



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DEL
POTENCIAL REMEDIADOR DE *BACCHARIS LATIFOLIA* FRENTE
A CONTAMINANTES MÉTALICOS EN SOLUCIONES ACUOSAS
SALACHE COTOPAXI”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de
Ingeniero Ambiental

Autor:

Cardenas Cardenas Juan Diego

Tutor:

Moreno Ávila Andrés Sebastián

LATACUNGA – ECUADOR

Agosto 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Cardenas Cardenas Juan Diego, con cédula de ciudadanía No. 1760670388, declaro ser autor del presente Proyecto de Investigación: **“CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL REMEDIADOR DE *BACCHARIS LATIFOLIA* FRENTE A CONTAMINANTES MÉTALICOS EN SOLUCIONES ACUOSAS SALACHE COTOPAXI”**, siendo el Ingeniero Mg. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Tutor del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 6 de agosto del 2026

Juan Diego Cardenas Cardenas
C.C: 1760670388
ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **CARDENAS CARDENAS JUAN DIEGO**, identificado con cédula de ciudadanía 1760670388 de estado civil soltero, a quien en lo sucesivo se denominará **EL CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - **EL CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado “**CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL REMEDIADOR DE BACCHARIS LATIFOLIA FRENTE A CONTAMINANTES MÉTALICOS EN SOLUCIONES ACUOSAS SALACHE COTOPAXI**”, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Octubre 2022 – Marzo 2023

Finalización de la carrera: Abril 2026 – Agosto 2026

Tutor: Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Mg.

Tema: “**CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL REMEDIADOR DE BACCHARIS LATIFOLIA FRENTE A CONTAMINANTES MÉTALICOS EN SOLUCIONES ACUOSAS SALACHE COTOPAXI**”

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **EL CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO: Por el presente contrato **EL CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **EL CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **EL CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - LA CESIONARIA podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **EL CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 6 días del mes de agosto de 2026.

Juan Diego Cardenas Cardenas
EL CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
LA CESIONARIA

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación con el título:

“CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL REMEDIADOR DE *BACCHARIS LATIFOLIA* FRENTE A CONTAMINANTES MÉTALICOS EN SOLUCIONES ACUOSAS SALACHE COTOPAXI”, de Cardenas Cardenas Juan Diego, de la carrera de Ingeniería Ambiental, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del Aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, 6 de agosto del 2026

Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Mg.
C.C: 0503220063
DOCENTE TUTOR

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, el postulante: Cardenas Cardenas Juan Diego, con el título del Proyecto de Investigación: **“CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL REMEDIADOR DE *BACCHARIS LATIFOLIA* FRENTE A CONTAMINANTES MÉTALICOS EN SOLUCIONES ACUOSAS SALACHE COTOPAXI”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 6 de agosto del 2026

Ing. Vladimir Marconi Ortiz Bustamante, PhD.
C.C: 0502188451
LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Ing. José Luis Ágreda Oña, Mg.
C.C: 0401332101
LECTOR 2 (MIEMBRO)

Dra. Kalina Fonseca Largo, PhD.
CC: 1723534457
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más profundo agradecimiento a mi madre, Elisa Cárdenas, y a mi padre, Will Aponte, quienes han sido pilares fundamentales a lo largo de toda mi vida y, especialmente, durante mi formación universitaria. Gracias por su apoyo incondicional, por cada esfuerzo realizado, por acompañarme en los momentos difíciles y por brindarme siempre la confianza y la motivación necesarias para continuar. Cada etapa superada durante esta carrera también es resultado del respaldo, cariño y dedicación que me han brindado.

A mi tía, Graciela Cárdenas, le agradezco sinceramente por su preocupación constante, por estar pendiente de mis necesidades y por brindarme su ayuda cada vez que la necesité. Su disposición para apoyarme y acompañarme durante este proceso ha sido muy importante para alcanzar esta meta.

