



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**OBTENCIÓN DE BIOCARBÓN MAGNÉTICO IMPREGNADO  
CON NANOPARTÍCULAS DE HIERRO A PARTIR DE RESIDUOS  
ORGÁNICOS DE TOCTE (*Juglans neotropica*) Y AGUACATE  
(*Persea americana*)**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA QUÍMICA**

**AUTOR:**

**CUENCA PÉREZ DANIELA ESTEFANÍA**

Riobamba - Ecuador

2024



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**OBTENCIÓN DE BIOCARBÓN MAGNÉTICO IMPREGNADO  
CON NANOPARTÍCULAS DE HIERRO A PARTIR DE RESIDUOS  
ORGÁNICOS DE TOCTE (*Juglans neotropica*) Y AGUACATE  
(*Persea americana*)**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA QUÍMICA**

**AUTOR: CUENCA PÉREZ DANIELA ESTEFANÍA**

**DIRECTOR: ING. MAYRA PAOLA ZAMBRANO VINUEZA**

Riobamba - Ecuador

2024

© 2024, Cuenca Pérez Daniela Estefanía

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Cuenca Pérez Daniela Estefanía, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 25 de febrero de 2024

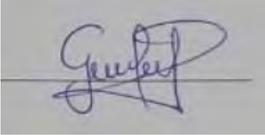
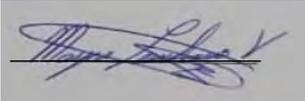
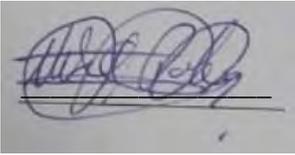


.....  
**Cuenca Pérez Daniela Estefanía**

**C.I. 060489959-1**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **OBTENCIÓN DE BIOCARBÓN MAGNÉTICO IMPREGNADO CON NANOPARTÍCULAS DE HIERRO A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE TOCTE (*Juglans neotropica*) Y AGUACATE (*Persea americana*)**, realizado por la señorita: **CUENCA PÉREZ DANIELA ESTEFANÍA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Gabriela Viviana Tubon Usca, PhD. <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2024-04-16
Ing. Mayra Paola Zambrano Vinueza <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2024-04-16
Ing. Mabel Mariela Parada Rivera <b>ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2024-04-16

## **DEDICATORIA**

A Dios y la Virgen Dolorosa, fuentes inagotables de sabiduría y guía, agradezco por iluminar mi camino y darme la fortaleza necesaria para culminar este arduo pero gratificante proceso académico. A mi amada familia, pilar fundamental en mi vida, les dedico este logro, agradeciendo su inquebrantable apoyo, amor y comprensión que han sido mi impulso constante. A todos aquellos que, con su valiosa contribución, han dejado una huella en mi formación académica y personal.

Daniela

## AGRADECIMIENTO

Con sincero agradecimiento, reconozco a Dios y a la Virgen Dolorosa por ser la guía constante que ha iluminado cada paso de mi trayectoria académica y personal. A mi familia, mi apoyo incondicional y pilar fundamental, les expreso mi más profundo agradecimiento por su amor y presencia constante en cada fase de este desafiante viaje. Expreso mi gratitud a los docentes que, con su sabiduría y dedicación, no solo me formaron como profesional, sino también como un ser comprometido con el aporte a la sociedad. Su influencia ha dejado una marca imborrable en mi desarrollo. Mi reconocimiento especial y agradecimiento se dirigen a mi asesora, al Ingeniero Paúl Palmay y a la Ingeniera Gabriela Tubon, cuya guía constante, disposición para ayudarme en todo momento y sabios consejos fueron esenciales para la culminación exitosa de este proyecto; su liderazgo y acompañamiento han sido fundamentales para alcanzar este logro. También, quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ingeniero Diego Guerrero, cuyo apoyo constante, sabios consejos y profundo conocimiento han sido fundamentales en el desarrollo de este estudio. Aprecio enormemente el tiempo y la paciencia que dedicó para brindarme orientación, lo cual ha sido de un valor incalculable para mí. No puedo pasar por alto expresar mi gratitud a los técnicos de laboratorio e investigación, cuyos valiosos consejos contribuyeron de manera significativa a mi formación. Finalmente, a la Escuela Politécnica de Chimborazo, agradezco por brindarme una educación de calidad que ha sido la base de mi crecimiento académico y personal.

Daniela

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xiv
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1

### CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Limitaciones.....	3
1.3. Delimitaciones.....	3
1.4. Problema general de investigación.....	3
1.5. Problemas específicos de investigación.....	3
1.6. Objetivos.....	4
1.6.1. <i>Objetivo general</i> .....	4
1.6.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	4
1.7. Justificación.....	4
1.8. Hipótesis general.....	5
1.9. Hipótesis específicas.....	5

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes de investigación.....	6
2.2. Referencias Teóricas.....	8
2.2.1. <i>Residuos Orgánicos</i> .....	8
2.2.1.1. <i>Aguacate</i> .....	8
2.2.1.2. <i>Tocte</i> .....	9

<b>2.2.2. Biocarbón</b> .....	<b>10</b>
<b>2.2.3. Pirólisis</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2.4. Nanomateriales</b> .....	<b>12</b>
2.2.4.1. <i>Tipos de nanomateriales</i> .....	12
<b>2.2.5. Nanopartículas</b> .....	<b>13</b>
2.2.5.1. <i>Síntesis de nanopartículas</i> .....	14
2.2.5.2. <i>Aplicaciones de la nanotecnología</i> .....	14
2.2.5.3. <i>Nanopartículas de hierro</i> .....	15
<b>2.2.6. Mercurio</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2.7. Adsorción</b> .....	<b>16</b>
2.2.7.1. <i>Tipos de adsorción</i> .....	16
2.2.7.2. <i>Variables que afectan la adsorción</i> .....	17
<b>2.2.8. Pruebas de caracterización</b> .....	<b>17</b>
2.2.8.1. <i>Microscopía electrónica de barrido (SEM)</i> .....	17
2.2.8.2. <i>Espectroscopía de infrarrojo (IR)</i> .....	18
2.2.8.3. <i>Espectroscopía de absorción atómica</i> .....	19

### **CAPÍTULO III**

<b>3. MARCO METODOLÓGICO</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1. Enfoque de investigación</b> .....	<b>20</b>
<b>3.2. Nivel de investigación</b> .....	<b>20</b>
<b>3.3. Diseño de investigación</b> .....	<b>20</b>
3.3.1. <i>Identificación de variables</i> .....	20
3.3.1.1. <i>Variables Independientes</i> .....	21
3.3.1.2. <i>Variables Dependientes</i> .....	21
3.3.2. <i>Diseño experimental de la investigación</i> .....	21
<b>3.4. Tipo de estudio</b> .....	<b>23</b>
<b>3.5. Métodos, técnicas e instrumentos de investigación</b> .....	<b>24</b>
3.5.1. <i>Lugar de realización</i> .....	24
3.5.2. <i>Técnica de acondicionamiento de la materia prima para la obtención del biocarbón</i> .....	25

3.5.3.	<i>Técnica para la obtención de biocarbón impregnado con nanopartículas de hierro.</i>	27
3.5.4.	<i>Técnica para la caracterización de biocarbón.</i>	30
3.5.5.	<i>Caracterización técnica del biocarbón</i>	33
3.6.	<b>Porcentaje de remoción de Hg</b>	35
3.7.	<b>Análisis estadístico</b>	35
3.7.1.	<i>Método de análisis estadístico</i>	35
3.7.2.	<i>Herramientas de análisis</i>	35

## CAPÍTULO IV

4.	<b>MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b>	36
4.1.	<b>Resultados de la caracterización física y química del biocarbón impregnado</b>	36
4.1.1.	<i>Humedad</i>	37
4.1.2.	<i>pH</i>	37
4.1.3.	<i>Cenizas totales</i>	38
4.1.3.1.	<i>Cálculo de cenizas totales</i>	38
4.1.3.2.	<i>Resultados de cenizas totales</i>	38
4.1.4.	<i>Densidad</i>	39
4.1.4.1.	<i>Densidad aparente</i>	39
4.1.4.2.	<i>Densidad real</i>	39
4.1.5.	<i>Porosidad</i>	40
4.2.	<b>Resultados de la caracterización técnica del biocarbón impregnado</b>	41
4.2.1.	<i>Espectroscopía de infrarrojo (IR)</i>	41
4.2.1.1.	<i>Espectroscopía de infrarrojo de tocte</i>	41
4.2.1.2.	<i>Espectroscopía de infrarrojo de aguacate</i>	44
4.2.2.	<i>Microscopía electrónica de barrido (SEM)</i>	46
4.2.2.1.	<i>Microscopía electrónica de barrido de biocarbón de tocte</i>	46
4.2.2.2.	<i>Microscopía electrónico de barrido de biocarbón de aguacate</i>	47
4.2.2.3.	<i>Microscopía electrónico de barrido para BCT-NFe</i>	48
4.2.2.4.	<i>Microscopía electrónica de barrido para BCA-NFe</i>	53
4.3.	<b>Resultados del diseño experimental</b>	57
4.3.1.	<i>Resultados de pH</i>	57

4.3.2.	<i>Resultados de conductividad</i> .....	57
4.3.3.	<i>Espectrometría de absorción atómica (AAS)</i> .....	58
4.3.3.1.	<i>Resultados de AAS para BCT-NFe</i> .....	58
4.3.3.2.	<i>Resultados de AAS para BCA-NFe</i> .....	59
4.4.	<b>Porcentaje de remoción de Hg</b> .....	60
4.4.1.	<i>Porcentaje de remoción de Hg para BCT-NFe</i> .....	60
4.4.2.	<i>Porcentaje de remoción de Hg para BCA-NFe</i> .....	61
4.5.	<b>Análisis estadístico</b> .....	62
4.5.1.	<i>ANOVA de porcentaje de remoción de Hg</i> .....	62
4.5.1.1.	<i>Normalidad</i> .....	64
4.5.1.2.	<i>Homocedasticidad</i> .....	65
4.5.1.3.	<i>Independencia</i> .....	66
4.5.1.4.	<i>ANOVA</i> .....	67
4.5.1.5.	<i>Método de Tukey</i> .....	69
4.5.2.	<i>Análisis de comportamiento de pH</i> .....	70
4.5.3.	<i>Análisis de comportamiento de Conductividad</i> .....	74
4.6.	<b>Análisis complementario</b> .....	78
4.6.1.	<i>Porcentaje de remoción de Hg en análisis complementario</i> .....	79
4.6.2.	<i>ANOVA para análisis complementario</i> .....	80
4.6.3.	<i>Efecto del tiempo de adsorción en la remoción de Hg</i> .....	81
4.6.4.	<i>Espectroscopía de Infrarrojo (IR) posterior a la adsorción</i> .....	84
4.6.4.1.	<i>Análisis IR de biocarbón de tocte con nanopartículas de hierro después de la adsorción</i> 85	
4.6.4.2.	<i>Análisis IR de biocarbón de aguacate con nanopartículas de hierro después de la adsorción</i> .....	86
4.7.	<b>Análisis de resultados</b> .....	88
4.8.	<b>Comprobación de hipótesis</b> .....	91
4.8.1.	<i>Comprobación de hipótesis general</i> .....	91
4.8.2.	<i>Comprobación de hipótesis específicas</i> .....	91
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	92
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	93
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Antecedentes.....	6
Tabla 3-1: Identificación de variables .....	21
Tabla 3-2: Diseño experimental .....	23
Tabla 3-3: Técnica de acondicionamiento de la materia prima .....	25
Tabla 3-4: Técnica para la obtención de biocarbón impregnado con nanopartículas de hierro...27	
Tabla 3-5: Técnica para el análisis fisicoquímico de biocarbón impregnado .....	30
Tabla 3-6: Caracterización técnica del biocarbón.....	33
Tabla 4-1: Resultados de la caracterización fisicoquímica de BCT-NFe y BCA-NFe.....	36
Tabla 4-2: Resultados de la caracterización de humedad para BCT-NFe y BCA-NFe.....	37
Tabla 4-3: Resultados de la caracterización de pH para BCT-NFe y BCA-NFe .....	37
Tabla 4-4: Resultados de la caracterización de cenizas totales para BCT-NFe y BCA-NFe .....	38
Tabla 4-5: Resultados de la caracterización de densidad para BCT-NFe y BCA-NFe .....	40
Tabla 4-6: Resultados de la caracterización de porosidad para BCT-NFe y BCA-NFe.....	41
Tabla 4-7: Datos de las pulsaciones del biocarbón de tocte.....	42
Tabla 4-8: Datos de las pulsaciones del BCT-NFe.....	43
Tabla 4-9: Datos de las pulsaciones del biocarbón de aguacate .....	44
Tabla 4-10: Datos de las pulsaciones del BCA-NFe .....	45
Tabla 4-11: EDS para BCT-NFe zona 1.....	49
Tabla 4-12: EDS para BCT-NFe zona 2.....	51
Tabla 4-13: EDS para BCA-NFe zona 1 .....	53
Tabla 4-14: EDS para BCA-NFe zona 2 .....	55
Tabla 4-15: Resultado de pH para BCT-NFe y BCA-NFe .....	57
Tabla 4-16: Resultado de conductividad para BCT-NFe y BCA-NFe.....	58
Tabla 4-17: Resultado de AAS expresado como concentración final de Hg para BCT-NFe.....	59
Tabla 4-18: Resultado de AAS expresado como concentración final de Hg para BCA-NFe.....	60
Tabla 4-19: Porcentaje de remoción de Hg para BCT-NFe.....	61
Tabla 4-20: Porcentaje de remoción de Hg para BCA-NFe .....	62
Tabla 4-21: ANOVA para el porcentaje de remoción de mercurio .....	68
Tabla 4-22: Porcentaje de remoción de Hg para BCT-NFe y BCA-NFe con 50 y 100 ppm a 5,10 y 15 minutos.....	79
Tabla 4-23: ANOVA para el porcentaje de remoción de Hg con 50 y 100 ppm a 5,10 y 15 minutos. ....	81
Tabla 4-24: Datos de las pulsaciones de BCT-NFe después de la adsorción.....	85
Tabla 4-25: Datos de las pulsaciones de BCA-NFe después de la adsorción .....	87

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: El fruto del aguacate .....	9
Ilustración 2-2: Componente del tocte.....	10
Ilustración 2-3: Biocarbón.....	10
Ilustración 2-4: Clasificación de los nanomateriales .....	13
Ilustración 2-5: Reacción para la formación de óxido de hierro .....	15
Ilustración 2-6: Microscopio electrónico de barrido.....	18
Ilustración 2-7: Absorción [%A] versus longitud de onda [ $\text{cm}^{-1}$ ].....	19
Ilustración 3-1: Diseño experimental .....	22
Ilustración 3-2: Diagrama de flujo del acondicionamiento de la materia prima .....	26
Ilustración 3-3: Diagrama de flujo para obtención de BCT-Fe y BCA-Fe .....	29
Ilustración 4-1: Picos de IR al biocarbón de tocte .....	41
Ilustración 4-2: Picos de IR al BCT-NFe .....	42
Ilustración 4-3: Picos de IR al biocarbón de aguacate .....	44
Ilustración 4-4: Picos de IR al BCA-NFe.....	45
Ilustración 4-6: Análisis SEM para el biocarbón de aguacate .....	48
Ilustración 4-7: Análisis SEM-EDS para BCT-NFe zona 1.....	49
Ilustración 4-8: Análisis SEM-EDS para BCT-NFe zona 2.....	50
Ilustración 4-10: Análisis SEM-EDS para BCA-NFe zona 1 .....	53
Ilustración 4-11: Análisis SEM-EDS para BCA-NFe zona 2 .....	54
Ilustración 4-13: Gráfica de normalidad.....	64
Ilustración 4-14: Test de Shapiro-Wilk .....	65
Ilustración 4-15: Gráfica de varianza constante.....	65
Ilustración 4-16: Test de Bartlett .....	66
Ilustración 4-17: Gráfica de independencia.....	66
Ilustración 4-18: Test de Durbin-Watson .....	67
Ilustración 4-19: Gráfico de las diferencias entre tratamientos mediante el método de Tukey ...	69
Ilustración 4-20: Gráfica de interacción triple, entre los 3 factores principales .....	70
Ilustración 4-21: Efecto de los niveles de BCT-Fe sobre el pH.....	71
Ilustración 4-22: Efecto de los niveles de concentración inicial de Hg sobre el pH .....	71
Ilustración 4-23: Efecto de los niveles de tiempo sobre el pH.....	72
Ilustración 4-24: Efecto interacción entre Biocarbón y Concentración inicial de Hg .....	72
Ilustración 4-25: Efecto interacción entre los factores Biocarbón y Tiempo de absorción .....	73
Ilustración 4-26: Efecto interacción entre Concentración inicial Hg y Tiempo de absorción .....	73
Ilustración 4-27: Efecto Biocarbón, Concentración inicial Hg y Tiempo de absorción con pH .....	74

Ilustración 4-28: Efecto del factor biocarbón en la conductividad .....	74
Ilustración 4-29: Efecto de la Concentración inicial de Hg en la conductividad .....	75
Ilustración 4-30: Efecto del factor tiempo en la conductividad .....	75
Ilustración 4-31: Efecto de interacción del Biocarbón y Concentración inicial de Hg .....	76
Ilustración 4-32: Efecto de interacción del Biocarbón y Tiempo de absorción .....	76
Ilustración 4-33: Efecto interacción de Concentración inicial de Hg y Tiempo de absorción ....	77
Ilustración 4-34: Efecto Concentración inicial de Hg, Tiempo de absorción y Biocarbón .....	78
Ilustración 4-35: Efecto del Tiempo en la Remoción de Hg con BCT-NFe a 50 ppm.....	82
Ilustración 4-36: Efecto del Tiempo en la Remoción de Hg con BCT-NFe a 100 ppm.....	83
Ilustración 4-37: Efecto del Tiempo en la Remoción de Hg con BCA-NFe a 50 ppm .....	83
Ilustración 4-38: Efecto del Tiempo en la Remoción de Hg con BCA-NFe a 100 ppm .....	84
Ilustración 4-39: Picos de IR para BCT-NFe después de la adsorción .....	85
Ilustración 4-40: Picos de IR para BCA-NFe después de la adsorción.....	86

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3-1 : Porcentaje de cenizas totales. ....	31
Ecuación 3-2: Densidad aparente. ....	32
Ecuación 3-3: Densidad real.....	32
Ecuación 3-4: Porosidad.....	32
Ecuación 3-5: % de remoción de mercurio.....	35
Ecuación 4-1: Modelo estadístico. ....	63

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>BCT-NFe</b>	Biocarbón de tocte impregnado con nanopartículas de hierro
<b>BCA-NFe</b>	Biocarbón de aguacate impregnado con nanopartículas de hierro
<b>IR</b>	Espectroscopía de infrarrojo
<b>SEM</b>	Microscopía electrónica de barrido
<b>EDS</b>	Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva
<b>AAS</b>	Espectroscopía de absorción atómica
<b>g</b>	gramos
<b>Fe</b>	Hierro
<b>Hg</b>	Mercurio
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>ppb</b>	Partes por billón

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO A:</b> BOCETO RECOLECCIÓN DE DATOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL .....	103
<b>ANEXO B:</b> ACONDICIONAMIENTO DE MATERIA PRIMA – TOCTE.....	105
<b>ANEXO C:</b> ACONDICIONAMIENTO DE MATERIA PRIMA – AGUACATE.....	106
<b>ANEXO D:</b> IMPREGNACIÓN CON NANOPARTÍCULAS DE HIERRO .....	107
<b>ANEXO E:</b> PIRÓLISIS.....	108
<b>ANEXO F:</b> ACONDICIONAMIENTO DE BCT-NFe y BCA-NFe .....	109
<b>ANEXO G:</b> REPRODUCCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL .....	110
<b>ANEXO H:</b> CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE BCT-NFe y BCA-NFe .....	111
<b>ANEXO I:</b> CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE BCT-NFe y BCA-NFe.....	112

## RESUMEN

La contaminación por mercurio, la gestión inadecuada de desechos orgánicos y la necesidad de un adsorbente efectivo plantearon importantes desafíos para la conservación del medio ambiente y la protección de la salud pública. En este contexto, el estudio se centró en la obtención de biocarbón magnético impregnado con nanopartículas de hierro a partir de residuos orgánicos de tocte (*Juglans neotropica*) y aguacate (*Persea americana*), con el propósito de utilizarlo en la adsorción de mercurio en soluciones acuosas. Para lograrlo, se aplicaron diversos métodos, incluyendo la impregnación, pirólisis y acondicionamiento del biocarbón, seguidos de una detallada caracterización física y química. Los resultados obtenidos mediante espectrometría de absorción atómica indicaron que se alcanzó un porcentaje máximo de remoción de mercurio del 99.993% para el tratamiento BCT-NFe y del 99.989% para el BCA-NFe, utilizando una concentración inicial de Hg de 10 ppm y un tiempo de absorción de 120 minutos. Además, la caracterización reveló diferencias significativas entre el BCT-NFe y el BCA-NFe en términos de contenido de humedad, pH, densidad aparente y real, así como porosidad, lo que sugiere distintas capacidades de biosorción entre ambos. El análisis mediante espectroscopía de infrarrojo y microscopía electrónica de barrido confirmó la presencia de nanopartículas de hierro y su interacción con el biocarbón. Además, se observó que factores como el tipo de biocarbón, la concentración inicial de mercurio y el tiempo de absorción influyeron en el pH y la conductividad del sistema. En conclusión, tras obtener biocarbón e impregnarlo con nanopartículas de hierro, ambos materiales lograron remover más del 99% de mercurio, siendo el BCT-NFe el más efectivo en el tratamiento de 10 ppm durante 120 minutos de absorción. Además, se evidenció que el pH y la conductividad variaron conforme interactuaron los factores modificados influyendo significativamente en la remoción.

**Palabras clave:** <BIOCARBÓN MAGNÉTICO>, <ADSORCIÓN>, <NANOPARTICULAS DE HIERRO>, <REMOCIÓN DE MERCURIO>.

0365-DBRA-UPT-2024



## ABSTRACT

Mercury contamination, inadequate organic waste management and the need for an effective adsorbent posed important challenges for environmental conservation and public health protection. In this context, the study focused on obtaining magnetic biochar impregnated with iron nanoparticles from organic wastes of tocte (*Juglans neotropica*) and avocado (*Persea americana*), with the purpose of using it in the adsorption of mercury in aqueous solutions. To achieve this, several methods were applied, including impregnation, pyrolysis and conditioning of the biochar, followed by a detailed physical and chemical characterization. The results obtained by atomic absorption spectrometry indicated that a maximum mercury removal rate of 99.993% was achieved for the BCT-NFe treatment and 99.989% for BCANFe, using an initial Hg concentration of 10 ppm and an absorption time of 120 minutes. In addition, characterization revealed significant differences between BCT-NFe and BCA-NFe in terms of moisture content, pH, bulk and true density, as well as porosity, suggesting different biosorption capacities between the two. Analysis by infrared spectroscopy and scanning electron microscopy confirmed the presence of iron nanoparticles and their interaction with biochar. In addition, it was observed that factors such as the type of biochar, the initial mercury concentration and the adsorption time influenced the pH and conductivity of the system. In conclusion, after obtaining biochar and impregnating it with iron nanoparticles, both materials were able to remove more than 99% of mercury, with BCT-NFe being the most effective in the 10 ppm treatment during 120 minutes of adsorption. In addition, it was evidenced that the pH and conductivity varied as the modified factors interacted, significantly influencing the removal.

Key words: <MAGNETIC BIOCHAR>, <ADSORPTION>, <IRON NANOPARTICULES>, <MERCURY REMOVAL>.



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

Ced: 110369613

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación se enfoca en la obtención y caracterización del biocarbón magnético a partir de residuos de tocte (*Juglans neotropica*) y aguacate (*Persea americana*), con el objetivo de evaluar su capacidad para la remoción de mercurio en soluciones acuosas. Este enfoque responde al desafío global de la contaminación del agua con mercurio, ofreciendo una solución sostenible y efectiva mediante la conversión de residuos orgánicos en un material adsorbente de alta eficacia. De esta manera, la investigación aborda la gestión inadecuada de desechos y contribuye significativamente a la sostenibilidad ambiental.

Los objetivos de esta investigación han sido diseñados para obtener, caracterizar y evaluar la capacidad de remoción del biocarbón magnético impregnado con nanopartículas de hierro. La metodología empleada se ha estructurado en fases de obtención, caracterización y evaluación de la capacidad de adsorción. Los capítulos de la investigación abarcan desde la contextualización del problema hasta la discusión de resultados y conclusiones, proporcionando una visión completa del proceso y sus implicaciones.

Además, este estudio se centra en analizar cómo diferentes factores, como la concentración inicial de mercurio, el tiempo de absorción y el tipo de biocarbón, influyen en la eficacia de la remoción de contaminantes. Se presta especial atención al comportamiento del pH y la conductividad en relación con estos factores, con el propósito de comprender mejor los procesos de adsorción de contaminantes en medios acuosos y optimizar los resultados obtenidos.

La importancia de esta investigación trasciende a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), ya que ofrece la posibilidad de aplicar los resultados en procesos de tratamiento de aguas residuales, generando impactos positivos tanto ambientales como económicos. A nivel social, la investigación busca proporcionar una solución efectiva y sostenible para la contaminación del agua con mercurio, beneficiando directamente a comunidades que dependen del suministro seguro de agua potable.

## CAPÍTULO I

### 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1. Planteamiento del problema

La contaminación del agua con mercurio se ha convertido en un desafío global de gran preocupación. La Organización Panamericana de la Salud, (2022) destaca la toxicidad del mercurio, ubicándolo entre los 10 productos químicos más preocupantes en términos de salud pública. La presencia de este metal en el agua se atribuye a diversos factores, siendo la actividad industrial y la minería fuentes significativas de contaminación. La explotación minera, en particular, emerge como una fuente relevante de liberación de mercurio en los cuerpos de agua, contribuyendo de manera sustancial a este problema global. Además de los riesgos inherentes a la salud y al medio ambiente, el mercurio exhibe propiedades persistentes y bioacumulativas, intensificando su toxicidad a lo largo del tiempo (Gibb y O'Leary, 2014, pág.168).

A su vez, la gestión inadecuada de los desechos orgánicos generados en áreas agrícolas, forestales y urbanas, incluyendo los residuos provenientes de las actividades relacionadas con el Tocte y el Aguacate representan un desafío global. La explotación de estos residuos con el propósito de producir biocarbón ofrece la posibilidad de obtener un subproducto con un potencial significativo en el ámbito de la adsorción de diversos componentes. Esta iniciativa no solo abordaría la problemática de la gestión deficiente de desechos, sino que también abriría nuevas oportunidades para la utilización sostenible de estos recursos, contribuyendo así a la gestión más eficiente de los desechos orgánicos y fomentando avances en el campo de la adsorción de manera eco amigable (Porras y González, 2016, pág.92).

Por último, la ausencia de un adsorbente accesible para tratar el agua contaminada con mercurio proveniente de la minería constituye una problemática crucial en la gestión ambiental actual. La actividad minera, al liberar mercurio en las fuentes de agua, crea un desafío significativo debido a la falta de opciones eficientes y fácilmente disponibles para la remoción de este metal tóxico. La carencia de un adsorbente adecuado no solo agrava la contaminación del agua, sino que también limita las posibilidades de mitigar los impactos negativos en la salud humana y el ecosistema.

## 1.2. Limitaciones

- La disponibilidad de residuos de tocte (*Juglans neotropica*) y aguacate (*Persea americana*) es limitada en ciertas áreas, lo que puede afectar la disponibilidad y la cantidad de biocarbón producido.
- La composición química y física de los residuos de tocte y aguacate puede variar, lo que podría afectar la calidad y eficiencia del biocarbón producido, así como la adsorción de Hg.
- Los resultados y conclusiones obtenidos en este estudio pueden no ser generalizables a otras regiones geográficas debido a las diferencias en los tipos de residuos orgánicos y la composición de las soluciones acuosas.

## 1.3. Delimitaciones

- Los residuos orgánicos seleccionados para este estudio provienen del tocte (*Juglans neotropica*) y el aguacate (*Persea americana*).
- La impregnación con nanopartículas de hierro (Fe) se llevará a cabo en los materiales orgánicos seleccionados.
- El estudio se centra en la adsorción mercurio (Hg) en soluciones acuosas.

## 1.4. Problema general de investigación

¿Se puede lograr la adsorción de Hg utilizando biocarbón magnético derivado de residuos orgánicos impregnado con nanopartículas de hierro?

## 1.5. Problemas específicos de investigación

- ¿Es posible obtener biocarbón magnético a través de la pirólisis de los residuos de tocte y aguacate?
- ¿Cuáles son las propiedades físicas y químicas del biocarbón impregnado producido a partir de los residuos de tocte y aguacate, y cómo influyen en su calidad y aplicaciones potenciales?
- ¿Cuál es la tasa de remoción de mercurio (Hg) para los tratamientos que emplean biocarbón impregnado con nanopartículas?

## **1.6. Objetivos**

### **1.6.1. Objetivo general**

- Obtener biocarbón magnético impregnado con nanopartículas de Hierro a partir de residuos orgánicos de tocte (*Juglans neotropica*) y aguacate (*Persea americana*) para la adsorción de mercurio en soluciones acuosas.

### **1.6.2. Objetivos específicos**

- Obtener biocarbón magnético impregnado con nanopartículas de Hierro a partir de los residuos de tocte (*Juglans neotropica*) y aguacate (*Persea americana*) mediante pirólisis.
- Caracterizar de forma física y química el biocarbón impregnado.
- Estimar la capacidad de remoción de mercurio del biocarbón impregnado con nanopartículas de hierro, a través de la medición de las concentraciones de mercurio en las soluciones acuosas antes y después de la adsorción.
- Evaluar si existen diferencias significativas en la capacidad de remoción de mercurio entre los diferentes tipos de biocarbón impregnado con nanopartículas de hierro, utilizando el análisis de varianza (ANOVA).
- Analizar el comportamiento del pH y la conductividad frente a la concentración inicial de Hg, el tiempo de adsorción y el tipo de biocarbón.

## **1.7. Justificación**

De acuerdo con las investigaciones de Cundy et al. (2008) y Escárcega et al. (2021), plantean que los residuos orgánicos albergan una amplia gama de compuestos con aplicaciones potenciales, especialmente en el ámbito de la nanotecnología. Este descubrimiento adquiere una relevancia crítica en el contexto actual, donde se observa un crecimiento en la revalorización de estos residuos como una alternativa viable y necesaria. A su vez, el avanzado progreso en la nanotecnología ha facilitado la creación de nanomateriales con características excepcionales, destacando por sus altas relaciones superficie específica/volumen. Estas propiedades se perfilan como esenciales para abordar la problemática previamente planteada, especialmente en el tratamiento de mercurio mediante procesos de adsorción con residuos orgánicos.

El propósito fundamental de la presente investigación radica en la obtención de biocarbón impregnado con nanopartículas de hierro a partir de residuos orgánicos, con la finalidad de utilizarlo en la adsorción de mercurio proveniente de soluciones acuosas. La producción de biocarbón enriquecido con nanopartículas a partir de estos residuos no solo se configura como una opción práctica y prometedora, sino que también destaca por aprovechar una fuente abundante y renovable para la generación de dicho material. Este enfoque no solo tiene implicaciones científicas, sino que también reporta beneficios tangibles para diversos sectores y entidades, tales como institutos de investigación, empresas dedicadas al tratamiento de aguas residuales, agricultores y comunidades que dependen del suministro seguro de agua potable. La aplicación de esta técnica se direcciona como una solución eficaz y económicamente viable para la eliminación de mercurio, lo cual contribuye significativamente a la mejora de la calidad del agua y, por ende, a la salud y bienestar de la población.

### **1.8. Hipótesis general**

El biocarbón magnético, obtenido a partir de residuos orgánicos *de Juglans neotropica y Persea americana* e impregnado con nanopartículas de hierro, tiene una capacidad destacada para la remoción de mercurio en soluciones acuosas mediante el proceso de adsorción.

### **1.9. Hipótesis específicas**

- ¿Se logra un porcentaje de remoción de mercurio del biocarbón de tocte impregnado con nanopartículas de hierro?
- ¿Se logra un porcentaje de remoción de mercurio del biocarbón de aguacate impregnado con nanopartículas de hierro?
- ¿Exhibe el biocarbón de tocte impregnado con nanopartículas de hierro un mayor porcentaje de remoción de mercurio en comparación con el obtenido a partir del aguacate?

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de investigación

En la Tabla 2-1, se presentan los antecedentes relacionados con el presente trabajo de titulación. En dicha tabla, se detallan los autores, años de publicación y títulos respectivos de las investigaciones seleccionadas. Estos antecedentes no solo cumplen la función de establecer un marco de referencia temporal y contextual, sino que también son valiosos recursos para el análisis metodológico, la revisión de resultados y la comprensión de diversos aspectos abordados en el ámbito de estudio. Posterior a esta tabla, se presenta un estado del arte individualizado para cada antecedente, destacando los elementos más significativos y relevantes de cada investigación.

**Tabla 2-1:** Antecedentes

Auto/Autores	Año	Título
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Trivedi, P</i></li> <li>• <i>Axe, L</i></li> </ul>	2000	Modeling Cd and Zn Sorption to Hydrous Metal Oxides.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Rubio, Ivan</i></li> <li>• <i>Calderón, Adolfo Ramiro</i></li> <li>• <i>Perdomo, Alexandra</i></li> <li>• <i>Rodríguez, Daniel</i></li> <li>• <i>Rojas, Javier Ivan</i></li> </ul>	2015	Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales: una revisión.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Cho, Dong</i></li> <li>• <i>Yoon, Kwangsuk</i></li> <li>• <i>Kwon, Eilhann</i></li> <li>• <i>Biswas, Jayanta</i></li> <li>• <i>Song, Hocheol</i></li> </ul>	2017	Fabrication of magnetic biochar as a treatment medium for As(V) via pyrolysis of FeCl <sub>3</sub> -pretreated spent coffee ground
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Carolín, Femina</i></li> <li>• <i>Kumar, Senthil</i></li> <li>• <i>Saravanan, A</i></li> <li>• <i>Joshiba, Janet</i></li> <li>• <i>Naushad, Mu</i></li> </ul>	2017	Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Monárrez, B</i></li> <li>• <i>Sáenz, A</i></li> <li>• <i>Bautista, L</i></li> <li>• <i>Silva, L</i></li> <li>• <i>Miki, M</i></li> <li>• <i>Amézaga, P</i></li> </ul>	2018	Simultaneous and fast removal of As <sup>3+</sup> , As <sup>5+</sup> , Cd <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Pb <sup>2+</sup> and F <sup>-</sup> from water with composite Fe-Ti oxides nanoparticles
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Zhang, Jin</i></li> <li>• <i>Lin, Shuang</i></li> <li>• <i>Han, Meiling</i></li> <li>• <i>Su, Qing</i></li> <li>• <i>Xia, Lianqiu</i></li> <li>• <i>Hui, Zhaocong</i></li> </ul>	2020	Adsorption properties of magnetic magnetite nanoparticle for coexistent Cr(VI) and Cu(II) in mixed solution.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Lin, Ze</i></li> <li>• <i>Weng, Xiulan</i></li> <li>• <i>Owens, Gary</i></li> <li>• <i>Chen, Zuliang</i></li> </ul>	2020	Simultaneous removal of Pb(II) and rifampicin from wastewater by iron nanoparticles synthesized by a tea extract

<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Pabón, Santiago</i></li> <li>• <i>Benítez, Ricardo</i></li> <li>• <i>Sarría, Rodrigo</i></li> <li>• <i>Gallo, José</i></li> </ul>	2020	Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Pabón, Santiago</i></li> <li>• <i>Benítez, Ricardo</i></li> <li>• <i>Sarría, Rodrigo</i></li> <li>• <i>Gallo, José</i></li> </ul>	2022	Mercury (II) removal from aqueous solutions by iron nanoparticles synthesized from extract of <i>Eucalyptus grandis</i>

Realizado por: Cuenca, 2024.

El mercurio (Hg) es liberado en cuerpos de agua y suelos principalmente debido a actividades humanas, representando una seria amenaza para la flora, fauna y la salud humana. Este metal posee características de persistencia, bioacumulación y no biodegradabilidad, lo que lo vuelve altamente tóxico incluso en concentraciones bajas (Zhang et al., 2020; Trivedi y Axe, 2000). Por este motivo, se han desarrollado técnicas específicas para tratar y eliminar el mercurio del agua, clasificadas en dos categorías según el equipo de trabajo de (Rubio et al., 2015; Carolin et al., 2017) tales como convencionales, como la filtración por membrana, el intercambio iónico, la adsorción, la precipitación química, la electrocoagulación, la coagulación-floculación, entre otras; y las técnicas no convencionales, que involucran procesos innovadores para la remoción del mercurio en entornos acuáticos (Pabón et al., 2020).

En 2017, Cho y su equipo lograron la obtención de biocarbón magnético a partir de café molido (SCG) mediante pirólisis con nitrógeno (N<sub>2</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Su investigación se centró en examinar los efectos del pretratamiento de SCG con cloruro férrico (FeCl<sub>3</sub>) en las propiedades del material y su capacidad de adsorción de Arsénico V. Los resultados indicaron que la pirólisis con CO<sub>2</sub> generó un biocarbón altamente poroso con un área superficial considerablemente mayor en comparación con las condiciones de N<sub>2</sub>. Sin embargo, a pesar de tener una superficie menor, el biocarbón producido en N<sub>2</sub> exhibió una mayor capacidad de adsorción de As(V). Los análisis de difracción de rayos X y fotoelectrones de rayos X revelaron que las fases minerales predominantes en el biocarbón producido en N<sub>2</sub> eran Fe<sub>3</sub>C (Cementita) y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Magnetita), siendo Fe<sub>3</sub>C más efectivo en la adsorción de As(V). Estos resultados sugirieron la posibilidad de fabricar biocarbón funcional mediante pretratamientos específicos para mejorar su aplicabilidad en la remoción de As(V) (Cho et al., 2017, pág. 942).

