m<sup>2</sup>/g, lo que mejora su capacidad de retención. En cambio, los que se emplean para el tratamiento de líquidos requieren una

estructura con un volumen significativo de macroporos, para facilitar el acceso de los compuestos a los poros más finos (Marsh, 2006).

Además, en el caso de aguas residuales con contenidos de materia orgánica (DQO) inferiores a 2 g/L, el uso de carbón activado es especialmente eficiente, siempre y cuando el material pueda ser regenerado y reutilizado, para mantener la viabilidad económica del proceso (Sheintuch et al., 1999).

Otros campos donde se utiliza el carbón activado incluyen la purificación de gases industriales, procesos de descafeinación, extracción y purificación de metales como el oro, tratamiento de residuos, aplicaciones médicas, y como elemento filtrante en sistemas de aire comprimido, mascarillas y respiradores (Roopa, 2016). Marsh (2006) destaca que la diversidad y efectividad de estos productos es el resultado de años de investigación y optimización tecnológica.

### **2.3. Definiciones Conceptuales**

**Adsorción.** Hassler (1988) explica que la adsorción es un fenómeno superficial mediante el cual iones, átomos o moléculas presentes en una fase gaseosa o líquida se adhieren a la superficie de un sólido, siendo un proceso clave en aplicaciones de purificación de agua y gases.

**Biosorción.** Según Volesky (2001), la biosorción hace referencia a la capacidad de ciertas biomasas, vivas o muertas, para captar y remover metales pesados u otros contaminantes desde soluciones acuosas, empleando mecanismos físico-químicos sin requerir energía metabólica.

**Biomasa.** La FAO (2004) define la biomasa como toda materia orgánica proveniente de fuentes vegetales o animales, incluidos residuos agrícolas e industriales,

que puede ser utilizada con fines energéticos o como materia prima para diferentes procesos.

**Efluente.** De acuerdo con Metcalf y Eddy (2003), un efluente es un líquido que ha sido descargado desde una instalación industrial o urbana y que generalmente contiene contaminantes como materia orgánica, sólidos en suspensión o compuestos químicos.

**Isoterma de adsorción.** Foo y Hameed (2010) explican que una isoterma de adsorción es una ecuación que describe el comportamiento de un soluto sobre la superficie de un adsorbente en equilibrio, siendo las más comunes las de tipo Langmuir y Freundlich.

**pH.** Según Skoog et al. (2014), el pH es una medida que indica la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ) en una disolución acuosa, determinando su grado de acidez o basicidad. Se representa en una escala que va de 0 a 14.

**Caudal.** Metcalf y Eddy (2003) definen el caudal como el volumen de fluido que atraviesa una sección determinada en un intervalo de tiempo, expresado normalmente en litros por segundo (L/s) o metros cúbicos por hora ( $m^3/h$ ).

**Carbón activado.** Según Marsh y Rodríguez-Reinoso (2006), el carbón activado es un material microporoso con alta superficie específica, obtenido mediante procesos de activación térmica o química, utilizado como adsorbente en el tratamiento de líquidos y gases.

**Carbonización.** Menéndez Díaz (2008) señala que la carbonización es un proceso térmico donde la materia orgánica se transforma en un sólido carbonoso (char) al ser calentada en atmósfera inerte, eliminando los compuestos volátiles.

**Activación química.** Molina-Sabio y Rodríguez-Reinoso (2004) describen la activación química como un proceso en el que la materia prima se mezcla con agentes

como ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) o hidróxido de potasio (KOH) y se somete a calor para desarrollar porosidad.

**Activación física.** Como explican Dias et al. (2007), la activación física consiste en someter el char a temperaturas entre 800 y 1100 °C en presencia de un gas oxidante suave (vapor de agua o  $CO_2$ ), promoviendo la formación de poros.

**Microporos.** Marsh y Rodríguez-Reinoso (2006) clasifican los microporos como aquellos poros con diámetros menores a 2 nanómetros, que representan la mayor parte de la superficie específica de los carbones activados.

**Mesoporos.** De acuerdo con los mismos autores, los mesoporos tienen diámetros entre 2 y 50 nanómetros, facilitando la entrada de moléculas hacia los microporos, especialmente en medios líquidos.

**Macroporos.** También según Marsh y Rodríguez-Reinoso (2006), los macroporos son estructuras con más de 50 nanómetros de diámetro, que actúan como canales de acceso dentro del material poroso.

**DQO (Demanda Química de Oxígeno).** APHA-AWWA-WEF (2017) definen la DQO como la cantidad de oxígeno requerida para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua mediante un agente químico fuerte, reflejando su carga contaminante.

**Cenizas.** Hassler (1988) indica que las cenizas corresponden al contenido inorgánico que permanece después de la combustión del carbón, afectando negativamente la capacidad adsorbente si están presentes en altos porcentajes.

**Densidad aparente.** La Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (s.f.) establece que la densidad aparente es la relación entre la masa

del carbón activado y el volumen total que ocupa, incluyendo los espacios interparticulares.

## 2.4. Formulación de Hipótesis

### 2.4.1. Hipótesis general

La cáscara de naranja es un buen adsorbente para la remoción de colorantes orgánicos presentes en las aguas residuales.

### 2.4.2. Hipótesis específicas

El proceso de carbonización de las cáscaras de naranja incrementa significativamente la superficie específica y la porosidad del material obtenido, mejorando su capacidad de adsorción de colorantes orgánicos.

Los parámetros operativos, como el tiempo de contacto, la temperatura y el pH, tienen un efecto significativo en la eficiencia de adsorción del adsorbente derivado de cáscaras de naranja.

El adsorbente obtenido de cáscaras de naranja presenta una capacidad de adsorción de colorantes orgánicos que es comparable a la de adsorbentes comerciales, lo que sugiere su viabilidad como alternativa sostenible en procesos de tratamiento de aguas residuales.

## 2.5. Operacionalización de Variables e Indicadores

MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES			
VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADOR	MÉTODO
Y <sub>1</sub> : El porcentaje de remoción de colorantes orgánicos, aplicando la Biosorción con cáscara de naranja "Citruscinensis".	Porcentaje	%	Ensayo experimental en una columna fija con flujo continuo.
VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADOR	
X <sub>1</sub> : Flujo de la solución colorante orgánico en la entrada del proceso de Biosorción	Caudal	L/min	

X <sub>2</sub> : pH del efluente acuoso a la entrada del proceso de Biosorción	pH	Escala numérica( 1 – 14)
X <sub>3</sub> : Tiempo de operación en el proceso de Biosorción	Tiempo	Horas.