De igual manera, agradezco a mis primos Marlon Cárdenas, Martín Cárdenas y Gabriela Cárdenas, por estar presentes durante este camino, por preocuparse por mi bienestar y por ofrecerme su ayuda en diferentes momentos de mi formación académica. Su apoyo y cercanía hicieron que este proceso fuera más llevadero.

También agradezco a Jaela Ramos y Javier Lloacana, grandes amigos que conocí durante la carrera, por su amistad, compañía y apoyo a lo largo de este proceso académico.

Juan Diego Cardenas Cardenas

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, con todo mi cariño, a mi madre, Elisa Cárdenas, y a mi padre, Will Aponte, por ser mi apoyo constante, por acompañarme en cada etapa de mi vida y por enseñarme, con su esfuerzo y ejemplo, a seguir adelante hasta alcanzar mis metas.

A la memoria de mis abuelos, María Lorenza Álvarez y Fidel José Cárdenas, quienes fueron parte fundamental de mi crecimiento y crianza. Aunque hoy no estén físicamente conmigo, sus enseñanzas, cariño y recuerdos permanecen presentes en mi vida y en cada logro que alcanzo.

Este logro también les pertenece.

Juan Diego Cardenas Cardenas

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

**TÍTULO: “CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DEL
POTENCIAL REMEDIADOR DE *BACCHARIS LATIFOLIA* FRENTE A
CONTAMINANTES MÉTALICOS EN SOLUCIONES ACUOSAS SALACHE
COTOPAXI”.**

Autor:
Cardenas Cardenas Juan Diego

RESUMEN

La investigación evaluó el potencial de biochars elaborados con hojas y flores de *Baccharis latifolia* para disminuir Cu(II) en una solución acuosa sintética, complementando el estudio con la caracterización fitoquímica de raíz, tallo, hojas y flores. El material vegetal se recolectó en el sector Salache, cantón Latacunga; se secó a 80 °C durante 24 horas y se sometió a extracción etanólica para identificar metabolitos secundarios mediante ensayos colorimétricos y de precipitación. Los biochars se produjeron en mufla, bajo condiciones limitadas de oxígeno, a 350, 400 y 450 °C durante 15 minutos. Su desempeño se evaluó frente a una concentración inicial de 104 mg/L de Cu(II), considerando tiempos de contacto de 0, 10, 30 y 60 minutos. La concentración residual se determinó mediante espectrofotometría UV-visible y se calculó el porcentaje de remoción. El tamizaje mostró diferencias entre órganos: los compuestos fenólicos alcanzaron 5/5 en tallo, flor y hoja; los taninos registraron 5/5 en tallo y flor, 4/5 en hoja y 3/5 en raíz; la flor presentó la mayor intensidad de flavonoides, con 4/5, y la hoja mostró la mayor evidencia preliminar de alcaloides. Los rendimientos de biochar variaron entre 33,39 % y 57,65 %. Los tratamientos más eficientes fueron hoja a 400 °C y flor a 450 °C, ambos con 76,92 % de remoción y 24 mg/L de concentración residual a los 60 minutos. Los resultados evidenciaron un potencial adsorbente preliminar; sin embargo, su interpretación quedó limitada por el uso de una solución sintética, una única concentración inicial y la ausencia de réplicas independientes.

Palabras clave: *Baccharis latifolia*, biochar, Cu(II), adsorción, metabolitos secundarios, remoción.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL RESOURCES

**THEME: “PHYTOCHEMICAL CHARACTERIZATION AND EVALUATION
OF THE REMEDIATION POTENTIAL OF BACCHARIS LATIFOLIA AGAINST
METAL CONTAMINANTS IN AQUEOUS SOLUTIONS FROM SALACHE
COTOPAXI”**