En 2018, Monárrez-Cordero y su equipo llevaron a cabo un análisis de la eficacia de nanopartículas compuestas por óxidos de Fe-Ti para la captura de diversos iones contaminantes presentes en el agua. Estas nanopartículas, con un tamaño promedio de  $9 \pm 3$  nm y un área superficial de 208 m<sup>2</sup>/g, demostraron su capacidad para eliminar iones de plomo (Pb), alcanzando un notable 94% de remoción después de 25 minutos. La presencia de múltiples óxidos en estas nanopartículas, combinada con su elevada área superficial, contribuyó significativamente a su destacada efectividad como adsorbente. Estos resultados señalan la prometedora aplicación de las nanopartículas compuestas por óxidos de Fe-Ti en el tratamiento de agua contaminada (Monárrez et al., 2018, pág. 150).

El equipo dirigido por Pabón llevó a cabo la síntesis de nanopartículas de hierro utilizando un extracto de *Eucalyptus grandis* y sales de cloruro de hierro con el objetivo de eliminar el mercurio de soluciones acuosas. Todos los análisis fueron evaluados a través de espectroscopía de absorción atómica mediante la técnica de vapor frío (CVAAS), mostrando una variación en el porcentaje de retención para Hg que osciló entre el 75.05% y el 79.59% en un rango de pH de 4 a 7 (Pabón et al., 2022, pág. 1). Además, en el mismo año, Lin y su grupo de investigación sintetizaron nanopartículas de hierro a partir del extracto de té para la adsorción de plomo, logrando una remoción del 97.5% (Lin et al., 2020, pág. 1).

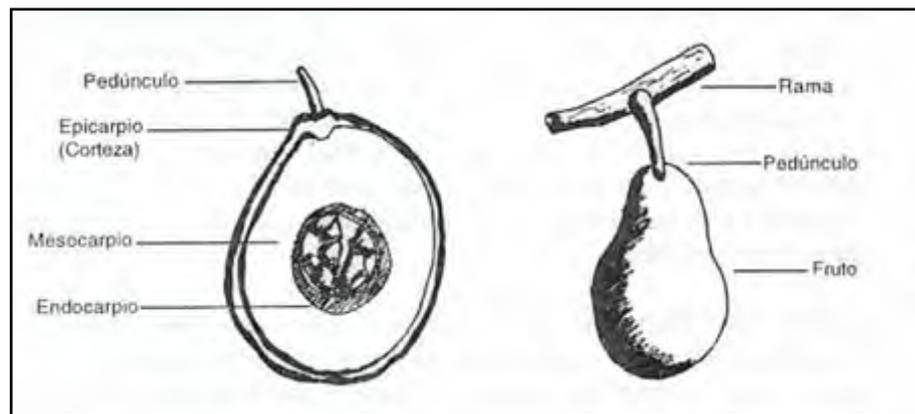
## **2.2. Referencias Teóricas**

### **2.2.1. Residuos Orgánicos**

#### **2.2.1.1. Aguacate**

*Persea americana*, miembro de la familia *Lauraceae*, es una fruta comestible ampliamente reconocida bajo el nombre de aguacate. Esta fruta es originaria de las regiones tropicales y subtropicales de Centroamérica y México, y a lo largo de la historia, ha sido cultivada en numerosas regiones de todo el mundo. Su presencia global se debe a su atractivo sabor y a los diversos beneficios nutricionales que ofrece, lo que lo ha convertido en un elemento esencial en la dieta de muchas culturas (Al-Otaibi et al., 2023; Álvarez et al., 2015).

En Ecuador la producción está distribuida en los valles interandinos de la Sierra, en las provincias de Imbabura (Chota y Salinas), Carchi (Mira), Pichincha (Guayllabamba), Tungurahua (Patate y Baños) Chimborazo y Azuay (Paute y Gualaceo) (Flores et al., 2021, pág. 65) . En la Ilustración 2-1 se muestran los componentes constituyentes externos e internos como: pedúnculo, epicarpio, mesocarpio y endocarpio. En esta investigación, nos enfocaremos exclusivamente en el endocarpio del aguacate, es decir, la pepa de esta fruta debido a su naturaleza como residuo agrícola, lo que lo convierte en un recurso sostenible y amigable con el medio ambiente.



**Ilustración 2-1:** El fruto del aguacate

**Fuente:** Amórtegui, 2001, pág. 8.

Según (Amórtegui, 2001) el aguacate es una fruta apreciada por sus propiedades organolépticas, nutricionales y medicinales, tales como vitaminas B, A, C y E, además de proteínas, calcio, magnesio, potasio, hierro y fósforo (pág. 9). En concordancia, (Vivero et al., 2019) en su estudio del aguacate como compuesto bioactivo indica que la semilla (mesocarpio) es rica en potasio y antioxidantes debido a su alta concentración en compuestos fenólicos. Asimismo, posee propiedades antioxidantes e incluso antimicrobianas (pág. 492).

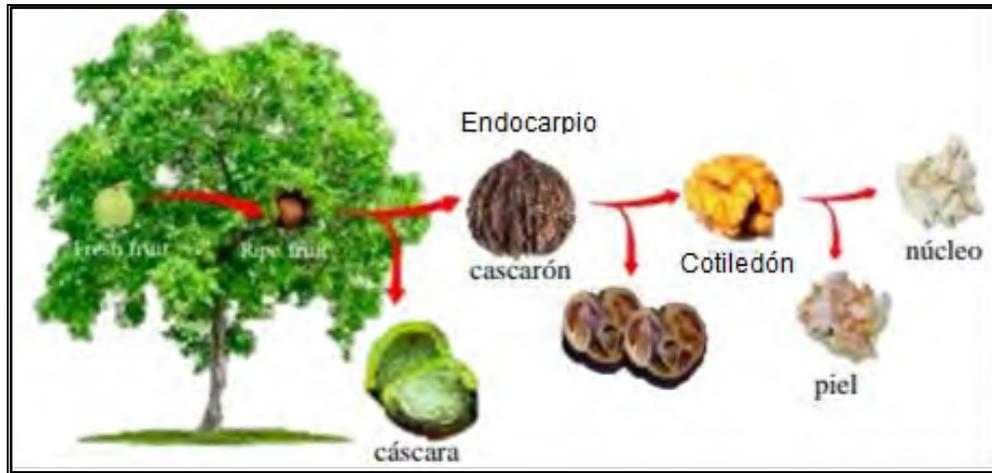
#### 2.2.1.2. Tocte

*Juglans neotropica* Diels, nativa de la zona andina de América del Sur, ha desempeñado un papel importante en las comunidades locales a lo largo de la historia. Este árbol ha sido utilizado por su valiosa madera en los mercados, así como por sus hojas y frutos en las industrias textil, alimentaria y medicinal (Rojas y Torres, 2008, pág. 69).

Conocido comúnmente como “tocte” pertenece a la familia *Juglandaceae* y es nativa de Honduras, Colombia, Perú, Bolivia y Ecuador. En este último, desde tiempos remotos, se ha llevado a cabo una amplia producción de tocte. Este fruto es una variante de la nuez, que surge en árboles frondosos conocidos como nogales y se localiza principalmente en regiones como Chimborazo, Loja, Ibarra, Azuay e Imbabura. La cosecha de este fruto se realiza anualmente entre los meses de junio y octubre (Borja y Quituisaca, 2020, pág. 25).

En la Ilustración 2-2 se presentan los componentes de *Juglans neotropica* Diels se componen de diferentes partes, que incluyen la cáscara, el endocarpio, el cotiledón, la piel y el núcleo. Siendo objeto de este estudio el endocarpio, mismo que es considerado un residuo agrícola, el cual puede ser aprovechado debido a su capacidad biodegradable, químicamente inerte y no tóxico. Sumado

a ello, es ampliamente utilizado como un medio de filtración altamente eficaz para separar el petróleo crudo, materiales peligrosos y metales pesados del agua, y, además, posee propiedades antioxidantes y antimicrobianas (Jahanban-Esfahlan et al. 2019).



**Ilustración 2-2:** Componente del tocte

**Fuente:** Adaptación de Jahanban et al., 2019, pág. 3.

### 2.2.2. Biocarbón

El biocarbón de la Ilustración 2-3 según (Escalante et al., 2016) se define por la International Biochar Initiative como "un material sólido obtenido a través de la conversión termoquímica de biomasa en un entorno con una cantidad limitada de oxígeno" (pág. 268). Su composición generalmente comprende celulosa, hemicelulosa, lignina y otros compuestos orgánicos, con proporciones que varían según la biomasa utilizada como materia prima. Todos estos constituyentes ayudan a la formación de estructuras porosas en el biocarbón resultante. Además, la temperatura de pirólisis ejerce una influencia directa sobre las propiedades fisicoquímicas del biocarbón, abarcando aspectos como su composición elemental, estabilidad, área superficial y la presencia de grupos funcionales en su superficie, tal como indica (Senadheera et al., 2023, pág. 5).



**Ilustración 2-3:** Biocarbón

**Fuente:** CarbonZero Sagl, 2020.

Los estudios de caracterización de biocarbones como lo presenta Escalante en su investigación han identificado que este material se presenta como un sólido carbonoso de color negro, con una superficie intrincada y desordenada, cuyas características estructurales se ven influenciadas por el tipo de biomasa utilizada y la duración del proceso de pirólisis. En cuanto al pH, se ha observado una variación significativa, abarcando desde niveles ácidos hasta alcalinos, con una media de pH de 8.1 y un rango que oscila entre 6.2 y 13 (Escalante et al., 2016, pág. 370).

La presencia de poros en el biocarbón es un factor determinante en su capacidad de adsorción, una característica esencial en múltiples aplicaciones. Conforme la temperatura de tratamiento aumenta, se incrementa la cantidad de poros, particularmente los micro-poros de menos de 2 nm de diámetro, distribuidos de manera uniforme. Estos micro-poros son responsables principales de la alta capacidad de adsorción del biocarbón, al proporcionar una amplia área superficial para la interacción con moléculas de gases y solventes. La eficacia de la adsorción no solo está influenciada por el tamaño de los poros, sino también por su distribución y organización molecular (Lehmann y Joseph, 2009, pág. 2).

### **2.2.3. Pirólisis**

La pirólisis es un proceso termoquímico fundamental utilizado para la obtención de carbón a partir de materiales orgánicos, como biomasa, residuos agrícolas o desechos orgánicos. Durante este procedimiento, los materiales se someten a temperaturas superiores a 400°C en ausencia de oxígeno, lo que impide la combustión completa y favorece la descomposición térmica de la materia prima. Esta descomposición conduce a la liberación de gases y vapores, mientras que los componentes sólidos se transforman en carbón (Escalante et al., 2016, pág. 375).

La pirólisis lenta implica un calentamiento gradual de la biomasa con temperaturas alrededor de los 500 °C y largos tiempos de residencia, lo que resulta en altos rendimientos de biocarbón. Por otro lado, la pirólisis rápida se caracteriza por un calentamiento rápido, superando temperaturas a 550 °C, lo que produce principalmente líquidos de alta calidad. Por último, la pirólisis ultrarrápida se realiza a temperaturas moderadas de 400-600 °C con tasas de calentamiento rápidas y tiempos de residencia del vapor bajas, resultando en menos gas y un mayor rendimiento de productos aceitosos (Escalante et al. 2016, pág. 376).

La selección de las condiciones de temperatura y tiempo de residencia en el reactor de pirólisis es fundamental para determinar las propiedades finales del carbón resultante, tales como su estructura, composición química y reactividad. Mediante el empleo de tecnologías altamente eficientes, es posible alcanzar rendimientos de masa del 30-40% (base húmeda), junto con

producciones de energía cercanas al 30% (contenido en el carbón) y contenidos de carbono fijado superiores al 90% de la biomasa original (Escalante et al., 2016, pág. 375). La pirólisis controlada posibilita la producción de carbones con características específicas, como una porosidad elevada, lo que los convierte en materiales prometedores para aplicaciones en la purificación de agua y la adsorción de contaminantes.

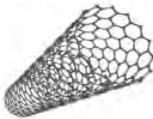
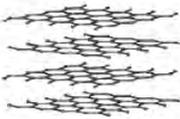
#### **2.2.4. *Nanomateriales***

La nanociencia y la nanotecnología han surgido como campos prioritarios en el avance científico y tecnológico contemporáneo, en paralelo con la biotecnología y la tecnología de la información. Estas áreas se centran en el estudio de los fenómenos en la nano escala y los materiales que los constituyen, inaugurando así un nuevo ámbito científico para la concepción, producción y aplicación de nanoestructuras y nanomateriales. Se enfoca en la investigación, diseño, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, dispositivos y sistemas funcionales a nivel nano, aprovechando las propiedades únicas que emergen a esta escala (Gómez, 2018; Gutiérrez, 2018).

Los nanomateriales, es una categoría especial de materiales que abarcan cerámicos, metálicos, semiconductores, poliméricos o una combinación de estos, se caracterizan por tener al menos una dimensión en el rango de 1 a 100 nanómetros. Esta escala dimensional representa una transición entre las propiedades de las moléculas y los átomos, y las de un material sólido a una escala mayor. En contraste con los materiales a mayor escala, los nanomateriales exhiben propiedades notablemente diferentes debido a su reducido tamaño, lo que los diferencia tanto de los sólidos volumétricos como de las moléculas y los átomos individuales (Gutiérrez, 2018, pág. 25).

##### **2.2.4.1. *Tipos de nanomateriales***

Como se muestra en la Ilustración 2-4 según el número de dimensiones en la nano escala, los nanomateriales se pueden categorizar en cuatro tipos principales: materiales de dimensión cero (como las nanopartículas), de una dimensión (como los nanotubos), de dos dimensiones (como las películas delgadas) y de tres dimensiones (compuestos por unidades nanométricas tridimensionales).

Estructura	Nanomateriales
<b>Cero dimensional (0D)</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fullerenos</li> <li>- Partículas coloidales</li> <li>- Puntos cuánticos (Qdots)</li> <li>- Nanoclusters</li> <li>- Nanopartículas de Au y Ag</li> </ul>
<b>Uni dimensional (1D)</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nanocables y nanofibras</li> <li>- Nanotubos</li> <li>- Nanovarillas</li> <li>- Fibras poliméricas</li> </ul>
<b>Bi-dimensional (2D)</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Monocapas</li> <li>- Nanorrecubrimiento</li> <li>- Películas poliméricas (nano)</li> <li>- Superficies espesor &lt;100nm</li> <li>- Películas multicapa</li> </ul>
<b>Tri-dimensional (3D)</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materiales nanoestructurales</li> <li>- Policristales</li> <li>- Nanobolas</li> <li>- Nanobobinas</li> <li>- Nanoflores</li> </ul>

**Ilustración 2-4:** Clasificación de los nanomateriales

**Fuente:** Gómez, 2018, pág. 77.

Po otro lado, la taxonomía de los nanomateriales delineada por Gómez (2018, pág. 77) en su investigación, los nanomateriales se dividen en cuatro categorías principales, de acuerdo con las pautas establecidas por la Agencia del Medio Ambiente de los EE. UU. En primer lugar, destacan los nanomateriales carbonosos, representados por fullerenos de forma elipsoidal o esférica, y nanotubos con estructuras cilíndricas. En segunda instancia, emergen los nanomateriales metálicos, englobando puntos cuánticos, nanopartículas de oro y plata, así como óxidos metálicos, como el dióxido de titanio. En paralelo, los dendrímeros son polímeros nanométricos caracterizados por ramificaciones, múltiples extremos de cadena y cavidades internas propicias para albergar moléculas terapéuticas. Finalmente, se resalta la relevancia de los compuestos nano híbridos, que integran nanopartículas entre sí o con materiales de mayor tamaño.

### 2.2.5. *Nanopartículas*

Las nanopartículas, son aquellas que se ubican en la escala de un nanómetro, es decir, una milmillonésima parte ( $10^{-9}$ ) de un metro, presentan dimensiones inferiores a aproximadamente 100 nm en al menos una dirección. En concordancia, (Gómez, 2018) define a las nanopartículas como “estructuras con tamaños inferiores a 100 nanómetros (es decir  $1 \times 10^{-7}$  metros), que pueden

ser sintetizadas a partir de diferentes materiales, incluyendo metales” (pág. 77). Debido a su tamaño extremadamente reducido, estas partículas exhiben propiedades físicas y químicas singulares en comparación con el material a granel (Techarang y Siripinyanond, 2023, pág. 5).

La producción de nanopartículas puede llevarse a cabo mediante diversas técnicas, como métodos físicos, por ejemplo, evaporación y condensación térmica, así como mediante síntesis química. En este último proceso, se emplea un precursor metálico, un agente reductor y un agente estabilizador. Adicionalmente, la síntesis de nanopartículas también puede lograrse mediante procesos biológicos (Techarang y Siripinyanond, 2023, pág. 5).

#### *2.2.5.1. Síntesis de nanopartículas*

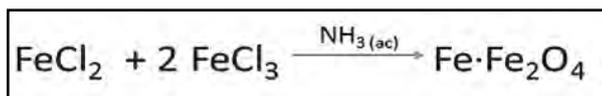
Los principales métodos de síntesis para nanomateriales se dividen en dos enfoques; el enfoque "de arriba hacia abajo", que se basa principalmente en métodos físicos, donde se abordan técnicas como la evaporación térmica, la formación de conglomerados gaseosos, la implantación iónica, la deposición química de vapor y la activación mecánica o mecano síntesis. En contraste, el enfoque "de abajo hacia arriba", se centra en métodos químicos, como el método coloidal, la reducción fotoquímica y radiación-química, la irradiación con microondas, las reacciones en dendrímeros, la síntesis solvotérmica y el método sol-gel (Zanella, 2012, pág. 69).

#### *2.2.5.2. Aplicaciones de la nanotecnología*

La nanotecnología se aplica en una variedad de campos, incluyendo medicina, ingeniería, informática, mecánica, física y química. En el área del agua, se destacan los filtros porosos a escala nanométrica, capaces de eliminar virus y bacterias, así como tecnologías de separación eléctrica para eliminar sales y metales pesados. En cuanto a energía, las celdas solares se presentan como una opción prometedora para generar energía limpia. En informática, los nanotubos semiconductores están siendo empleados para crear circuitos de computación más rápidos y eficientes. En agricultura, la nanoestructuración de agroquímicos y el diseño de materiales funcionales para mejorar sistemas de irrigación y embalaje. Además, en medicina, la nanotecnología está siendo explorada para el tratamiento de enfermedades como el cáncer, el VIH/sida, la diabetes y la osteoartritis. Estos avances reflejan el impacto significativo de la nanotecnología en diversas áreas, ofreciendo soluciones innovadoras y eficaces para una variedad de desafíos (Medina et al., 2015, pág. 49).

### 2.2.5.3. Nanopartículas de hierro

Las nanopartículas de hierro, originadas a partir del óxido de hierro, constituyen partículas minúsculas en la escala nanométrica que exhiben características magnéticas inherentes. La estructura magnética de estas partículas puede diversificarse en formas tales como la hematita ( $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), la maghemita ( $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Es crucial reconocer que las condiciones de síntesis desempeñan un rol determinante en la configuración final del óxido de hierro, lo que influye directamente en sus propiedades magnéticas y en su aplicabilidad en diversos campos tecnológicos y científicos (Starbird y Montero, 2015, pág. 45).



**Ilustración 2-5:** Reacción para la formación de óxido de hierro

**Fuente:** Starbird y Montero, 2015, pág. 45.

En la Ilustración 2-5 se muestra la reacción para la formación de nanopartículas de óxido de hierro a partir de cloruros de hierro y amoníaco en medio etanólico. Inicialmente, los cloruros de hierro,  $\text{FeCl}_2$  y  $\text{FeCl}_3$ , actúan como precursores de hierro en el proceso de síntesis. La adición de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) desempeña un papel crucial al proporcionar las condiciones adecuadas para la formación y estabilización de las nanopartículas. La reacción conduce a la formación de nanopartículas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), que exhiben propiedades magnéticas y pueden encontrar aplicaciones en una amplia gama de campos, incluyendo la medicina, la ingeniería de materiales y la catálisis. Es importante tener en cuenta que la composición química y la estructura cristalina de las nanopartículas resultantes pueden ser influenciadas por diversos factores, como la concentración de reactivos, la temperatura y el tiempo de reacción (Starbird y Montero, 2015, pág. 46).

### 2.2.6. Mercurio

El mercurio (Hg) según (Muñoz y Arango, 2020, pág. 282), es un elemento químico perteneciente al grupo de los metales de transición, destaca por ser el único metal líquido a temperatura ambiente, con una densidad de 13.456 g/ml a 25 °C y una presión de vapor de 0.00212 mm Hg a 20 °C. Su uso predominante se encuentra en la extracción artesanal y a pequeña escala del oro, donde se emplea para separarlo de las rocas mediante la formación de una amalgama, facilitando así su extracción con relativa eficiencia. Este procedimiento implica la adherencia del mercurio al oro,

seguida por la evaporación del mercurio mediante calor, dejando como residuo el oro puro (Español, 2012, pág. 2).

Desde el punto de vista toxicológico, el mercurio se presenta en tres formas: elemental, inorgánica (sales de mercurio y óxido de mercurio) y orgánica. Cada una de estas variantes químicas posee diferentes niveles de toxicidad, aunque todas comparten la capacidad de afectar los sistemas neuronales humanos. A pesar de su utilidad en diversas aplicaciones, el mercurio es altamente perjudicial para el medio ambiente y la salud humana. De hecho, es catalogado como uno de los diez productos químicos más preocupantes para la salud pública por la Organización Mundial de la Salud (OMS), debido a su persistencia y efectos nocivos (Organización Panamericana de la Salud, 2022).

### **2.2.7. Adsorción**

La adsorción, según (Izquierdo et al., 2004, pág. 158), se manifiesta como un fenómeno impulsado por la atracción entre las moléculas en la superficie del sólido (adsorbente) y las moléculas presentes en el fluido (adsorbato). Este proceso es caracterizado por la transferencia de materia de una fase a otra, concentrándose en la superficie, lo que lo clasifica adecuadamente como un fenómeno superficial (Weber et al. 1979). La distintiva rapidez y eficacia de este proceso lo destacan, superando de manera significativa a otras tecnologías utilizadas en el tratamiento de aguas residuales, como señalan (Mohamed y Abu-Dief, 2018, pág. 378).

#### **2.2.7.1. Tipos de adsorción**

En términos generales, se distinguen tres tipos de adsorción que varían según la naturaleza de la atracción entre el soluto y el adsorbente. La adsorción de tipo eléctrico se manifiesta cuando los iones de una sustancia específica se acumulan en la superficie del material adsorbente debido a la atracción electrostática entre ellos. Por otro lado, en la fisisorción o atracción de fuerzas de Van der Waals, la molécula adsorbida no ocupa un lugar fijo en la superficie, sino que puede desplazarse dentro de la interfaz. Asimismo, cuando el adsorbato establece enlaces fuertes en los centros activos del adsorbente, se clasifica como adsorción de carácter químico. Es relevante señalar que, en la fisisorción, la especie adsorbida mantiene su naturaleza química, mientras que en la quimisorción, la especie adsorbida experimenta una transformación generando una entidad diferente (Tejada et al., 2015; Appelo y Postma, 2004).

### *2.2.7.2. Variables que afectan la adsorción*

El proceso de adsorción se ve impactado por diversos factores. En primera instancia, la temperatura puede tener consecuencias negativas, ya que un aumento considerable podría modificar la textura del adsorbente y deteriorar el material, resultando en una disminución de su capacidad de sorción. Asimismo, el pH de la solución acuosa desempeña un papel fundamental en los procesos de adsorción de metales en distintos adsorbentes. Los iones de hidrógeno presentes en el agua actúan como competidores fuertes en el proceso de adsorción, influyendo en la distribución de las especies químicas del metal en la solución y en la naturaleza de la superficie adsorbente. En relación con cationes y aniones, los valores de pH ejercen efectos divergentes: la adsorción de cationes se ve favorecida en pH superiores a 4.5, mientras que la adsorción de aniones prefiere valores bajos de pH, entre 1.5 y 4.

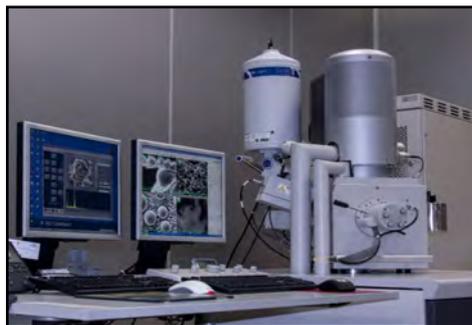
Otro factor crucial es el tamaño de las partículas del adsorbente, ya que la adsorción tiene lugar principalmente en el interior de las partículas, en las paredes de los poros. Esto implica que la cantidad de adsorbato que puede ser retenida está directamente relacionada con el volumen de las partículas. Partículas más pequeñas presentan un área superficial mayor y, en consecuencia, una capacidad de sorción superior debido a su mayor área de superficie interna por unidad de masa. Finalmente, la presencia de otros iones en la solución puede afectar el proceso de adsorción, ya que estos iones pueden competir con el metal por las zonas de sorción en el adsorbente. La existencia de iones adicionales puede disminuir la eficacia de la adsorción al desplazar al metal de las áreas de interés en el adsorbente (Tejada et al., 2015, pág. 112).

### **2.2.8. Pruebas de caracterización**

#### *2.2.8.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM)*

La observación de nanopartículas según (Gómez, 2018, pág. 76), requiere el uso de microscopios de alta resolución, como el electrónico de barrido como se muestra en la Ilustración 2-6. El Microscopio Electrónico de Barrido, comúnmente abreviado como SEM por sus siglas en inglés (Scanning Electron Microscopy), constituye una herramienta fundamental en el ámbito científico y tecnológico actual debido a su capacidad para revelar con gran detalle las características intrínsecas de los materiales bajo estudio. Su funcionamiento se fundamenta en la interacción entre un haz de electrones de alta energía y la muestra, lo que permite obtener información detallada sobre su estructura cristalina, morfología superficial, porosidad y composición química. Esta técnica, ampliamente utilizada en la investigación de diversas áreas, desde semiconductores

y nanopartículas hasta la modificación de productos comerciales y la catálisis heterogénea (Clavijo 2013).



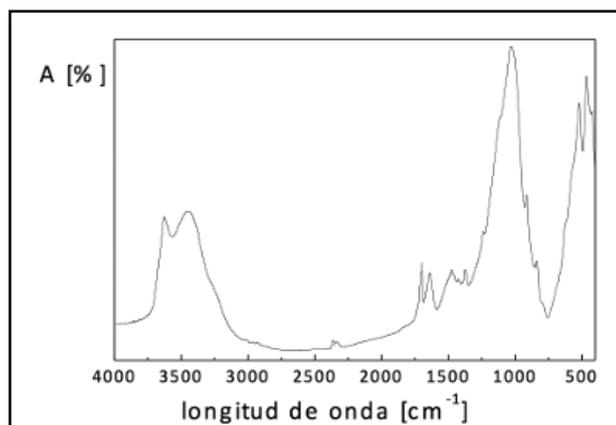
**Ilustración 2-6:** Microscopio electrónico de barrido

**Fuente:** CIMAV, 2023.

Antes de analizar una muestra en el SEM, es crucial prepararla recubriéndola con un metal conductor como el oro o carbón, lo que le confiere propiedades conductoras necesarias para interactuar con los electrones acelerados. Este proceso permite la obtención de imágenes detalladas en dos o tres dimensiones, revelando la topografía, morfología, composición química y otras propiedades de la muestra. El SEM ofrece una resolución excepcional de hasta 2 nanómetros, permitiendo un análisis completo de la estructura y composición de los materiales estudiados, además de una profundidad de campo significativa y la capacidad de obtener imágenes tridimensionales (Clavijo, 2013; Castroviejo, 2020).

#### 2.2.8.2. Espectroscopía de infrarrojo (IR)

La espectroscopia infrarroja (IR) es un método analítico que estudia la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Se centra en la capacidad de las moléculas para vibrar y rotar a diferentes frecuencias, conocidas como modos vibracionales normales. Cuando una molécula vibra y rota, puede absorber energía de fotones en el rango infrarrojo si la frecuencia de la radiación coincide con la del movimiento vibracional. Los enlaces químicos presentan movimientos vibracionales naturales dentro de este rango, lo que permite que ciertos modos vibracionales se sincronicen con un haz infrarrojo, resultando en un intercambio de energía entre el haz y las moléculas. Cada enlace químico muestra un comportamiento específico en función del tipo atómico, entorno químico y concentración de enlaces, lo que se refleja en bandas características en el espectro infrarrojo. Estas bandas, que representan los movimientos de vibración de los enlaces moleculares, constituyen la firma única de cada compuesto, lo que facilita su identificación y caracterización mediante la espectroscopia infrarroja (Piqué y Vázquez, 2012, pág. 63).



**Ilustración 2-7:** Absorción [%A] versus longitud de onda [ $\text{cm}^{-1}$ ]

**Fuente:** Piqué y Vázquez, 2012, pág. 63.

En la Ilustración 2-7, la absorbancia se muestra como una función de la longitud de onda, lo que permite visualizar cómo varía la absorción de la muestra en diferentes rangos de energía. Esta gráfica es comúnmente utilizada en espectroscopia infrarroja para identificar patrones de absorción característicos de diferentes compuestos químicos, lo que facilita su análisis y caracterización.

### 2.2.8.3. Espectroscopía de absorción atómica

Según Gallegos et al (2012, pág. 19), la espectroscopia de absorción atómica (AAS), conocida como Atomic Absorption Spectroscopy en inglés, se caracteriza por su alta sensibilidad y especificidad, atribuibles a las estrechas líneas de absorción atómica, que oscilan entre 0.002 y 0.005 nm, y a las transiciones electrónicas únicas para cada elemento. En esta técnica instrumental, los átomos presentes en la llama absorben selectivamente la radiación, lo que resulta en una disminución de la señal detectada, la cual se convierte en una medida de la concentración del elemento de interés. Es ampliamente empleada en la determinación del contenido de metales pesados en muestras acuosas debido a su precisión y fiabilidad (Pérez y Alvarado, 2018, pág. 389).

La espectroscopia de absorción atómica con llama se destaca como un método altamente utilizado para la cuantificación de metales en diversas matrices, siendo especialmente relevante en la química ambiental. Esta técnica ofrece la ventaja de proporcionar mediciones específicas y sensibles, lo que la convierte en una herramienta invaluable para el análisis de muestras en laboratorios ambientales y de investigación. Su popularidad se debe a su capacidad para determinar con precisión la concentración de elementos específicos, así como a su facilidad de uso y operación (Peñaloza et al., 2023; Razmilic, 1993).

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Enfoque de investigación

La presente investigación, al ser de naturaleza experimental, adoptará un enfoque metodológico de tipo cuantitativo y descriptivo con el propósito de validar la hipótesis previamente planteada. En este, se llevará a cabo la determinación de la capacidad de adsorción de los nanocompuestos, con el objetivo de evaluar su eficacia en la eliminación de mercurio. La naturaleza cuantitativa de este enfoque proporcionará datos concretos y estadísticamente significativos, ofreciendo así una base sólida para el análisis exhaustivo de los resultados obtenidos.

#### 3.2. Nivel de investigación

Esta investigación tiene como objetivo la obtención de biocarbón magnético impregnado con nanopartículas de hierro, utilizando residuos orgánicos de Tocte (*Juglans neotropica*) y Aguacate (*Persea americana*) como materias primas. El enfoque metodológico abarcará análisis detallados de la adsorción del biocarbón magnético impregnado resultante, con el propósito específico de maximizar su capacidad de remoción de mercurio en soluciones acuosas. Se empleará un diseño experimental longitudinal para identificar condiciones óptimas, destacando la naturaleza descriptiva de la investigación. Se espera que los resultados contribuyan al avance en la adsorción de metales pesados, ofreciendo una solución ecológica y eficiente, con posibles implicaciones en la gestión de residuos orgánicos y la preservación del agua.

#### 3.3. Diseño de investigación

##### 3.3.1. Identificación de variables

La Tabla 3-1 destaca las variables clave identificadas en el contexto de la investigación, alineándose con el enfoque metodológico de este estudio. Se ha concebido una clasificación que distingue entre variables independientes y dependientes, fundamentada en el cumplimiento de la hipótesis planteada. En este marco, se busca comprender y cuantificar el impacto de las variables independientes, como la concentración inicial de Hg y el tiempo, sobre las variables dependientes, tales como los parámetros fisicoquímicos (pH y conductividad) y la concentración final de mercurio.

**Tabla 3-1:** Identificación de variables

<b>Variab</b> <b>les</b>	<i>Independiente</i>	Concentración inicial de Hg
		Tiempo
	<i>Dependiente</i>	Parámetros fisicoquímicos <ul style="list-style-type: none"><li>• pH</li><li>• Conductividad</li></ul>
		Concentración final de Hg

Realizado por: Cuenca, 2024.

### 3.3.1.1. Variables Independientes

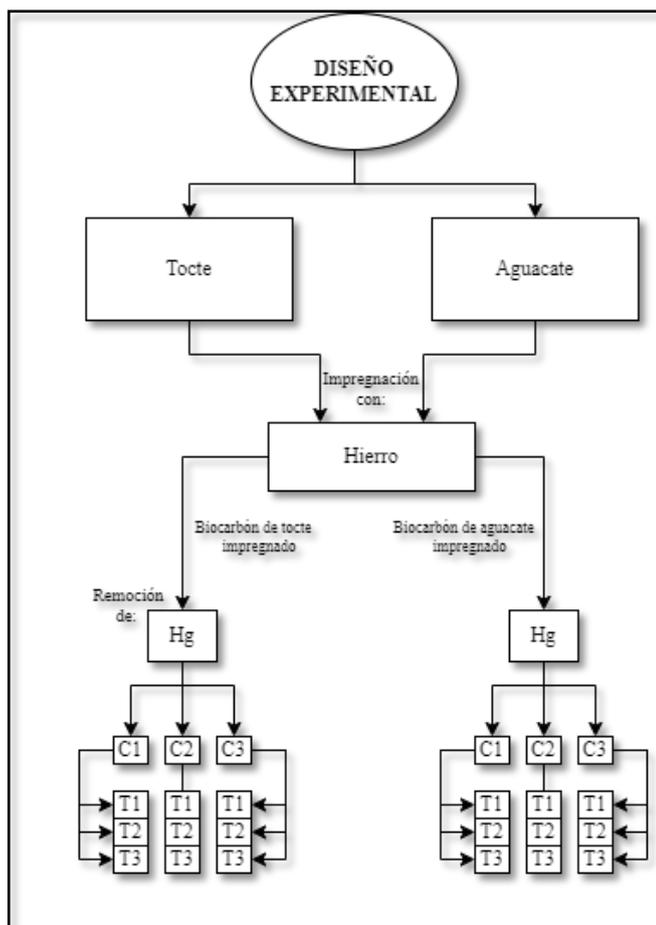
- **Concentración inicial de Hg:** Representa la cantidad inicial de Hg presente en las soluciones acuosas que se utilizarán en el proceso de adsorción, la manipulación de esta variable permite evaluar cómo afecta la capacidad de adsorción del biocarbón magnético impregnado.
- **Tiempo:** Representa el intervalo o duración del proceso de adsorción, mediante su variación se permitirá estudiar la evolución de la capacidad de adsorción a lo largo del tiempo y determinar el tiempo óptimo para la máxima eficiencia.

### 3.3.1.2. Variables Dependientes

- **Parámetros Fisicoquímicos:** Este conjunto de variables incluye el pH y la conductividad de las soluciones. Su estudio permitirá observar cómo estos parámetros cambian a lo largo del proceso proporcionando información valiosa sobre las condiciones en las cuales se lleva a cabo la adsorción.
- **Concentración final de Hg:** Representa la cantidad de Hg que permanece en la solución después de la adsorción, su evaluación permitirá cuantificar la capacidad de remoción del biocarbón en la eliminación de Hg.

### 3.3.2. Diseño experimental de la investigación

En el marco de la presente investigación, se implementará un diseño experimental tri factorial 2x3x3 para evaluar la concentración final de Hg, pH y conductividad; mientras se mantiene constante la concentración inicial de Hg y el tiempo. Cabe destacar que el diseño experimental se llevará a cabo bajo condiciones aleatorias, asegurando así una asignación equitativa y representativa de los distintos ensayos.



**Ilustración 3-1:** Diseño experimental

Realizado por: Cuenca, 2024.

Para el desarrollo de este diseño experimental, se empleará tocte y aguacate como materia prima, las cuales, tras un proceso de acondicionamiento previo, serán impregnadas con óxidos de hierro y mediante la pirólisis, se inducirá la formación de nanopartículas, dando lugar al biocarbón magnético. Se empleará 1 gramo de este biocarbón de cada origen para la construcción de filtros, mismos que se pondrán en contacto con soluciones acuosas de mercurio de concentraciones 1 ppm (C1), 10 ppm (C2) y 50 ppm (C3). Se recogerán muestras en intervalos predefinidos de 30 minutos (T1), 60 minutos (T2) y 120 minutos (T3) para un total de 9 combinaciones o puntos de ensayo para cada materia prima como se muestra en la Ilustración 3-1.

**Tabla 3-2:** Diseño experimental

Diseño experimental				
<i>Variables independientes</i>		<i>Parámetros de control</i>		<i>Variable dependiente</i>
Concentración inicial de Hg	Tiempo	pH	Conductividad	Concentración final de Hg
ppm	minutos	-	μS	-
1	30			
	60			
	120			
10	30			
	60			
	120			
50	30			
	60			
	120			

Realizado por: Cuenca, 2024

El diseño experimental mostrado en Tabla 3-2 será implementado tanto para el tocte como para el aguacate. Es relevante destacar que este procedimiento se reproducirá en tres ocasiones (triplicado) en cada análisis, generando, de esta manera, un conjunto de 27 muestras por cada tipo de materia prima y un conjunto total de 54 muestras para la concentración final de Hg, mismas que serán destinadas a una evaluación estadística pormenorizada de los resultados obtenidos. De igual manera de obtendrán 54 muestras tanto para pH como para conductividad de cada una de las materias primas, obteniendo así un total de 324 datos. Por último, el boceto completo para la recolección de tos datos experimentales se presenta en el ANEXO A, mientras que la metodología aplicada del diseño se muestra en el ANEXO G.