## **Capítulo III. Metodología**

### **3.1. Diseño Metodológico**

#### **3.1.1. Enfoque**

El enfoque de esta investigación es cuantitativo, aplicado y tecnológico, ya que se orienta a la recolección y análisis de datos medibles para evaluar la eficiencia del carbón activado obtenido de cáscara de naranja en la adsorción de colorantes orgánicos presentes en efluentes. Se trata de una investigación aplicada, pues busca dar solución a un problema ambiental específico mediante el uso de un material innovador y sostenible. Asimismo, es de carácter tecnológico, dado que implica la transformación de un residuo orgánico en un material funcional con propiedades adsorbentes, contribuyendo al desarrollo de tecnologías verdes.

#### **3.1.2. Tipo de Investigación**

El tipo de investigación de este estudio es aplicada y tecnológica, ya que tiene como objetivo resolver un problema práctico y específico —la eliminación de colorantes orgánicos en efluentes— mediante el aprovechamiento de un residuo orgánico como la cáscara de naranja, transformándolo en un material funcional con propiedades adsorbentes. Se enmarca dentro de la investigación aplicada porque busca generar soluciones concretas a una necesidad ambiental, y se considera tecnológica porque conlleva el desarrollo y optimización de un proceso para obtener un producto útil, sostenible e innovador.

#### **3.1.3. Nivel de Investigación**

El nivel de investigación de este estudio es explicativo, ya que se orienta a analizar y comprender la influencia de variables independientes como la temperatura de calcinación y la dosis de ácido fosfórico como sustancia activadora sobre la remoción de colorantes orgánicos, que constituye la variable dependiente. Este nivel permite establecer relaciones causa-efecto entre los parámetros del proceso de activación química del carbón y su eficiencia como adsorbente, con el fin de optimizar las condiciones de producción del material y contribuir a la solución de un problema ambiental mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos.

## **3.2. Población y Muestra**

### **3.2.1. Población**

La población del estudio está constituida por las soluciones acuosas de azul de metileno preparadas en laboratorio, que simulan la presencia de colorantes orgánicos en efluentes. Estas soluciones representan un modelo controlado para evaluar el comportamiento del carbón activado obtenido a partir de cáscara de naranja bajo distintas condiciones de activación. Aunque el estudio se realiza en Huacho, la población no corresponde a un entorno natural o industrial local, sino a un sistema experimental diseñado para analizar la eficiencia del adsorbente desarrollado.

### **3.2.2. Muestra**

La muestra del estudio está conformada por seis soluciones de azul de metileno preparadas en laboratorio, que serán tratadas con carbón activado obtenido a partir de cáscara de naranja. El diseño experimental considera la combinación de tres temperaturas de calcinación (300 °C, 400 °C y 500 °C) con dos dosis de ácido fosfórico al 33% (1 mL y 2 mL por gramo de biomasa), lo que da lugar a seis tratamientos experimentales. Cada muestra será expuesta a una de estas condiciones para evaluar su efecto sobre la eficiencia

de remoción del azul de metileno, permitiendo así analizar la influencia de las variables independientes sobre la variable dependiente en un entorno controlado.

### **3.3. Recursos Empleados en la Etapa Experimental**

#### **3.3.1. Reactivos Químicos**

Ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) al 33%

Azul de metileno (colorante patrón)

Agua destilada

Alcohol etílico (etanol al 96%)

Solución buffer (para calibración del pH-metro)

Fenolftaleína (indicador para acidez volátil)

Solución de NaOH 0.1 N (para titulaciones de acidez)

Ácido sulfúrico diluido (en caso se requiera para ajustes de pH o limpieza)

Agua Tridestilada

#### **3.3.2. Materia Prima**

Cáscaras de naranja (previamente lavadas y secadas)

#### **3.3.3. Equipos y Materiales**

Estufa de secado (para determinar humedad y secado previo)

Horno mufla (para calcinación y determinación de cenizas)

Balanza analítica (con precisión de 0.001 g)

Procesador o licuadora (para triturar muestras)

Tamices de laboratorio o coladores de cocina (por ejemplo, malla 100)

Vasos de precipitados, erlenmeyers y tubos de ensayo

Probetas y cilindros graduados

Bureta

Agitador magnético o mecánico

Placas Petri

Espectrofotómetro UV-Vis (para medir la concentración de azul de metileno antes y después del tratamiento)

pH-metro

#### **3.3.4. Seguridad y Limpieza**

Guantes de nitrilo

Gafas de seguridad

Mascarilla (en caso de polvo o gases)

Bata de laboratorio

Alcohol y paños para limpieza

### **3.4. Procedimiento Experimental**

#### **3.4.1. Recolección y Preparación de la Materia Prima**

Se comenzó recolectando cáscaras de naranja provenientes de residuos domésticos y de mercado local en Huacho. Estas fueron seleccionadas visualmente para asegurar que estuvieran libres de moho y en buen estado. Las cáscaras se lavaron con agua destilada para eliminar restos de suciedad, azúcares solubles y compuestos no deseados (González et al., 2019).

### **3.4.2. Secado**

Las cáscaras troceadas se colocaron en bandejas de acero inoxidable y se introdujeron en una estufa de secado a 105 °C durante 24 horas, con el objetivo de eliminar la humedad superficial y estructural. Este paso es fundamental para evitar reacciones no deseadas durante la impregnación y carbonización (ASTM D2866-11).

### **3.4.3. Triturado y Tamizado**

Una vez secas, las cáscaras fueron trituradas en una licuadora hasta obtener un polvo grueso. Luego, se tamizó el material con un colador de cocina para asegurar un tamaño de partícula uniforme, lo cual favorece la eficiencia de la activación química y la adsorción posterior (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).

### **3.4.4. Calcinación o Carbonización**

Después del periodo de secado, el material fue transferido un recipiente de acero y se llevó a un horno tipo mufla para su carbonización. Se realizaron tratamientos térmicos a tres temperaturas distintas: 300 °C, 400 °C y 500 °C, durante 2 horas, bajo atmósfera limitada de oxígeno. Este proceso convierte la biomasa en carbón activado, promoviendo la formación de poros y eliminando compuestos volátiles (FAO, 1986).

### **3.4.5. Activación Química**

Se pesaron 25 g del material carbonizado y se colocaron en vasos de precipitados. Luego, se añadió ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) al 33% en proporciones de 1 mL/g y 2 mL/g de cáscara, según el diseño experimental. La mezcla se agitó con varilla de vidrio para una distribución homogénea del ácido y se dejó reposar por 8 horas a temperatura ambiente en condiciones cubiertas. La impregnación química con  $H_3PO_4$  es conocida por promover el desarrollo de mesoporos y aumentar la superficie específica del carbón (Ioannidou & Zabaniotou, 2007).