Author:
Cardenas Cardenas Juan Diego

ABSTRACT

The study evaluated the potential of biochars produced from the leaves and flowers of *Baccharis latifolia* to reduce Cu(II) in a synthetic aqueous solution, complementing the study with a phytochemical characterization of the roots, stems, leaves, and flowers. The plant material was collected in the Salache area, Latacunga canton; it was dried at 80 °C for 24 hours and subjected to ethanol extraction to identify secondary metabolites using colorimetric and precipitation assays. Biochars were produced in a muffle furnace under oxygen-limited conditions at 350, 400, and 450 °C for 15 minutes. Their performance was evaluated against an initial concentration of 104 mg/L of Cu(II), considering contact times of 0, 10, 30, and 60 minutes. The residual concentration was determined using UV-visible spectrophotometry, and the removal percentage was calculated. The screening revealed differences among organs: phenolic compounds scored 5/5 in the stem, flower, and leaf; tannins scored 5/5 in the stem and flower, 4/5 in the leaf, and 3/5 in the root; the flower had the highest flavonoid content, at 4/5, and the leaf showed the strongest preliminary evidence of alkaloids. Biochar yields ranged from 33.39% to 57.65%. The most efficient treatments were leaves at 400 °C and flowers at 450 °C, both with 76.92% removal and a residual concentration of 24 mg/L at 60 minutes. The results demonstrated preliminary adsorbent potential; however, their interpretation was limited by the use of a synthetic solution, a single initial concentration, and the absence of independent replicates.

Keywords: *Baccharis latifolia*, Biochar, Cu(II), Adsorption, Secondary metabolites, Removal.

INDICE

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR	iii
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	v
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	vi
AGRADECIMIENTO	vii
DEDICATORIA	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
1 INFORMACIÓN GENERAL	1
2 Introducción.....	2
3 Justificación del proyecto	5
4 Beneficiarios del proyecto	8
5 Problema de investigación.....	9
6 Objetivos del proyecto.....	12
6.1 Objetivo General:	12
6.2 Objetivos Específicos:	12
7 Actividades y sistema de tareas en relación con los objetivos planteados	13
8 Fundamentación científico-técnica.....	17
8.1 Contaminación de los sistemas acuáticos por cobre.....	17
8.2 Cobre divalente en medios acuosos.....	18
8.3 Fuentes y efectos ambientales del Cu(II)	19
8.4 Tecnologías para la disminución de Cu(II) en agua	19
8.5 Diferenciación conceptual del proceso evaluado	20
8.6 Fundamentos de la adsorción	21

8.7	Biochar como material adsorbente	21
8.8	Biomasa precursora: hojas y flores de <i>Baccharis latifolia</i>	22
8.9	Pirólisis de la biomasa	23
8.10	Influencia de la temperatura de pirólisis.....	23
8.11	Influencia del órgano vegetal	24
8.12	Mecanismos posibles de disminución de Cu(II)	24
8.13	Evaluación cuantitativa de la remoción.....	25
8.14	Tiempo de contacto.....	26
8.15	Concentración inicial.....	26
8.16	<i>Baccharis latifolia</i>	27
8.16.1	Clasificación taxonómica y distribución	27
8.16.2	Metabolitos secundarios de <i>Baccharis latifolia</i>	27
8.16.3	Compuestos fenólicos y taninos	28
8.16.4	Flavonoides.....	28
8.16.5	Alcaloides	29
8.16.6	Saponinas y sapogeninas	29
8.16.7	Terpenoides, triterpenos y esteroides.....	29
8.16.8	Cumarinas, lactonas y glucósidos cardiotónicos	30
8.16.9	Antraquinonas y quinonas	30
8.16.10	Alcance del tamizaje fitoquímico	30
8.16.11	Antecedentes ambientales de la especie	31
8.17	Relación entre los metabolitos secundarios y el biochar	31
8.18	Determinación de Cu(II) mediante espectrofotometría UV-visible.....	32
8.19	Factibilidad técnica y ambiental preliminar	32
8.20	Modelo conceptual de la investigación	33