### 3.4. Tipo de estudio

La investigación adopta un enfoque cuantitativo de tipo experimental con un diseño longitudinal. Este estudio se llevará a cabo al azar para garantizar la validez y la representatividad de las observaciones. La metodología cuantitativa permitirá la medición precisa de variables como la concentración inicial de mercurio, el tiempo, el pH y la conductividad, mientras que el diseño experimental posibilitará la manipulación de variables independientes, para analizar su impacto en las variables dependientes. Mientras que la naturaleza descriptiva del estudio facilitará una comprensión detallada de los procesos involucrados en la obtención de biocarbón magnético impregnado con nanopartículas de hierro

### **3.5. Métodos, técnicas e instrumentos de investigación**

#### **3.5.1. Lugar de realización**

La investigación se llevará a cabo en los laboratorios de análisis instrumental, química analítica y operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo (ESPOCH). Situada en Riobamba, una ciudad en la región interandina de la Sierra Ecuatoriana, específicamente en el kilómetro 1 ½ de la Panamericana Sur, con coordenadas geográficas de 1°39'20" S y 78°40'42" W, a una altitud de 2817 metros sobre el nivel del mar. Además, el análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) se realizará tanto en el laboratorio de materiales de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH como en el laboratorio de materiales de la Universidad Técnica de Ambato (UTA).

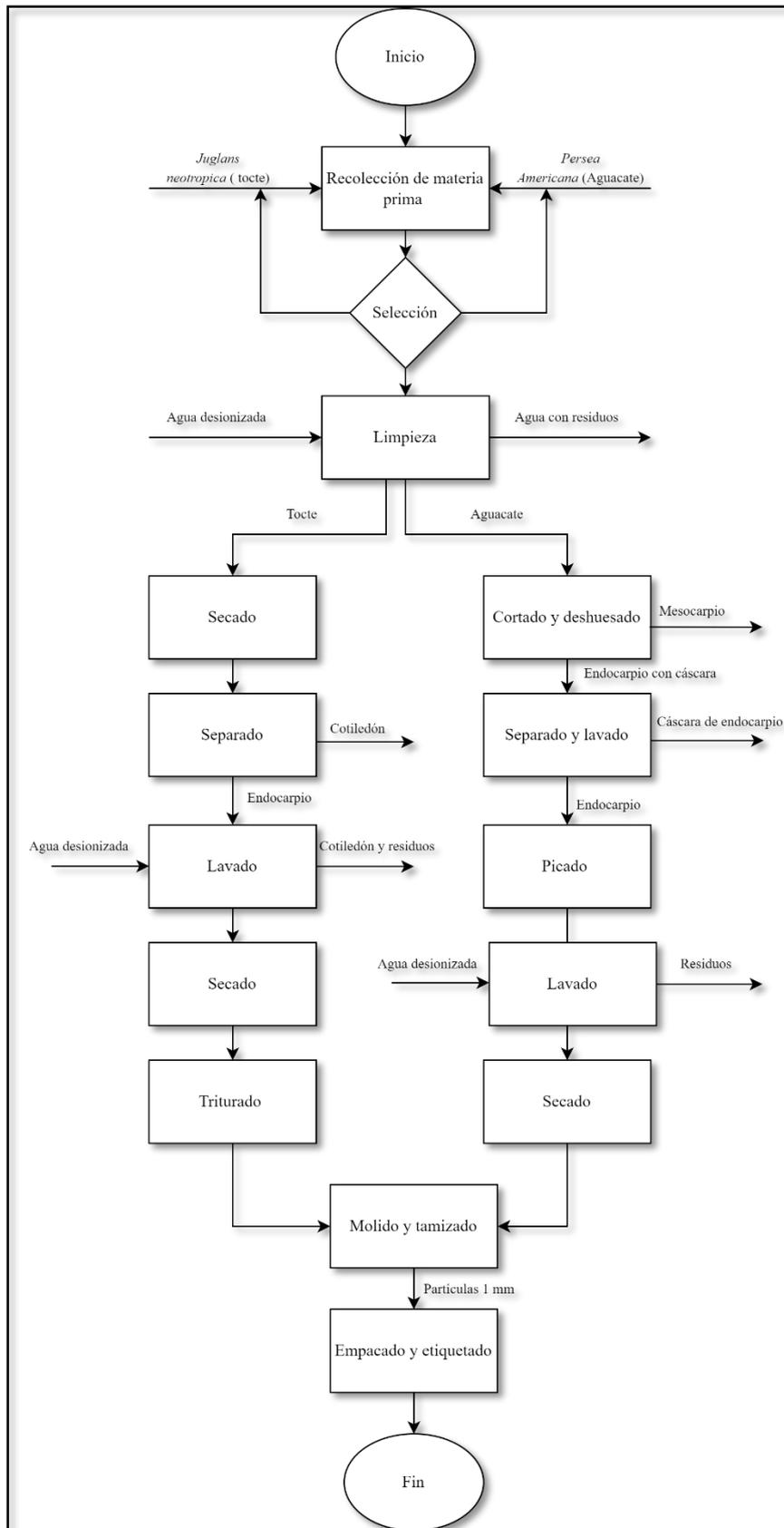
### 3.5.2. Técnica de acondicionamiento de la materia prima para la obtención del biocarbón

En el proceso de acondicionamiento de la materia prima mostrado en la Tabla 3-3 y en la Ilustración 3-2, se implementó la metodología propuesta por el equipo de (Peng et al., 2022, pág. 2). Además, se llevaron a cabo ajustes adaptativos considerando las características fundamentales del tratamiento de las materias primas, tomando como referencia los resultados obtenidos en las pruebas piloto.

**Tabla 3-3:** Técnica de acondicionamiento de la materia prima

Materiales, equipos y reactivos	Procedimiento		Referencias
	Tocte (ANEXO B)	Aguacate (ANEXO C)	
<p><b>Materiales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Residuos de tocte y aguacate</li> <li>Fundas Ziploc</li> <li>Martillo</li> <li>Cuchillo</li> </ul> <p><b>Equipos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Molino manual</li> <li>Molino de martillos</li> <li>Estufa</li> <li>Tamiz</li> </ul> <p><b>Reactivos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Agua desionizada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recolectar, seleccionar y limpiar el tocte con agua desionizada.</li> <li>Secar la materia prima en una estufa a 80 °C por 24h.</li> <li>Retirar el cotiledón del haciendo uso de un martillo.</li> <li>Lavar con agua desionizada el endocarpio obtenido retirando los sobrantes de cotiledón.</li> <li>Secar la materia prima en una estufa a 80 °C por 24h.</li> <li>Triturar la materia prima en el molino de martillos.</li> <li>Moler y tamizar la materia prima triturada hasta obtener un tamaño de partícula aproximada a 1 mm.</li> <li>Empacar y etiquetar en fundas ziploc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recolectar, seleccionar y limpiar el aguacate con agua desionizada.</li> <li>Cortar el aguacate y retirar endocarpio (pepa).</li> <li>Retirar la cáscara de la pepa y lavar con agua desionizada</li> <li>Picar en cubos de aproximadamente 1 cm de lado las pepas de aguacate.</li> <li>Lavar las pepas con agua desionizada.</li> <li>Secar la materia prima en una estufa a 80 °C por 24 h.</li> <li>Moler y tamizar la materia prima hasta obtener un tamaño de partícula aproximada a 1mm.</li> <li>Empacar y etiquetar en fundas ziploc.</li> </ul>	<p>(Peng et al., 2022, pág. 2)</p>

Realizado por: Cuenca, 2024.



**Ilustración 3-2:** Diagrama de flujo del acondicionamiento de la materia prima  
 Realizado por: Cuenca, 2024.

### 3.5.3. Técnica para la obtención de biocarbón impregnado con nanopartículas de hierro.

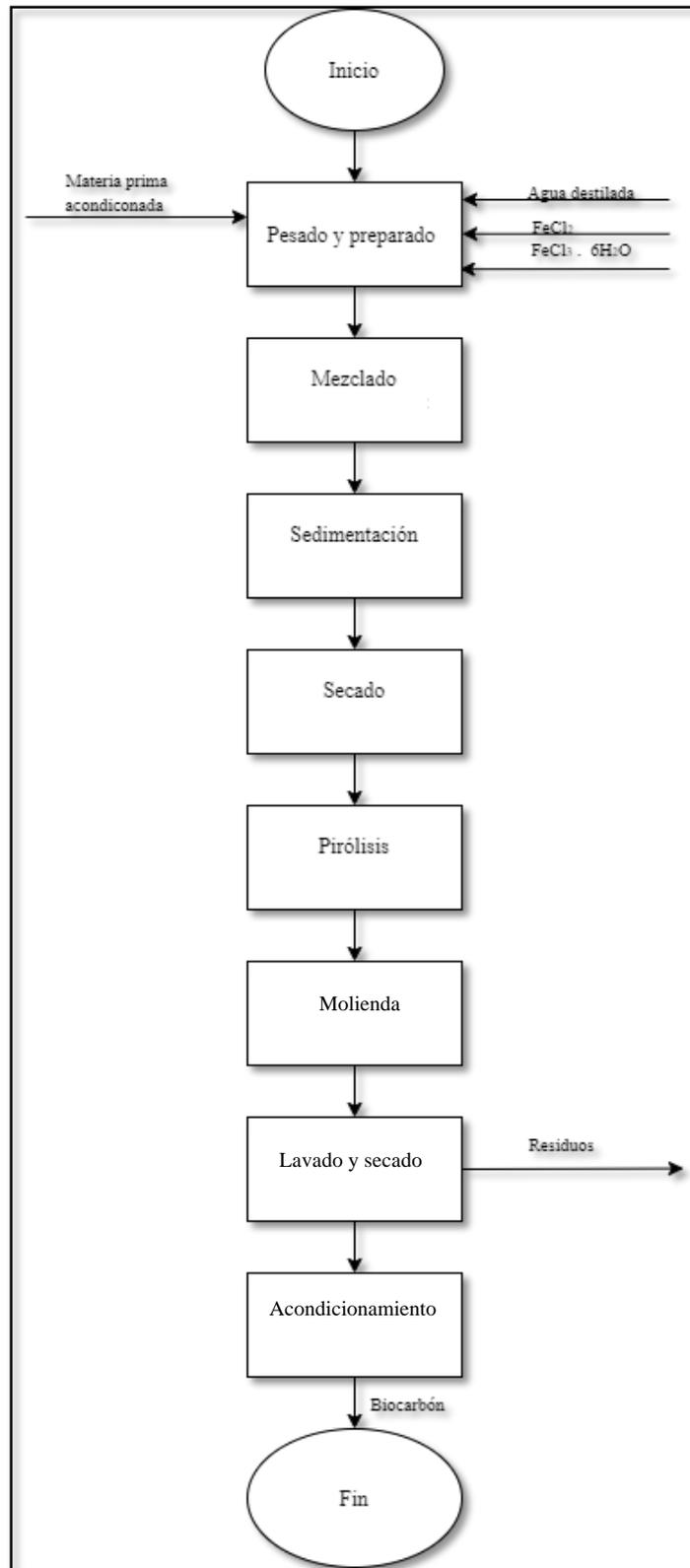
La obtención de biocarbón impregnado con nanopartículas de hierro descrito en la Tabla 3-4 y en la Ilustración 3-3, se llevó a cabo siguiendo la metodología establecida por el equipo de (Peng et al., 2022, pág. 2). No obstante, se realizaron ajustes sustanciales al incorporar elementos complementarios provenientes de las pautas delineadas por el grupo de investigación de (Mascolo et al, 2013, pág. 5552), así como las adaptaciones derivadas de las pruebas piloto llevadas a cabo.

**Tabla 3-4:** Técnica para la obtención de biocarbón impregnado con nanopartículas de hierro

Materiales, equipos y reactivos	Procedimiento	Métodos de ensayos
<p><b>Materiales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Polvo de residuos de tocte o aguacate</li> <li>• Erlenmeyers - 1000 mL</li> <li>• Tamiz</li> <li>• Mortero y pistilo</li> <li>• Matraz KITASATO</li> <li>• Embudo Buchner</li> <li>• Papel Filtro</li> </ul> <p><b>Equipos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza analítica</li> <li>• Shaker</li> <li>• Estufa</li> <li>• Equipo de pirólisis</li> <li>• Agitador</li> <li>• Bomba al vacío</li> </ul> <p><b>Reactivos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cloruro Ferroso (FeCl<sub>2</sub>)</li> <li>• Cloruro de hierro III hexahidratado (FeCl<sub>3</sub> 6H<sub>2</sub>O)</li> </ul>	<p>Se realiza el mismo procedimiento para:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Biocarbón de tocte impregnado con nanopartículas de hierro (BCT-NFe)</li> <li>• Biocarbón de aguacate impregnado con nanopartículas de hierro (BCA-NFe)</li> </ul> <hr/> <p style="text-align: center;"><b>Impregnación con hierro (ANEXO D)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pesar 200 g de materia prima; 6,74 g de FeCl<sub>2</sub>; 17,4 g de FeCl<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O</li> <li>• Preparar una solución de FeCl<sub>2</sub> (6,74 g/L) y una de FeCl<sub>3</sub> 6H<sub>2</sub>O (17,4 g/L)</li> <li>• Introducir 200 g de materia prima en un Erlenmeyer de 1000 mL que contenga 500 mL de la solución de FeCl<sub>2</sub> y 500 mL de la solución de FeCl<sub>3</sub> 6H<sub>2</sub>O</li> <li>• Mezclar en el Shaker a una velocidad de 200 rpm por 24 horas a 25 °C.</li> <li>• Sedimentar por 65 horas a temperatura ambiente</li> <li>• Secar en un horno estufa a 105 °C por 48 horas</li> </ul> <hr/> <p style="text-align: center;"><b>Pirólisis (ANEXO E)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar pirólisis bajo flujo de N<sub>2</sub> a 450 °C por 3 horas de la muestra seca.</li> </ul> <hr/> <p style="text-align: center;"><b>Acondicionamiento primario (ANEXO F)</b></p>	<p style="text-align: center;">(Peng et al., 2022, pág.2) (Mascolo et al., 2013, pág. 5552)</p>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua desionizada</li> <li>• NaOH 1M</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moler el biocarbón impregnado con un mortero y pistilo</li> <li>• Lavar 3 veces con agua desionizada el biocarbón impregnado haciendo uso de un sistema de filtración (Bomba al vacío, Kitasato, embudo buchner y papel filtro)</li> <li>• Secar el biocarbón impregnado en una estufa a 105°C por 3 horas</li> </ul>	
	<p><i>Acondicionamiento secundario (ANEXO F)</i></p>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aforar 5g de carbón impregnado a 100 mL de agua desionizada</li> <li>• Agregar gota a gota NaOH a la dilución (debe estar en constante agitación) hasta llegar a un pH de 10.</li> <li>• Sedimentar por 24 horas</li> <li>• Lavar 3 veces con agua desionizada</li> <li>• Secar en una estufa a 70 °C por 4 horas</li> <li>• Moler el biocarbón impregnado con un mortero y pistilo</li> <li>• Tamizar el biocarbón impregnado por una malla</li> <li>• Empacar el biocarbón en fundas ziploc</li> <li>• Etiquetar</li> </ul>	

Realizado por: Cuenca, 2024



**Ilustración 3-3:** Diagrama de flujo para obtención de BCT-Fe y BCA-Fe

Realizado por: Cuenca, 2024.

### 3.5.4. Técnica para la caracterización de biocarbón

En la Tabla 3-5 se presentan las técnicas empleadas para llevar a cabo el análisis fisicoquímico del biocarbón impregnado con nanopartículas de hierro provenientes del tocte y aguacate basada en la metodología implementada por (Tamay, 2019, págs. 31-40). En esta sección, se detalla minuciosamente el método utilizado, así como los materiales, equipos, reactivos y el procedimiento completo a seguir. Además, se incluyen las ecuaciones necesarias para realizar los cálculos pertinentes. Asimismo, las imágenes y fotografías relacionadas con estas metodologías están incluidas en el Anexo H para proporcionar una referencia visual completa.

**Tabla 3-5:** Técnica para el análisis fisicoquímico de biocarbón impregnado

No	Método de evaluación	Materiales, equipos y reactivos	Procedimiento	Cálculos
1	Humedad	<p><b>Materiales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vidrio reloj</li> <li>• Espátula</li> </ul> <p><b>Equipos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza analítica</li> <li>• Termobalanza</li> </ul> <p><b>Reactivos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestras de biocarbón impregnado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pesar en un vidrio reloj 3 g de cada muestra de biocarbón impregnando</li> <li>• Colocar la muestra en la termobalanza por un tiempo de 3 minutos.</li> <li>• Reportar los datos</li> </ul>	No se realizan cálculos para esta prueba

2	pH	<p><b>Materiales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vidrio reloj</li> <li>• Espátula</li> <li>• Varilla de agitación</li> <li>• Vaso de precipitación de 100 mL</li> </ul> <p><b>Equipos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plancha de agitación magnética</li> <li>• Magento de agitación</li> <li>• Balanza analítica</li> <li>• pH-metro</li> </ul> <p><b>Reactivos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua desionizada</li> <li>• Muestras de carbón impregnado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pesarse en un vidrio reloj 5 g de cada muestra a analizar</li> <li>• Medir 50 mL de agua desionizada en un vaso de precipitación de 100 mL</li> <li>• Adicionar la muestra al vaso y agitar con ayuda de la varilla por un minuto</li> <li>• Colocar un magneto de agitación en la mezcla</li> <li>• Agitar durante 15 minutos a velocidad constante utilizando una plancha de agitación magnética</li> <li>• Medir el pH de la mezcla utilizando el pH- metro</li> <li>• Reportar los datos</li> </ul>	No se realizan cálculos para esta prueba
3	Cenizas totales	<p><b>Materiales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Espátula</li> <li>• Vidrio reloj</li> <li>• Crisoles</li> <li>• Pinzas</li> </ul> <p><b>Equipos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza analítica</li> <li>• Estufa</li> <li>• Mufla</li> <li>• Desecador</li> </ul> <p><b>Reactivos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestras de carbón impregnado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Talar los crisoles limpios en la estufa por 2 horas a 105°C.</li> <li>• Pasar los crisoles al desecador por 20 minutos.</li> <li>• Pesarse los crisoles vacíos.</li> <li>• Pesarse 2 g de muestra en el crisol y llevarlos a la estufa a 105 ° C por 30 minutos para la precalcificación.</li> <li>• Colocar en un mufla a 200°C por 2 horas, luego de este tiempo incrementar la temperatura a 500°C durante 8 horas</li> <li>• Colocar las muestras en el desecador por una hora</li> <li>• Pesarse las muestras</li> <li>• Reportar los datos y realizar los cálculos</li> </ul>	<p><b>Ecuación 3-1 : Porcentaje de cenizas totales.</b></p> $\% \text{ Cenizas Totales} = \frac{m_{cc} - m_{cm}}{m_{cv} - m_{cm}} * 100$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>m_{cc}</math> representa la masa en gramos del crisol con cenizas</li> <li>• <math>m_{cv}</math> representa la masa en gramos del crisol con la muestra</li> <li>• <math>m_{cm}</math> representa la masa en gramos del crisol vacío</li> </ul>

5	<b>Densidad aparente</b>	<b>Materiales</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Espátula</li> <li>• Probeta</li> </ul> <b>Equipos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza analítica</li> </ul> <b>Reactivos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua desionizada</li> <li>• Muestras de carbón impregnado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pesarse la probeta de 10 mL vacía</li> <li>• Agregar la cantidad necesaria de muestra hasta llegar a los 10 mL</li> <li>• Pesarse la probeta llena</li> <li>• Reportar los datos</li> <li>• Realizar los cálculos</li> </ul>	<b>Ecuación 3-2:</b> Densidad aparente.  $Densidad\ aparente = \frac{m_s}{V_p}$ Donde: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>m_s</math> masa de sólido</li> <li>• <math>V_p</math> Volumen final</li> </ul>
6	<b>Densidad real</b>	<b>Materiales</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Espátula</li> <li>• Vidrio reloj</li> </ul> <b>Equipos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza analítica</li> <li>• Picnómetro</li> </ul> <b>Reactivos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua desionizada</li> <li>• Muestras de carbón impregnado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pesarse el picnómetro vacío</li> <li>• Pesarse 2 gramos de muestras en un vidrio reloj</li> <li>• Agregar la muestra y aforar con agua desionizada</li> <li>• Pesarse el picnómetro aforado</li> <li>• Reportar los datos</li> <li>• Realizar los cálculos</li> </ul>	<b>Ecuación 3-3:</b> Densidad real.  $Densidad\ real = \frac{P_m - P_v}{P_L + P_m - P_v - P_{mL}}$ Donde: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>P_m</math> peso del picnómetro con muestra</li> <li>• <math>P_v</math> peso del picnómetro vacío</li> <li>• <math>P_L</math> peso del picnómetro con agua desionizada</li> <li>• <math>P_{mL}</math> peso del picnómetro y la muestra aforada</li> </ul>
7	<b>Porosidad</b>	Esta prueba se lleva a cabo con base en los resultados obtenidos de las mediciones de densidad aparente y real.		<b>Ecuación 3-4:</b> Porosidad.  $P = 1 - \frac{Densidad\ aparente}{Densidad\ real}$ Donde: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>P</math> representa la porosidad</li> </ul>

Realizado por: Cuenca, 2024.

### 3.5.5. Caracterización técnica del biocarbón

La Tabla 3-6 detalla las técnicas utilizadas en la caracterización técnica del biocarbón impregnado con nanopartículas de hierro obtenidas del tocte y aguacate. Se empleará la espectroscopía de infrarrojo y la microscopía electrónica de barrido para este propósito. Además, en el punto 3 de la tabla se describe el uso de Espectrometría de Absorción Atómica para analizar las muestras resultantes de los tratamientos aplicados, lo cual permitirá determinar la concentración final de mercurio. También, las imágenes y fotografías correspondientes a estas técnicas se encuentran adjuntas en el Anexo I para una referencia visual detallada.

**Tabla 3-6:** Caracterización técnica del biocarbón

No	Método de evaluación	Materiales, equipos y reactivos	Procedimiento
1	<b>Espectroscopía de infrarrojo (IR)</b>	<b>Materiales</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Espátula</li> </ul> <b>Equipos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Espectrofotómetro de infrarrojo</li> </ul> <b>Reactivos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestras de carbón impregnado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tomar una muestra representativa colocar en la cámara de muestras del espectrofotómetro de infrarrojo.</li> <li>• Iniciar el análisis espectroscópico mediante el espectrofotómetro de infrarrojo.</li> <li>• Registrar los espectros de absorción infrarroja de la muestra en un rango de longitudes de onda específicas.</li> <li>• Reportar los datos espectroscópicos obtenidos, incluyendo los espectros de absorción infrarroja</li> </ul>
8	<b>Microscopía electrónica de barrido (SEM)</b>	<b>Materiales</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Espátula</li> <li>• Cinta doble faz</li> </ul> <b>Equipos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Microscopio electrónico de barrido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tomar una muestra representativa y colocarla en una cinta de doble faz para su manipulación posterior.</li> <li>• Montar la muestra en el portaobjetos y cubrirla con un recubrimiento conductor, típicamente oro, utilizando un equipo especializado.</li> <li>• Transferencia al Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)</li> </ul>

		<b>Reactivos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Muestras de carbón impregnado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Retirar el portaobjetos del equipo de recubrimiento y colocarlo en el portaobjetos del microscopio electrónico de barrido.</li> <li>Análisis de las Muestras</li> <li>Registrar y reportar los datos obtenidos durante el análisis, incluyendo imágenes y resultados de análisis químicos.</li> </ul>
9	<b>Espectrometría de Absorción atómica (AAS)</b>	<b>Materiales</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Espátula</li> </ul> <b>Equipos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Espectrómetro de absorción atómica</li> </ul> <b>Reactivos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Muestras</li> <li>Borohidruro de Sodio</li> <li>Soluciones estándar de Mercurio</li> <li>Gas argón en grado reactivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acondicionar las muestras para el análisis a una temperatura ambiente.</li> <li>Preparar soluciones estándar de mercurio con concentraciones conocidas y bien definidas para su uso en la calibración del equipo.</li> <li>Realizar la curva de calibración en el espectrofotómetro de absorción atómica utilizando las soluciones estándar preparadas.</li> <li>Introducir las muestras en el espectrofotómetro de absorción atómica y llevar a cabo las mediciones de absorción para determinar la concentración de mercurio presente en cada muestra.</li> <li>Registrar y procesar los datos obtenidos durante el análisis de las muestras.</li> <li>Reportar los resultados del análisis, incluyendo las concentraciones de mercurio determinadas en cada muestra.</li> </ul>

Realizado por: Cuenca, 2024.

### 3.6. Porcentaje de remoción de Hg

Para calcular el porcentaje de remoción, se emplearán los datos de concentración inicial de mercurio (1, 10 y 50 ppm) y los resultados de la espectroscopia de absorción atómica, que proporciona la concentración final de mercurio en ppb después de los tratamientos. Se realizará la conversión de ppb a ppm (1 ppm = 1000 ppb) para asegurar la consistencia de unidades. Posteriormente, se calculará el porcentaje de remoción utilizando la concentración final de mercurio mediante la Ecuación 3-1 y se procederá a su respectivo análisis.

**Ecuación 3-5:** % de remoción de mercurio.

$$\% R = \frac{C_f - C_i}{C_i} * 100\%$$

Donde:

- $C_f$  representa la concentración final de mercurio
- $C_i$  representa la concentración inicial de mercurio
- %  $R$  representa el porcentaje de remoción de mercurio

### 3.7. Análisis estadístico

#### 3.7.1. Método de análisis estadístico

Para llevar a cabo el análisis estadístico en este trabajo de investigación, se implementará el análisis de varianza (ANOVA). Este método se empleará para comparar las variaciones entre los datos obtenidos de cada repetición, con el objetivo de determinar la significancia de los resultados y tomar decisiones sobre la aceptación o rechazo de la hipótesis nula. El ANOVA proporcionará una evaluación robusta de las diferencias entre grupos, permitiendo una interpretación precisa de la influencia de las variables independientes, como la concentración inicial de Hg y el tiempo, en la variable dependiente de concentración final de Hg.

#### 3.7.2. Herramientas de análisis

Para llevar a cabo el análisis estadístico, se empleará Minitab, Excel y RStudio como herramientas integrales para validar el método estadístico utilizado en la investigación. Estos softwares no solo facilitarán la aplicación rigurosa de técnicas estadísticas, sino que también desempeñarán un papel esencial en la representación gráfica de las dinámicas observadas.

## CAPÍTULO IV

### 4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo, se exponen y analizan los resultados de la caracterización fisicoquímica y técnica del biocarbón obtenido a partir de tocte y aguacate, impregnado con nanopartículas de hierro. Asimismo, se presentan los resultados derivados del diseño experimental propuesto, incluyendo datos sobre el pH, conductividad y concentración final de mercurio. Esta última variable es fundamental para llevar a cabo los cálculos destinados a determinar el porcentaje de remoción de mercurio tras la aplicación de los tratamientos. A partir de estos resultados, se realiza un análisis estadístico ANOVA con el fin de identificar el tratamiento más efectivo y validar los datos obtenidos. Además, se analizan los resultados del pH y la conductividad para observar el comportamiento de las medias en los diferentes niveles de cada factor. Por último, se presentarán las conclusiones de este capítulo, las cuales se basan en los resultados obtenidos y los objetivos planteados inicialmente.

#### 4.1. Resultados de la caracterización física y química del biocarbón impregnado

A continuación, en la Tabla 4-1 se exponen los resultados de la caracterización fisicoquímica tanto del BCT-NFe como del BCA-NFe, obtenidos siguiendo la metodología detallada en la Tabla 3-5. Esta metodología aborda la evaluación de diversos parámetros como la humedad, el pH, las cenizas totales, la densidad aparente y real, así como la porosidad, mediante las ecuaciones especificadas en la misma tabla. Además, se incluyen los cálculos realizados para la obtención de estos resultados en las secciones posteriores del estudio. Cabe destacar que en el ANEXO H se encuentran disponibles fotografías de las pruebas realizadas para evidenciar los resultados obtenidos.

**Tabla 4-1:** Resultados de la caracterización fisicoquímica de BCT-NFe y BCA-NFe

Característica	BCT-NFe	BCA-NFe	Unidad
Humedad	3.98	2.81	%
pH	6.19	6.42	-
Cenizas Totales	3.79	3.85	%
Densidad aparente	0.58	0.54	g/mL
Densidad real	0.95	0.86	g/mL
Porosidad	0.38	0.37	g/mL

Realizado por: Cuenca, 2024.

Según los datos de la Tabla 4-1, al comparar los parámetros de humedad entre el BCT-NFe y el BCA-NFe, se evidencia que el BCT-NFe exhibe un valor de 3.98, superando al BCA-NFe, que registra un valor de 2.81. En cuanto al pH, el BCT-NFe muestra un valor de 6.19, catalogado

como ligeramente ácido, mientras que el BCA-NFe presenta un pH de 6.42, indicando una tendencia más neutra. Respecto al porcentaje de cenizas totales, se observa que el BCT-NFe y el BCA-NFe muestran valores cercanos, con 3.79 y 3.85, respectivamente. La densidad aparente también muestra similitudes entre ambos, con valores de 0.58 y 0.54, respectivamente, para BCT-NFe y BCA-NFe. Asimismo, la densidad real exhibe proximidad, con 0.95 para BCT-NFe y 0.86 para BCA-NFe. Finalmente, al calcular la porosidad basada en la densidad real y aparente, se obtiene un valor de 0.38 para el BCT-NFe y 0.37 para el BCA-NFe, demostrando una diferencia mínima entre ambos materiales en este aspecto.

#### 4.1.1. Humedad

**Tabla 4-2:** Resultados de la caracterización de humedad para BCT-NFe y BCA-NFe

Característica	BCT-NFe	BCA-NFe	Unidad
Humedad	3.98	2.81	%

Realizado por: Cuenca, 2024

En la Tabla 4-2 se puede observar que el contenido de humedad del BCT-NFe es de 3.98%, mientras que para el BCA-NFe es menor, con un valor de 2.81%. Estos hallazgos están respaldados por el estudio de (Smith, 2022, págs. 32-38), donde se encontró que la humedad del biocarbón derivado de raquis de banano fue del 2.97%, lo que valida nuestros resultados sobre la humedad. Además, de acuerdo con (Cantos et al., 2018, págs. 400-422), un menor contenido de humedad favorece el aprovechamiento energético en la cinética de pirólisis. Por tanto, BCA-NFe tendría mayor aprovechamiento energético con respecto a BCT-NFe.

#### 4.1.2. pH

**Tabla 4-3:** Resultados de la caracterización de pH para BCT-NFe y BCA-NFe

Característica	BCT-NFe	BCA-NFe	Unidad
pH	6.19	6.42	-

Realizado por: Cuenca, 2024

Los resultados de pH se presentan en la Tabla 4-3, donde se observan valores de 6.19 y 6.42 para BCT-NFe y BCA-NFe, respectivamente. Estos resultados se sitúan dentro de los rangos establecidos por (Pérez et al., 2021, pág. 4), quien indica que los valores oscilan entre 4.46 y 6.75 en su investigación de biocarbón de ápices de caña de azúcar. En concordancia, una investigación reciente realizada por (Zapien et al., 2023, págs. 6-7), se obtuvo un pH de 9 para biocarbón con nanopartículas de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> en la adsorción de Cr (VI) en soluciones acuosas. Sin embargo, su estudio señala que el proceso de adsorción es más eficiente en entornos ácidos. Por tanto, los resultados

ácidos que hemos obtenido, al situarse por debajo de 7 (el pH neutro), sugieren que BCT-NFe y BCA-NFe son efectivos en la adsorción, más aún BCT-NFe al tener un carácter más ácido. Además, según (Tejada et al., 2015, pág. 113), la adsorción de cationes tiende a favorecerse en pH superiores a 4.5, tal como se observa en los resultado.

### 4.1.3. Cenizas totales

#### 4.1.3.1. Cálculo de cenizas totales

Los cálculos fueron llevados a cabo para determinar el porcentaje de cenizas totales utilizando la Ecuación 3-1 tanto para BCT-NFe como para BCA-NFe, por medio de los datos obtenidos que se presentan a continuación:

<b>BCT-NFe</b>	<b>BCA-NFe</b>
<i>Datos:</i>	<i>Datos:</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>m_{cc} = 42.0352 \text{ g}</math></li> <li>• <math>m_{cv} = 43.9713 \text{ g}</math></li> <li>• <math>m_{cm} = 41.9590 \text{ g}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>m_{cc} = 43.1495 \text{ g}</math></li> <li>• <math>m_{cv} = 45.0978 \text{ g}</math></li> <li>• <math>m_{cm} = 43.0725 \text{ g}</math></li> </ul>
$\% \text{ Cenizas Totales} = \frac{42.0352 \text{ g} - 41.9590 \text{ g}}{43.9713 \text{ g} - 41.9590 \text{ g}} * 100$	$\% \text{ Cenizas Totales} = \frac{43.2853 \text{ g} - 43.0725 \text{ g}}{45.0725 \text{ g} - 43.0725 \text{ g}} * 100$
<b>Cenizas Totales = 3.79 %</b>	<b>Cenizas Totales = 3.85 %</b>

#### 4.1.3.2. Resultados de cenizas totales

**Tabla 4-4:** Resultados de la caracterización de cenizas totales para BCT-NFe y BCA-NFe

Característica	BCT-NFe	BCA-NFe	Unidad
Cenizas Totales	3.79	3.85	%

Realizado por: Cuenca, 2024

Los resultados de cenizas totales, tal como se expresan en la Tabla 4-4, revelan valores de 3.79 % y 3.85 % para BCT-NFe y BCA-NFe, respectivamente. Según (Trujillo et al., 2019, pág. 489), que el contenido de cenizas está influenciado por el tipo de biomasa utilizada. En este contexto el estudio realizado por (Tamay, 2019, págs. 35-40), donde se examinó el biocarbón obtenido a partir de la corona de piña, se obtuvo un valor de 3.39 %, muy similar a los encontrados en este estudio validando los mismos. Además, según (Zamora, 2010, pág. 49), un alto contenido de cenizas indica una mayor presencia de residuos, lo cual es indeseable en el carbón ya que puede afectar el proceso de adsorción. Por lo tanto, los resultados sugieren que BCT-NFe es más adecuado que

BCT-NFe para alcanzar un alto rendimiento de adsorción y no presentan un exceso significativo de impurezas que pudieran afectar las pruebas técnicas de caracterización.

#### 4.1.4. Densidad

##### 4.1.4.1. Densidad aparente

Los cálculos fueron llevados a cabo para determinar la densidad aparente utilizando la Ecuación 3-2 tanto para BCT-NFe como para BCA-NFe, por medio de los datos obtenidos que se presentan a continuación:

BCT-NFe	BCA-NFe
<b>Datos:</b>	<b>Datos:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>m_s = 2.8241 \text{ g}</math></li> <li>• <math>V_p = 10 \text{ mL}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>m_s = 5.3625 \text{ g}</math></li> <li>• <math>V_p = 10 \text{ mL}</math></li> </ul>
$Densidad\ aparente = \frac{3.7632 \text{ g}}{10 \text{ mL}}$	$Densidad\ aparente = \frac{3.2594 \text{ g}}{10 \text{ mL}}$
$Densidad\ aparente = 0.38 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$	$Densidad\ aparente = 0.32 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$

##### 4.1.4.2. Densidad real

Los cálculos fueron llevados a cabo para determinar la densidad real utilizando la Ecuación 3-3 tanto para BCT-NFe como para BCA-NFe, por medio de los datos obtenidos que se presentan a continuación:

BCT-NFe	BCA-NFe
<b>Datos:</b>	<b>Datos:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>P_m = 16.0507 \text{ g}</math></li> <li>• <math>P_v = 14.3251 \text{ g}</math></li> <li>• <math>P_L = 20.0745 \text{ g}</math></li> <li>• <math>P_{mL} = 19.9874 \text{ g}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>P_m = 16.2969 \text{ g}</math></li> <li>• <math>P_v = 14.3251 \text{ g}</math></li> <li>• <math>P_L = 20.0745 \text{ g}</math></li> <li>• <math>P_{mL} = 19.7562 \text{ g}</math></li> </ul>
<b>Densidad real</b>	<b>Densidad real</b>
$= \frac{16.0507 \text{ g} - 14.3251 \text{ g}}{20.0745 + 16.0507 - 14.3251 - 19.9874}$	$= \frac{16.2969 \text{ g} - 14.3251 \text{ g}}{20.0745 + 16.2969 - 14.3251 - 19.7562}$
$Densidad\ real = 0.95 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$	$Densidad\ real = 0.86 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$

**Tabla 4-5:** Resultados de la caracterización de densidad para BCT-NFe y BCA-NFe

Característica	BCT-NFe	BCA-NFe	Unidad
Densidad aparente	0.58	0.54	g/mL
Densidad real	0.95	0.86	g/mL

Realizado por: Cuenca, 2024

En la Tabla 4-5 se presentan los resultados de la densidad aparente y real para BCT-NFe y BCA-NFe. En comparación con el estudio realizado por (Ordóñez, 2017, págs. 65-70), donde se determinó una densidad aparente de 0.8168 mg/mL, este valor es mayor que los obtenidos para BCT-NFe y BCA-NFe, que fueron de 0.58 y 0.54, respectivamente. Sin embargo, el mismo estudio indica que una densidad aparente alta se correlaciona con una mayor capacidad de biosorción. Por lo tanto, según esta relación, los resultados obtenidos no indicarían una alta capacidad de biosorción en concordancia con la densidad para BCT-NFe y BCA-NFe.

Por otro lado, al comparar los resultados de la densidad real obtenidos por (Tamay, 2019, págs. 35-40), que fue de 0.895 g/mL, se observa una similitud notable con los valores encontrados para BCT-NFe 0.95 y aún más con BCA-NFe 0.86 g/mL, lo que sugiere que los resultados son validados.