Terminado el tiempo de reposo se llevó a una estufa a incubar por 90 minutos a una temperatura de 150 °C.

#### **3.4.6. Lavado y Neutralización**

Una vez finalizada la carbonización, el carbón se dejó enfriar a temperatura ambiente. Posteriormente, se lavó con abundante agua destilada hasta que el pH del filtrado fue cercano a 7. Este lavado es esencial para remover el exceso de ácido residual y sales solubles que puedan interferir con la adsorción (Babel & Kurniawan, 2003).

#### **3.4.7. Secado Final**

El carbón lavado fue secado nuevamente en la estufa a 105 °C durante 4 horas para eliminar la humedad residual. Este paso asegura un producto final estable y conservable.

#### **3.4.8. Almacenamiento**

Finalmente, el carbón activado seco fue almacenado en frascos de vidrio herméticos, rotulados con la condición experimental correspondiente (temperatura y dosis de ácido), para su posterior análisis y pruebas de adsorción

### **3.5. Técnicas de Recolección de Datos**

Las técnicas de recolección de datos experimentales empleadas en este estudio incluyeron la observación directa durante el proceso de producción del carbón activado, el registro de variables controladas como temperatura de calcinación y dosis de ácido fosfórico, y la medición instrumental, principalmente a través del uso de un espectrofotómetro UV-Vis para cuantificar la concentración de azul de metileno antes y después del tratamiento. Asimismo, se aplicaron técnicas de análisis gravimétrico para la caracterización de la materia prima (porcentaje de humedad, cenizas y materia volátil), así como mediciones de pH y acidez volátil mediante titulación, con el fin de evaluar las propiedades fisicoquímicas del adsorbente.

### 3.5.1. *Acidez Volátil*

Se pesaron 10 gramos de cáscara de naranja seca y molida, y se mezclaron con 100 mL de una solución hidroalcohólica (alcohol etílico al 96% con agua en partes iguales). Esta mezcla se agitó y dejó reposar para facilitar la extracción de ácidos volátiles. Luego, se filtró y se tomaron 25 mL del extracto, a los cuales se añadieron unas gotas de fenolftaleína. La muestra se tituló con hidróxido de sodio (NaOH 0.1 N) hasta alcanzar un color rosado persistente. El volumen de NaOH utilizado se registró y se empleó para calcular la acidez volátil, expresada en miligramos de ácido acético por 100 gramos de muestra.

#### **Ecuación 1**

*Acidez Volátil de la Cáscara de Naranja*

$$\text{Acidez Volátil} \left( \frac{\text{mg de ácido acético}}{100 \text{ gramos de muestra}} \right) = \frac{V \times N \times 60.05 \times 100}{m}$$

Donde:

- V: volumen de NaOH gastado en la titulación (mL)
- N: normalidad del NaOH (eq/L), usualmente 0.1 N
- 60.05: peso molecular del ácido acético (g/mol)
- m: masa de muestra utilizada (g)

El método descrito se basa en procedimientos adaptados de la **norma AOAC 941.15** (Association of Official Analytical Chemists), que establece técnicas para la determinación de acidez volátil en productos alimentarios y fermentados.

### 3.5.2. *Porcentaje de Humedad*

Para medir el contenido de humedad, se tomó una muestra de cáscara de naranja, la cual fue pesada y colocada en un recipiente apto para calentamiento. Esta se introdujo en una estufa de secado a 105 °C durante un periodo continuo de 24 horas. Una vez transcurrido el tiempo, se dejó enfriar la muestra en un desecador y se volvió a pesar. La pérdida de masa observada entre la muestra inicial y la seca fue utilizada para calcular el porcentaje de humedad presente en la muestra original

## **Ecuación 2**

*Porcentaje de Humedad de la Cáscara de Naranja*

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{P_0 - P_f}{P_0}$$

### **Donde:**

- $P_0$ : peso inicial de la muestra (g)
- $P_f$ : peso después del secado (g)

Este procedimiento fue adaptado del método oficial AOAC 934.01, establecido por la Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2000), comúnmente empleado para estimar la humedad en frutas deshidratadas y materiales vegetales secos.

### **3.5.3. Porcentaje de Cenizas**

Para conocer el contenido de cenizas, se utilizó una porción de cáscara de naranja seca y molida, la cual fue colocada en un crisol previamente tarado. La muestra fue llevada a un horno tipo mufla, donde se sometió a una temperatura constante de 550 °C durante aproximadamente 4 horas, hasta lograr una combustión completa del material orgánico. Una vez finalizado el proceso, el crisol fue retirado con pinzas metálicas y dejado enfriar en un desecador antes de tomar el peso final. La diferencia entre la masa inicial del

material seco y el residuo inorgánico restante permitió calcular el porcentaje de cenizas, lo que representa el contenido mineral no volátil de la muestra.

$$Ceniza(\%) = \frac{P_0 - P_f}{P_0}$$

**Donde:**

- $P_0$ : peso inicial de la muestra (g)
- $P_f$ : peso después de calcinar (g)

Se basa en la técnica descrita en la norma AOAC 942.05, la cual establece el uso de un horno tipo mufla para eliminar la materia orgánica por incineración a temperaturas cercanas a 550 °C. Esta metodología permite cuantificar el contenido mineral no volátil presente en muestras secas, siendo ampliamente utilizada para evaluar residuos sólidos derivados de frutas y vegetales. El método fue ajustado en este estudio para aplicarse a residuos de cáscara de naranja como parte del proceso de caracterización antes de su activación química.

#### **3.5.4. Concentración del Azul de Metileno**

Para determinar la concentración de azul de metileno en las muestras, se elaboró una curva de calibración utilizando soluciones estándar con concentraciones conocidas del colorante. Cada una de estas soluciones fue analizada en un espectrofotómetro UV-Vis, midiendo su absorbancia a una longitud de onda específica, generalmente en torno a los 664 nm, que corresponde al máximo de absorción del azul de metileno. Los datos obtenidos permitieron construir una gráfica de absorbancia frente a concentración, a partir de la cual se obtuvo una ecuación lineal. Esta ecuación se utilizó posteriormente para calcular la concentración de azul de metileno en las soluciones tratadas, comparando sus valores de absorbancia con la curva generada.

### **3.5.5. Porcentaje de Remoción de Azul de Metileno**

Una vez determinadas las concentraciones de azul de metileno antes y después del tratamiento con el adsorbente, se procedió a calcular el porcentaje de remoción del colorante. Este valor se obtuvo aplicando una fórmula sencilla que compara la concentración inicial con la final, permitiendo cuantificar la eficacia del proceso de adsorción. La expresión utilizada fue:

#### **Ecuación 3**

*Porcentaje de Remoción del Carbón Activado Preparado a Partir de Cáscara de Naranja*

$$\text{Remoción}(\%) = \frac{C_0 - C_f}{C_0}$$

donde  $C_0$  representa la concentración inicial del azul de metileno y  $C_f$  la concentración final tras el tratamiento. Este cálculo permitió evaluar el desempeño del carbón activado elaborado a partir de cáscara de naranja bajo diferentes condiciones de activación.