9	Marco legal aplicable.....	33
9.1.1	Constitución de la República del Ecuador.....	34
9.1.2	Convenio de Basilea	35
9.1.3	Convenio sobre la Diversidad Biológica	36
9.1.4	Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua ...	36
9.1.5	Código Orgánico del Ambiente	37
9.1.6	Reglamento al Código Orgánico del Ambiente	38
9.1.7	Gestión de sustancias y residuos con contenido de cobre	39
9.1.8	Código Orgánico Integral Penal	39
10	Metodología.....	40
10.1	Área de estudio	40
10.2	Enfoque, tipo y alcance de la investigación	41
10.3	Diseño de la investigación.....	42
10.4	Población, muestra y unidades de análisis.....	43
10.5	Recolección e identificación botánica	43
10.6	Caracterización fitoquímica de la biomasa vegetal	44
10.6.1	Acondicionamiento del material vegetal	44
10.6.2	Preparación de los extractos etanólicos	44
10.6.3	Condiciones generales del tamizaje.....	45
10.6.4	Ensayos para alcaloides	45
10.6.5	Compuestos fenólicos y taninos	46
10.6.6	Cumarinas y estructuras lactónicas.....	46
10.6.7	Saponinas y sapogeninas	46
10.6.8	Antraquinonas y quinonas	47
10.6.9	Flavonoides.....	47

10.6.10	Triterpenos y esteroides	48
10.6.11	Valoración semicuantitativa.....	48
10.7	Preparación de la biomasa destinada a biochar	48
10.8	Producción de los biochars en mufla.....	49
10.8.1	Diseño de los tratamientos.....	49
10.8.2	Pirólisis en condiciones limitadas de oxígeno.....	49
10.8.3	Enfriamiento y acondicionamiento.....	50
10.8.4	Medidas de seguridad durante la carbonización.....	50
10.9	Rendimiento de producción.....	50
10.10	Preparación de la solución sintética de Cu(II).....	51
10.11	Ensayos de adsorción	51
10.11.1	Preparación del material de laboratorio	51
10.11.2	Condiciones experimentales	51
10.11.3	Evaluación del tiempo de contacto	52
10.11.4	Concentración inicial.....	52
10.11.5	Control analítico	52
10.12	Separación del biochar y preparación de las muestras	52
10.13	Determinación de Cu(II) mediante espectrofotometría UV-visible.....	53
10.14	Control y aseguramiento de la calidad analítica.....	53
10.15	Cálculo del porcentaje de remoción	53
10.16	Organización y análisis de los resultados	54
11	Resultados y discusión	54
11.1	Recolección y acondicionamiento del material vegetal	55
11.2	Resultados del tamizaje fitoquímico.....	55
11.2.1	Perfil fitoquímico general.....	55

11.2.2	Compuestos fenólicos y taninos	56
11.2.3	Flavonoides.....	57
11.2.4	Alcaloides	58
11.2.5	Sapogeninas relacionadas con saponinas	58
11.2.6	Triterpenos y esteroides	59
11.2.7	Cumarinas, antraquinonas y quinonas	59
11.2.8	Alcance del perfil fitoquímico frente a la adsorción	60
11.3	Producción y rendimiento del biochar.....	60
11.4	Curva de calibración y concentración inicial de Cu(II).....	62
11.5	Efecto del tiempo de contacto sobre la concentración residual de Cu(II)	64
11.5.1	Comparación entre órgano vegetal y temperatura de pirólisis	66
11.6	Análisis estadístico exploratorio.....	67
11.7	Evaluación técnica preliminar	69
12	Conclusiones.....	69
13	Recomendaciones	71
14	Referencias	72
15	Anexos.....	¡Error! Marcador no definido.