#### 4.1.5. Porosidad

Los cálculos se realizaron para determinar la porosidad utilizando la Ecuación 3-4 tanto para BCT-NFe como para BCA-NFe, basándose en los resultados de la densidad aparente y real como se muestra a continuación:

BCT-NFe	BCA-NFe
<i>Datos:</i>	<i>Datos:</i>
<ul style="list-style-type: none"><li>Densidad aparente = 0.58 g</li><li>Densidad real = 0.28 g</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Densidad aparente = 0.54 g</li><li>Densidad real = 0.27 g</li></ul>
$P = 1 - \frac{0.38 \text{ g}}{0.95 \text{ g}}$	$P = 1 - \frac{0.32 \text{ g}}{0.86 \text{ g}}$
$P = 0.60$	$P = 0.63 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$

**Tabla 4-6:** Resultados de la caracterización de porosidad para BCT-NFe y BCA-NFe

Característica	BCT-NFe	BCA-NFe	Unidad
Porosidad	0.60	0.63	g/mL

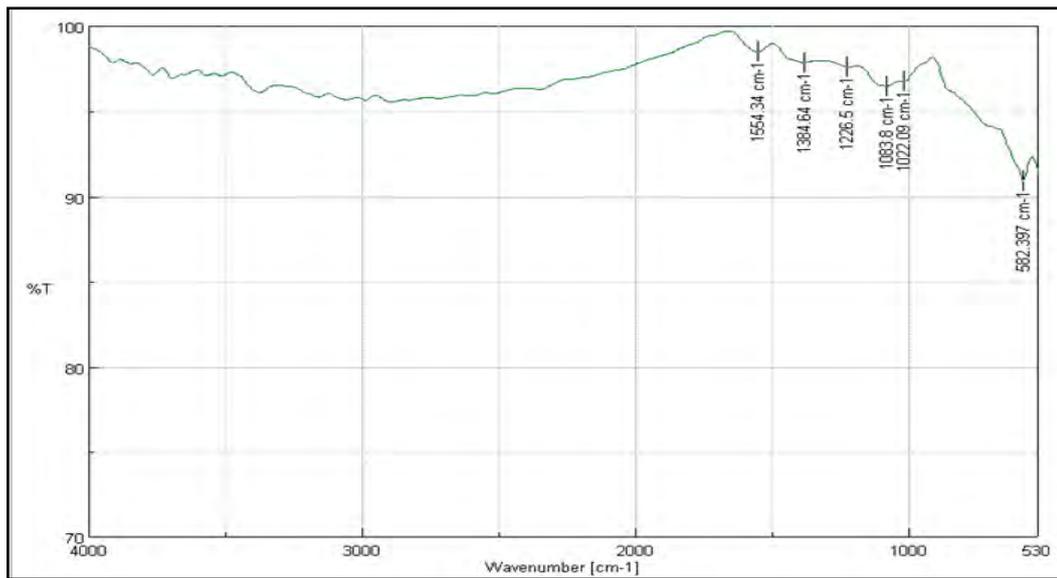
Realizado por: Cuenca, 2024

Los resultados obtenidos, tal como se reflejan en la Tabla 4-6, muestran valores de densidad de 0.60 g/mL para BCT-NFe y 0.63 g/mL para BCA-NFe. Estos valores pueden ser comparados con el estudio realizado por (Pintado, 2018, pág. 72), donde se obtuvo una densidad de 0.641 g/mL validando los resultados obtenidos. Además, en el estudio de (Tamay, 2019, págs. 35-40) se encontró un resultado de 0.704 g/mL, lo que sugiere que valores altos de porosidad están asociados con una mayor cantidad de sitios activos y, por ende, una mayor capacidad de adsorción. En este sentido, se observa que BCA-NFe presenta una mayor porosidad que BCT-NFe.

## 4.2. Resultados de la caracterización técnica del biocarbón impregnado

### 4.2.1. Espectroscopía de infrarrojo (IR)

#### 4.2.1.1. Espectroscopía de infrarrojo de tocte



**Ilustración 4-1:** Picos de IR al biocarbón de tocte

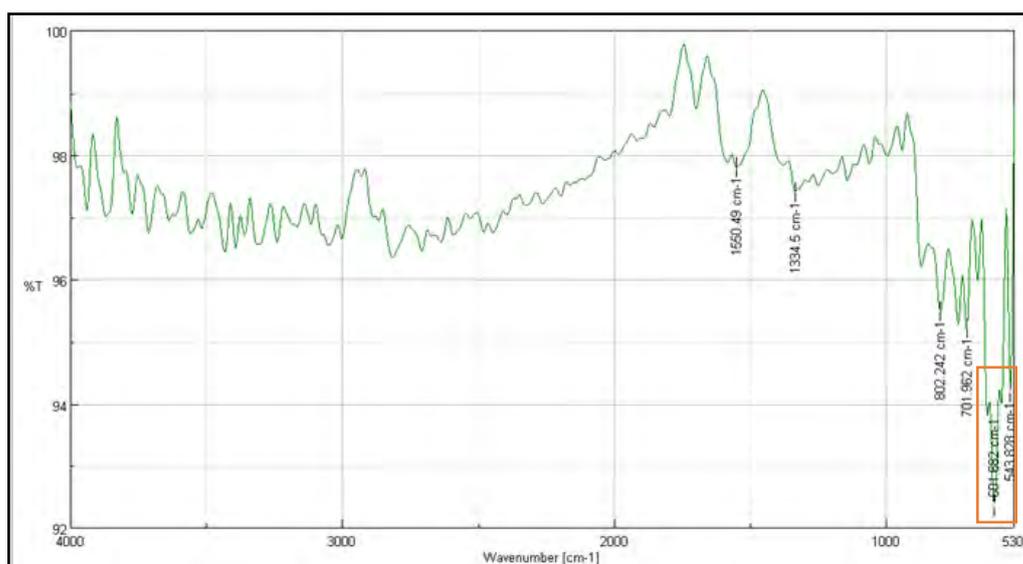
Realizado por: Cuenca, 2024.

**Tabla 4-7:** Datos de las pulsaciones del biocarbón de tocte

Wavenumber [cm <sup>-1</sup> ]	%T
1554.34	98.4795
1384.64	97.8526
1226.5	97.6019
1083.8	96.4907
1022.09	96.7599
582.397	90.9031

Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-1 se presentan los picos resultantes de la prueba de espectroscopia infrarroja (IR) realizada al biocarbón de tocte, y las correspondencias con respecto a esta ilustración se detallan en la Tabla 4-7, donde se presenta el número de onda en relación con el porcentaje de transmitancia. Destaca un pico de absorción prominente en el número de onda de 1554.34 cm<sup>-1</sup>, asociado comúnmente con los enlaces dobles carbono-carbono (C=C) presentes en compuestos orgánicos insaturados. Además, se observan otros picos relevantes en los números de onda de 1384.64 cm<sup>-1</sup> y 1226.5 cm<sup>-1</sup>, relacionados con los enlaces C-H y C-O, respectivamente, típicos de grupos funcionales alifáticos y alcoholes presentes en la muestra. También se identifican picos en 1083.8 cm<sup>-1</sup> y 1022.09 cm<sup>-1</sup>, atribuibles a los enlaces C-O y C-N, característicos de grupos funcionales presentes en compuestos alcohólicos y aminas, respectivamente. Finalmente, se encuentra un pico de absorción más bajo en 582.397 cm<sup>-1</sup>, posiblemente relacionado con los enlaces C-C presentes en compuestos orgánicos saturados.



**Ilustración 4-2:** Picos de IR al BCT-NFe

Realizado por: Cuenca, 2024.

**Tabla 4-8:** Datos de las pulsaciones del BCT-NFe

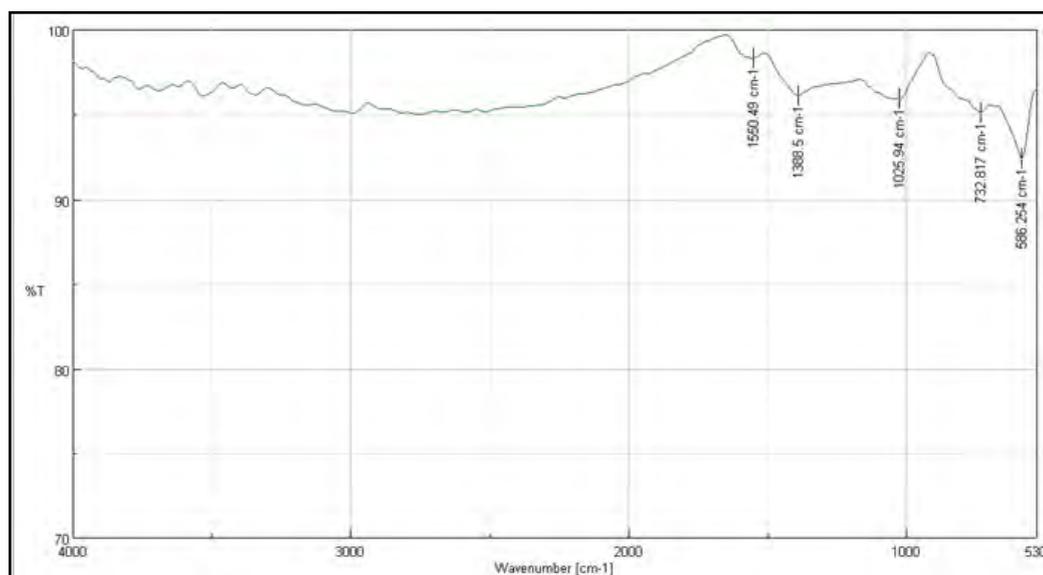
Wavenumber [cm <sup>-1</sup> ]	%T
1550.49	97.799
1334.5	97.4049
802.242	95.4765
701.962	95.2109
601.682	92.3369
543.828	94.1703

Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-2 se presentan los picos resultantes de la prueba de espectroscopia infrarroja (IR) realizada al BCT-NFe, y las correspondencias con respecto a esta ilustración se detallan en la tabla 8-4, donde se presenta el número de onda en relación con el porcentaje de transmitancia. El pico de absorción más destacado se localiza en el número de onda de 1550.49 cm<sup>-1</sup>, indicativo de enlaces C=C, lo que sugiere la presencia de compuestos orgánicos insaturados. Se observa otro pico relevante en 1334.5 cm<sup>-1</sup>, que podría asociarse con los enlaces C-H presentes en alquenos y alcanos. Además, se identifican picos en 802.242 cm<sup>-1</sup>, 701.962 cm<sup>-1</sup>, 601.682 cm<sup>-1</sup> y 543.828 cm<sup>-1</sup>, los cuales corresponden a varias vibraciones y enlaces característicos de diferentes grupos funcionales, tales como C-O, C-H y C-C.

Al comparar la Ilustración 4-1 con la Ilustración 4-2, se aprecia claramente el cambio en los picos antes y después de la impregnación con las nanopartículas de hierro. Para corroborar la presencia de hierro en forma de magnetita Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, se examinaron las bandas vibracionales relevantes. Según (Mata et al., 2022, pág. 2), estas bandas se encuentran en el rango de 540 a 570 cm<sup>-1</sup>, mientras que (Cabrera, 2017, pág. 54), reporta que las bandas vibracionales de la magnetita se sitúan entre 580 y 640 cm<sup>-1</sup>. Los resultados descritos en la Tabla 4-8, específicamente las longitudes de onda de 601.682 y 543.828 cm<sup>-1</sup>, se encuentran dentro de los rangos mencionados en las investigaciones anteriores, lo que confirma la presencia del enlace metal-oxígeno (Fe-O). Por lo tanto, se puede concluir que en el BCT-NFe se encuentra presente magnetita.

#### 4.2.1.2. Espectroscopía de infrarrojo de aguacate



**Ilustración 4-3:** Picos de IR al biocarbón de aguacate

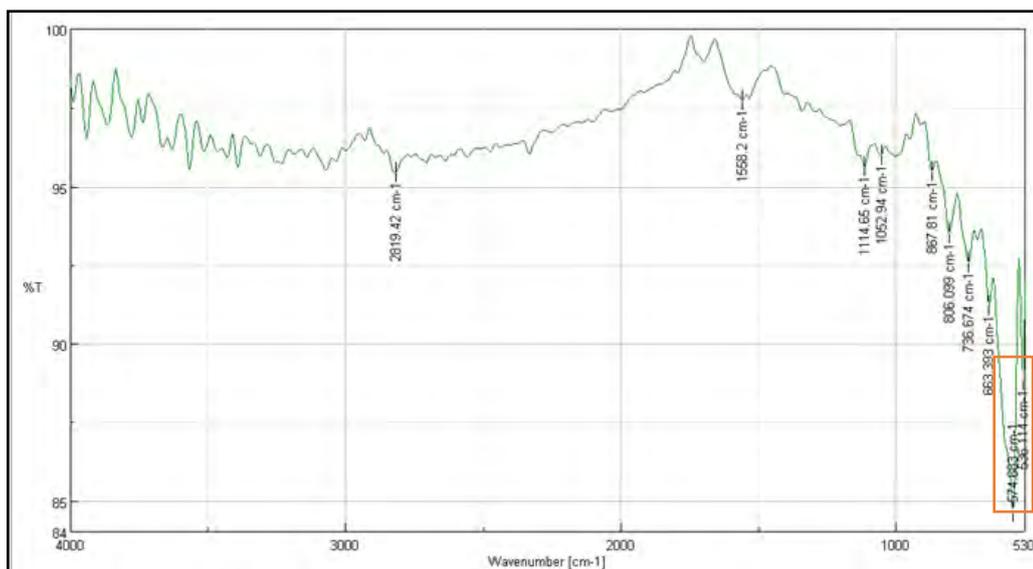
Realizado por: Cuenca, 2024.

**Tabla 4-9:** Datos de las pulsaciones del biocarbón de aguacate

Wavenumber [cm-1]	%T
1550.49	98.3405
1388.5	96.1238
1025.94	95.9013
732.817	95.1187
586.254	92.4143

Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-3 se presentan los picos resultantes de la prueba de espectroscopia infrarroja (IR) realizada al BCT-NFe, y las correspondencias con respecto a esta ilustración se detallan en la Tabla 4-9, donde se presenta el número de onda en relación con el porcentaje de transmitancia. El pico de absorción más prominente se registra en el número de onda de 1550.49  $\text{cm}^{-1}$ , lo que sugiere la presencia de enlaces C=C, característicos de compuestos orgánicos insaturados en la muestra. Otro pico relevante se presenta en 1388.5  $\text{cm}^{-1}$ , posiblemente asociado con los enlaces C-H presentes en alquenos o alcanos. Además, se identifican picos adicionales en 1025.94  $\text{cm}^{-1}$ , 732.817  $\text{cm}^{-1}$  y 586.254  $\text{cm}^{-1}$ , los cuales podrían corresponder a diversos grupos funcionales, tales como C-O, C-H y C-C, características de varios compuestos orgánicos.



**Ilustración 4-4:** Picos de IR al BCA-NFe

Realizado por: Cuenca, 2024.

**Tabla 4-10:** Datos de las pulsaciones del BCA-NFe

Wavenumber [cm-1]	%T
2819.42	95.4217
1558.2	97.7411
1114.65	95.6117
1052.94	95.9785
867.81	95.4562
806.099	93.5005
736.674	92.5656
663.393	91.19
574.683	84.5943
536.114	88.8325

Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-4 se presentan los picos resultantes de la prueba de espectroscopia infrarroja (IR) realizada al BCT-NFe, y las correspondencias con respecto a esta ilustración se detallan en la Tabla 4-10, donde se presenta el número de onda en relación con el porcentaje de transmitancia. El pico de absorción más prominente se encuentra en el número de onda de 2819.42 cm<sup>-1</sup>, asociado típicamente con los enlaces C-H, lo que sugiere la presencia de grupos metileno (-CH<sub>2</sub>) en la muestra. Además, se observa otro pico significativo en 1558.2 cm<sup>-1</sup>, posiblemente relacionado con los enlaces C=C, característicos de compuestos orgánicos insaturados. Asimismo, se identifican picos en 1114.65 cm<sup>-1</sup>, 1052.94 cm<sup>-1</sup>, 867.81 cm<sup>-1</sup>, 806.099 cm<sup>-1</sup>, 736.674 cm<sup>-1</sup>, 663.393 cm<sup>-1</sup>, 574.683 cm<sup>-1</sup> y 536.114 cm<sup>-1</sup>, los cuales podrían corresponder a diferentes vibraciones de grupos funcionales, como C-O, C-H y C-C, presentes en diversos compuestos orgánicos.

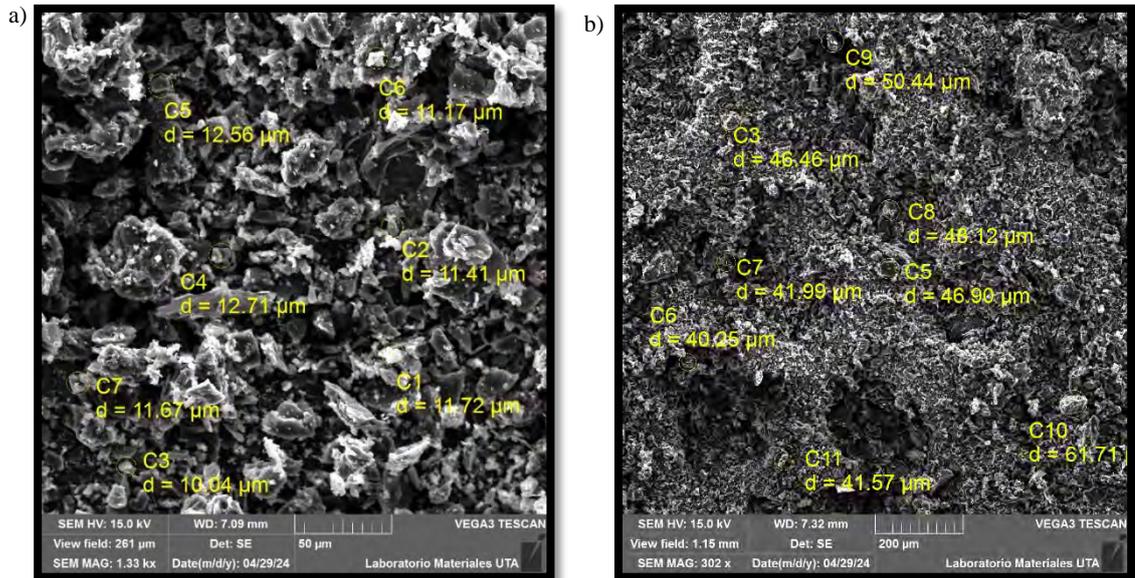
Al comparar las Ilustración 4-3 e Ilustración 4-4, se evidencia un cambio notable en los picos antes y después de la impregnación con las nanopartículas de hierro. Se llevó a cabo un análisis de las bandas vibracionales pertinentes para verificar la existencia de hierro en forma de magnetita  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . En concordancia, (Mata et al., 2022, pág. 2) indica que estas bandas se ubican entre 540 y 570  $\text{cm}^{-1}$ , mientras que (Cabrera, 2017, pág. 54) indica un rango de 580 a 640  $\text{cm}^{-1}$ . Los resultados de la tabla 10-4, particularmente las longitudes de onda de 574.683 y 536.114  $\text{cm}^{-1}$ , coinciden con los rangos mencionados en las investigaciones previas, lo que confirma la presencia del enlace metal-oxígeno (Fe-O). Por consiguiente, se puede inferir que en el BCA-NFe existe magnetita.

#### **4.2.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

Se realizó un análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) en muestras de biocarbón de tocte y aguacate, tanto antes como después de la impregnación con nanopartículas de hierro (BCT-NFe y BCA-NFe). Para el biocarbón sin impregnar, se empleó el SEM para medir el diámetro de las partículas a distancias de 50, 100 y 200  $\mu\text{m}$ , de acuerdo con el nivel de enfoque correspondiente. Respecto a las muestras impregnadas (BCT-NFe y BCA-NFe), se identificaron dos áreas distintas: la Zona 1, caracterizada por estructuras de mayor tamaño, y la Zona 2, con partículas más pequeñas. Este procedimiento permitió obtener una comprensión integral de la morfología y distribución de las partículas en las muestras. Asimismo, se llevó a cabo un análisis elemental mediante espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDS) para evaluar cualitativa y cuantitativamente la composición superficial. Adicionalmente, se efectuaron mediciones de los diámetros para determinar el tamaño de las nanopartículas de hierro.

##### **4.2.2.1. Microscopía electrónica de barrido de biocarbón de tocte**

La Ilustración 4-5 presenta las imágenes obtenidas del análisis SEM del biocarbón de tocte sin impregnar. En la imagen "a", capturada a una distancia de 50  $\mu\text{m}$ , se registraron diámetros de 11,72; 11,41; 10,04; 12,72; 12,56; 11,17 y 11,67  $\mu\text{m}$ , mientras que en la imagen "b", tomada a 200  $\mu\text{m}$ , se identificaron diámetros de 46,46; 46,90; 40,25; 41,99; 48,12; 50,44; 61,71 y 41,57  $\mu\text{m}$ . Ambas imágenes muestran la morfología del biocarbón, evidenciando la variabilidad en el tamaño de las partículas en distintas áreas de la muestra.

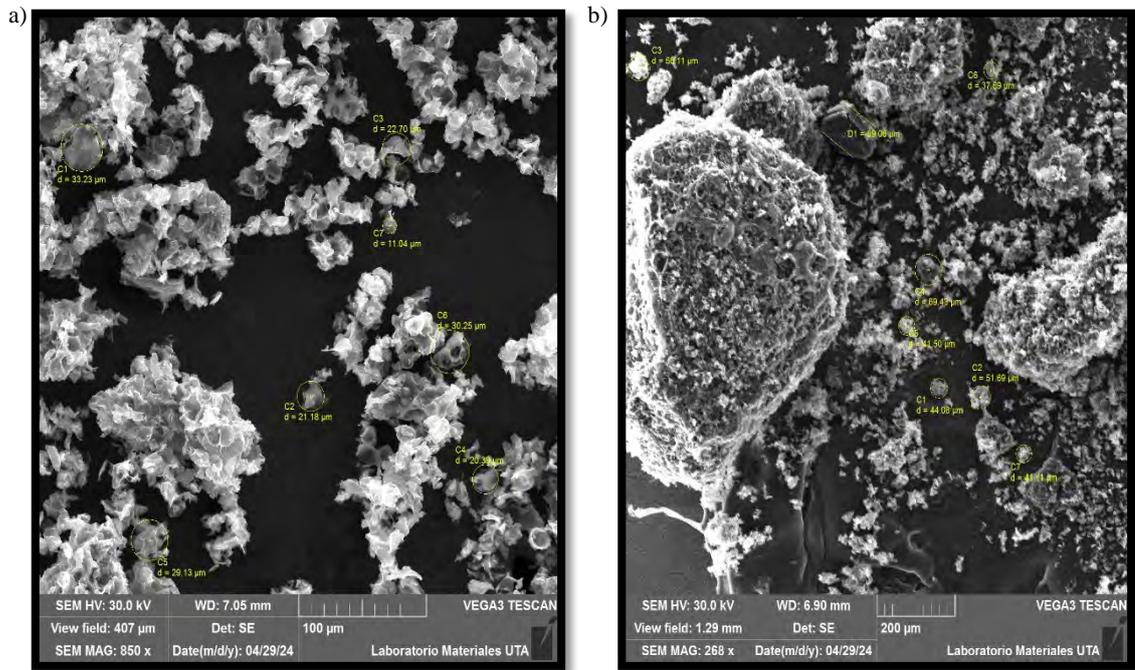


**Ilustración 4-5:** Análisis SEM para el biocarbón de tocte

Realizado por: UTA, 2024.

#### 4.2.2.2. Microscopía electrónico de barrido de biocarbón de aguacate

La Ilustración 4-6 mostrada a continuación se exhibe las imágenes resultantes del análisis SEM del biocarbón de aguacate sin impregnar. En la imagen "a", capturada a una distancia de 100 μm, se observaron diámetros de 33,23; 21,18; 22,70; 20,39; 29,13; 30,25 y 11,04 μm, mientras que en la imagen "b", tomada a 200 μm, se detectaron diámetros de 44,08; 51,69; 56,11; 69,43; 41,50; 37,69 y 41,11 μm. Ambas imágenes ofrecen una representación detallada de la estructura del biocarbón, evidenciando la variación en el tamaño de las partículas en diferentes áreas de la muestra.



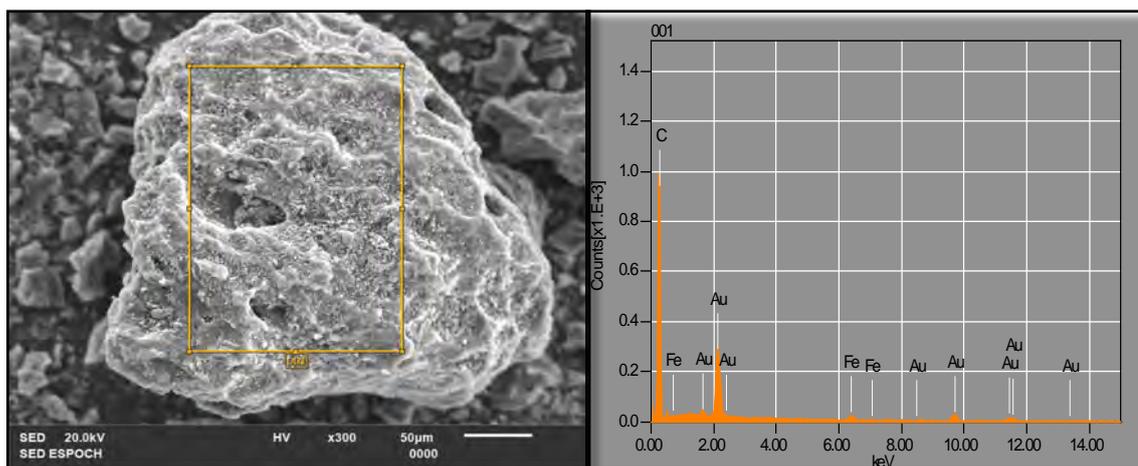
**Ilustración 4-6:** Análisis SEM para el biocarbón de aguacate

Realizado por: UTA, 2024.

Además, al comparar las imágenes de la Ilustración 4-5 (biocarbón de tocte) con las de la Ilustración 4-6 (biocarbón de aguacate), específicamente en el apartado "b", se observa una similitud notable en los diámetros de las partículas a 200  $\mu\text{m}$ . Mostrando una correspondencia entre las muestras de tocte y aguacate en términos de tamaño de partículas, lo que indica una característica común entre estas dos fuentes de biocarbón.

#### 4.2.2.3. Microscopía electrónico de barrido para BCT-NFe

- **Zona 1 BCT-NFe**



**Ilustración 4-7:** Análisis SEM-EDS para BCT-NFe zona 1

Realizado por: ESPOCH, 2024.

En la Ilustración 4-7 se presenta la zona 1 de BCT-NFe, capturada a una distancia de 50  $\mu\text{m}$ , donde se observa una estructura sólida con huecos que parecen corresponder a los poros de dicha estructura. Esta configuración es consistente con la Ilustración 2-4 de la clasificación de nanomateriales, la cual describe la estructura como una nanopartícula de dimensión cero o de tipo carbonoso, según lo menciona (Gómez, 2018, pág. 76). Además, se llevó a cabo un análisis de composición en la región resaltada dentro del cuadrado amarillo de la ilustración, lo que proporciona información adicional sobre la composición de la muestra en esa área específica. Esta información se presenta en la parte derecha de la imagen, donde se identifican elementos como carbono (C), hierro (Fe) y oro (Au).

**Tabla 4-11:** EDS para BCT-NFe zona 1

Formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
C	18.32	97.58	0.15	4960	0.1129361	K
Fe	0.42	0.48	0.02	210	0.0037930	K
Au	5.97	1.94	0.11	3963	0.0470318	M
<b>Total</b>	<b>24.71</b>	<b>100.00</b>				

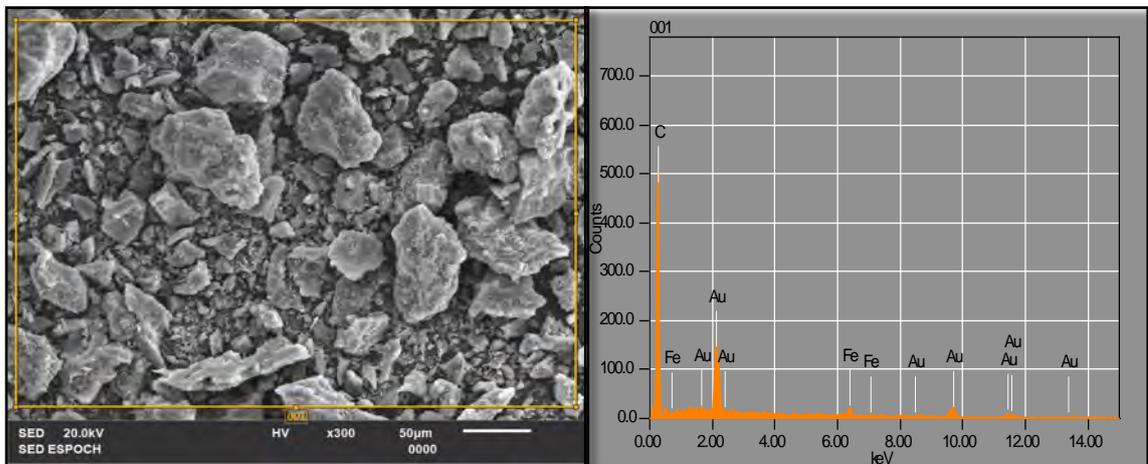
Realizado por: ESPOCH, 2024.

En la Tabla 4-11 se revela la composición elemental de la muestra donde se identifica que el carbono (C) constituye el 18.32% de la masa y el 97.58% de los átomos, con una incertidumbre de 0.15. Se detectaron 4960 electrones netos, utilizando la línea de emisión K para el análisis, con una relación K de 0.1129361. Por otro lado, el hierro (Fe) representa el 0.42% de la masa y el 0.48% de los átomos, con una incertidumbre de 0.02. Se detectaron 210 electrones netos, también utilizando la línea de emisión K, con una relación K de 0.0037930. En cuanto al oro (Au), constituye el 5.97% de la masa y el 1.94% de los átomos, con una incertidumbre de 0.11. Se

detectaron 3963 electrones netos, utilizando la línea de emisión M para el análisis, con una relación K de 0.0470318.

Con base en la información proporcionada por la Ilustración 4-7 y la Tabla 4-11 que detalla la composición de esta región específica, se confirma que la estructura predominante está mayoritariamente compuesta por carbono (C), representando el 15.32% de la muestra. Este hallazgo sugiere la presencia de un material carbonoso. Además, se identifica la presencia de hierro (Fe) en un 0.42%, lo que sugiere la presencia de nanopartículas de hierro en la muestra. Por otro lado, el oro (Au) es detectado en cantidades mínimas, lo que indica que su presencia es incidental y proviene de la manipulación previa a la análisis, siendo utilizado como un conductor sin relevancia en la composición estructural del material en estudio.

- **Zona 2 BCT-NFe**



**Ilustración 4-8:** Análisis SEM-EDS para BCT-NFe zona 2

Realizado por: ESPOCH, 2024.

En la Ilustración 4-8 se exhibe la zona 2 de BCT-NFe, capturada a una distancia de 50  $\mu\text{m}$ , donde se pueden apreciar pequeñas estructuras de diferentes tamaños y una morfología amorfa, similares a las observadas en el estudio de (Suresh et al., 2016, pág. 739) en las partículas más grandes mostradas, así como en el estudio de (AL-Mousawi et al., 2019, pág. 205), donde ambos estudios respaldan la presencia de nanopartículas de óxido de hierro en la muestra analizada. Además, se realizó un análisis de composición en la región resaltada dentro del cuadrado amarillo de la ilustración, proporcionando información adicional sobre la composición de la muestra en esa área específica. Esta información se presenta en la parte derecha de la imagen, donde se identifican elementos como carbono (C), hierro (Fe) y oro (Au).

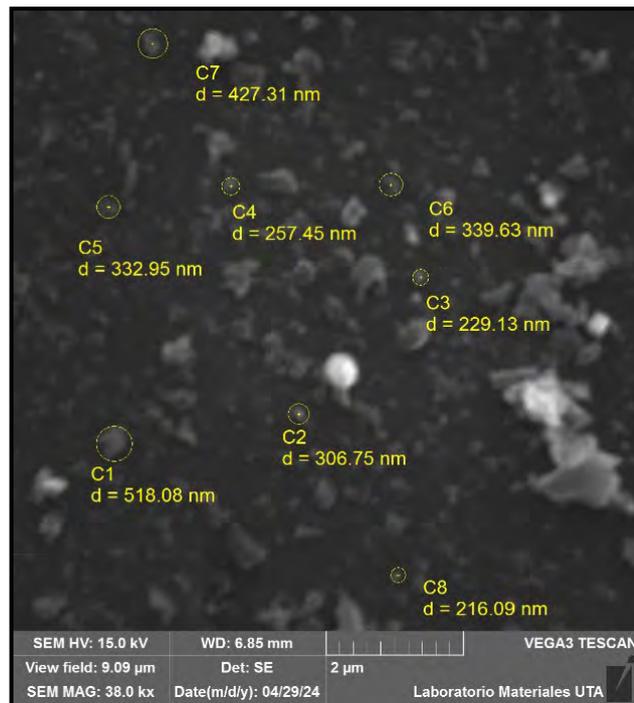
**Tabla 4-12:** EDS para BCT-NFe zona 2

Formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
C	13.20	97.13	0.15	2562	0.0802630	K
Fe	0.59	0.93	0.03	213	0.0053102	K
Au	4.32	1.94	0.11	2071	0.0338139	M
<b>Total</b>	18.11	100.00				

Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Tabla 4-12 muestra la composición de la muestra de la zona 2 de BCT-NFe en términos de porcentaje de masa y porcentaje de átomos para varios elementos. El carbono (C) constituye el 18.32% de la masa total y el 97.58% de los átomos presentes, con una incertidumbre (sigma) de 0.15. Se detectaron 4960 electrones netos en el análisis, utilizando la línea de emisión K, y la relación K para el carbono es de 0.1129361. El hierro (Fe) representa solo el 0.42% de la masa total y el 0.48% de los átomos, con una incertidumbre de 0.02. Se detectaron 210 electrones netos y la relación K para el hierro es de 0.0037930. Por último, el oro (Au) constituye el 5.97% de la masa total y el 1.94% de los átomos, con una incertidumbre de 0.11. Se detectaron 3963 electrones netos, utilizando la línea de emisión M, y la relación K para el oro es de 0.0470318. En conjunto, estos elementos componen el 24.71% de la masa total de la muestra.

Con base en la información proporcionada por la Ilustración 4-8 y la Tabla 4-12 que detalla la composición de esta región específica, se confirma que la estructura predominante está mayoritariamente compuesta por carbono (C), representando el 13.20% de la muestra. Este hallazgo sugiere la presencia de un material carbonoso de naturaleza nanométrica. Además, se identifica la presencia de hierro (Fe) en un 0.59%, lo que sugiere la presencia de nanopartículas de hierro en la muestra. Por otro lado, el oro (Au) es detectado en cantidades mínimas, lo que indica que su presencia es incidental y proviene de la manipulación previa a la análisis, siendo utilizado como un conductor sin relevancia en la composición estructural del material en estudio.



**Ilustración 4-9:** SEM-Medición de nanopartículas para BCT-NFe

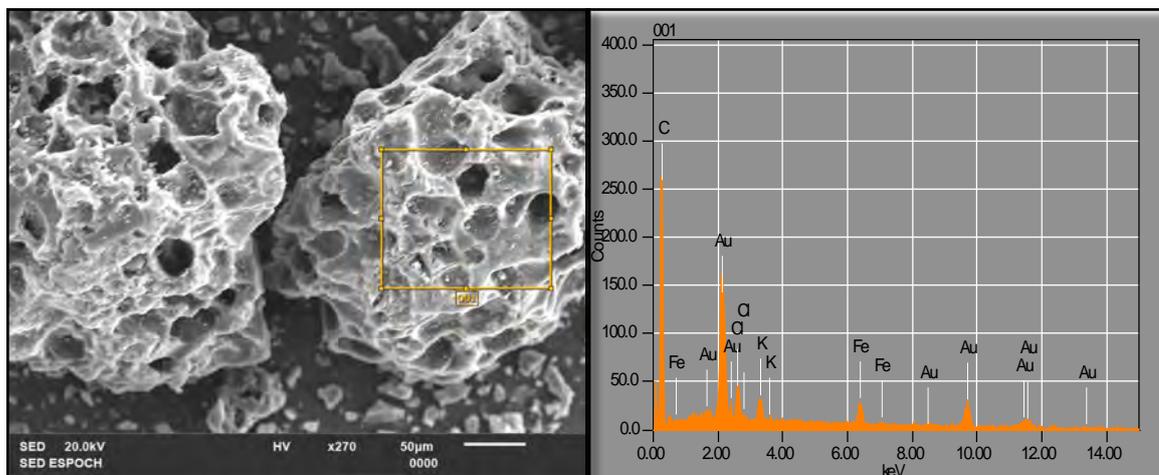
Realizado por: UTA, 2024.

En la Ilustración 4-9 se exhibe la imagen obtenida mediante el microscopio electrónico de barrido a una distancia de 2  $\mu\text{m}$ , donde se evidencia una baja calidad de imagen atribuible al fenómeno de magnetismo de las nanopartículas de hierro, tal como señala (Aldama et al., 2009, pág. 15). Se identificaron partículas con diámetros que oscilan entre 216,09 y 518,08 nm, corroborando así la presencia de estas estructuras nanométricas. Este hallazgo se sustenta en los datos proporcionados en las Tabla 4-11 y 4-12, donde se evidencia la presencia de hierro mediante análisis de Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS), confirmando la composición química de las partículas. Además, se observa una distribución uniforme de las nanopartículas en la muestra, lo que muestra un proceso de impregnación exitoso.

Por otro lado, en la Ilustración 4-5, referente al biocarbón de tocte sin impregnar, se evidencian diámetros micrométricos sin la presencia de nanopartículas de hierro. Este resultado contrasta con la muestra impregnada, respaldando la hipótesis de que el biocarbón de tocte ha sido efectivamente impregnado con las nanopartículas mencionadas.

#### 4.2.2.4. Microscopía electrónica de barrido para BCA-NFe

- **Zona 1 BCA-NFe**



**Ilustración 4-10:** Análisis SEM-EDS para BCA-NFe zona 1

Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-10 se muestra la zona 1 de BCA-NFe, capturada a una distancia de 50  $\mu\text{m}$ , revelando una estructura sólida con numerosos poros visibles, superando en tamaño a los observados en la Ilustración 4-7 para BCT-NFe. Esta configuración se alinea con la Ilustración 2-4 de la clasificación de nanomateriales, donde se describe la estructura como una nanopartícula de dimensión cero o de tipo carbonoso, según lo indica (Gómez, 2018, pág. 57). Además, se realizó un análisis de composición en la región resaltada dentro del cuadrado amarillo de la ilustración, brindando información adicional sobre la composición de la muestra en esa área específica. Esta información se presenta en la parte derecha de la imagen, donde se identifican elementos como carbono (C), hierro (Fe), oro (Au), cloro (Cl) y potasio (K).