### **3.6. Técnicas para el Procesamiento de la Información**

Para analizar los datos obtenidos durante el experimento, se emplearon herramientas estadísticas y de procesamiento gráfico en los programas Minitab y Excel. En Minitab se realizaron análisis de varianza (ANOVA) para identificar diferencias significativas entre las condiciones experimentales, así como gráficos de interacción y diagramas de dispersión que facilitaron la interpretación de los resultados. Por su parte, Excel se utilizó para organizar las tablas de datos, calcular promedios, desviaciones estándar y generar gráficas comparativas que ayudaron a visualizar el comportamiento del sistema frente a las distintas variables evaluadas, como la temperatura de calcinación y la

dosis del agente activador. Estas técnicas permitieron interpretar de forma clara y objetiva los efectos de los tratamientos aplicados.

### 3.7. Diseño experimental

La temperatura de calcinación y la dosis del ácido activador (ácido fosfórico 33%) como variables independientes, asimismo el porcentaje de remoción del azul de metileno como variable dependiente o respuesta. Los niveles de cada variable o factor se resumen a continuación en la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Variables Independientes*

Variable	Niveles	Código
Temperatura Calcinación (grados centígrados) (A)	300	1
	400	2
	500	3
Dosis de la Sustancia Activadora (mililitros de ácido fosfórico/gramos de carbón) (B)	1	1
	2	2

Se construirá la matriz de diseño experimental en base a un diseño factorial completo multinivel el cual se trabajará en Minitab para el procesamiento de dichos valores medidos y cuantificados en la variable respuesta.

**Tabla 6**

*Resumen del Diseño Factorial Multinivel*

Factores:	2	Réplicas:	3
Corridas base:	6	Total, de corridas:	18
Bloques base:	1	Total, de bloques:	3

\*Número de niveles: 3; 2

**Tabla 7***Tabla Aleatorizada de Diseño Codificada*

<b>Corrida</b>	<b>Blq</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
1	3	3	1
2	3	2	2
3	3	2	1
4	3	3	2
5	3	1	1
6	3	1	2
7	2	2	2
8	2	3	1
9	2	3	2
10	2	2	1
11	2	1	2
12	2	1	1
13	1	2	2
14	1	1	2
15	1	3	2
16	1	1	1
17	1	2	1
18	1	3	1

\*“A” y “B” véase la Tabla 5.

\*Los números en la columna “A” y “B” son los niveles codificados según la Tabla 5.

**Tabla 8***Matriz de Diseño Experimental (Factorial Completo Multinivel)*

<b>Orden Estadístico</b>	<b>Orden de Corrida</b>	<b>Tipo de Punto</b>	<b>Bloques</b>	<b>Temperatura °C</b>	<b>Concentración Ácido mL/g</b>
17	1	1	3	500	1
16	2	1	3	400	2
15	3	1	3	400	1
18	4	1	3	500	2
13	5	1	3	300	1
14	6	1	3	300	2
10	7	1	2	400	2
11	8	1	2	500	1
12	9	1	2	500	2
9	10	1	2	400	1
8	11	1	2	300	2
7	12	1	2	300	1
4	13	1	1	400	2
2	14	1	1	300	2

6	15	1	1	500	2
1	16	1	1	300	1
3	17	1	1	400	1
5	18	1	1	500	1

---

## Capítulo IV. Análisis de Resultados

### 4.1. Caracterización de la Materia Prima (Cáscara de Naranja)

#### 4.1.1. Acidez Volátil

**Tabla 9**

*Acidez Volátil de la Cáscara de Naranja*

<b>Muestra Codificada</b>	<b>Volumen del extracto (mL)</b>	<b>Volumen NaOH 0.1N (mL)</b>	<b>Acidez volátil (g ácido acético / 100g muestra)</b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación Estándar</b>
A01	10	2.9	0.348	0.36	0.012
A02	10	3.1	0.372		
A03	10	3	0.360		

\* Muestra de 10 gramos de cáscara de naranja seca.

#### 4.1.2. Porcentaje de Humedad

**Tabla 10**

*Porcentaje de Humedad de la Cáscara de Naranja*

<b>Muestra Codificada</b>	<b>Masa inicial (g)</b>	<b>Masa post-secada (g)</b>	<b>Pérdida por secado (%)</b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación Estándar</b>
B01	5	4.278	14.44	14.813	0.391
B02	5	4.239	15.22		
B03	5	4.261	14.78		

\*Una vez secada la muestra fue enfriada en un desecador hasta enfriamiento a temperatura ambiental y volverse a pesar.

\*La muestra fue secada en el rango de 100-105°C.

#### 4.1.3. Porcentaje de Cenizas

**Tabla 11**

*Porcentaje de Cenizas de la Cáscara de Naranja*

Código	Masa de muestra (g)	Masa del residuo (g)	% Cenizas calculado	Promedio	Desviación Estándar
C01	5	0.348	6.96%		
C02	5	0.362	7.24%	6.97%	0.26%
C03	5	0.336	6.72%		

## 4.2. Determinación del Porcentaje de Remoción de Azul de Metileno

### 4.2.1. Curva de Calibración de para medir la Concentración de Azul de Metileno

Se preparó como reactivo patrón para construir la curva de calibración Azul de Metileno en disoluciones de 1; 2; 4; 6; 8; 10 mg/L. Estas disoluciones fueron colocadas en una celda óptica de 1cm de paso en el espectrofotómetro de UV-Visible para medir la absorbancia y en base a ella construir la curva que nos permita medir la concentración final de la muestra tratada con el carbón activado obtenido en cada tratamiento y poder determinar el porcentaje de remoción.

Los resultados de dichos ensayos se realizaron 10 veces por cada disolución para poder obtener una curva ajustada y minimizar errores. Esto se visualiza en la Tabla 12.

**Tabla 12**

*Absorbancia de las Muestras Patrón para Medir la Concentración de Azul de Metileno.*

Muestras patrón Concentración (mg/l)	Absorbancia										Promedio
	Ensayos										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0.018	0.026	0.025	0.024	0.022	0.022	0.026	0.020	0.025	0.023	0.0231
2	0.037	0.040	0.040	0.039	0.039	0.045	0.045	0.044	0.041	0.047	0.0417
4	0.080	0.082	0.087	0.080	0.082	0.083	0.075	0.082	0.089	0.084	0.0824
6	0.109	0.110	0.106	0.116	0.115	0.106	0.111	0.107	0.116	0.117	0.1113
8	0.141	0.131	0.125	0.137	0.128	0.124	0.124	0.121	0.133	0.133	0.1297
10	0.146	0.144	0.141	0.143	0.146	0.142	0.136	0.141	0.160	0.158	0.1457

\*Cabe resaltar que el blanco que corresponde al agua destilada utilizada para preparar la disolución utilizada para calibrar el instrumento se ajusta a cero.