Índice de Tablas

<i>Tabla 1</i> Actividades correspondientes al objetivo específico 1	13
<i>Tabla 2</i> Actividades correspondientes al objetivo específico 2	14
<i>Tabla 3</i> Actividades correspondientes al objetivo específico 3.....	16
<i>Tabla 4</i> Diferencias entre los principales conceptos vinculados con la investigación.	20
<i>Tabla 5</i> Clasificación taxonómica de <i>Baccharis latifolia</i>	27
<i>Tabla 6</i> Características del área de recolección.....	41
<i>Tabla 7</i> Variables y condiciones de la fase de adsorción	43
<i>Tabla 8</i> Condiciones aplicadas para preparar extractos etanólicos	44
<i>Tabla 9</i> Intensidad de las respuestas fitoquímicas	48
<i>Tabla 10</i> Tratamientos Biochar	49
<i>Tabla 11</i> Concentración y absorbancia.....	53
<i>Tabla 12</i> Características del material vegetal recolectado.....	55
<i>Tabla 13</i> Síntesis semicuantitativa del perfil fitoquímico de <i>Baccharis latifolia</i>	56
<i>Tabla 14</i> Resultados de compuestos fenólicos y taninos	57
<i>Tabla 15</i> Resultados integrados de las pruebas realizadas para flavonoides	57
<i>Tabla 16</i> Resultados de las pruebas realizadas para alcaloides	58
<i>Tabla 17</i> Resultados de las pruebas indirectas de sapogeninas	59
<i>Tabla 18</i> Resultados exploratorios de triterpenos y esteroides.....	59
<i>Tabla 19</i> Resultados de cumarinas, antraquinonas y quinonas	60
<i>Tabla 20</i> Rendimiento de los biochars elaborados con hojas y flores de <i>Baccharis latifolia</i>	61
<i>Tabla 21</i> Datos experimentales de la curva de calibración de Cu(II)	63
<i>Tabla 22</i> Concentración residual de Cu(II) según tratamiento y tiempo de contacto .	64
<i>Tabla 23</i> Porcentaje de remoción de Cu(II) según tratamiento y tiempo de contacto.	64
<i>Tabla 24</i> Comparación de los tratamientos al finalizar 60 minutos	67
<i>Tabla 25</i> ANOVA de dos vías sin replicación para el porcentaje de remoción de Cu(II)	67
<i>Tabla 26</i> Agrupación exploratoria de Tukey para los tratamientos de biochar	68
<i>Tabla 27</i> Agrupación exploratoria de Tukey para el tiempo de contacto	68

1 INFORMACIÓN GENERAL

Título: Caracterización fitoquímica y evaluación del potencial remediador de *Baccharis latifolia* frente a contaminantes metálicos en soluciones acuosas.

Lugar de ejecución: Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, Parroquia Eloy Alfaro (Sector Salache), Campus CEASA de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Institución, unidad académica y carrera que auspicia: Universidad Técnica de Cotopaxi, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Carrera de Ingeniería Ambiental.

Equipo de investigadores:

Ing. Andrés Moreno Mg. (Tutor de Titulación)

Juan Diego Cárdenas Cárdenas (Estudiante)

Área de Conocimiento: Ciencias de la Vida y Medio Ambiente.

Línea de investigación: Análisis, conservación y aprovechamiento de la biodiversidad local.

Sublínea de investigación de la carrera: manejo y conservación de la biodiversidad.

Línea de vinculación CAREN: gestión de recursos naturales, biotecnología y genética, biodiversidad, para el desarrollo humano y social.

2 INTRODUCCIÓN

La contaminación de los sistemas acuáticos por elementos metálicos constituye una problemática ambiental persistente, debido a que estos contaminantes no se degradan, sino que pueden cambiar de forma química, distribuirse entre la fase disuelta y el material particulado, depositarse en los sedimentos e incorporarse a los organismos acuáticos. El cobre puede ingresar a los cuerpos de agua mediante procesos naturales de meteorización, pero el incremento de sus concentraciones se relaciona principalmente con actividades mineras, metalúrgicas e industriales, la fabricación de equipos eléctricos, el uso de compuestos cúpricos y la descarga inadecuada de efluentes (Liao et al., 2023).