**Tabla 4-13:** EDS para BCA-NFe zona 1

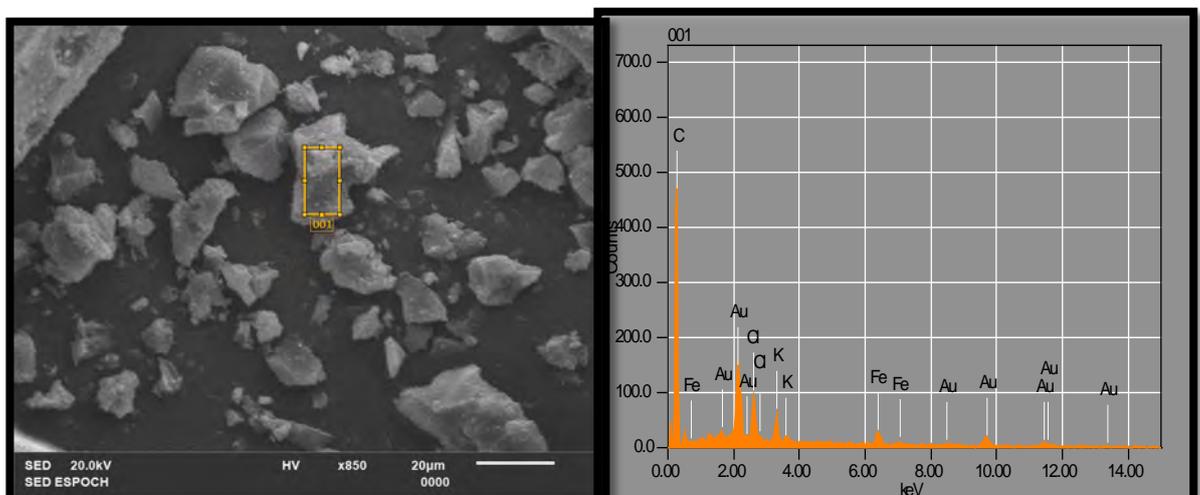
Formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
C	5.32	93.26	0.08	1373	0.0242502	K
Cl	0.22	1.30	0.01	337	0.0019174	K
K	0.17	0.90	0.01	238	0.0015272	K
Fe	0.50	1.88	0.02	324	0.0045477	K
Au	2.48	2.66	0.07	2100	0.0193319	M
<b>Total</b>	<b>8.68</b>	<b>100.00</b>				

Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Tabla 4-13 se presenta la composición elemental de una muestra, expresada en términos de masa y porcentaje atómico de cada elemento. En primer lugar, el carbono (C) constituye el 5.32% de la masa y el 93.26% de los átomos presentes en la muestra. Luego, el cloro (Cl) representa el 0.22% de la masa y el 1.30% de los átomos, mientras que el potasio (K) y el hierro (Fe) contribuyen con el 0.17% y el 0.50% de la masa, respectivamente. Finalmente, el oro (Au) constituye el 2.48% de la masa total. Se observa que el carbono es el elemento dominante en términos de masa y átomos, seguido por el oro, mientras que los otros elementos, como el cloro, el potasio y el hierro, contribuyen en menor medida.

La información proporcionada por la Ilustración 4-10 y la Tabla 4-13, que detalla la composición de esta región específica, confirma que la estructura predominante está mayoritariamente compuesta por carbono, lo que sugiere la presencia de un material carbonoso de naturaleza nanométrica. Además, se identifica la presencia de hierro (Fe), lo que indica la presencia de nanopartículas de hierro en la muestra. Por otro lado, la presencia de oro (Au) sugiere que su aparición es incidental y probablemente se deba a la manipulación previa al análisis, siendo utilizado como un conductor sin relevancia en la composición estructural del material en estudio. En cuanto al potasio (K), este elemento es propio del mesocarpio del aguacate, como lo menciona (Vivero et al. 2019) en su estudio de caracterización de este fruto. Por último, el cloro (Cl) se identifica como una impureza que podría ser residuo del proceso de impregnación con cloruros de hierro como indica la Ilustración 2-5.

- **Zona 2 BCA-NFe**



**Ilustración 4-11:** Análisis SEM-EDS para BCA-NFe zona 2

Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-11 se exhibe la zona 2 de BCA-NFe, capturada a una distancia de 50  $\mu\text{m}$ , donde se pueden apreciar pequeñas estructuras de diferentes tamaños y una morfología amorfa, similares a las observadas en el estudio de (Suresh et al., 2016, pág. 739) en las partículas más grandes mostradas, así como en el estudio de (AL-Mousawi et al., 2019, pág. 205), donde ambos estudios respaldan la presencia de nanopartículas de óxido de hierro en la muestra analizada. Además, se realizó un análisis de composición en la región resaltada dentro del cuadrado amarillo de la ilustración, proporcionando información adicional sobre la composición de la muestra en esa área específica. Esta información se presenta en la parte derecha de la imagen, donde se identifican elementos como carbono (C), hierro (Fe), oro (Au), cloro (Cl) y potasio (K).

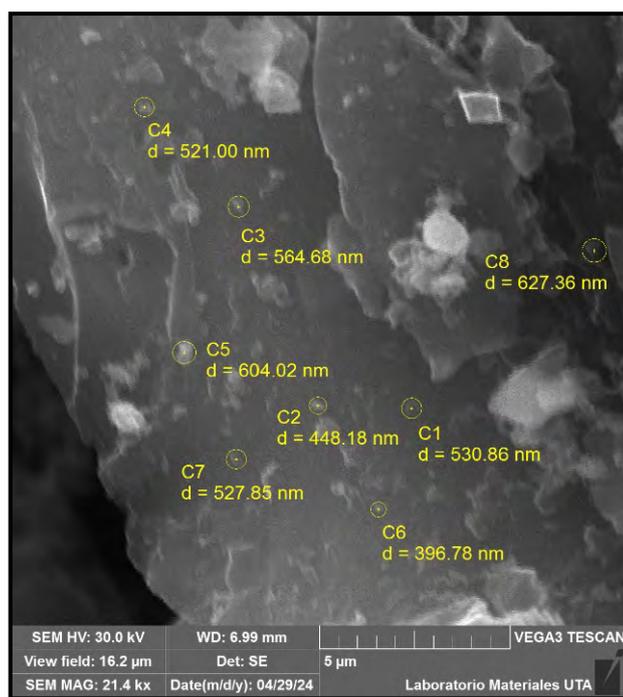
**Tabla 4-14:** EDS para BCA-NFe zona 2

Formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
C	11.96	94.77	0.14	2436	0.0555002	K
Cl	0.62	1.68	0.02	811	0.0059585	K
K	0.45	1.10	0.02	523	0.0043365	K
Fe	0.63	1.07	0.03	309	0.0055893	K
Au	2.88	1.39	0.09	1892	0.0224724	M
<b>Total</b>	16.54	100.00				

Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Tabla 4-14 presentada se detalla la composición elemental de BCA-NFe en la zona 2, indicando tanto la masa como el porcentaje atómico de cada elemento. El carbono (C) representa el 11.96% de la masa total y el 94.77% de los átomos presentes, seguido por el cloro (Cl) con un 0.62% de la masa y un 1.68% de los átomos. Además, se identifica la presencia de potasio (K) y hierro (Fe), contribuyendo con un 0.45% y un 0.63% de la masa, respectivamente. Por último, el oro (Au) constituye el 2.88% de la masa total. Se destaca que el carbono es el elemento preponderante en términos de masa y átomos, seguido por el oro, mientras que los demás elementos, como el cloro, el potasio y el hierro, presentan contribuciones menores.

La composición de esta área específica, detallada en la Tabla 4-14 y respaldada por la información de la Ilustración 4-11, confirma que la estructura predominante está compuesta principalmente por carbono, lo que sugiere la presencia de un material carbonoso a nivel nanométrico. Además, se observa la presencia de hierro (Fe), indicando así la existencia de nanopartículas de hierro en la muestra. Por otro lado, la aparición de oro (Au) parece ser incidental y podría atribuirse a la manipulación previa al análisis, donde se utilizó como un conductor sin relevancia estructural en el material bajo estudio. Respecto al potasio (K), este elemento es característico del mesocarpio del aguacate, tal como se menciona en el estudio de caracterización realizado por (Vivero et al., 2019, pág. 492). Por último, el cloro (Cl) se identifica como una impureza, posiblemente residuo del proceso de impregnación con cloruros de hierro, como sugiere la Ilustración 2-5.



**Ilustración 4-12:** SEM-Medición de nanopartículas para BCT-NFe

**Realizado por:** UTA, 2024.

En la Ilustración 4-12 se exhibe la imagen obtenida mediante el microscopio electrónico de barrido a una distancia de 5 μm, donde se evidencia una baja calidad de imagen atribuible al fenómeno de magnetismo de las nanopartículas de hierro, tal como señala (Aldama et al., 2009, pág. 15). Se detectan partículas con tamaños comprendidos entre 396,78 y 627,36 nm, lo cual ratifica la presencia de estas estructuras a nivel nanométrico. Este hallazgo se apoya en los datos consignados en las Tabla 4-13 y 4-14, donde se constata la existencia de hierro mediante análisis de Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS), validando así la composición química de las partículas. Además, se observa una distribución uniforme de las nanopartículas en la muestra, lo que indica un proceso de impregnación exitoso.

Por otra parte, en la Ilustración 4-6, referente al biocarbón de tocte sin impregnación, se aprecian diámetros a escala micrométrica sin indicios de nanopartículas de hierro. Esta discrepancia con la muestra impregnada fortalece la noción de que el biocarbón de tocte ha sido tratado con las nanopartículas mencionadas de manera eficaz.

### 4.3. Resultados del diseño experimental

En esta sección, se exponen los resultados obtenidos del diseño experimental implementado, abordando el pH medido y la conductividad, así como la espectrometría de absorción atómica, que refleja la variable de concentración final de Hg tanto para BCT-NFe como para BCA-NFe.

#### 4.3.1. Resultados de pH

En la Tabla 4-15 se detallan los resultados del pH medido para los distintos tratamientos de concentración de Hg y tiempos de exposición tanto para BCT-NFe como para BCA-NFe. Los valores oscilan desde el mínimo registrado de 1.00 hasta el máximo de 3.98, ofreciendo así una panorámica de la variabilidad de pH en función de las condiciones experimentales aplicadas. Estos datos proporcionan una visión completa de la influencia de los tratamientos sobre la acidez o alcalinidad de las muestras.

**Tabla 4-15:** Resultado de pH para BCT-NFe y BCA-NFe

		pH								
	Concentración (ppm)	1			10			50		
	Tiempo (min)	30	60	120	30	60	120	30	60	120
Biocarbón con nanopartículas de Fe	Tocte	3,98	3,40	3,22	2,92	2,42	1,97	2,31	2,25	2,49
		3,86	3,29	3,07	2,63	2,36	1,96	2,53	3,80	2,39
		3,61	3,19	3,02	2,58	2,59	2,10	2,76	2,45	2,04
	Aguacate	2,66	2,88	2,56	2,23	2,35	2,02	1,42	1,47	1,40
		2,61	2,58	2,72	2,12	2,30	1,96	1,00	1,22	1,69
		3,00	2,91	2,59	2,15	2,16	1,94	1,31	1,23	1,92

Realizado por: Cuenca, 2024.

#### 4.3.2. Resultados de conductividad

En la Tabla 4-16 se presentan los resultados de la conductividad medida para los diversos tratamientos de concentración de Hg y tiempos de exposición tanto para BCT-NFe como para BCA-NFe. Los valores registrados abarcan un amplio rango, desde un mínimo de 5.22  $\mu$ S hasta un máximo de 38900  $\mu$ S. Esta diversidad refleja la influencia de las diferentes condiciones experimentales en la conductividad de las muestras, proporcionando una visión completa de cómo estas variables afectan las propiedades físicas y químicas de los materiales estudiados.

**Tabla 4-16:** Resultado de conductividad para BCT-NFe y BCA-NFe

<i>Conductividad</i>									
<i>Concentración (ppm)</i>	<b>1</b>			<b>10</b>			<b>50</b>		
<i>Tiempo (min)</i>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>120</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>120</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>120</b>
<i>Tocte</i>	5,48	5,37	14,08	1157,00	2290,00	7800,00	3310,00	3840,00	5120,00
	5,99	5,22	14,17	1394,00	2600,00	7740,00	1604,00	50,00	4610,00
	5,89	5,37	14,11	1492,00	1298,00	7570,00	1012,00	1910,00	4420,00
<i>Aguacate</i>	899,00	402,00	1049,00	7690,00	3920,00	4070,00	2100,00	38500,00	6860,00
	1023,00	912,00	672,00	7380,00	2490,00	3930,00	29500,00	38900,00	4400,00
	479,00	390,00	1016,00	7070,00	2010,00	3940,00	17430,00	25400,00	4770,00

Realizado por: Cuenca, 2024.

### 4.3.3. Espectrometría de absorción atómica (AAS)

#### 4.3.3.1. Resultados de AAS para BCT-NFe

En la Tabla 4-17 se exhiben los resultados de la actividad de absorción atómica (ASS) para BCT-NFe, analizada en función de diferentes tratamientos de concentración de Hg y tiempos de exposición. Los valores obtenidos muestran una variabilidad significativa, oscilando desde un mínimo de 0.6812 ppb hasta un máximo de 40.2349 ppb. Es importante destacar que se realizó una conversión de partes por mil millones (ppb) a partes por millón (ppm) para garantizar la uniformidad de las unidades de medida y facilitar la comparación con estándares establecidos.

**Tabla 4-17:** Resultado de AAS expresado como concentración final de Hg para BCT-NFe

Concentración inicial de Hg	Tiempo	Concentración final de Hg (Espectrometría de absorción atómica)	
		<i>ppb</i>	<i>mg/L = ppm</i>
<i>ppm</i>	<i>minutos</i>		
1	30	3,1707	0,0031707
		2,8419	0,0028419
		3,2785	0,0032785
	60	4,8051	0,0048051
		4,3400	0,0043400
		4,0362	0,0040362
	120	3,9779	0,0039779
		3,6911	0,0036911
		3,8822	0,0038822
10	30	4,2045	0,0042045
		3,2563	0,0032563
		5,2354	0,0052354
	60	2,0320	0,0020320
		2,9670	0,0029670
		2,3689	0,0023689
	120	1,7000	0,0017000
		0,6812	0,0006812
		0,9385	0,0009385
50	30	36,9439	0,0369439
		3,7201	0,0037201
		36,2932	0,0362932
	60	38,8163	0,0388163
		38,6864	0,0386864
		36,0497	0,0360497
	120	35,9693	0,0359693
		39,0931	0,0390931
		40,2349	0,0402349

Realizado por: Cuenca, 2024.

#### 4.3.3.2. Resultados de AAS para BCA-NFe

En la Tabla 4-18 se exhiben los resultados de la actividad de absorción atómica (AAS) para BCA-NFe, analizada en función de diferentes tratamientos de concentración de Hg y tiempos de exposición. Los valores obtenidos muestran una variabilidad significativa, oscilando desde un mínimo de 1.0635 ppb hasta un máximo de 331.7995 ppb. Es importante destacar que se realizó una conversión de partes por mil millones (ppb) a partes por millón (ppm) para garantizar la uniformidad de las unidades de medida y facilitar la comparación con estándares establecidos.

**Tabla 4-18:** Resultado de AAS expresado como concentración final de Hg para BCA-NFe

Concentración inicial de Hg	Tiempo	Concentración final de Hg (Espectrometría de absorción atómica)	
		<i>ppb</i>	<i>mg/L = ppm</i>
<i>ppm</i>	<i>minutos</i>		
1	30	3,4220	0,0034220
		3,2760	0,0032760
		3,7589	0,0037589
	60	3,7531	0,0037531
		3,4376	0,0034376
		3,8177	0,0038177
	120	2,1348	0,0021348
		2,3280	0,0023280
		1,7637	0,0017637
10	30	5,9390	0,0059390
		3,6963	0,0036963
		2,8798	0,0028798
	60	1,1362	0,0011362
		6,4654	0,0064654
		3,5786	0,0035786
	120	5,1073	0,0051073
		1,0635	0,0010635
		10,6699	0,0106699
50	30	294,5749	0,2945749
		261,4240	0,2614240
		266,2783	0,2662783
	60	40,7644	0,0407644
		58,0957	0,0580957
		24,3457	0,0243457
	120	331,7995	0,3317995
		322,1298	0,3221298
		311,0002	0,3110002

Realizado por: Cuenca, 2024.

#### 4.4. Porcentaje de remoción de Hg

##### 4.4.1. Porcentaje de remoción de Hg para BCT-NFe

En la Tabla 4-19 se presentan los resultados del cálculo del porcentaje de remoción de Hg utilizando la Ecuación 3-5, la cual se basa en las concentraciones inicial y final de Hg. Estos valores se muestran específicamente para BCT-NFe después de la aplicación de los diferentes tratamientos. Se observa que el porcentaje de remoción oscila entre un mínimo de 99.519% y un máximo de 99.993%, correspondiente al tratamiento con una concentración inicial de 10 ppm y un tiempo de adsorción de 120 minutos.

**Tabla 4-19:** Porcentaje de remoción de Hg para BCT-NFe

Concentración inicial de Hg <i>ppm</i>	Tiempo <i>minutos</i>	Concentración final de Hg <i>ppm</i>	% de remoción de Hg <i>%</i>
1	30	0,0034220	99,6829300
		0,0032760	99,7158100
		0,0037589	99,6721500
	60	0,0037531	99,5194900
		0,0034376	99,5660000
		0,0038177	99,5963800
	120	0,0021348	99,6022100
		0,0023280	99,6308900
		0,0017637	99,6117800
10	30	0,0059390	99,9579550
		0,0036963	99,9674370
		0,0028798	99,9476460
	60	0,0011362	99,9796800
		0,0064654	99,9703300
		0,0035786	99,9763110
	120	0,0051073	99,9830000
		0,0010635	99,9931880
		0,0106699	99,9906150
50	30	0,2945749	99,9261122
		0,2614240	99,9925598
		0,2662783	99,9274136
	60	0,0407644	99,9223674
		0,0580957	99,9226272
		0,0243457	99,9279006
	120	0,3317995	99,9280614
		0,3221298	99,9218138
		0,3110002	99,9195302

Realizado por: Cuenca, 2024.

**4.4.2. Porcentaje de remoción de Hg para BCA-NFe**

En la Tabla 4-20 se presentan los resultados del cálculo del porcentaje de remoción de Hg utilizando la Ecuación 3-5, la cual se basa en las concentraciones inicial y final de Hg. Estos valores se muestran específicamente para BCA-NFe después de la aplicación de los diferentes tratamientos. Se observa que el porcentaje de remoción oscila entre un mínimo de 99.336% y un máximo de 99.989%, correspondiente al tratamiento con una concentración inicial de 10 ppm y un tiempo de adsorción de 120 minutos.

**Tabla 4-20:** Porcentaje de remoción de Hg para BCA-NFe

Concentración inicial de Hg <i>ppm</i>	Tiempo <i>minutos</i>	Concentración final de Hg <i>ppm</i>	% de remoción de Hg <i>%</i>
1	30	0,0034220	99,6578000
		0,0032760	99,6724000
		0,0037589	99,6241100
	60	0,0037531	99,6246900
		0,0034376	99,6562400
		0,0038177	99,6182300
	120	0,0021348	99,7865200
		0,0023280	99,7672000
		0,0017637	99,8236300
10	30	0,0059390	99,9406100
		0,0036963	99,9630370
		0,0028798	99,9712020
	60	0,0011362	99,9886380
		0,0064654	99,9353460
		0,0035786	99,9642140
	120	0,0051073	99,9489270
		0,0010635	99,9893650
		0,0106699	99,8933010
50	30	0,2945749	99,4108502
		0,2614240	99,4771520
		0,2662783	99,4674434
	60	0,0407644	99,9184712
		0,0580957	99,8838086
		0,0243457	99,9513086
	120	0,3317995	99,3364010
		0,3221298	99,3557404
		0,3110002	99,3779996

Realizado por: Cuenca, 2024.

#### 4.5. Análisis estadístico

##### 4.5.1. ANOVA de porcentaje de remoción de Hg

En base con los resultados presentados en las Tabla 4-19 y Tabla 4-20, que muestran la remoción de Hg para BCT-NFe y BCA-NFe respectivamente, se lleva a cabo un análisis de varianza (ANOVA) con el propósito de investigar el efecto de los diferentes niveles de los factores de estudio en el porcentaje de eliminación de mercurio, y determinar el tratamiento óptimo que maximice esta remoción. Los factores considerados en este análisis son:

- a) BCT-NFe y BCA-NFe
- b) concentración inicial de Hg (1, 10, 50 ppm)
- c) tiempo de absorción (30, 60, 120 minutos).

Se formula el modelo estadístico mediante la Ecuación 4-1, con un nivel de significancia establecido en  $\alpha = 0.05$ , lo que indica que se acepta un margen de error del 5%. Este modelo se utiliza para analizar y comprender la relación entre las variables y los resultados observados en el estudio.

**Ecuación 4-1:** Modelo estadístico.

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

- $\mu$ : La media global del % de remoción de mercurio.
- $\alpha_i$ : Efecto del  $i$  ésimo nivel del factor Biocarbón A; ( $i = 1, 2, \dots, a$ ).
- $\beta_j$ : Efecto del  $j$  ésimo nivel del factor Concentración inicial B; ( $j = 1, 2, \dots, b$ ).
- $\gamma_k$ : Efecto del  $k$  ésimo nivel del factor Tiempo C; ( $k = 1, 2, \dots, c$ ).
- $(\alpha\beta)_{ij}$  Efecto de interacción entre el  $i$  ésimo nivel del factor Biocarbón y el  $j$  ésimo nivel del factor Concentración inicial.
- $(\alpha\gamma)_{ik}$  Efecto de interacción entre el  $i$  ésimo nivel del factor Biocarbón y el  $k$  ésimo nivel del factor Tiempo.
- $(\beta\gamma)_{jk}$  Efecto de interacción entre el  $j$  ésimo nivel del factor Concentración inicial y el  $k$  ésimo nivel del factor Tiempo.
- $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$  Efecto de interacción entre el  $i$  esimo nivel del factor Biocarbón en el  $j$  ésimo nivel del factor Concentración inicial y en el  $k$  ésimo nivel del factor Tiempo.
- $\varepsilon_{ijkl}$ : Error atribuible al % de remoción de mercurio producida por el  $i$  esimo nivel del factor Biocarbón, el  $j$  ésimo nivel del factor Concentración inicial y el  $k$  ésimo nivel del factor Tiempo (Yijk).
- $Y_{ijkl}$  % de remoción de mercurio producido por el  $i$  esimo nivel del factor Biocarbón, el  $j$  ésimo nivel del factor Concentración inicial y el  $k$  ésimo nivel del factor Tiempo.

Previo al ANOVA, para analizar el efecto de los diversos niveles de los factores en el porcentaje de remoción de mercurio, es fundamental confirmar la validez de los supuestos estadísticos subyacentes. Se llevará a cabo un análisis para verificar la normalidad de los datos, asegurando que sigan una distribución normal. Además, se evaluará la homocedasticidad para verificar si las varianzas de las muestras son consistentes entre los grupos. Por último, se examinará la independencia de las observaciones para garantizar que no haya dependencia entre ellas. Estas

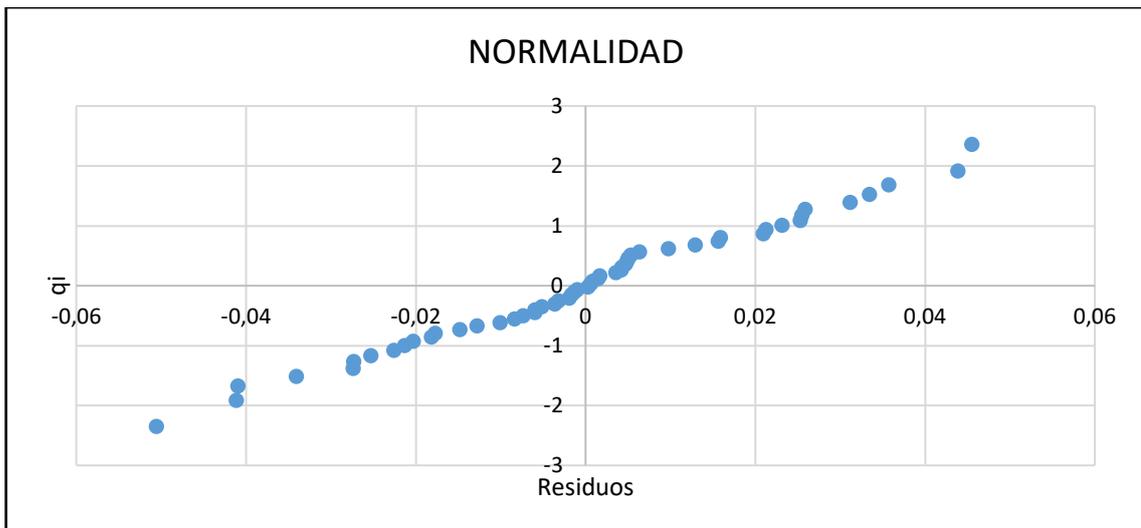
pruebas preliminares son esenciales para garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante el ANOVA.

#### 4.5.1.1. Normalidad

La normalidad de los errores del modelo es esencial para validar los resultados del ANOVA. Se llevó a cabo una evaluación de la normalidad utilizando pruebas estadísticas como el test de Shapiro-Wilk. Además, se empleó gráficos de diagnóstico, como el diagrama de los residuos para visualizar la distribución de los errores y confirmar su conformidad con la distribución normal.

$H_0$ : los residuos proceden de una distribución normal.

$H_1$ : los residuos no proceden de una distribución normal.



**Ilustración 4-13:** Gráfica de normalidad

**Realizado por:** Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-13 se presenta un gráfico de normalidad que permite visualizar la distribución de los puntos en relación con una línea de referencia que representa una distribución normal. Se observa que los puntos están dispersos de manera uniforme alrededor de esta línea, lo que sugiere que los datos siguen una distribución normal. Esta uniformidad en la dispersión indica que los errores del modelo tienen una distribución cercana a la normal, cumpliendo así con uno de los supuestos fundamentales para la validez de los resultados del ANOVA. Además de la inspección visual del gráfico, se realizará el test de Shapiro-Wilk, para confirmar formalmente la normalidad de los datos.

```
shapiro-wilk normality test
data: mod2$residuals
W = 0.98517, p-value = 0.7395
```

**Ilustración 4-14:** Test de Shapiro-Wilk

Realizado por: Cuenca, 2024.

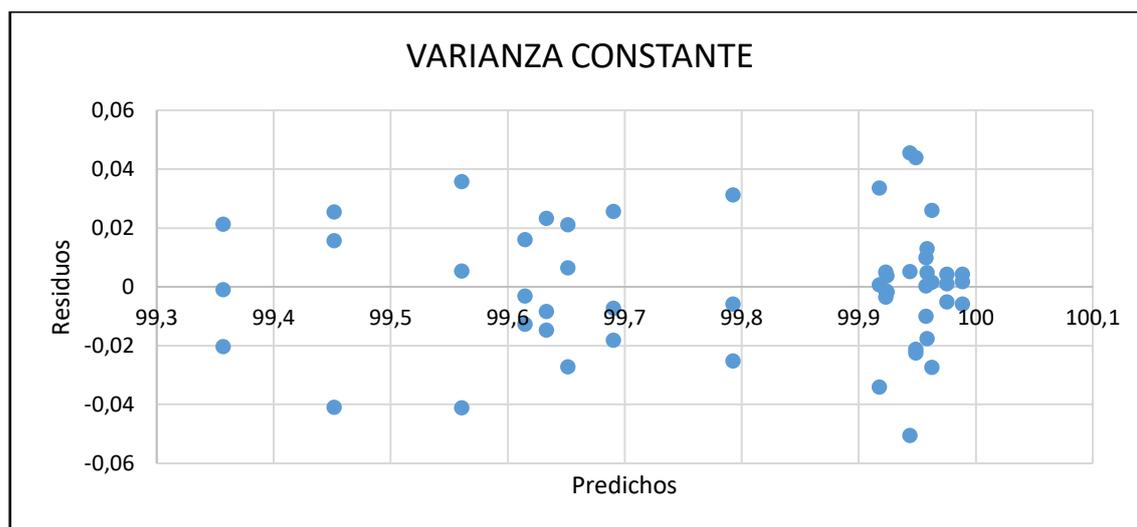
Al realizar el test de Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad de los residuos como se muestra en la Ilustración 4-14, se encuentra que el valor p-value es de 0.7395 el cual es mayor que el nivel de significancia establecido. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula  $H_0$ , lo que indica que los residuos provienen de una distribución normal. Este resultado sugiere que los errores del modelo siguen una distribución que se ajusta razonablemente bien a una distribución normal.

#### 4.5.1.2. Homocedasticidad

Se evalúa la homocedasticidad para asegurar que las varianzas de las muestras sean consistentes entre los grupos. Para ello, se realiza la prueba de Bartlett, que determina si las diferentes poblaciones generadas por los distintos tratamientos presentan varianzas constantes.

$H_0$ : los datos tienen varianza constante.

$H_1$ : los datos no tienen varianza constante.



**Ilustración 4-15:** Gráfica de varianza constante

Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-15 se presenta un gráfico que muestra la constancia de la varianza, donde se observa que las dispersiones de los puntos a lo largo del rango de valores predichos son uniformes. Esta uniformidad sugiere que los datos exhiben una varianza constante, lo que implica que el supuesto de homocedasticidad se cumple.

```
Bartlett test of homogeneity of variances
data: D3F2$Y2.V1 by ABC
Bartlett's K-squared = 25.62, df = 17, p-value = 0.08167
```

**Ilustración 4-16:** Test de Bartlett

Realizado por: Cuenca, 2024.

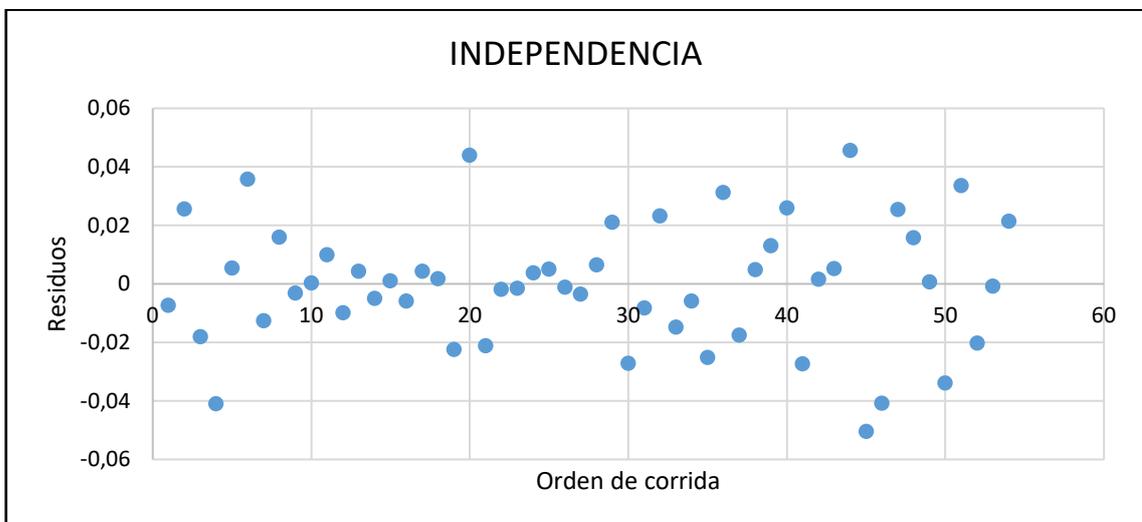
Al aplicar el test de Bartlett para evaluar la homocedasticidad, se observó que el valor p-value 0.08167 es mayor que el nivel de significancia establecido. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula  $H_0$ , lo que sugiere que los datos presentan varianza constante entre los grupos. Esta conclusión refuerza la validez del supuesto de homocedasticidad en el análisis estadístico realizado, como se muestra en la Ilustración 4-16.

#### 4.5.1.3. Independencia

La independencia se realiza para comprobar que los resultados observados no están influenciados por los resultados de otras observaciones. En otras palabras, cada observación es independiente de las demás. Para verificar este supuesto, se realizará la prueba de Durbin-Watson. Esta prueba se utiliza para detectar la presencia de autocorrelación en los residuos del modelo.

$H_0$ : los datos fueron tomados aleatoriamente.

$H_1$ : los datos fueron no tomados aleatoriamente.



**Ilustración 4-17:** Gráfica de independencia

Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-17 se muestra un gráfico de independencia, el cual es una herramienta clave para evaluar si las observaciones en el modelo son independientes entre sí. En este gráfico, se observa que los residuos están dispersos al azar a lo largo del eje horizontal, sin mostrar ninguna tendencia discernible o patrón evidente. Esta dispersión uniforme sugiere que no hay relación sistemática entre las observaciones y respalda la suposición de independencia en este análisis estadístico.

```
Durbin-watson test
data: modelo2
Dw = 2.0529, p-value = 0.6086
alternative hypothesis: true autocorrelation is greater than 0
```

#### **Ilustración 4-18:** Test de Durbin-Watson

**Realizado por:** Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-18 se presenta el resultado del Test de Durbin-Watson, una prueba utilizada para verificar la presencia de autocorrelación en los residuos de un modelo estadístico. La interpretación de esta prueba revela que el valor de p-value 0.6086 es mayor que el nivel de significancia establecido, lo que indica que no se rechaza la hipótesis nula  $H_0$ . En consecuencia, se concluye que los datos muestrales fueron tomados aleatoriamente y no muestran evidencia de autocorrelación entre las observaciones.

#### **4.5.1.4. ANOVA**

Se realizará un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la influencia de los factores Biocarbón, Concentración inicial de Hg y Tiempo de absorción en el porcentaje de remoción de mercurio. A continuación, se presentarán las siguientes pruebas de hipótesis para determinar la significancia de estos factores y sus posibles interacciones.

#### **Pruebas de hipótesis**

- $H_0: \alpha_i = 0$ , el factor Biocarbón no tiene efecto en el % de remoción de mercurio.  $H_A: \alpha_i \neq 0$ , el factor Biocarbón tiene efecto en el % de remoción de mercurio.
- $H_0: \beta_j = 0$ , el factor Concentración inicial de Hg no tiene efecto en el % de remoción de mercurio.
- $H_A: \beta_j \neq 0$ , el factor Concentración inicial de Hg tiene efecto en el % de remoción de mercurio.

- $H_0: \gamma_k = 0$ , el factor Tiempo de absorción no tiene efecto en el % de remoción de mercurio.
- $H_A: \gamma_k \neq 0$ , el factor Tiempo de absorción tiene efecto en el % de remoción de mercurio.
- $H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0$ , no existe efecto de interacción entre Biocarbón y concentración inicial de Hg  
 $H_A: (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$ , existe efecto de interacción entre Biocarbón y concentración inicial de Hg
- $H_0: (\alpha\gamma)_{ik} = 0$ , no existe efecto de interacción entre Biocarbón y Tiempo de absorción  
 $H_A: (\alpha\gamma)_{ik} \neq 0$ , existe efecto de interacción entre Biocarbón y Tiempo de absorción
- $H_0: (\alpha\gamma)_{ik} = 0$ , no existe efecto de interacción entre concentración inicial de Hg y Tiempo de absorción  
 $H_A: (\alpha\gamma)_{ik} \neq 0$ , existe efecto de interacción entre concentración inicial de Hg y Tiempo de absorción
- $H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0$ , no existe efecto de interacción entre Biocarbón, concentración inicial de Hg y Tiempo
- $H_A: (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$ , existe efecto de interacción entre Biocarbón, concentración inicial de Hg y Tiempo

**Tabla 4-21:** ANOVA para el porcentaje de remoción de mercurio

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADOS MEDIOS	$f_0$	VALOR_P
<b>A: BIOCARBÓN</b>	0.139797196	1	0.139797196	212.44797	0.0005
<b>B: CONCENTRACION INICIAL DE Hg</b>	0.889258459	2	0.444629229	675.697222	0.0000
<b>C: TIEMPO DE ADSORCIÓN</b>	0.037745166	2	0.018872583	28.6804177	0.5261
<b>AB</b>	0.456279095	2	0.228139547	346.700685	0.0000
<b>AC</b>	0.098986626	2	0.049493313	75.21434	0.1645
<b>BC</b>	0.261520676	4	0.065380169	99.3573874	0.0709
<b>ABC</b>	0.217261815	4	0.054315454	82.5424844	0.0674
<b>ERROR</b>	0.02368909	36	0.00065803		
<b>TOTAL</b>	2.124538122	53			

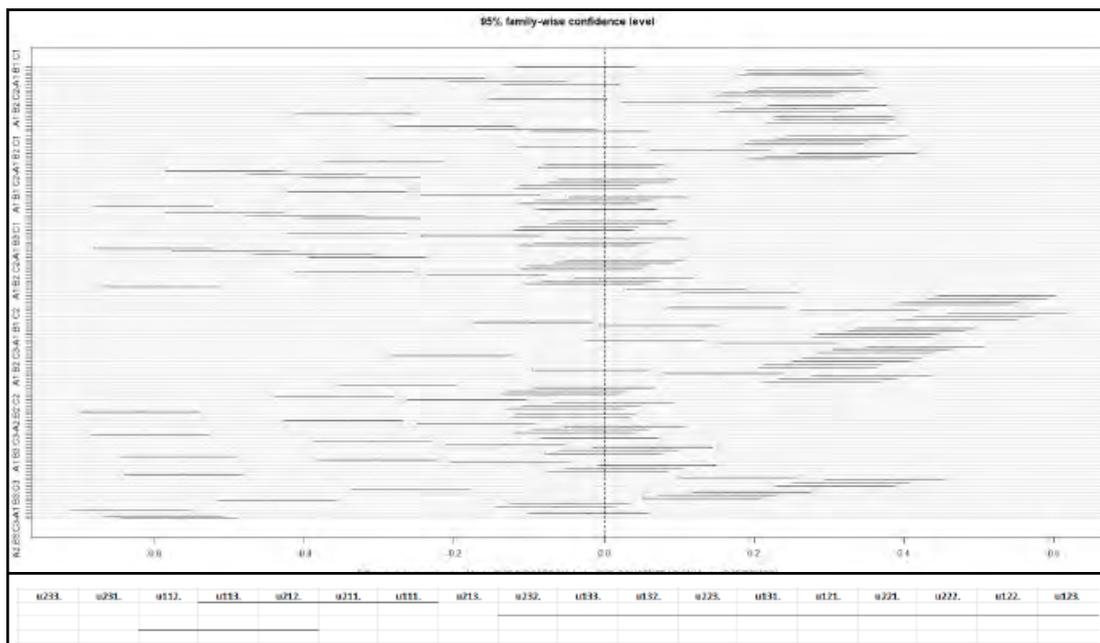
Realizado por: Cuenca, 2024.