\*Se midió la absorbancia de las muestras a una longitud de onda de 660nm.

**Tabla 13**

*Resumen del Modelo de Regresión Lineal de la Curva de Calibración de Azul de Metileno.*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)
0.0103665	96.15%	96.09%

**Tabla 14**

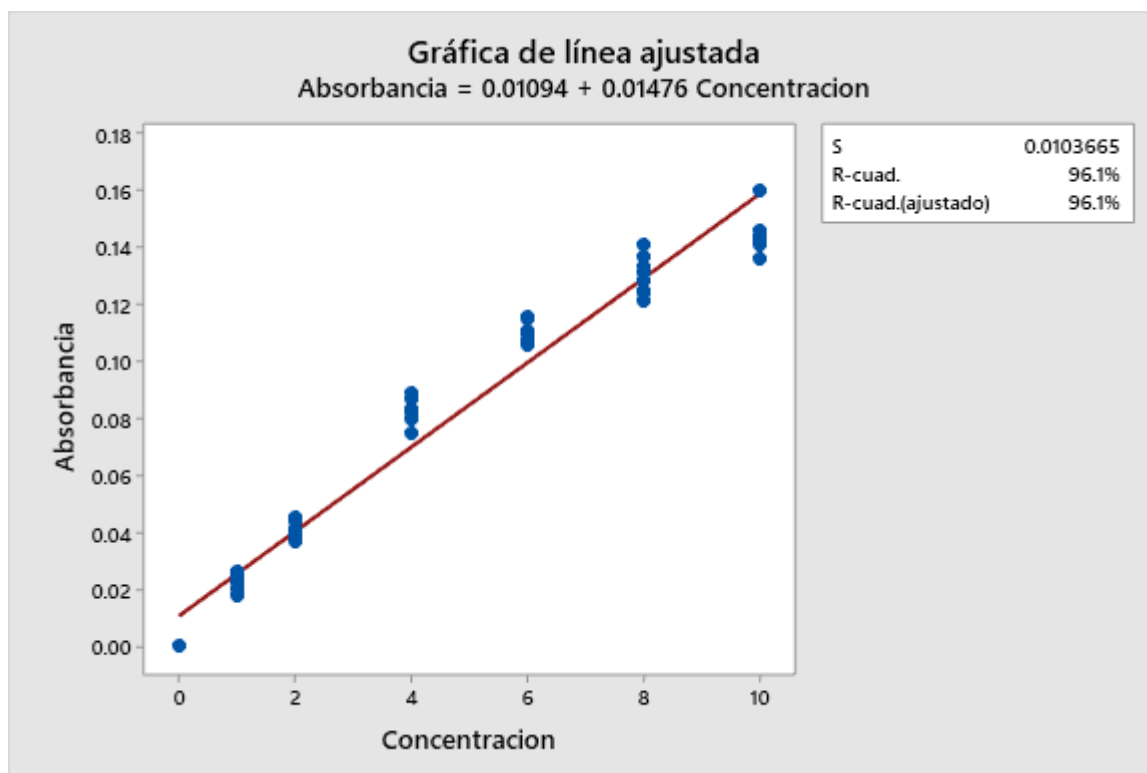
*Análisis de Varianza para el Modelo de Regresión Lineal de la Curva de Calibración de Azul de Metileno.*

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	1	0.182371	0.182371	1697.05	0.000
Error	68	0.007308	0.000107		
Total	69	0.189679			

**Figura 7**

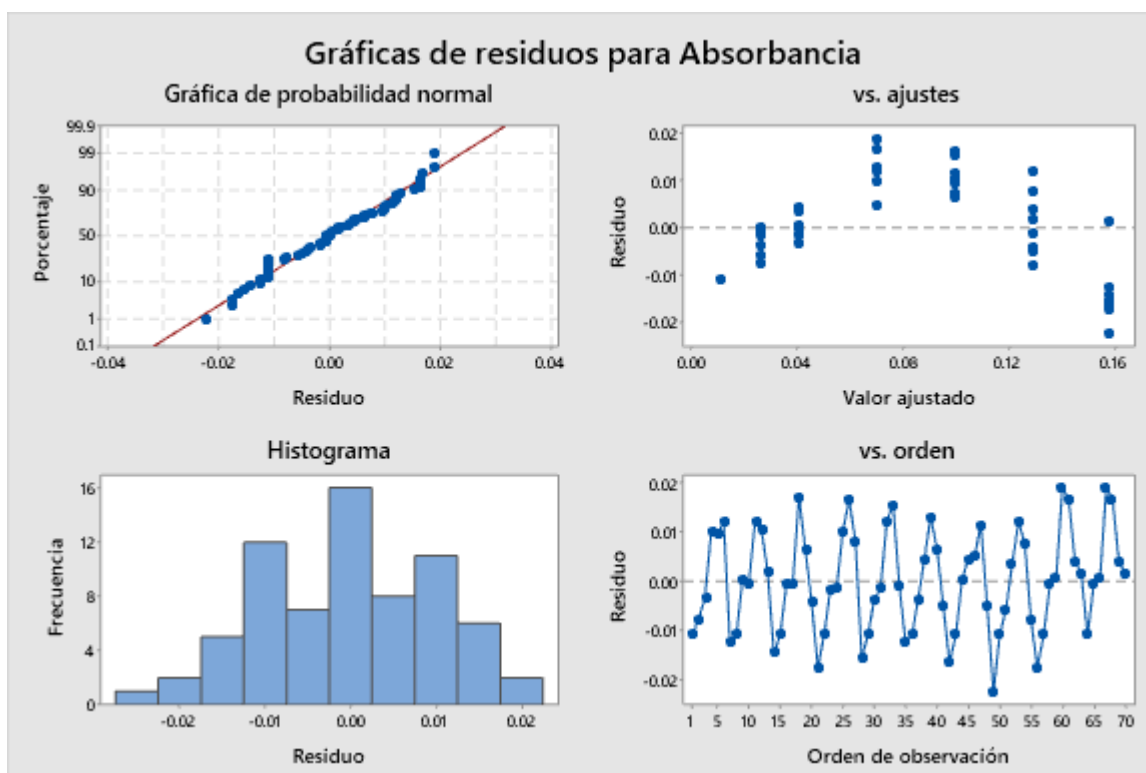
*Modelo de Regresión Lineal de la Curva de Calibración de Azul de Metileno*