De acuerdo con las pruebas de hipótesis planteadas y los resultados del ANOVA para el porcentaje de remoción de mercurio mostrados en la Tabla 4-21, se determina que el biocarbón y la concentración inicial de Hg tienen efectos estadísticamente significativos en la remoción de mercurio, como se evidencia por sus valores p significativamente bajos (<0.05). Sin embargo, el tiempo de adsorción no muestra un efecto significativo, ya que su valor p es mayor que 0.05. En cuanto a las interacciones entre los factores, todas ellas muestran efectos significativos en el %

de remoción de mercurio. En resumen, el tipo de biocarbón y la concentración inicial de Hg son determinantes en la remoción de mercurio, mientras que el tiempo de adsorción no lo es. Las interacciones entre los factores también tienen una influencia significativa en el proceso de remoción de mercurio.

#### 4.5.1.5. Método de Tukey

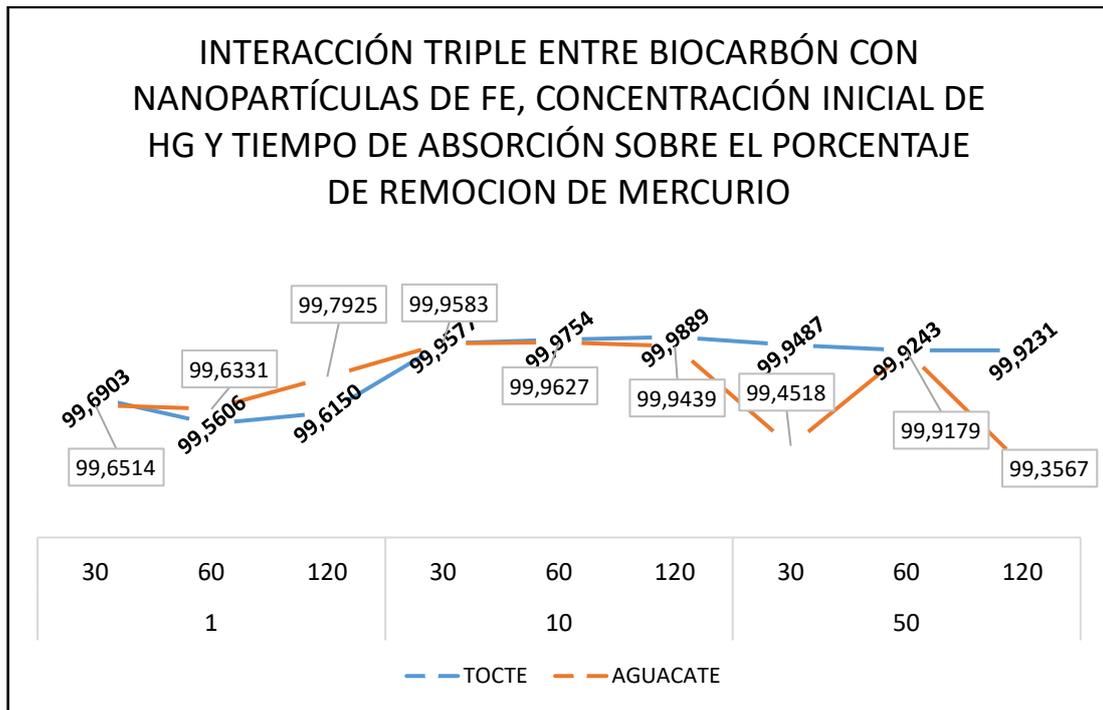
Para determinar el mejor tratamiento entre los diferentes niveles de los factores Biocarbón, Concentración inicial de Hg y Tiempo de absorción, se llevará a cabo una comparación de medias utilizando el método de Tukey. Este análisis se realizará utilizando el software RStudio, el cual proporcionará una evaluación detallada de las diferencias significativas entre los tratamientos.



**Ilustración 4-19:** Gráfico de las diferencias entre tratamientos mediante el método de Tukey  
**Realizado por:** Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-19 se muestra el gráfico de las diferencias entre tratamientos utilizando el método de Tukey, acompañado de una versión simplificada en la parte inferior de la misma. Al analizar los resultados, se evidencia que 10 tratamientos exhiben medias de porcentaje de remoción de mercurio estadísticamente idénticas. Esto sugiere que otros criterios, como consideraciones económicas o de complejidad de elaboración, pueden ser relevantes para la selección del tratamiento óptimo. Además, el tratamiento Biocarbón de Tocte-Concentración inicial de Hg de 10 ppm-Tiempo de absorción de 120 minutos, logra la máxima remoción de

mercurio de acuerdo con la observación de la gráfica de interacción triple, presentada en la Ilustración 4-20, donde se aprecia la similitud entre estos 10 tratamientos.

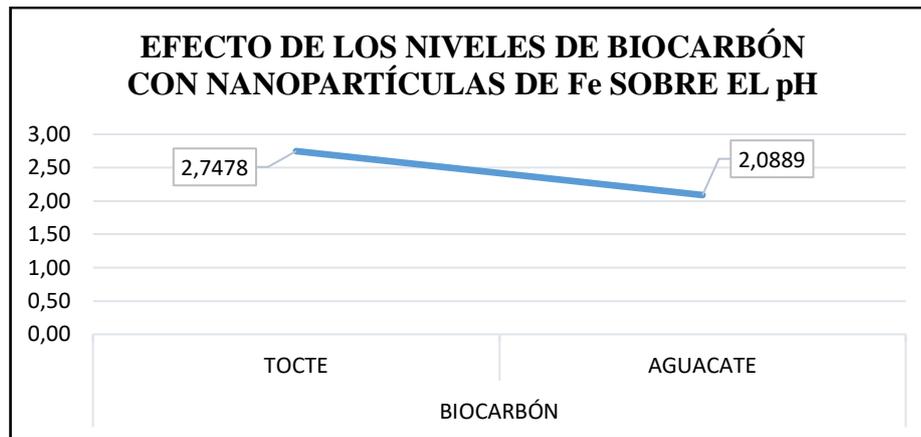


**Ilustración 4-20:** Gráfica de interacción triple, entre los 3 factores principales

Realizado por: Cuenca, 2024.

#### 4.5.2. Análisis de comportamiento de pH

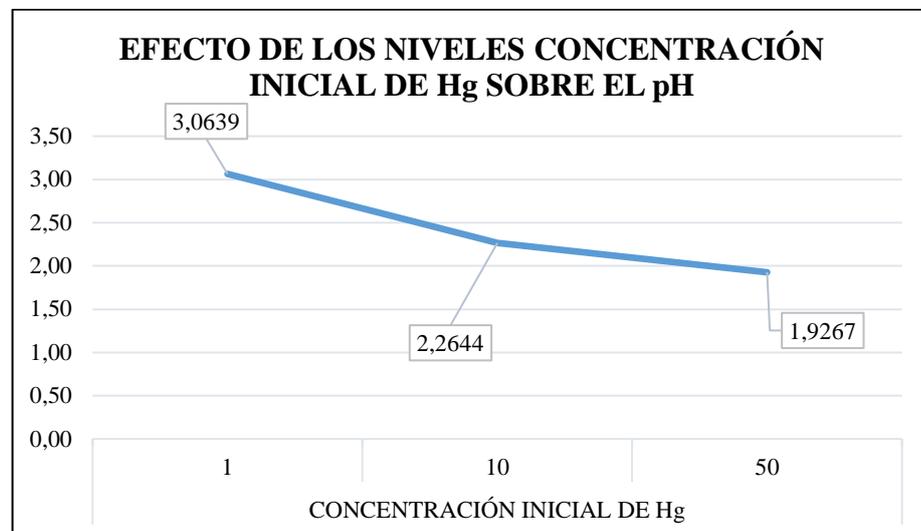
Para el análisis del comportamiento del pH en los distintos niveles de cada factor y de interacción se toma en cuenta las medias de cada nivel o combinación de niveles, a continuación, se presentarán las gráficas de efectos principales y de interacción:



**Ilustración 4-21:** Efecto de los niveles de BCT-Fe sobre el pH

Realizado por: Cuenca, 2024.

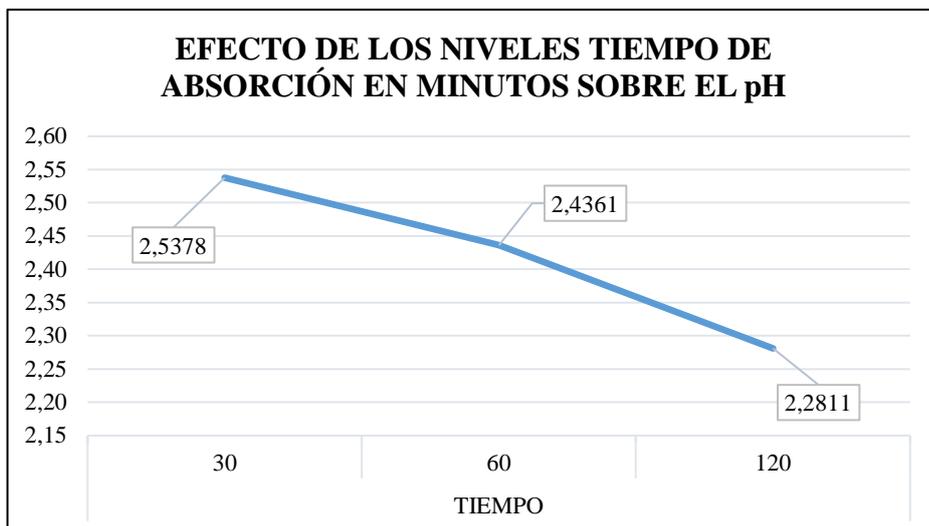
En el gráfico presentado en la Ilustración 4-21, se puede apreciar que al utilizar biocarbón de Tocte, el pH tiende a ser más alto, mientras que al emplear biocarbón de aguacate, el pH es inferior.



**Ilustración 4-22:** Efecto de los niveles de concentración inicial de Hg sobre el pH

Realizado por: Cuenca, 2024.

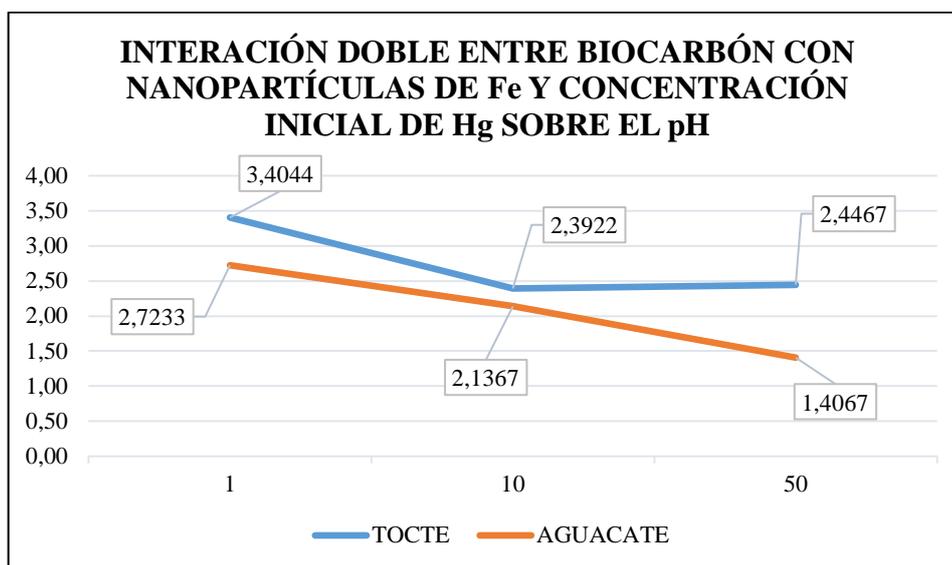
En el gráfico representado en la Ilustración 4-22, se evidencia que cuando la concentración inicial de mercurio es de 1 ppm, el pH tiende a ser más elevado, mientras que cuando la concentración inicial es de 50 ppm, el pH es más bajo.



**Ilustración 4-23:** Efecto de los niveles de tiempo sobre el pH

Realizado por: Cuenca, 2024.

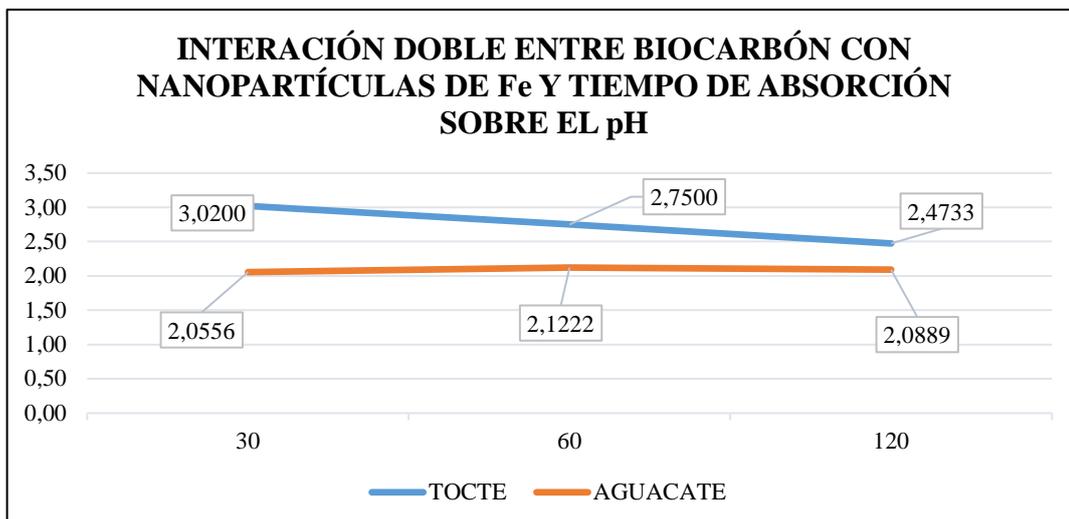
En el gráfico ilustrado en la Ilustración 4-23, se puede observar que cuando el tiempo de absorción es de 30 minutos, el pH tiende a ser más alto, mientras que cuando el tiempo de absorción es de 120 minutos, el pH es más bajo.



**Ilustración 4-24:** Efecto interacción entre Biocarbón y Concentración inicial de Hg

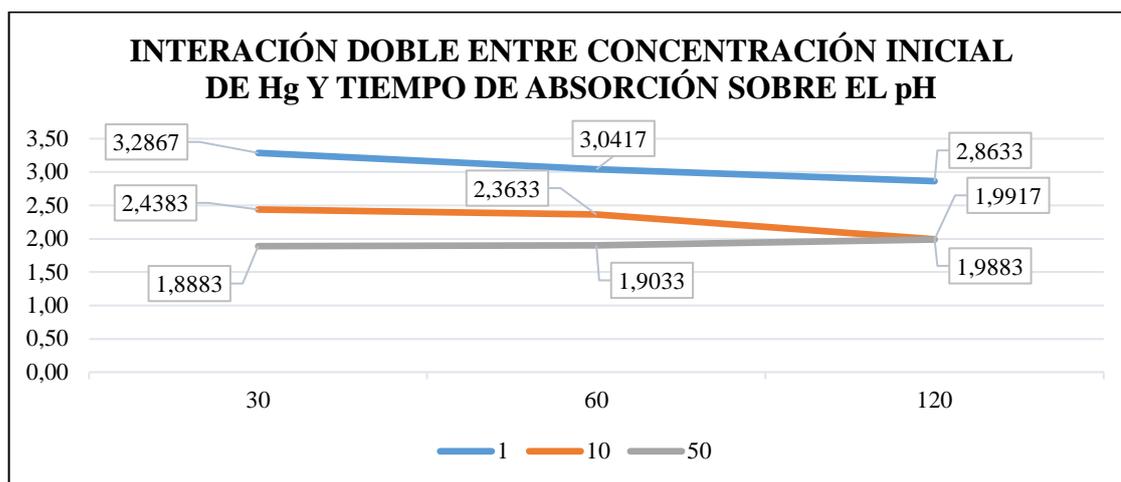
Realizado por: Cuenca, 2024.

En el gráfico representado en la Ilustración 4-24, se puede apreciar que cuando se utiliza el biocarbón de Tocte y la concentración inicial de Hg es de 1 ppm, el pH tiende a ser más alto. Por otro lado, cuando se emplea el biocarbón de Aguacate y la concentración inicial de Hg es de 50 ppm, el pH tiende a ser menor.



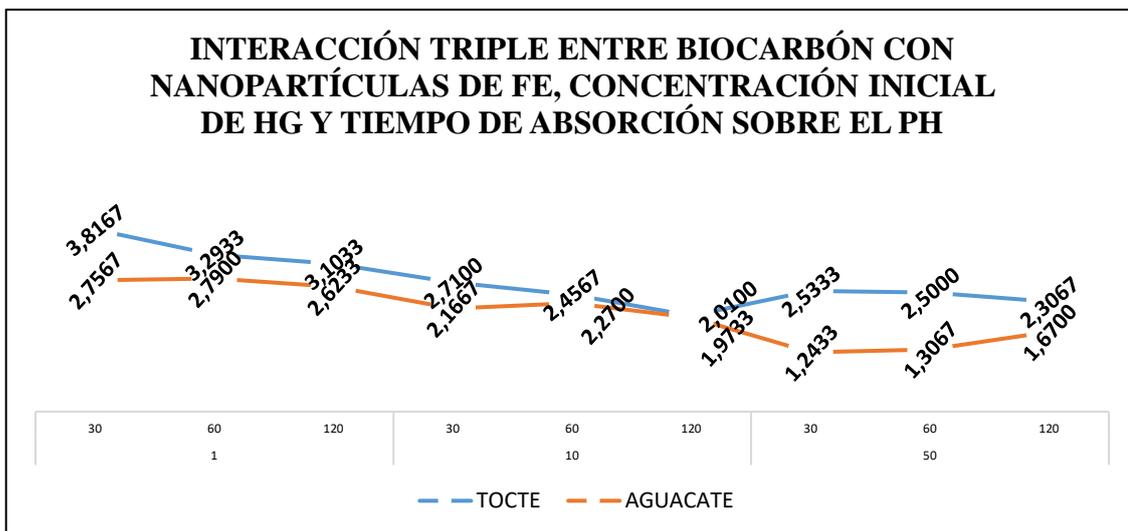
**Ilustración 4-25:** Efecto interacción entre los factores Biocarbón y Tiempo de absorción  
 Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-25 se presenta un gráfico que revela que al utilizar el biocarbón de Tocte y un tiempo de absorción de 30 minutos, el pH tiende a ser más alto. En contraste, cuando se emplea el biocarbón de Aguacate bajo las mismas condiciones de tiempo de absorción de 30 minutos, el pH tiende a ser más bajo.



**Ilustración 4-26:** Efecto interacción entre Concentración inicial Hg y Tiempo de absorción  
 Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-26 se presenta un gráfico que muestra una relación entre la concentración inicial de mercurio (Hg) y el tiempo de absorción con respecto al pH. Se observa que cuando la concentración inicial de Hg es de 1 ppm y el tiempo de absorción es de 30 minutos, el pH tiende a ser más alto. Por otro lado, cuando la concentración inicial de Hg es de 50 ppm y el tiempo de absorción es de 30 minutos, el pH tiende a ser más bajo.

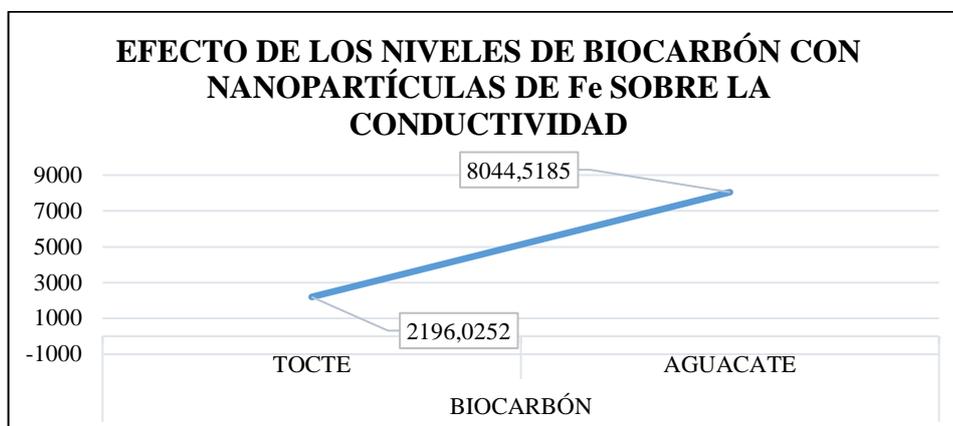


**Ilustración 4-27:** Efecto Biocarbón, Concentración inicial Hg y Tiempo de absorción con pH

Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-27 se presenta un gráfico que muestra la relación entre el tipo de biocarbón utilizado, la concentración inicial de mercurio (Hg) y el tiempo de absorción con respecto al pH. Se observa que cuando se utiliza el biocarbón de Tocte, una concentración inicial de Hg de 1 ppm y un tiempo de absorción de 30 minutos, el pH tiende a ser más alto. Sin embargo, cuando se emplea el biocarbón de aguacate, una concentración inicial de Hg de 50 ppm y un tiempo de absorción de 30 o 60 minutos, el pH tiende a ser más bajo.

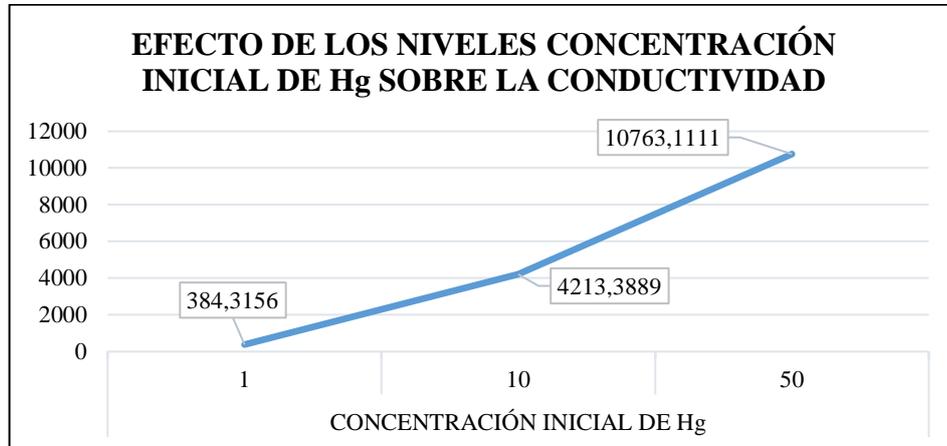
#### 4.5.3. Análisis de comportamiento de Conductividad



**Ilustración 4-28:** Efecto del factor biocarbón en la conductividad

Realizado por: Cuenca, 2024.

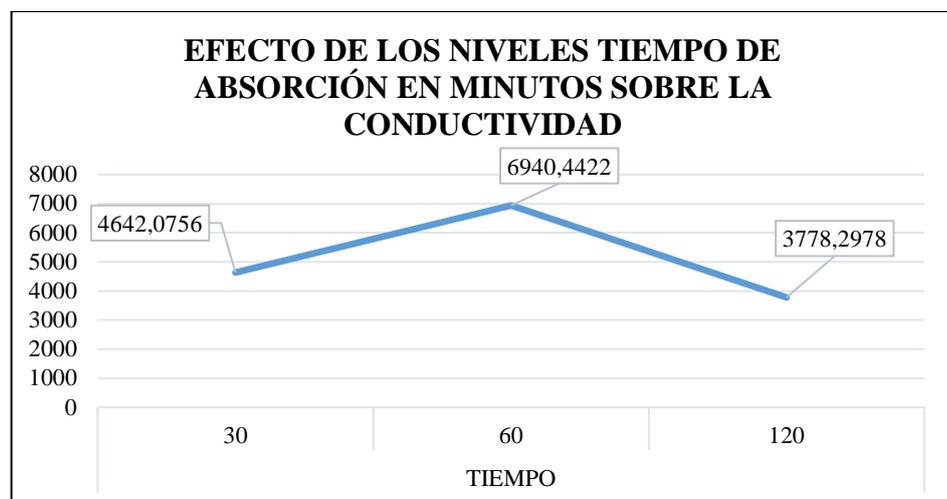
En la Ilustración 4-28 se presenta un gráfico que muestra la relación entre el tipo de biocarbón utilizado y la conductividad. Se observa que cuando se utiliza el biocarbón de Tocte, la conductividad tiende a ser menor, mientras que al emplear el biocarbón de aguacate, la conductividad tiende a ser mayor.



**Ilustración 4-29:** Efecto de la Concentración inicial de Hg en la conductividad

Realizado por: Cuenca, 2024.

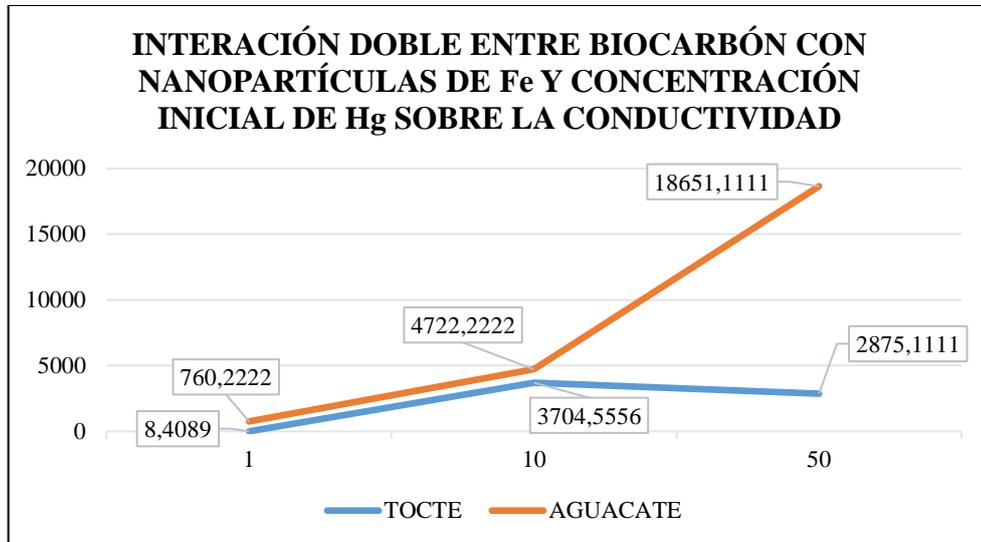
En la ilustración Ilustración 4-29 se presenta un gráfico que ilustra la relación entre la concentración inicial de mercurio y la conductividad. La interpretación de este gráfico revela que cuando la concentración inicial de mercurio es de 1 ppm, la conductividad tiende a ser menor. Por otro lado, cuando la concentración inicial es de 50 ppm, la conductividad tiende a ser mayor.



**Ilustración 4-30:** Efecto del factor tiempo en la conductividad

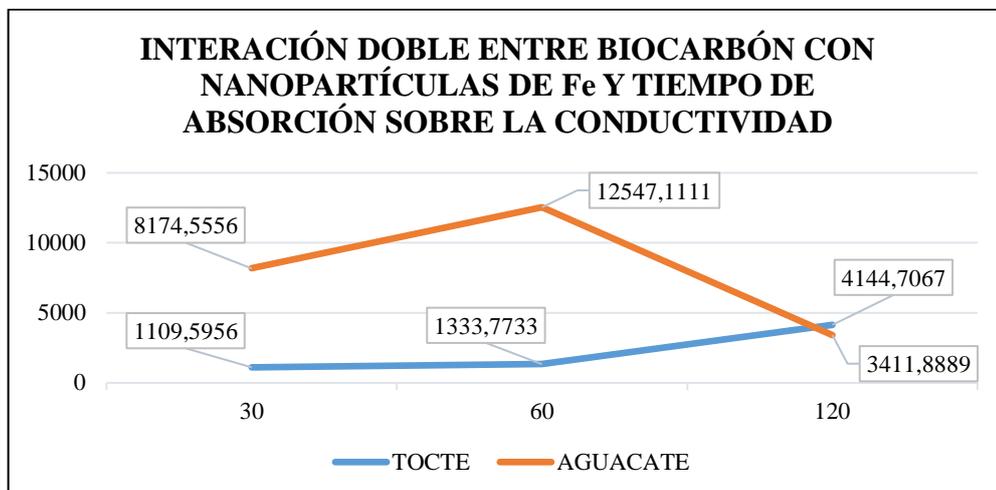
Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-30 se presenta un gráfico que representa la relación entre el tiempo de absorción y la conductividad. Se observa que cuando el tiempo de absorción es de 60 minutos, la conductividad tiende a ser mayor. Por otro lado, cuando el tiempo de absorción es de 120 minutos, la conductividad tiende a ser menor.



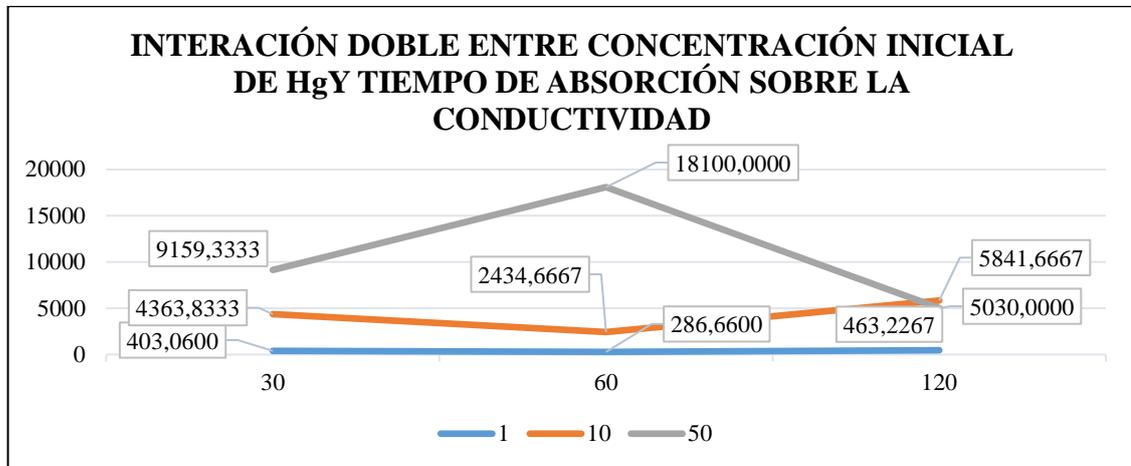
**Ilustración 4-31:** Efecto de interacción del Biocarbón y Concentración inicial de Hg  
**Realizado por:** Cuenca, 2024.

En la ilustración Ilustración 4-31 se presenta un gráfico que muestra la relación entre el tipo de biocarbón utilizado, la concentración inicial de mercurio (Hg) y la conductividad. Al analizar este gráfico, se observa que cuando se emplea el biocarbón de Tocte y la concentración inicial de Hg es de 1 ppm, la conductividad tiende a ser menor. Por el contrario, cuando se utiliza el biocarbón de Aguacate y la concentración inicial de Hg es de 50 ppm, la conductividad tiende a ser mayor.



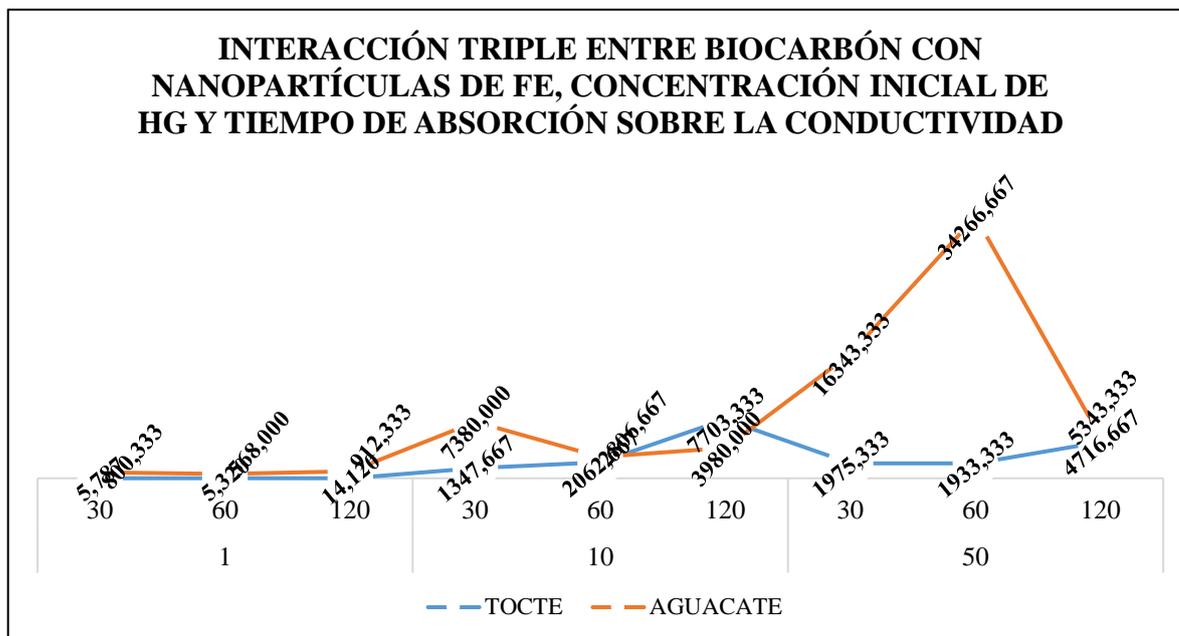
**Ilustración 4-32:** Efecto de interacción del Biocarbón y Tiempo de absorción  
**Realizado por:** Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-32 se presenta un gráfico que muestra la relación entre el tipo de biocarbón utilizado, el tiempo de absorción y la conductividad. Al analizar este gráfico, se observa que cuando se emplea el biocarbón de Tocte y el tiempo de absorción es de 30 minutos o de 60 minutos, la conductividad tiende a ser menor. Por otro lado, cuando se utiliza el biocarbón de Aguacate y el tiempo de absorción es de 60 minutos, la conductividad tiende a ser mayor.



**Ilustración 4-33:** Efecto interacción de Concentración inicial de Hg y Tiempo de absorción  
**Realizado por:** Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-33 se presenta un gráfico que analiza la relación entre la concentración inicial de Hg, el tiempo de absorción y la conductividad. Al examinar este gráfico, se evidencia que cuando la concentración inicial de Hg es de 1 ppm y el tiempo de absorción es de 60 minutos, la conductividad tiende a ser menor. En contraste, cuando la concentración inicial de Hg es de 50 ppm y el tiempo de absorción es de 60 minutos, la conductividad tiende a ser mayor.



**Ilustración 4-34:** Efecto Concentración inicial de Hg, Tiempo de absorción y Biocarbón

Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-34 se presenta un gráfico que examina la relación entre el tipo de biocarbón utilizado, la concentración inicial de Hg, el tiempo de absorción y la conductividad. Al analizar este gráfico, se observa que cuando se utiliza el biocarbón de Tocte, junto con una concentración inicial de Hg de 1 ppm y un tiempo de absorción de 30 minutos, 60 minutos o 120 minutos, la conductividad tiende a ser menor. Por otro lado, cuando se emplea el biocarbón de Aguacate, junto con una concentración inicial de Hg de 50 ppm y un tiempo de absorción de 60 minutos, la conductividad tiende a ser mayor.

#### 4.6. Análisis complementario

El análisis complementario se ejecutó bajo las mismas condiciones del diseño experimental, utilizando filtros de BCT-NFe y CBA-NFe. Estos filtros fueron expuestos a la interacción mediante el goteo de soluciones acuosas de 50 y 100 ppm de Hg, durante intervalos de tiempo de 5, 10 y 15 minutos. El propósito fue explorar la influencia de este factor en la remoción de mercurio, dado que el análisis ANOVA previo no mostró significancia con tiempos de 30, 60 y 120 minutos, probablemente debido a la saturación de la muestra. Al incrementar las concentraciones a 50 ppm, que es la mayoría del diseño experimental, y al agregar una concentración de 100 ppm, el objetivo es resaltar con mayor claridad la interacción. Esto se realiza

con la intención de que el equipo de espectroscopía de absorción atómica pueda detectar con mayor precisión los valores de absorbancia.

#### 4.6.1. Porcentaje de remoción de Hg en análisis complementario

En la Tabla 4-22, se presentan los resultados del cálculo del porcentaje de remoción de Hg utilizando la Ecuación 3-5, la cual se basa en las concentraciones inicial y final de Hg. Estos valores se muestran para BCT-NFe y BCA-NFe después de la aplicación de los diferentes tratamientos complementarios.

**Tabla 4-22:** Porcentaje de remoción de Hg para BCT-NFe y BCA-NFe con 50 y 100 ppm a 5, 10 y 15 minutos.

Concentración inicial de Hg	Tiempo	BCT-NFe		BCT-NFe		
		Concentración final de Hg	% de remoción de Hg	Concentración final de Hg	% de remoción de Hg	
<i>ppm</i>	<i>minutos</i>	<i>ppm</i>	<i>%</i>	<i>ppm</i>	<i>%</i>	
50	5	0,3619152	99,2761696	4,6604240	90,6791520	
		0,6470977	98,7058046	9,0402330	81,9195340	
		0,0974042	99,8051916	0,8501590	98,2996820	
	10	0,0262452	99,9475096	3,8691510	92,2616980	
		0,1622738	99,6754524	3,4301340	93,1397320	
		0,0044462	99,9911076	2,5927680	94,8144640	
		15	0,0016720	99,9966560	0,0603190	99,8793620
			0,0471881	99,9056238	5,2856960	89,4286080
			0,0548614	99,8902772	2,6594830	94,6810340
100	5	1,0092616	98,9907384	0,4292420	99,5707580	
		1,0965180	98,9034820	6,5829300	93,4170700	
		0,5029509	99,4970491	23,8496100	76,1503900	
	10	0,2180706	99,7819294	1,4096190	98,5903810	
		0,3787440	99,6212560	1,1520570	98,8479430	
		0,6484213	99,3515787	5,1370700	94,8629300	
	15	0,0687580	99,9312420	0,3984930	99,6015070	
		0,0642963	99,9357037	0,2816170	99,7183830	
		0,0993067	99,9006933	2,0584300	97,9415700	

Realizado por: Cuenca, 2024.

#### **4.6.2. ANOVA para análisis complementario**

Con base en los datos presentados en la Tabla 4-22, que muestra los porcentajes de remoción de Hg para BCT-NFe y BCA-NFe, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) para investigar cómo los diferentes niveles de los factores de estudio afectan la eliminación de mercurio aumentando las concentraciones iniciales de Hg y reduciendo los tiempos de adsorción. Como se muestra a continuación:

- a) La utilización de BCT-NFe y BCA-NFe.
- b) La concentración inicial de Hg (50 y 100 ppm).
- c) El tiempo de absorción (5, 10, 15 minutos).

Se plantean las siguientes hipótesis con respecto a cada factor:

##### **Factor A (Biocarbón):**

- Hipótesis nula (H0): El tipo de biocarbón no tiene un efecto significativo en el % de remoción de Hg.
- Hipótesis alternativa (H1): El tipo de biocarbón tiene un efecto significativo en el % de remoción de Hg.

##### **Factor B (Concentración Inicial de Hg):**

- Hipótesis nula (H0): La concentración inicial de Hg no tiene un efecto significativo en el % de remoción de Hg.
- Hipótesis alternativa (H1): La concentración inicial de Hg tiene un efecto significativo en el % de remoción de Hg.

##### **Factor C (Tiempo de Adsorción):**

- Hipótesis nula (H0): El tiempo de adsorción no tiene un efecto significativo en el % de remoción de Hg.
- Hipótesis alternativa (H1): El tiempo de adsorción tiene un efecto significativo en el % de remoción de Hg.

##### **Interacciones AB, AC, BC y ABC:**

- Hipótesis nula (H0): Hay interacción significativa entre los factores en combinación.
- Hipótesis alternativa (H1): No hay interacción significativa entre los factores en combinación.

**Tabla 4-23:** ANOVA para el porcentaje de remoción de Hg con 50 y 100 ppm a 5,10 y 15 minutos.

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADOS MEDIOS	f <sub>0</sub>	VALOR_P
<b>A: BIOCARBÓN</b>	13,8354	1	13,8354	0,66	0,4232
<b>B: CONCENTRACION INICIAL DE Hg</b>	95,83	2	47,915	2,30	0,1220
<b>C: TIEMPO DE ADSORCIÓN</b>	273,921	1	273,921	13,15	0,0013
AB	11,6788	2	5,83941	0,28	0,7580
AC	17,1918	1	17,1918	0,83	0,3727
BC	63,0944	2	31,5472	1,51	0,2403
ABC	11,662	2	5,83101	0,28	0,7583
ERROR	500,077	24	20,8366		
TOTAL	987,29	35			

Realizado por: Cuenca, 2024

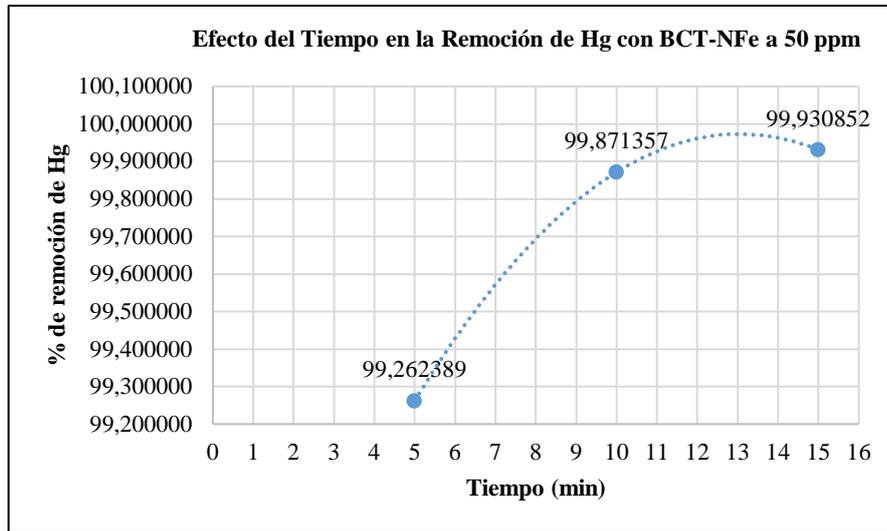
En la Tabla 4-23 se muestra el análisis de varianza (ANOVA) llevado a cabo para investigar la influencia de tres factores (biocarbón, concentración inicial de Hg y tiempo de adsorción) y sus posibles interacciones en el proceso de remoción de Hg. Se observó que el biocarbón no mostró una contribución estadísticamente significativa al % de remoción de Hg, como se evidencia por su baja suma de cuadrados (13,8354) con un grado de libertad y un estadístico F de 0,66, lo que resulta en un valor p de 0,4232. En contraste, la concentración inicial de Hg exhibió una suma de cuadrados de 95,83 con 2 grados de libertad, y un estadístico F de 2,30, aunque su valor p de 0,1220 sugiere una tendencia hacia la significancia estadística. El tiempo de adsorción, por otro lado, demostró una influencia significativa en el % de remoción de Hg, con una suma de cuadrados de 273,921, un estadístico F de 13,15 y un valor p de 0,0013. No se observaron interacciones significativas entre los factores (AB, AC, BC y ABC), ya que todos tuvieron valores  $p > 0,05$ . En conclusión, el tiempo de adsorción emerge como el factor más influyente en la remoción de Hg, seguido por la concentración inicial de Hg, mientras que el biocarbón parece tener un efecto menos significativo. Además, las interacciones entre los factores evaluados no contribuyeron de manera significativa al proceso de remoción de Hg.

#### 4.6.3. Efecto del tiempo de adsorción en la remoción de Hg

A raíz de los hallazgos del ANOVA efectuado en el análisis complementario, que indica la significancia del tiempo de adsorción en la remoción de mercurio, se generan las siguientes representaciones gráficas. Estas ilustran la interacción entre el tiempo (5, 10 y 15 minutos) y la media del porcentaje de remoción de Hg para cada tratamiento, considerando la concentración inicial de Hg (50 y 100 ppm) y el tipo de biocarbón (BCT-NFe y BCA-NFe).

- **Efecto del tiempo de adsorción en la remoción de Hg con BCT-NFe**

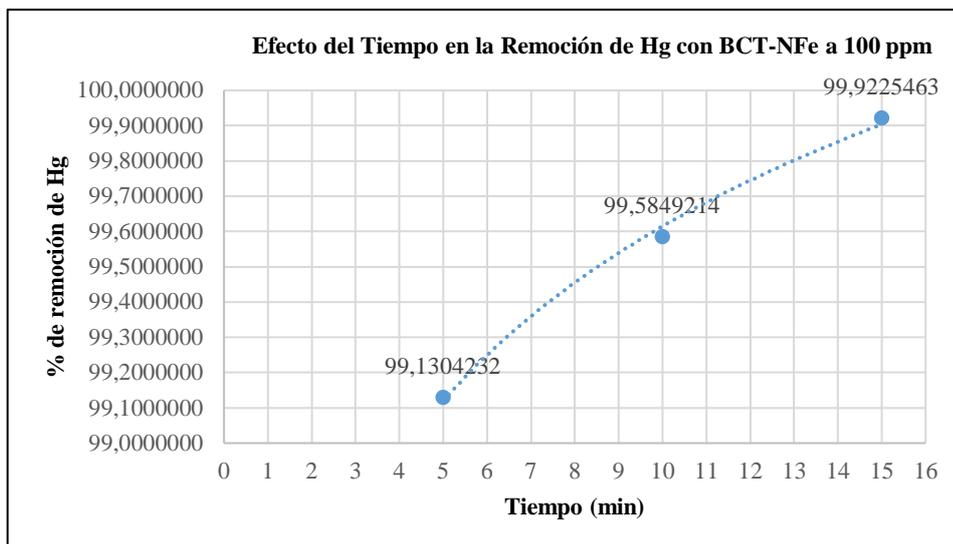
La Ilustración 4-35 presenta la evolución temporal del porcentaje de remoción de mercurio utilizando BCT-NFe con una concentración inicial de 50 ppm. Se observa un aumento gradual en la eficiencia de remoción a lo largo del tiempo, partiendo de 99,26% a los 5 minutos, incrementando a 99,87% a los 10 minutos y alcanzando su máximo de 99,93% a los 15 minutos.



**Ilustración 4-35:** Efecto del Tiempo en la Remoción de Hg con BCT-NFe a 50 ppm

Realizado por: Cuenca, 2024.

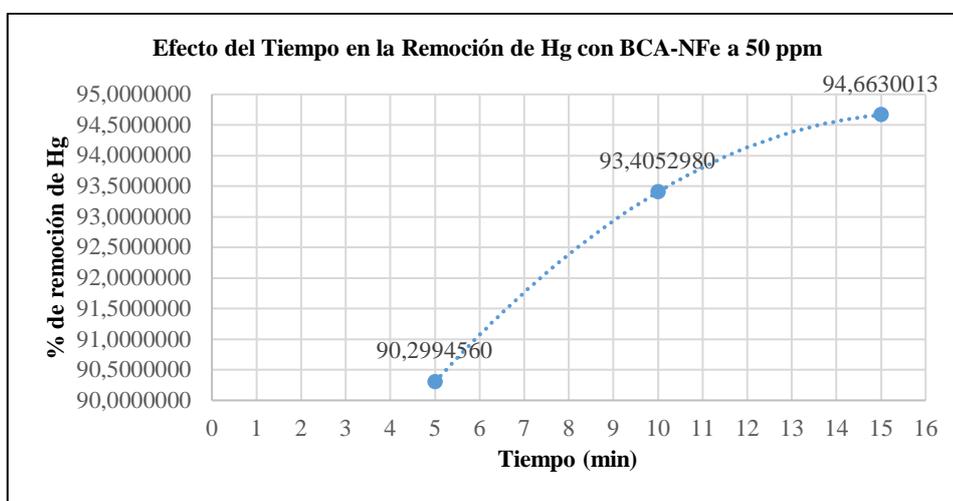
La curva creciente en la Ilustración 4-36 refleja el aumento progresivo en la remoción de mercurio a medida que transcurre el tiempo de exposición al tratamiento con BCT-NFe a 100 ppm. Parte de 99,13% a los 5 minutos, incrementando a 99,58% a los 10 minutos y alcanzando su máximo de 99,92% a los 15 minutos.



**Ilustración 4-36:** Efecto del Tiempo en la Remoción de Hg con BCT-NFe a 100 ppm

Realizado por: Cuenca, 2024.

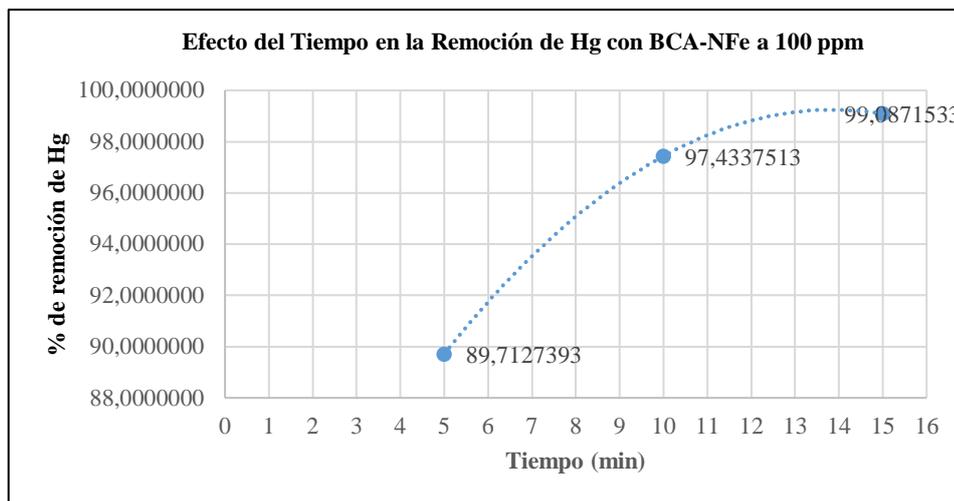
- Efecto del tiempo de adsorción en la remoción de Hg con BCA-NFe



**Ilustración 4-37:** Efecto del Tiempo en la Remoción de Hg con BCA-NFe a 50 ppm

Realizado por: Cuenca, 2024.

La representación gráfica en la Ilustración 4-37 muestra un aumento gradual en la eliminación de mercurio a medida que el tiempo de exposición al tratamiento con BCA-NFe a 50 ppm avanza. Comienza en un 90,29% a los 5 minutos, aumenta a un 93,40% a los 10 minutos y alcanza su punto máximo de 94,66% a los 15 minutos.



**Ilustración 4-38:** Efecto del Tiempo en la Remoción de Hg con BCA-NFe a 100 ppm

Realizado por: Cuenca, 2024.

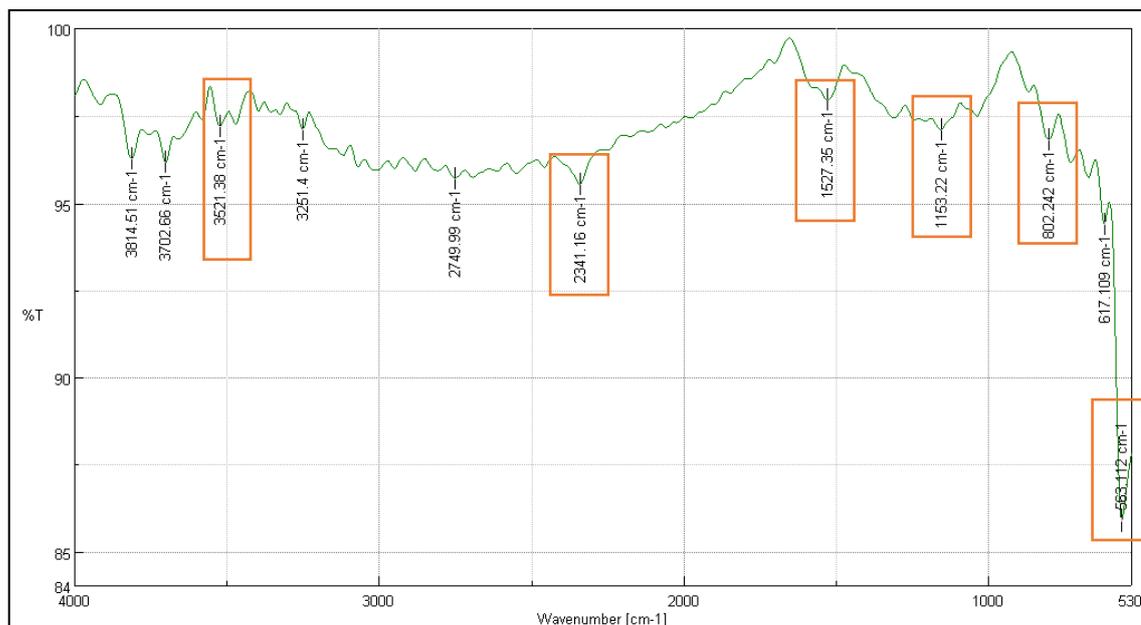
La gráfica presentada en la Ilustración 4-38 que la eliminación de mercurio va en aumento conforme transcurre el tiempo de exposición al tratamiento con BCA-NFe a 100 ppm. Se inicia en un 89,71% a los 5 minutos, aumenta a un 97,43% a los 10 minutos y alcanza su máximo de 99,08% a los 15 minutos.

En las ilustraciones presentadas en esta sección se muestra que el incremento gradual es una respuesta cinética del sistema, donde la adsorción de mercurio por parte del biocarbón activado aumenta de manera constante con el tiempo. Además, la estabilización de la curva hacia los 15 minutos indica que se ha alcanzado un punto de equilibrio, donde la eficiencia de remoción se ha maximizado bajo las condiciones experimentales establecidas.

#### **4.6.4. Espectroscopía de Infrarrojo (IR) posterior a la adsorción**

Después de aplicar diversos tratamientos a diferentes concentraciones de mercurio, se realizó un análisis de espectroscopia de infrarrojo en muestras de BCT-NFe y BCA-NFe. El objetivo fue confirmar la presencia de mercurio en las muestras, lo que evidencia su capacidad para adsorber este elemento.

#### 4.6.4.1. Análisis IR de biocarbón de tocte con nanopartículas de hierro después de la adsorción



**Ilustración 4-39:** Picos de IR para BCT-NFe después de la adsorción

Realizado por: Cuenca, 2024.

**Tabla 4-24:** Datos de las pulsaciones de BCT-NFe después de la adsorción

Wavenumber [cm-1]	%T	Grupo funcional
3521.38	97.1928	Hidroxilo (O-H)
1527.35	97.9427	Enlace (C-H) alqueno C=C
1153.22	97.0906	Vibración del enlace (C-O)
802.242	96.8136	Anillos Bencénicos (C-H)
563.112	85.8392	Enlace (Fe-O)

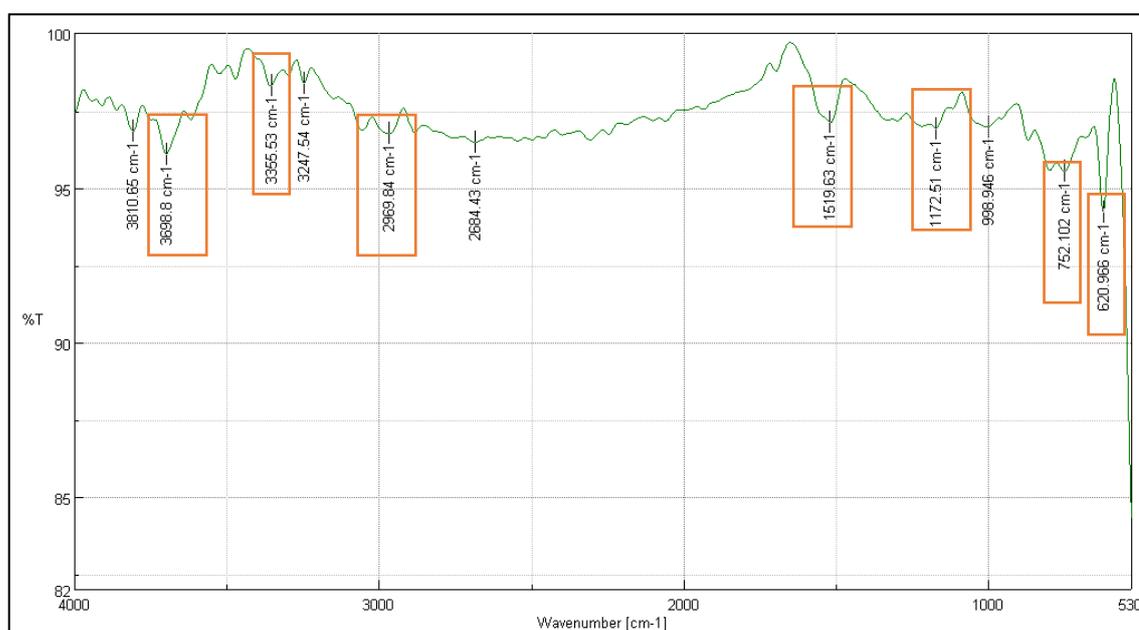
Realizado por: Cuenca, 2024.

En la Ilustración 4-39 se muestran los picos resultantes del análisis de espectroscopía infrarroja (IR) realizado en el BCT-NFe después de la adsorción de mercurio. Las correspondencias se detallan en la Tabla 4-24, donde se presenta el número de onda en relación con el porcentaje de transmitancia y el grupo funcional asociado. El pico registrado a  $3521.38 \text{ cm}^{-1}$  indica la presencia de grupos O-H asociados intermolecularmente en el rango de  $3200\text{-}3600 \text{ cm}^{-1}$ . Además, se identificó un pico de  $1527.35 \text{ cm}^{-1}$  correspondiente al doble enlace C=C. Por otro lado, el pico a  $1153.22 \text{ cm}^{-1}$ , correspondiente al enlace C-O, sugiere la presencia de grupos fenoles o ésteres, mientras que los picos a  $802.442 \text{ cm}^{-1}$  validan la presencia de aromáticos debido a la vibración de anillos bencénicos. Por último, el pico de  $563 \text{ cm}^{-1}$  representa la presencia de hierro por el enlace Fe-O, presente en el rango de  $540\text{ a }640 \text{ cm}^{-1}$ .

Estas longitudes de onda concuerdan con el estudio realizado por (Albis, Arzuza, Mosquera, 2019, pág. 36), sobre la remoción de Mercurio (II) en solución acuosa utilizando residuos industriales de yuca, correspondientes a la presencia del grupo funcional hidroxilo (O-H),  $1015\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al enlace C-O y  $860\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a los anillos bencénicos en las muestras después de la adsorción con diferentes concentraciones de mercurio. Por lo tanto, al coincidir los resultados de este estudio con el estudio mencionado anteriormente con longitudes de onda similares correspondientes a los mismos grupos identificados, se concluye que el mercurio está presente en la muestra y que la adsorción de este metal ha sido efectiva.

En concordancia, al comparar la Ilustración 4-2 con la Ilustración 4-39, se pueden observar cambios significativos en los espectros de infrarrojo, evidenciando alteraciones moleculares inducidas por la adsorción de mercurio en la muestra. En la Tabla 4-8, se encuentran los picos característicos de la vibración de los enlaces químicos C=C presentes en los materiales antes de la adsorción de mercurio, donde se muestra el pico máximo de  $1550.49\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a los dobles enlaces del grupo de alquenos, lo que indica las vibraciones intrínsecas de los enlaces presentes en el material. Sin embargo, después de la adsorción, en la Tabla 4-24, se observa un pico de  $3521.38\text{ cm}^{-1}$ , mostrando un notable aumento, lo que indica la presencia de grupos funcionales O-H y como estos interactúan con el mercurio en solución en el BCT-NFe, confirmando así la adsorción de este metal luego de los tratamientos aplicados.

#### 4.6.4.2. Análisis IR de biocarbón de aguacate con nanopartículas de hierro después de la adsorción



**Ilustración 4-40:** Picos de IR para BCA-NFe después de la adsorción

Realizado por: Cuenca, 2024.

**Tabla 4-25:** Datos de las pulsaciones de BCA-NFe después de la adsorción

Wavenumber [cm-1]	%T	Grupo funcional
3698.8	96.0806	Hidroxilo (O-H) libre
3355.53	98.3164	Hidroxilo (O-H) intermolecular
2969.84	96.7523	Enlace (C-H) alqueno o alquino
1519.63	97.1243	Enlace (C-H) alqueno C=C
1172.51	96.9276	Vibración del enlace (C-O)
752.102	95.5531	Enlace (C-H) alcano
620.966	94.2028	Enlace (Fe-O)

Realizado por: Cuenca, 2024.

La muestra los resultados del análisis de espectroscopia infrarroja (IR) realizado en el BCA-NFe después de la adsorción de mercurio. En la Tabla 4-25 se detallan los datos correspondientes, incluyendo el número de onda, el porcentaje de transmitancia y el grupo funcional asociado. El pico a 3555.53  $\text{cm}^{-1}$  indica la presencia de grupos O-H asociados intermolecularmente, típicamente observados en el rango de 3200-3600  $\text{cm}^{-1}$ . Por otro lado, el pico a 3968.8  $\text{cm}^{-1}$  también indica la presencia de estos grupos, posiblemente en una configuración libre, que suele encontrarse en el rango de 3570-3670  $\text{cm}^{-1}$ . Además, el pico a 2969.84  $\text{cm}^{-1}$  corresponde a vibraciones de enlace C-H, típicas de alquenos o alquinos. Asimismo, se observa un pico a 1519.63  $\text{cm}^{-1}$ , indicativo de la presencia de un doble enlace C=C. Por otro lado, el pico a 1172.51  $\text{cm}^{-1}$ , relacionado con el enlace C-O, sugiere la posible existencia de grupos fenoles o ésteres. La presencia de enlaces C-H en alcanos se confirma con el pico a 752.102  $\text{cm}^{-1}$ . Finalmente, el pico a 620  $\text{cm}^{-1}$  apunta hacia la presencia de hierro mediante el enlace Fe-O, comúnmente observado en el rango de 540 a 640  $\text{cm}^{-1}$ .

Estas longitudes de onda concuerdan con el estudio realizado por (Albis, Arzuza, Mosquera, 2019, pág. 36), sobre la remoción de Mercurio (II) en solución acuosa utilizando residuos industriales de yuca, correspondientes a la presencia del grupo funcional hidroxilo (O-H), 1015  $\text{cm}^{-1}$  correspondiente al enlace C-O y 860  $\text{cm}^{-1}$  correspondiente a los anillos bencénicos en las muestras después de la adsorción con diferentes concentraciones de mercurio. Por lo tanto, al coincidir los resultados de este estudio con el estudio mencionado anteriormente con longitudes de onda similares correspondientes a los mismos grupos identificados, se concluye que el mercurio está presente en la muestra y que la adsorción de este metal ha sido efectiva.

En relación con esto, al comparar la Ilustración 4-4 con la Ilustración 4-40, se observan cambios significativos en los espectros de infrarrojo, evidenciando alteraciones moleculares inducidas por la adsorción de mercurio en la muestra. En la Tabla 4-10 se identifican los picos característicos de la vibración de los enlaces químicos C-H y C=C presentes en los materiales antes de la adsorción de mercurio, donde se destaca el pico máximo de 2819.42  $\text{cm}^{-1}$  correspondiente a los

grupos metileno (-CH<sub>2</sub>), indicando las vibraciones intrínsecas de los enlaces presentes. Sin embargo, tras la adsorción, en la Tabla 4-25, se observa un pico a 3355.53 cm<sup>-1</sup>, mostrando un notable aumento, lo que indica la presencia de grupos funcionales O-H en el BCA-NFe después de la adsorción, confirmando así la adsorción de este metal luego de los tratamientos aplicados.

#### **4.7. Análisis de resultados**

El análisis de los resultados de la caracterización física y química y técnica del biocarbón derivado de tocte y aguacate impregnado con nanopartículas de hierro revela aspectos fundamentales sobre su composición y propiedades. Se destaca que BCT-NFe exhibe un contenido ligeramente superior de humedad en comparación con el BCA-NFe, lo que puede influir en la eficiencia energética durante procesos como la pirólisis. Además, ambos biocarbones presentan un pH ligeramente ácido, con el BCT-NFe siendo ligeramente más ácido, lo que podría favorecer su capacidad de adsorción de contaminantes.

En cuanto a la composición y la estructura, se observa que ambos biocarbones presentan valores similares de cenizas totales, sugiriendo una presencia comparable de residuos. Sin embargo, el BCT-NFe exhibe una mayor densidad aparente y real, indicando una potencialmente mayor capacidad de biosorción, mientras que el BCA-NFe muestra una mayor porosidad, lo que sugiere una potencialmente mayor eficiencia en el proceso de adsorción.

El análisis de espectroscopía de infrarrojo (IR) revela información detallada sobre la composición química de los biocarbones y sus muestras impregnadas con nanopartículas de hierro, identificando enlaces y grupos funcionales característicos. La impregnación con nanopartículas de hierro induce cambios en los espectros, sugiriendo una interacción entre el biocarbón y las nanopartículas de hierro, lo que puede influir en su capacidad de adsorción.

Por otro lado, el análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) proporciona información donde se detecta una distribución homogénea de las nanopartículas de hierro en la matriz del biocarbón, con partículas bien dispersas y un tamaño aparentemente uniforme. Garantizando una interacción entre el biocarbón y las nanopartículas de hierro. Además de mejorar la capacidad de adsorción de contaminantes. Por otro lado, la presencia de poros visibles en la superficie del biocarbón proporciona sitios de adsorción adicionales, aumentando así su capacidad de remoción de contaminantes.

Además, se observa una ligera diferencia en la morfología entre las muestras de biocarbón derivado de tocte y aguacate impregnadas con nanopartículas de hierro. Mientras que el biocarbón de tocte muestra una estructura más compacta y densa, el biocarbón de aguacate exhibe una mayor porosidad y una distribución de partículas más dispersa. Estas diferencias morfológicas podrían influir en la eficacia de adsorción de los materiales, con el biocarbón de aguacate potencialmente ofreciendo una mayor área superficial y, por lo tanto, una mayor capacidad de adsorción.

En cuanto al porcentaje de remoción de mercurio, para BCT-Fe se observa que el porcentaje de remoción oscila entre un mínimo de 99.519% y un máximo de 99.993%, correspondiente al tratamiento con una concentración inicial de 10 ppm y un tiempo de adsorción de 120 minutos. Mientras que para BCA-Fe el porcentaje de remoción oscila entre un mínimo de 99.336% y un máximo de 99.989%, correspondiente al tratamiento con una concentración inicial de 10 ppm y un tiempo de adsorción de 120 minutos

El análisis estadístico mediante ANOVA permitió determinar la influencia significativa de los factores estudiados (Biocarbón, Concentración inicial de Hg y Tiempo de absorción) en el porcentaje de remoción de mercurio. Además, se identificaron efectos de interacción entre estos factores, lo que indica la importancia de considerar las relaciones complejas entre las variables experimentales. El método de Tukey se utilizó para comparar los diferentes tratamientos y determinar el más efectivo en la remoción de mercurio. Se encontró que el tratamiento BCT-NFe con una concentración inicial de Hg de 10 ppm y un tiempo de absorción de 120 minutos fue el más eficaz en la remoción de mercurio, lo que sugiere su viabilidad para la purificación de aguas contaminadas. Estos resultados son fundamentales para comprender cómo los diferentes factores estudiados afectan la eficacia de adsorción de los materiales y para identificar las condiciones óptimas para su aplicación en la remoción de contaminantes en el agua.

El análisis de los resultados muestra claramente cómo diversos factores afectan el pH y la conductividad en el proceso estudiado. En cuanto al pH, se observa que el tipo de biocarbón utilizado tiene un impacto significativo: el biocarbón de Tocte tiende a aumentar el pH, mientras que el biocarbón de aguacate tiende a disminuirlo. Además, la concentración inicial de mercurio y el tiempo de absorción también influyen en el pH: una mayor concentración inicial de mercurio y un tiempo de absorción más largo tienden a disminuir el pH.

Por otro lado, en lo que respecta a la conductividad, se evidencia que el tipo de biocarbón utilizado también juega un papel importante: el biocarbón de Tocte tiende a disminuir la conductividad, mientras que el biocarbón de aguacate tiende a aumentarla. Además, tanto la concentración inicial

de mercurio como el tiempo de absorción influyen en la conductividad, con concentraciones más altas de mercurio y tiempos de absorción más largos que generalmente aumentan la conductividad.

La interacción entre los factores también es relevante en ambos casos. Por ejemplo, se observa que el biocarbón de Tocte tiene un efecto positivo en el pH cuando se combina con una concentración inicial baja de mercurio y un tiempo de absorción corto. Por otro lado, el biocarbón de aguacate muestra un efecto negativo en el pH en combinación con una concentración inicial alta de mercurio y un tiempo de absorción más largo. En cuanto a la conductividad, se observa que el biocarbón de Tocte disminuye la conductividad cuando se combina con una concentración inicial baja de mercurio y tiempos de absorción más cortos, mientras que el biocarbón de aguacate aumenta la conductividad cuando se combina con una concentración inicial alta de mercurio y tiempos de absorción más largos. Estas relaciones complejas entre los factores resaltan la importancia de considerar múltiples variables al evaluar el comportamiento del pH y la conductividad en sistemas de adsorción de contaminantes.

El análisis complementario se llevó a cabo bajo las mismas condiciones del diseño experimental, utilizando filtros de BCT-NFe y CBA-NFe. Estos filtros fueron expuestos a soluciones acuosas de 50 y 100 ppm de Hg mediante goteo, durante intervalos de tiempo de 5, 10 y 15 minutos. El propósito fue explorar la influencia de este factor en la remoción de mercurio, dado que el análisis ANOVA previo no mostró significancia con tiempos de 30, 60 y 120 minutos, probablemente debido a la saturación de la muestra.

El análisis de los resultados obtenidos en este estudio reveló el efecto de diferentes tratamientos complementarios en la remoción de Hg para BCT-NFe y BCA-NFe. La exploración de los porcentajes de remoción de Hg para estas variantes indicó que el biocarbón no mostró una contribución estadísticamente significativa, mientras que la concentración inicial de Hg y el tiempo de adsorción sí demostraron efectos significativos en la remoción de Hg. Específicamente, se observó un incremento gradual en la eficiencia de remoción con el tiempo de exposición, reflejado en las Ilustraciones 4-35, 4-36, 4-37 y 4-38. Estas curvas ascendentes sugirieron una respuesta cinética del sistema, donde la adsorción de mercurio aumentó constantemente con el tiempo. Además, la estabilización de las curvas hacia los 15 minutos indicó la maximización de la eficiencia de remoción bajo las condiciones experimentales establecidas.

## **4.8. Comprobación de hipótesis**

### ***4.8.1. Comprobación de hipótesis general***

Se comprobó que los biocarbones BCT-Fe y BCA-Fe, con valores del 99.993% y 99.989% respectivamente, cumplen con una capacidad destacada para la remoción de mercurio, al superar el umbral del 99% en todas las pruebas realizadas en soluciones acuosas contaminadas con mercurio mediante el proceso de adsorción.

### ***4.8.2. Comprobación de hipótesis específicas***

- Se logró una remoción del 99.993% de mercurio utilizando biocarbón impregnado con nanopartículas de hierro.
- Se obtuvo una remoción del 99.989% de mercurio empleando biocarbón impregnado con nanopartículas de hierro.
- Se demostró que el biocarbón de Tocte impregnado con nanopartículas de hierro exhibe una mayor eficacia en la remoción de mercurio, con un porcentaje del 99.993%, en comparación con el obtenido a partir del aguacate, que alcanzó un 99.989%.

## CONCLUSIONES

- Se obtuvo biocarbón impregnado con nanopartículas de hierro a partir de los residuos de tocte y aguacate mediante el proceso de pirólisis, lo que demuestra la viabilidad de utilizar estos materiales como adsorbentes magnéticos para la remoción de contaminantes.
- Se caracterizó el biocarbón impregnado física y químicamente. BCT-NFe mostró un contenido de humedad ligeramente mayor al de BCA-NFe (3.98% y 2.81%, respectivamente) y un pH ligeramente más ácido, mientras que ambos biocarbones tuvieron valores similares de cenizas totales. BCT-NFe exhibió una mayor densidad aparente y real, indicando una potencialmente mayor capacidad de biosorción, mientras que BCA-NFe mostró una mayor porosidad, sugiriendo una mayor eficiencia en el proceso de adsorción. Los análisis de espectroscopía de infrarrojo (IR) y microscopía electrónica de barrido (SEM) confirmaron la presencia de nanopartículas de hierro y su interacción con el biocarbón.
- Se estimó la capacidad de remoción de mercurio para los tratamientos BCT-NFe y BCA-NFe, demostrando una eficiencia superior al 99% en la eliminación del mercurio en todas las pruebas realizadas. Específicamente, se alcanzó un porcentaje de remoción del 99.993% para el BCT-NFe, superando ligeramente al 99.989% obtenido para el BCA-NFe, en el tratamiento con una concentración inicial de 10 ppm y un tiempo de adsorción de 120 minutos. Estos resultados indican que ambos tratamientos demostraron una capacidad destacada en la eliminación de mercurio.
- Se evaluó el porcentaje de remoción de mercurio mediante ANOVA, confirmando el impacto significativo de los factores de concentración, tiempo y tipo de biocarbón. Los resultados revelaron que el tratamiento más efectivo fue BCT-NFe, con una concentración inicial de Hg de 10 ppm y un tiempo de absorción de 120 minutos, logrando una remoción del 99.993%, lo que sugiere su potencial para la purificación de aguas contaminadas.
- Se analizó la variabilidad en el pH según los tratamientos aplicados, con valores entre 1.00 y 3.98 para BCT-NFe, y entre 1.00 y 2.91 para BCA-NFe. El biocarbón de Tocte aumenta el pH, mientras que el de aguacate lo disminuye. Respecto a la conductividad, se registraron valores entre 5.22  $\mu\text{S}$  y 38900  $\mu\text{S}$  donde el biocarbón de Tocte reduce la conductividad, mientras que el de aguacate la aumenta. La concentración inicial de mercurio y el tiempo de absorción también afectan la conductividad, con tendencia al aumento en ambos casos.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda explorar diferentes condiciones de impregnación, como el tiempo, la temperatura y la concentración de la solución de nanopartículas de hierro para optimizar la eficiencia de adsorción de los biocarbones y su capacidad para remover contaminantes de manera más efectiva.
- Se recomienda realizar un estudio detallado de la cinética de adsorción de los biocarbones para proporcionar una comprensión más profunda de los mecanismos involucrados como la velocidad y el equilibrio de adsorción en la remoción de contaminantes.
- Se recomienda validar la eficacia de los biocarbones en condiciones reales, realizando pruebas a escala piloto en sistemas de tratamiento de aguas residuales.
- Se recomienda investigar la posibilidad de regenerar y reutilizar los biocarbones después de su uso en la remoción de contaminantes para contribuir significativamente a la sostenibilidad y viabilidad económica de su aplicación en el tratamiento de aguas residuales.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **ALBIS, A., ARZUZA, S. y MOSQUERA, A.**, 2019. Remoción de Mercurio (II) en solución acuosa usando residuo industrial de yuca (Manihot esculenta). *Prospectiva*. 19 julio 2019. ISSN 1692-8261.
2. **ALDAMA, I., ARÉVALO, P., CUBERO, Á., PÉREZ, M., CASTELAÍN, M., MOLINA, J. y ISASI, J.**, 2009. Preparación y estudio de materiales nanoparticulados de óxido de hierro. *Serie Química de Materiales* [en línea], vol. 4, ISSN 1989-5003. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/228676439>.
3. **AL-MOUSAWI, H., AL-TAEE, M., RASHEED, M. y AL-HAJJAR, Q.**, 2019. Molecular and Nanotechnical Study for Antibiofilm Formation and CsuE Gene Expression Activities of Synthesized Iron Oxide Nanoparticles Against Multidrug-Resistant Acinetobacter ba. *Iraqi Journal of Biotechnology* [en línea]. 2019. pp. 201-215. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/339784618>.
4. **AL-OTAIBI, T., HAWSAH, M.A., ALOJAYRI, G., MARES, M.M., ALJAWDAH, H.M.A., MAODAA, S.N., AL-SHAEBI, E.M., DKHIL, M.A., THAGFAN, F.A., AL-QURAI SHY, S. y ABDEL-GABER, R.**, 2023. In vivo anticoccidial, antioxidant, and anti-inflammatory activities of avocado fruit, *Persea americana* (Lauraceae), against *Eimeria papillata* infection. *Parasitology International* [en línea]. 1 agosto 2023. pp. 102741. [consulta: 31 enero 2024]. ISSN 1383-5769. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383576923000181>.
5. **ÁLVAREZ, P., ÁVILA, Q. y COTO, A.**, 2015. Cultivos Tropicales. *Cultivos Tropicales* [en línea]. La Habana, 2015. pp. 111-123. ISSN 0258-5936. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193239249016>.
6. **AMÓRTEGUI, F.**, 2001. El cultivo de aguacate: módulo educativo para el desarrollo tecnológico de la comunidad rural. *Corporación para la promoción del desarrollo rural y agroindustrial del Tolima* [en línea]. [consulta: 20 febrero 2024]. Disponible en: <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/13053>.