*(Concentración vs Absorbancia)*



**Figura 8**

*Gráfica de Residuos para el Modelo de Regresión Lineal de la Curva de Calibración de Azul de Metileno*



#### **4.2.2. Determinación de la Concentración de Azul de Metileno en cada Tratamiento con las Muestras de Carbón Activado.**

Se utilizó como muestra inicial 50ml de una disolución de carbón activado de 10 mg/Litro. A cada una se le adicionó 0,1 gramo de carbón obtenido mediante los diferentes tratamientos. Luego se sometió a agitación constante durante aproximadamente 30 minutos en el agitador magnético, e incubo durante 24 horas en un lugar seco a temperatura ambiente. Luego de ello la muestra se filtró y el líquido se le midió la absorbancia, las cuales se reemplazarán en la ecuación de la curva de calibración para obtener la concentración, estos datos fueron recopilados en la Tabla 15.

#### Ecuación 4

*Ecuación de la Curva de Calibración del Azul de Metileno*

$$\text{Absorbancia} = 0.01094 + 0.01476\text{Concentración}$$

**Tabla 15**

*Absorbancia de las Muestras Tratadas con el Carbón Activado Obtenido con los Diferentes Ensayos.*

Orden Estadístico	Orden de Corrida	Temperatura °C	Concentración Ácido mL/g	Absorbancia	Concentración del Azul de Metileno (g/mL)
17	1	500	1	0.031	86.41
16	2	400	2	0.042	78.96
15	3	400	1	0.051	72.86
18	4	500	2	0.026	89.80
13	5	300	1	0.062	65.41
14	6	300	2	0.052	72.18
10	7	400	2	0.037	82.34
11	8	500	1	0.030	87.09
12	9	500	2	0.030	87.09
9	10	400	1	0.055	70.15
8	11	300	2	0.049	74.21
7	12	300	1	0.075	56.60
4	13	400	2	0.039	80.99
2	14	300	2	0.053	71.50
6	15	500	2	0.029	87.76
1	16	300	1	0.071	59.31
3	17	400	1	0.052	72.18
5	18	500	1	0.035	83.70

**Tabla 16**

*Resumen del Modelo Factorial Multinivel*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
2.35021	96.70%	94.39%	89.31%

**Tabla 17**

*Análisis de Varianza del Modelo Factorial Multinivel*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	1618.56	231.224	41.86	0.000
Bloques	2	9.64	4.820	0.87	0.447
Lineal	3	1535.33	511.777	92.65	0.000
Temperatura °C	2	1254.18	627.092	113.53	0.000
Concentración Ácido mL/g	1	281.15	281.147	50.90	0.000
Interacciones de 2 términos	2	73.60	36.798	6.66	0.014
Temperatura °C*Concentración Ácido mL/g	2	73.60	36.798	6.66	0.014
Error	10	55.23	5.523		
Total	17	1673.80			

**Ecuación 5**

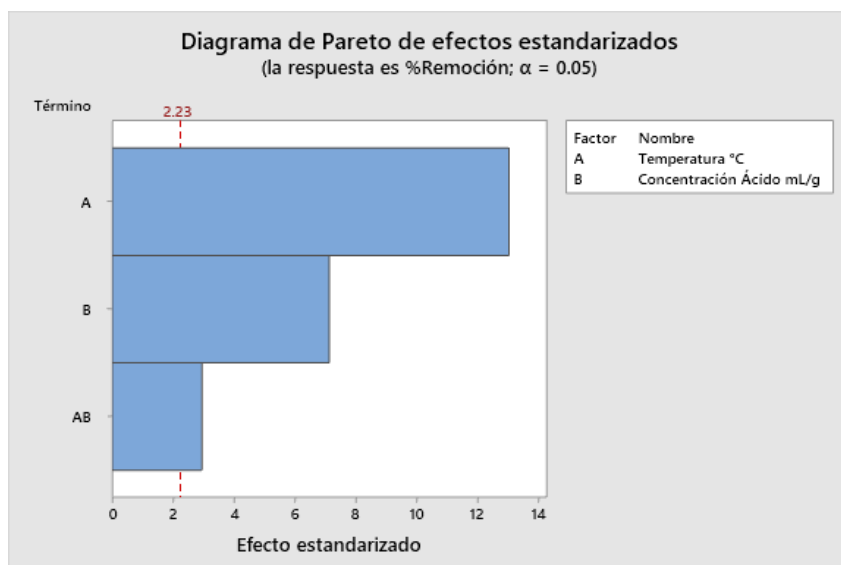
*Ecuación de la Curva de Calibración del Azul de Metileno*

$$\%R = -5,28 + 27,33 \times A + 0,1750 \times T - 0,0486 \times A \times T$$

Donde %R es el porcentaje de remoción del azul de metileno, A es la dosis del ácido activador (ácido fosfórico al 33%) en mL/gramo de carbón, y T es la temperatura de calcinación del carbón activado.

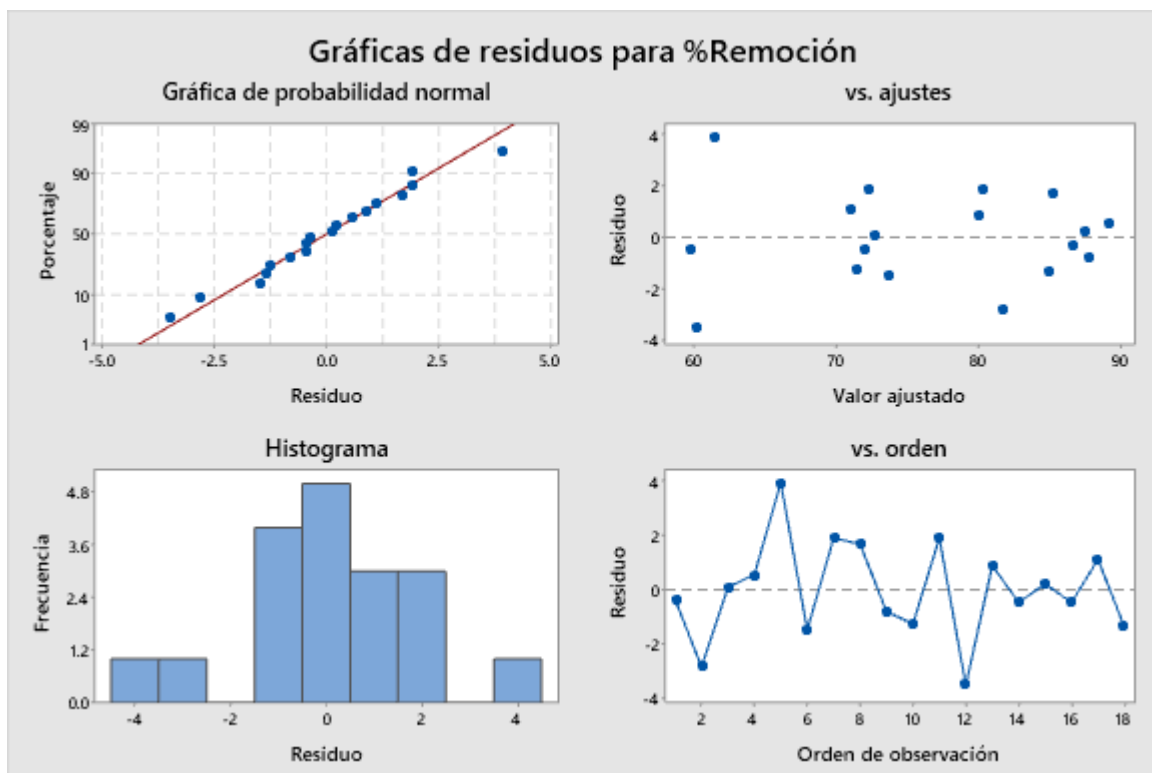
**Figura 9**

*Diagrama de Efectos Estándar (Pareto) para el Modelo de Regresión Factorial Multinivel*



**Figura 10**

*Gráficas de residuos para el Modelo de Regresión Factorial Multinivel*



## Capítulo V. Discusión de Resultados

### 5.1. Materia Prima (Cáscara de Naranja Seca)

#### 5.1.1. *Análisis de Acidez Volátil*

La acidez volátil promedio obtenida fue de 0.36 g de ácido acético por 100 g de muestra seca, con una desviación estándar baja (0.012), lo que refleja buena uniformidad entre las réplicas. Este parámetro indica la presencia de compuestos orgánicos volátiles y ácidos, principalmente derivados de la descomposición de componentes naturales como polisacáridos y aceites esenciales. Aunque no se considera crítico en la etapa final de activación, la acidez puede influir en la formación de poros y la generación de gases durante la carbonización, lo que favorece la creación de una red porosa eficiente para la adsorción.

#### 5.1.2. *Análisis del Porcentaje de Humedad*

El contenido de humedad promedio fue de 14.81%, con una desviación estándar de 0.391%. Este nivel de humedad es moderado y debe ser reducido significativamente antes del proceso de carbonización, ya que un exceso de agua puede interferir con la eficiencia térmica, consumir energía adicional y afectar la estructura porosa del carbón activado. Un secado previo adecuado (idealmente por debajo del 10%) es clave para asegurar una carbonización controlada y eficiente, favoreciendo la formación de microporos y evitando colapsos estructurales.

#### 5.1.3. *Análisis del Porcentaje de Cenizas*

El contenido de cenizas de 6.97% indica una presencia moderada de minerales inorgánicos no combustibles. Para la producción de carbón activado, este valor es aceptable, aunque una cantidad elevada puede obstruir los poros y disminuir la capacidad de adsorción. Las cenizas también afectan la pureza del carbón y podrían limitar su

aplicación en procesos que requieran altos niveles de adsorción (por ejemplo, en grado alimentario o farmacéutico). Si se requiere un carbón activado de alta calidad, puede ser necesario implementar etapas de pretratamiento o lavado ácido para reducir el contenido inorgánico.

## **5.2. Curva de Calibración para Medición de la Concentración de Azul de Metileno**

### **5.2.1. Evaluación de la Curva de Calibración**

Se construyó una curva de calibración relacionando la absorbancia con la concentración de azul de metileno en mg/L. La ecuación obtenida del modelo de regresión lineal es:

$$\text{Absorbancia} = 0.01094 + 0.01476 \times \text{Concentración}$$

Este modelo presenta un coeficiente de determinación  $R^2=96.1\%$ , lo cual indica que el 96.1% de la variación en los valores de absorbancia se explica por los cambios en la concentración. Este alto valor de  $R^2$  confirma que la relación es fuertemente lineal y que la regresión es adecuada para propósitos analíticos.

El análisis de varianza (ANOVA) muestra un valor  $F = 1697.05$  con un valor de  $p < 0.001$ , lo que confirma que la pendiente de la recta es significativamente diferente de cero y que el modelo es estadísticamente significativo.

### **5.2.2. Evaluación de los Residuos**

Las gráficas de residuos permiten verificar si el modelo de regresión cumple con los supuestos estadísticos esenciales. En la gráfica de probabilidad normal, los puntos se distribuyen cerca de la línea recta, lo que indica una aproximación a la normalidad en los residuos. El histograma muestra una forma casi simétrica centrada en cero, lo que refuerza esta observación. Al comparar los residuos con los valores ajustados, no se identifica una

tendencia definida, aunque hay cierta dispersión en los extremos, lo cual podría reflejar una ligera variación en la varianza de los errores. Por último, el gráfico de residuos en función del orden de observación no muestra patrones repetitivos, lo que sugiere que las observaciones son independientes entre sí.

### **5.3. Diseño Factorial Multinivel**

#### **5.3.1. Resumen del Modelo del Modelo Factorial Multinivel**

El estudio del modelo factorial multinivel aplicado a la remoción de azul de metileno con carbón activado elaborado a partir de cáscara de naranja evidencia que tanto la temperatura de activación como la cantidad de ácido fosfórico utilizado influyen notablemente en la eficiencia del proceso. Según la información de la Tabla 16, el modelo muestra una alta capacidad explicativa, con un  $R^2$  del 96.7%, mientras que los valores ajustados (94.39%) y predictivo (89.31%) indican que el modelo es confiable para analizar y prever comportamientos bajo diferentes condiciones experimentales.

#### **5.3.2. Análisis de Varianza del Modelo Factorial Multinivel**

De acuerdo con los resultados de la Tabla 17, la temperatura es el factor más determinante ( $p < 0.001$ ), aunque la concentración del ácido también presenta un impacto considerable y estadísticamente significativo ( $p < 0.001$ ). La interacción entre ambos factores también resulta ser relevante ( $p = 0.014$ ), lo que implica que el efecto de uno de ellos depende directamente del nivel del otro. Esto señala que la eficacia del proceso no puede ser optimizada modificando un único parámetro, sino que requiere una evaluación conjunta de ambos para obtener mejores resultados.