7. **APPELO, C.A.J. y POSTMA, D.**, 2004. *Geochemistry, groundwater and pollution, second edition* [en línea]. S.l.: CRC Press. [consulta: 31 enero 2024]. ISBN 9781439833544. Disponible en: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781439833544/geochemistry-groundwater-pollution-appelo-dieke-postma>.
8. **BORJA, M. y QUITUISACA, S.**, 2020. *Elaboración de harina, esencia y pasta de tocte para la aplicación en recetas de postres de innovación* [en línea]. Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Licenciada en Gastronomía y Servicio de Alimentos y Bebidas. Cuenca: Universidad de Cuenca. [consulta: 31 enero 2024]. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/33990>.
9. **CABRERA, J.**, 2017. *Síntesis de nanopartículas de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (magnetita) y su recubrimiento usando carbonización de glucosa mediante un proceso solvotérmico*. San Luis Potosí: Instituto Potodino de investigación científica y tecnológica, A.C.
10. **CANTOS, M., QUESADA, O., ROSS, A., BRITO, A. y CASANOVA, A.**, 2018. Cinética de la pirólisis de residuos madereros ecuatorianos. *Revista Cubana de Química*. 2018. pp. 400-422.
11. **CARBONZERO SAGL**, 2020. Biocarbón: Biomasa térmicamente descompuesta. [en línea]. [consulta: 20 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.biochar.info/biochar.biochar-overview.cfml>.
12. **CAROLIN, F., KUMAR, S., SARAVANAN, A., JOSHIBA, J. y NAUSHAD, M.**, 2017. Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 1 junio 2017. pp. 2782-2799. ISSN 2213-3437.
13. **CASTROVIEJO, M.**, 2020. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). *Universidad de Burgos* [en línea]. [consulta: 22 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/microscopia/microscopia-electronica-de-barrido-meb>.

14. **CHO, D., YOON, K., KWON, E., BISWAS, J. y SONG, H.**, 2017. Fabrication of magnetic biochar as a treatment medium for As(V) via pyrolysis of FeCl<sub>3</sub>-pretreated spent coffee ground. *Environmental Pollution*. 1 octubre 2017. pp. 942-949. ISSN 0269-7491.
15. **CIMAV**, 2023. Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido. *Gobierno de México* [en línea]. [consulta: 22 febrero 2024]. Disponible en: <https://cimav.edu.mx/laboratorios/mty-microscopia-electronica-de-barrido/>.
16. **CLAVIJO, J.**, 2013. Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Revista Elementos* [en línea]. 2013. pp. 133-146. [consulta: 22 febrero 2024]. ISSN 2248-5252. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5085347&info=resumen&idioma=ENG>.
17. **CUNDY, A.B., HOPKINSON, L. y WHITBY, R.L.D.**, 2008. Use of iron-based technologies in contaminated land and groundwater remediation: A review. *Science of The Total Environment*, vol. 400, no. 1-3, ISSN 0048-9697. DOI 10.1016/J.SCITOTENV.2008.07.002.
18. **ESCALANTE, R.A., PÉREZ, L.G., HIDALGO, M.C., LÓPEZ, C.J., CAMPO, A.J., VALTIERRA, P.E. y ETCHEVERS, B.J.**, 2016. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana* [en línea]. 2016. pp. 367-382. [consulta: 20 febrero 2024]. ISSN 2395-8030. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792016000300367](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000300367).
19. **ESCÁRCEGA, C., CABALLERO, E., CASTAÑEDA, J., UREÑA, B., MORONES, J. y BARRIGA, E.**, 2021. Aprovechamiento de residuos orgánicos para la síntesis de nanopartículas metálicas funcionales. *Química Hoy* [en línea]. 15 febrero 2021. pp. 6-11. [consulta: 31 enero 2024]. ISSN 2007-1183. Disponible en: <https://quimicahoy.uanl.mx/index.php/r/article/view/266>.
20. **ESPAÑOL, S.**, 2012. Contaminación con mercurio por la actividad minera. *Biomédica*, vol. 32, no. 3, ISSN 0120-4157. DOI <https://doi.org/10.7705/biomedica.v32i3.1437>.
21. **ESPOCH**, 2024. *Laboratorio de materiales de la Facultad de Mecánica*. Riobamba.
22. **FLORES, J.J.Á., CEVALLOS, H.V., MONTEALEGRE, V.J.G. y ROMERO, H.C.**, 2021. Análisis de la producción de aguacate en el Ecuador y su exportación a mercados

internacionales en el periodo 2008 al 2018. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas* [en línea]. 1 junio 2021. pp. 164-172. [consulta: 31 enero 2024]. ISSN 2631-2662. Disponible en: <https://remca.umet.edu.ec/index.php/REMCA/article/view/424>.

23. **GALLEGOS, W., VEGA, M. y NORIEGA, P.**, 2012. Espectroscopía de absorción atómica con llama y su aplicación para la determinación de plomo y control de productos cosméticos. *La Granja Revista de Ciencias de la Vida* [en línea]. 2012. pp. 18-25. ISSN 1390-3799. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476047399003>.

24. **GIBB, H. y O'LEARY, K.**, 2014. Mercury exposure and health impacts among individuals in the artisanal and small-scale gold mining community: A comprehensive review. *Environmental Health Perspectives*. 2014. pp. 667-672. ISSN 15529924.

25. **GÓMEZ, M.**, 2018. Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. *Repertorio de Medicina y Cirugía* [en línea]. 2018. pp. 75-80. Disponible en: <https://doi.org/10.31260/RepertMedCir.v27>.

26. **GUTIÉRREZ, C.**, 2018. Las NANOPARTÍCULAS: pequeñas estructuras con gran potencial ¿Por qué el interés en estos materiales? ¿Qué aplicaciones tienen? . S.l.:

27. **IZQUIERDO, F., CUNILL, F., TEJERO, J., IBORRA, M. y FITÉ, C.**, 2004. *Cinética de las Reacciones Químicas*. S.l.: s.n.

28. **JAHANBAN, A., OSTADRAHIMI, A., TABIBIAZAR, M. y AMAROWICZ, R.**, 2019. A Comprehensive Review on the Chemical Constituents and Functional Uses of Walnut (*Juglans spp.*) Husk. *International Journal of Molecular Sciences* 2019, Vol. 20, Page 3920 [en línea]. 12 agosto 2019. pp. 3-37. [consulta: 20 febrero 2024]. ISSN 1422-0067. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1422-0067/20/16/3920/htm>.

29. **LEHMANN, J. y JOSEPH, S.**, 2009. *Biochar for Environmental Management*. Earthscan. London: Dunstan House. ISBN 978-1-84407-658-1.

30. **MASCOLO, M., PEI, Y. y RING, T.**, 2013. Room Temperature Co-Precipitation Synthesis of Magnetite Nanoparticles in a Large pH Window with Different Bases. *Materials*, vol. 6, no. 12, ISSN 19961944. DOI 10.3390/ma6125549.

31. **MATA, S., ORTEGA, J., YEE-MADEIRA, H., RAVELO, D., SANTOYO, J., MORA, R. y HERNÁNDEZ, H.**, 2022. Síntesis y caracterización de nanopartículas de **Fe<sub>3O<sub>4</sub></sub>** funcionalizadas con APTES para aplicaciones biomédicas. México.
32. **MEDINA, M., GALVÁN, L. y REYES, R.**, 2015. La Nopartículas y el medio ambiente. *Universidad, Ciencia y Tecnología*. 2015. pp. 49-58. ISSN 1316-4821.
33. **MOHAMED, W.S. y ABU-DIEF, A.M.**, 2018. Synthesis, characterization and photocatalysis enhancement of Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO mixed oxide nanoparticles. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1 mayo 2018. pp. 375-385. ISSN 0022-3697.
34. **MONÁRREZ, B., SÁENZ, A., BAUTISTA, L., SILVA, L., MIKI, M. y AMÉZAGA, P.**, 2018. Simultaneous and fast removal of As<sup>3+</sup>, As<sup>5+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> and F<sup>-</sup> from water with composite Fe-Ti oxides nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*. 15 agosto 2018. pp. 150-160. ISSN 0925-8388.
35. **MUÑOZ, N. y ARANGO, Á.**, 2020. Mercury as a pollutant and risk factor for human health. *Revista Lasallista de Investigacion*. 2020. pp. 280-296. ISSN 22563938.
36. **ORDÓÑEZ, A.**, 2017. *Determinación de la capacidad adsorbente de los residuos de la industria de la papa (Solanum tuberosum) para remoción de metales pesados en aguas contaminadas* [en línea]. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana. [consulta: 5 marzo 2024]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14969>.
37. ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, 2022. Mercurio. [en línea]. [consulta: 22 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.paho.org/es/temas/mercurio>.
38. **PABÓN, S., BENÍTEZ, R., SARRIA, R. y GALLO, J.**, 2020. Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. *Entre Ciencia e Ingeniería* [en línea]. 2020. pp. 9-18. [consulta: 31 enero 2024]. ISSN 1909-8367. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-83672020000100009&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672020000100009&lng=en&nrm=iso&tlng=es).
39. **PABÓN, S., BENÍTEZ, R., SARRIA, R. y GALLO, J.**, 2022. Mercury (II) removal from aqueous solutions by iron nanoparticles synthesized from extract of *Eucalyptus grandis*. *Heliyon* [en línea]. 1 noviembre 2022. pp. 1-11. [consulta: 31 enero 2024]. ISSN 2405-8440. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36387526/>.

40. PENG, Y., AZEEM, M., LI, R., XING, L., LI, Y., ZHANG, Y., GUO, Z., WANG, Q., NGO, H.H., QU, G. y ZHANG, Z., 2022. Zirconium hydroxide nanoparticle encapsulated magnetic biochar composite derived from rice residue: Application for As(III) and As(V) polluted water purification. *Journal of Hazardous Materials*. 5 febrero 2022. pp. 1-12. ISSN 0304-3894.
41. PEÑALOZA, D., BARÚA, M., ESCALADA, J. y PAJARES, A., 2023. Técnica espectroscópica de absorción atómica para determinaciones en química ambiental. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*. 16 junio 2023. pp. 157-176. ISSN 1852-4516.
42. PÉREZ, C., JUÁREZ, P., ANZALDO, J., ALIA, I., SALCEDO, E., GUILLÉN, D., BALOIS, R., LÓPEZ, V. y CASTRO, R., 2021. Chemical characterization of biochar from sugarcane tips produced by hydrothermal carbonization and addition of organic catalysts. *Terra Latinoamericana*, vol. 39, ISSN 23958030. DOI 10.28940/TERRA.V39I0.936.
43. PÉREZ, E. y ALVARADO, D., 2018. Cuantificación por absorción atómica de Cu, Fe y Zn en alcohol destilado y agua. *UNED Research Journal*. 2018. pp. 387-396. ISSN 1659-441.
44. PINTADO, K., 2018. *Comparación de la biosorción y desorción de metales pesados mediante el uso de marlo de maíz (Zea mays) en aguas contaminadas* [en línea]. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana. [consulta: 5 marzo 2024]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16226>.
45. PIQUÉ, T. y VÁZQUEZ, A., 2012. Uso de Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo* [en línea], vol. 3, no. 2, [consulta: 22 febrero 2024]. ISSN 2007-3011. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-30112012000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112012000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es).
46. PORRAS, Á.C. y GONZÁLEZ, A.R., 2016. Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica. *Academia y Virtualidad* [en línea]. 21 julio 2016. pp. 90-107. [consulta: 31 enero 2024]. ISSN 2011-0731. Disponible en: <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/ravi/article/view/2004/1950>.

47. **RAZMILIC, B.**, 1993. Espectroscopía de absorción atómica. *ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACION - FAO* [en línea]. [consulta: 22 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/ab482s/AB482S04.htm>.
48. **ROJAS, R.F. y TORRES, C.G.**, 2008. Árboles del Valle Central de Costa Rica: reproducción Nogal. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* [en línea]. 2008. pp. 69-71. [consulta: 31 enero 2024]. ISSN 2215-2504. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5123203&info=resumen&idioma=SPA>.
49. **RUBIO, I., CALDERÓN, A.R., PERDOMO, A., RODRÍGUEZ, D. y ROJAS, J.I.**, 2015. Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales: una revisión. *Ingeniería y Región*, ISSN 1657-6985, N°. 13, 2015, págs. 73-90 [en línea]. 2015. pp. 73-90. [consulta: 31 enero 2024]. ISSN 1657-6985. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5432290&info=resumen&idioma=SPA>.
50. **SENADHEERA, S.S., GUPTA, S., KUA, H.W., HOU, D., KIM, S., TSANG, D.C.W. y OK, Y.S.**, 2023. Application of biochar in concrete – A review. *Cement and Concrete Composites* [en línea]. 1 octubre 2023. pp. 1-14. [consulta: 31 enero 2024]. ISSN 09589465. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/372593640\\_Application\\_of\\_biochar\\_in\\_concrete\\_-\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/372593640_Application_of_biochar_in_concrete_-_A_review).
51. **SMITH, E.**, 2022. *Efecto del biocarbón de biomasa agrícola y bacterias aisladas de aguas residuales para la remoción de fosfatos de efluentes agrícolas*. Perú: Universidad Nacional de Tumbes.
52. **STARBIRD, R. y MONTERO, V.**, 2015. Síntesis de nanopartículas magnéticas de óxido de hierro para la remoción de arsénico del agua de consumo humano. *Tecnología en Marcha*, vol. 28.
53. **SURESH, S., KARTHIKEYAN, S. y JAYAMOORTHY, K.**, 2016. Effect of bulk and nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles on peanut plant leaves studied by Fourier transform infrared spectral studies Effect of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles on peanut plant leaves >. *Journal of Advanced Research*. 1 septiembre 2016. pp. 739-747. ISSN 20901232.

54. **TAMAY, A.**, 2019. *Determinación de la capacidad de biosorción y desorción de la corona de piña ( Ananas comosus) para la remoción de metales pesados*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
55. **TECHARANG, T. y SIRIPINYANOND, A.**, 2023. Nanoparticle characterization by electrical field-flow fractionation and single particle inductively coupled plasma mass spectrometry. *Microchemical Journal*. 1 octubre 2023. pp. 2-8. ISSN 0026-265.
56. **TEJADA, C., VILLABONA, Á. y GARCÉS, L.**, 2015. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *TecnoLógicas*. 15 enero 2015. pp. 109-123. ISSN 0123-7799.
57. **TRIVEDI, P. y AXE, L.**, 2000. Modeling Cd and Zn Sorption to Hydrrous Metal Oxides. *Environmental Science and Technology* [en línea]. 1 junio 2000. pp. 2215-2223. [consulta: 31 enero 2024]. ISSN 0013936X. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es991110c>.
58. **TRUJILLO, E., VALENCIA, E., ALEGRÍA, M., HONORATA, A. y FLOR, M.**, 2019. Producción y caracterización química de biochar a partir de residuos orgánicos avícolas. *Rev Soc Quím Perú*. 2019. pp. 489-501. ISSN 1810-634X.
59. **UTA**, 2024. *Laboratorio de materiales de la Universidad Técnica de Ambato* . Ambato.
60. **VIVERO, A.S., VALENZUELA, R.B., VALENZUELA, A.B. y MORALES, G.**, 2019. Bioactive compounds and potential health benefits of avocado. *Revista Chilena de Nutricion*. 2019. pp. 491-498. ISSN 07177518.
61. **WEBER, W.J., BORCHARDT, J.A., BESSA FEIXAS, J.**, 1979. *Control de la calidad del agua : procesos fisicoquímicos* [en línea]. S.l.: s.n. [consulta: 31 enero 2024]. ISBN 9788429191998. Disponible en: <https://www.perlego.com/es/book/2790712/control-de-la-calidad-del-agua-procesos-fisicoquimicos-pdf>.
62. **ZAMORA, G.**, 2010. *Obtención de carbón activado a partir de semillas, de dos palmeras de la Amazonía Peruana, Shapaja (Atta/ea phalerta) y Aguaje (Mauritia flexuosa)*. Lima: Universidad Nacional Agraria Lla Molina.

63. **ZANELLA, R.**, 2012. Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. *Mundo Nano* [en línea]. 2012. ISSN 2448-5691. Disponible en: [www.mundonano.unam.mx](http://www.mundonano.unam.mx).
64. **ZAPIEN, J., VÁSQUEZ, E., POZUELO, M., ZORRILLA, A., FLORES, E., GUZMÁN, O., GUTIÉRREZ, J. y VÁZQUEZ, E.**, 2023. Nanocompositos magnéticos (biochar+magnetita y biochar+magnetita/ZnO) para remover contaminantes en agua: Caso de estudio con Cr(VI). *XXVIII Verano De la Ciencia* [en línea], vol. 21, ISSN 2395-9797. Disponible en: [www.jóvenesenciencia.ugto.mx](http://www.jóvenesenciencia.ugto.mx).
65. **ZHANG, J., LIN, S., HAN, M., SU, Q., XIA, L. y HUI, Z.**, 2020. Adsorption properties of magnetic magnetite nanoparticle for coexistent Cr(VI) and Cu(II) in mixed solution. *Water (Switzerland)* [en línea]. 1 febrero 2020. [consulta: 13 mayo 2024]. ISSN 20734441. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/339111926\\_Adsorption\\_Properties\\_of\\_Magnetic\\_Magnetite\\_Nanoparticle\\_for\\_Coexistent\\_CrVI\\_and\\_CuII\\_in\\_Mixed\\_Solution](https://www.researchgate.net/publication/339111926_Adsorption_Properties_of_Magnetic_Magnetite_Nanoparticle_for_Coexistent_CrVI_and_CuII_in_Mixed_Solution).



**ANEXOS**

**ANEXO A: BOCETO RECOLECCIÓN DE DATOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL**

Biocarbón con nanopartículas de Fe	<i>Variables independientes</i>			<i>Parámetros de control</i>		<i>Variable dependiente</i>
	Concentración inicial de Hg	Tiempo	Repetición	pH	Conductividad	Concentración final de Hg
	ppm	minutos		-	μS	ppm
Tocte	1	30	1			
			2			
			3			
		60	1			
			2			
			3			
		120	1			
			2			
			3			
	10	30	1			
			2			
			3			
		60	1			
			2			
			3			
		120	1			
			2			
			3			
	50	30	1			
			2			
			3			
		60	1			
			2			
			3			

		120	1			
			2			
			3			
<b>Aguacate</b>	1	30	1			
			2			
			3			
		60	1			
			2			
			3			
		120	1			
			2			
			3			
	10	30	1			
			2			
			3			
		60	1			
			2			
			3			
		120	1			
			2			
			3			
	50	30	1			
			2			
			3			
		60	1			
			2			
			3			
120		1				
		2				
		3				

## ANEXO B: ACONDICIONAMIENTO DE MATERIA PRIMA – TOCTE

<p>a)</p> 	<p>b)</p> 	<p>c)</p> 	<p>d)</p> 						
<p>h)</p> 	<p>g)</p> 	<p>f)</p> 	<p>e)</p> 						
<p><b>NOTAS:</b></p> <p>a) Selección de materia prima  b) Pelado y lavado del tocte  c) Secado del tocte  d) Tocte después de secado y limpieza  e) Reducción de tamaño y separación de cotiledón  f) Molienda en molino de martillos  g) Molienda secundaria h) Empacado y etiquetado</p>	<p><b>CATEGORIA DEL DIAGRAMA:</b></p> <p><input type="checkbox"/> Aprobado                      <input type="checkbox"/> Preliminar  <input type="checkbox"/> Certificado                    <input type="checkbox"/> Por aprobar  <input type="checkbox"/> Información                   <input type="checkbox"/> Por calificar</p>	<p>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA  DE CHIMBORAZO  FACULTAD DE CIENCIAS  CARRERA DE INGENIERIA  QUÍMICA</p> <p>ELABORADO POR:  <i>Daniela Estefanía Cuenca Pérez</i></p>	<p><b>TOCTE</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>LAMINA</th> <th>ESCALA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1:1</td> <td>2024/01/26</td> </tr> </tbody> </table>	LAMINA	ESCALA	FECHA	1	1:1	2024/01/26
LAMINA	ESCALA	FECHA							
1	1:1	2024/01/26							

**ANEXO C: ACONDICIONAMIENTO DE MATERIA PRIMA – AGUACATE**



**NOTAS:**

- a) Selección de materia prima
- b) Cortado y separado de mesocarpio
- c) Cortado de mesocarpio de aguacate
- d) Materia prima después de picado
- e) Lavado
- f) Secado
- g) Molienda y tamizado
- h) Empacado y etiquetado

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA:**

- Aprobado
- Certificado
- Información
- Preliminar
- Por aprobar
- Por calificar

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA  
DE CHIMBORAZO  
FACULTAD DE CIENCIAS  
CARRERA DE INGENIERIA  
QUÍMICA

ELABORADO POR:  
Daniela Estefanía Cuenca Pérez

**AGUACATE**

LAMINA	ESCALA	FECHA
1	1:1	2024/01/26

## ANEXO D: IMPREGNACIÓN CON NANOPARTÍCULAS DE HIERRO



### NOTAS:

- a) Solución de  $\text{FeCl}_2$  y  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- b) Materia prima acondicionada (Tocte/aguacate)
- c) Agitado
- d) Secado
- e) BCT-NFe
- f) BCA-NFe

### CATEGORIA DEL DIAGRAMA:

- Aprobado
- Certificado
- Información
- Preliminar
- Por aprobar
- Por calificar

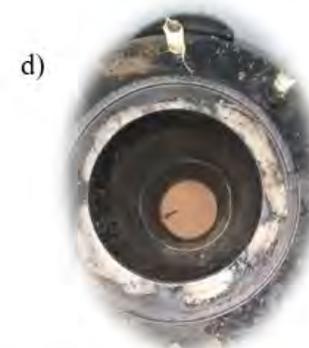
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA  
DE CHIMBORAZO  
FACULTAD DE CIENCIAS  
CARRERA DE INGENIERÍA  
QUÍMICA

ELABORADO POR:  
*Daniela Estefanía Cuenca Pérez*

### IMPREGNACIÓN

LAMINA	ESCALA	FECHA
1	1:1	2024/01/26

## ANEXO E: PIRÓLISIS



**NOTAS:**

- a) Equipo de pirólisis cerrado
- b) Nitrógeno para purga
- c) Equipo de pirólisis abierto
- d) Muestra inicial previo a la pirólisis dentro del reactor
- e) Cenizas finales posterior a la pirólisis dentro del reactor

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA:**

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> Aprobado    | <input type="checkbox"/> Preliminar    |
| <input type="checkbox"/> Certificado | <input type="checkbox"/> Por aprobar   |
| <input type="checkbox"/> Información | <input type="checkbox"/> Por calificar |

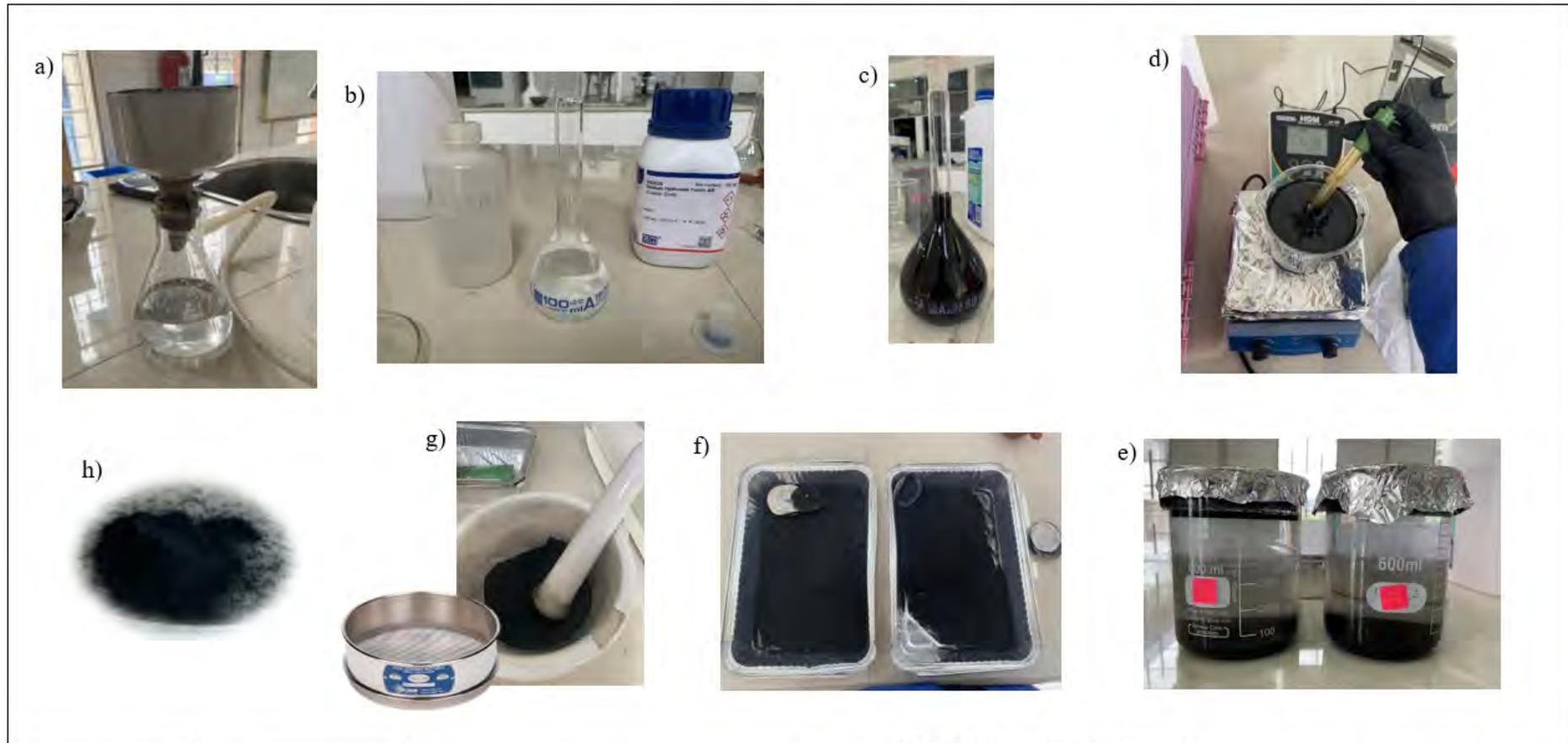
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA  
DECHIMBORAZO  
FACULTAD DE CIENCIAS  
CARRERA DE INGENIERÍA  
QUÍMICA

ELABORADO POR:  
*Daniela Estefanía Cuenca Pérez*

**PIRÓLISIS**

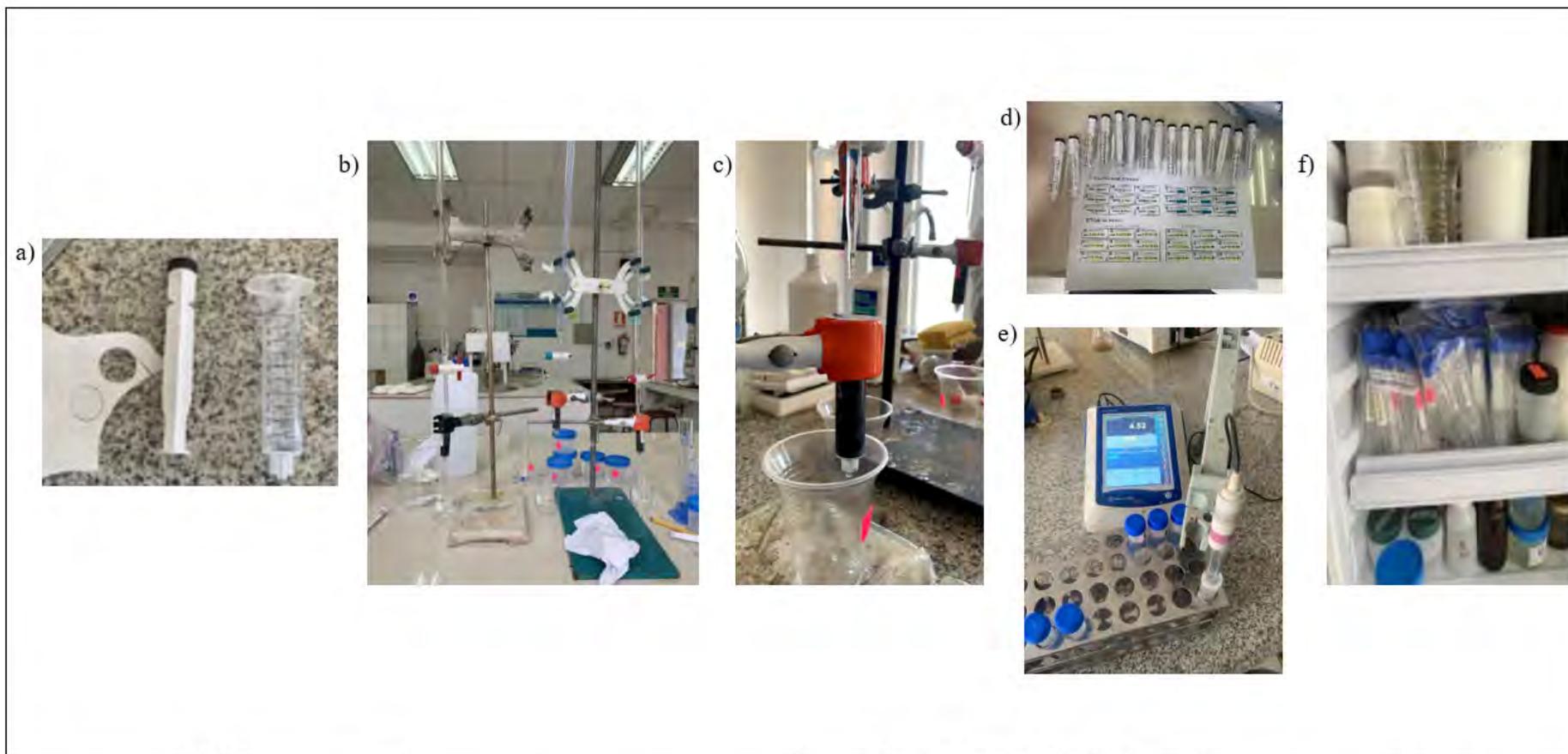
LAMINA	ESCALA	FECHA
1	1:1	2024/01/26

**ANEXO F: ACONDICIONAMIENTO DE BCT-NFe y BCA-NFe**



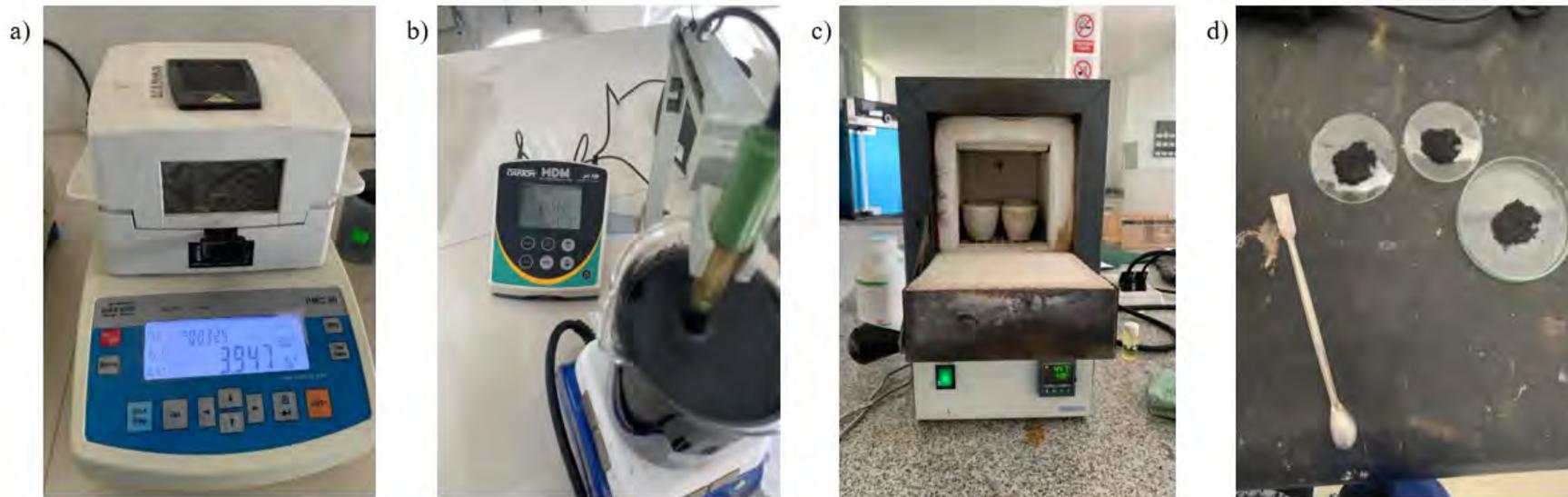
NOTAS:		CATEGORIA DEL DIAGRAMA:	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DECHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA		
a)	Lavado del biocarbón impregnado		<input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Información <input type="checkbox"/> Por calificar	ELABORADO POR: <i>Daniela Estefanía Cuenca Pérez</i>	
b)	Preparación de solución de hidróxido de sodio	<b>ACONDICIONAMIENTO</b>			
c)	Muestra afora				
d)	Regulación de pH	<b>LAMINA</b>		<b>ESCALA</b>	<b>FECHA</b>
e)	Sedimentación	1		1:1	2024/01/26
f)	Secado				
g)	Molienda y tamizado				
h)	Biocarbón acondicionado				

## ANEXO G: REPRODUCCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL



NOTAS:		CATEGORIA DEL DIAGRAMA:	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA	DISEÑO EXPERIMENTAL		
a)	Construcción de filtros con jeringa y papel filtro			<input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Información <input type="checkbox"/> Por calificar	ELABORADO POR: <i>Daniela Estefanía Cuenca Pérez</i>	LAMINA
b)	Equipo para filtro y solución acuosa de Hg	1	1:1			2024/01/26
c)	Contacto de filtro y solución acuosa de Hg					
d)	Etiquetado de envases de recolección y jeringas					
e)	Toma de mediciones de pH					
f)	Almacenamiento					

**ANEXO H: CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE BCT-NFe y BCA-NFe**



<p><b>NOTAS:</b></p> <p>a) Termobalanza para análisis de humedad                  b) Determinación de pH                  c) Determinación de cenizas totales                  d) Toma de muestras para análisis fisicoquímico</p>		<p><b>CATEGORIA DEL DIAGRAMA:</b></p> <p><input type="checkbox"/> Aprobado                      <input type="checkbox"/> Preliminar  <input type="checkbox"/> Certificado                      <input type="checkbox"/> Por aprobar  <input type="checkbox"/> Información                      <input type="checkbox"/> Por calificar</p>	<p>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA                  DE CHIMBORAZO                  FACULTAD DE CIENCIAS                  CARRERA DE INGENIERÍA                  QUÍMICA</p> <p>ELABORADO POR:  <i>Daniela Estefanía Cuenca Pérez</i></p>	<p><b>ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>LAMINA</th> <th>ESCALA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1:1</td> <td>2024/01/26</td> </tr> </tbody> </table>			LAMINA	ESCALA	FECHA	1	1:1	2024/01/26
LAMINA	ESCALA	FECHA										
1	1:1	2024/01/26										

**ANEXO I: CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE BCT-NFe y BCA-NFe**

a)



b)



c)



**NOTAS:**

- a) Equipo de Espectroscopia de infrarrojo (IR)
- b) Equipo de acondicionamiento para SEM y muestras
- c) Equipo de Espectroscopia de absorción atómica (AAS)

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA:**

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> Aprobado    | <input type="checkbox"/> Preliminar    |
| <input type="checkbox"/> Certificado | <input type="checkbox"/> Por aprobar   |
| <input type="checkbox"/> Información | <input type="checkbox"/> Por calificar |

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA  
DE CHIMBORAZO  
FACULTAD DE CIENCIAS  
CARRERA DE INGENIERÍA  
QUÍMICA

ELABORADO POR:  
*Daniela Estefanía Cuenca Pérez*

**CARACTERIZACIÓN TÉCNICA**

LAMINA	ESCALA	FECHA
1	1:1	2024/01/26



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA**  
**NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO**

**Fecha de entrega:** 14/06/2024

**INFORMACIÓN DEL AUTOR**

**Nombres – Apellidos:** Cuenca Pérez Daniela Estefanía

**INFORMACIÓN INSTITUCIONAL**

**Facultad:** Ciencias

**Carrera:** Ingeniería Química

**Título a optar:** Ingeniera Química

**Ing. Mayra Paola Zambrano Vinueza**  
**Director del Trabajo de Titulación**

**Ing. Mabel Mariela Parada Rivera**  
**Asesor del Trabajo de Titulación**