#### **5.3.3. Ecuación de Regresión Empírica del Modelo Factorial Multinivel**

La Ecuación 5, que representa el comportamiento del sistema, describe la remoción del azul de metileno como una función lineal de la dosis del ácido activador (A), la

temperatura de activación (T) y la interacción entre ambos. La constante negativa (-5.28) refleja que, sin la influencia combinada de estas variables, el proceso no es eficaz. El término positivo asociado a A (27.33) indica que un mayor volumen de ácido incrementa la remoción, mientras que el coeficiente positivo de T (0.1750) sugiere que una temperatura más alta también favorece el desempeño. No obstante, el término negativo de la interacción A\*T (-0.0486) sugiere que, a niveles altos de ambos factores, el beneficio puede verse reducido, posiblemente por efectos no lineales o limitaciones estructurales del material.

#### **5.3.4. *Análisis de Residuos del Modelo Factorial Multinivel***

Las representaciones gráficas de los residuos permiten verificar que el modelo estadístico cumple con los supuestos fundamentales de regresión. En la gráfica de probabilidad normal, los puntos siguen una trayectoria cercana a la línea recta, lo cual indica que los residuos tienen una distribución aproximadamente normal. La gráfica de residuos frente a los valores ajustados no muestra una estructura definida, lo que sugiere que la varianza de los errores es constante. Asimismo, el histograma revela una forma simétrica centrada en cero, lo que refuerza la suposición de normalidad. Por último, el gráfico de residuos en función del orden de observación no evidencia ningún patrón o secuencia, lo que señala que los errores son independientes entre sí. Estos hallazgos respaldan la adecuación del modelo utilizado.

## Capítulo VI. Conclusiones y Recomendaciones

### 6.1. Conclusiones

Los hallazgos obtenidos respaldan la viabilidad del uso de la cáscara de naranja como materia prima para la elaboración de carbón activado. De acuerdo con la Tabla 9, el valor promedio de acidez volátil fue de 0.36 g de ácido acético por cada 100 g de muestra seca, con una baja desviación estándar ( $\pm 0.012$ ), lo cual evidencia una composición química consistente que puede favorecer la introducción de grupos funcionales útiles para la adsorción. La Tabla 10 indica que el contenido de humedad fue de 14.81%, lo que implica la necesidad de aplicar un proceso de secado previo a la activación térmica, a fin de asegurar una estructura porosa efectiva. Asimismo, el contenido medio de cenizas reportado en la Tabla 11 fue de 6.97%, valor aceptable para aplicaciones de tratamiento de aguas, ya que no compromete gravemente la capacidad adsorbente del material.

En cuanto a la eficiencia del carbón activado producido, los datos experimentales revelan una notable capacidad de remoción del azul de metileno, alcanzando hasta un 89.80% bajo condiciones óptimas de activación (temperatura de 500 °C y una dosis de 2 mL/g de ácido fosfórico). Estos resultados se encuentran respaldados por los modelos estadísticos, los cuales mostraron altos niveles de ajuste, con un coeficiente de determinación superior al 96%, confirmando que las variables de proceso (temperatura y concentración del activador) influyen significativamente en el rendimiento.

Los resultados demuestran que la cáscara de naranja tiene un gran potencial como precursor para la producción de carbón activado, gracias a sus propiedades fisicoquímicas y a su capacidad para remover contaminantes de soluciones acuosas. El adecuado control de parámetros como la temperatura de activación y la concentración del ácido activador

permite obtener un material con un comportamiento adsorbente competitivo, sostenible y aprovechable a partir de un residuo agroindustrial.

## **6.2.Recomendaciones**

Incorporar un proceso de secado eficiente antes de la activación, para evitar interferencias en la formación de la estructura porosa.

Ampliar los estudios hacia otros tipos de contaminantes, como metales pesados o pesticidas, para explorar la versatilidad del material.

Realizar pruebas a escala piloto, con el fin de evaluar la viabilidad operativa del proceso en condiciones más cercanas a un entorno industrial.

Investigar la posibilidad de regenerar y reutilizar el carbón activado, lo cual permitiría aumentar la sostenibilidad del proceso.

Explorar otras condiciones de activación química, como diferentes concentraciones o tipos de agentes activadores, que podrían mejorar aún más el rendimiento y reducir costos de producción.

Estos resultados refuerzan el valor de aprovechar residuos orgánicos como recursos útiles para tecnologías ambientales, promoviendo una economía circular en el tratamiento de aguas.

## Referencias

Babel, S., & Kurniawan, T. A. (2003). Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 97(1–3), 219–243. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00263-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00263-7)

Cabrera, M. (2017). *Evaluación del uso de biosorbentes para la remoción de metales pesados en aguas residuales* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia].

Christie, R. M. (2014). *Colour chemistry*. Royal Society of Chemistry.

FAO. (1986). *Simple technologies for charcoal making* (FAO Forestry Paper No. 41). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>

Ioannidou, O., & Zabaniotou, A. (2007). Agricultural residues as precursors for activated carbon production—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1966–2005. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.013>

Limousin, G., Gaudet, J. P., Charlet, L., Szenknect, S., Barthès, V., & Krimissa, M. (2007). Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement. *Applied Geochemistry*, 22(2), 249–275. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.09.010>

Lucín García, A. S., & Ramírez Mendez, M. D. (2021). *Evaluación bioadsorbente de cáscaras de naranja (Citrus sinensis) y mandarina (Citrus reticulata) en aguas estuarinas con presencia de cadmio y plomo* [Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil].

Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated carbon*. Elsevier.

Palomino Falconi, M. C. (2023). *Bioadsorción del colorante textil azul de metileno mediante la utilización de cáscaras de limón* [Tesis de licenciatura, Universidad ESAN].

Ruiz Menendez, A. P. (2018). *Obtención de carbón activado a partir de cáscara de naranja (Citrus sinensis L. Obseck) y su aplicación como adsorbente de plomo (II) en disolución acuosa* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina].

Singh, N. B., Nagpal, G., Agrawal, S., & Rachna. (2018). Water purification by using adsorbents: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 11, 187–240. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.05.006>

Taibe, M., Mendoza, G., & Zapana, M. (2019). *Preparación y caracterización de biosorbentes derivados de biomasa para remoción de metales pesados* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín].

Vásquez Valenzuela, J. D. (2023). *Obtención de carbón activado a partir de cáscara de naranja agria (Citrus × aurantium) y su aplicación como adsorbente de cobre (II) en aguas residuales* [Tesis de licenciatura, Universidad de Sonora].

## Anexos

### Anexo 1

*Secado de la Cáscara de Naranja*



### Anexo 2

*Molienda y Tamizado de la Cáscara de Naranja Seca*





### Anexo 3

*Calcinación de la Cáscara de Naranja en Polvo.*





**Anexo 4**

*Activación Química del Carbón*





## Anexo 5

*Lavado, Filtrado y Secado del Carbón Activado.*