El cobre es un micronutriente esencial que interviene en procesos enzimáticos, metabólicos y de transferencia electrónica; sin embargo, su presencia en concentraciones elevadas puede alterar la regulación iónica, inducir estrés oxidativo y afectar funciones fisiológicas de los organismos expuestos (Liao et al., 2023). En ambientes acuosos, el Cu(II) puede encontrarse como ion libre Cu^{2+} o formando complejos con sustancias inorgánicas y orgánicas, por lo que su movilidad, biodisponibilidad y toxicidad no dependen únicamente de la concentración total presente en el agua (Liao et al., 2023). Factores como el pH, la dureza, la alcalinidad, la concentración de calcio y magnesio y el contenido de materia orgánica disuelta pueden modificar la especiación del cobre y su interacción con las superficies biológicas y minerales (Liao et al., 2023).

La exposición de los organismos acuáticos a concentraciones elevadas de Cu(II) puede provocar alteraciones en la respiración, el equilibrio osmótico, el comportamiento, el crecimiento y la reproducción, especialmente cuando aumenta la proporción biodisponible del metal (Liao et al., 2023). La toxicidad aguda del cobre en peces se ha relacionado con la alteración de la actividad de la enzima $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{-ATPasa}$ y con la pérdida del equilibrio iónico, mientras que la exposición prolongada puede generar efectos metabólicos, endocrinos y reproductivos (Liao et al., 2023). Estas evidencias justifican la investigación de alternativas que permitan disminuir la concentración residual de Cu(II) en soluciones acuosas y reducir su disponibilidad para los organismos expuestos (Liao et al., 2023).

Entre las tecnologías empleadas para remover contaminantes metálicos del agua se encuentran la precipitación química, el intercambio iónico, la coagulación-floculación, los procesos electroquímicos, la separación por membranas y la adsorción. Aunque estos tratamientos pueden alcanzar eficiencias importantes, algunos requieren equipos especializados, consumo elevado de energía o reactivos químicos y tratamientos posteriores

para los lodos y residuos generados, lo que puede limitar su aplicación en determinados contextos económicos y operacionales (Jagadeesh & Sundaram, 2023). La adsorción ha adquirido especial interés por su relativa simplicidad, la diversidad de materiales que pueden utilizarse y la posibilidad de aprovechar residuos o biomásas vegetales como precursores de adsorbentes carbonosos (Jagadeesh & Sundaram, 2023).

Dentro de los materiales evaluados para el tratamiento de aguas se encuentra el biochar, un sólido rico en carbono producido mediante la descomposición termoquímica de biomasa en condiciones de disponibilidad limitada de oxígeno (Tomczyk et al., 2020). El comportamiento del biochar como adsorbente depende de la naturaleza del material precursor y de las condiciones aplicadas durante la pirólisis, especialmente la temperatura, el tiempo de residencia y la disponibilidad de oxígeno (Tomczyk et al., 2020). Por esta razón, no todos los biochars presentan el mismo desempeño frente a un contaminante, aun cuando se produzcan a partir de una misma especie vegetal, debido a que los órganos de la planta pueden diferir en su composición lignocelulósica y mineral (Tomczyk et al., 2020).

La temperatura de pirólisis puede modificar la estructura carbonosa, la aromaticidad, la proporción de materia volátil y la presencia de componentes orgánicos y minerales en el biochar, generando materiales con comportamientos diferentes frente al Cu(II) (Tomczyk et al., 2020). Además, se ha demostrado experimentalmente que la materia orgánica disuelta liberada por biochars producidos a diferentes temperaturas presenta distinta afinidad por el Cu(II), lo que confirma que la condición térmica aplicada durante su elaboración influye directamente en la interacción entre el adsorbente y el ion metálico (Guo et al., 2022). En consecuencia, la comparación de biochars obtenidos a diferentes temperaturas debe realizarse experimentalmente, sin asumir que un aumento de la temperatura produce necesariamente una mayor remoción de cobre en todas las biomásas (Guo et al., 2022; Tomczyk et al., 2020).

Los procesos asociados con la retención de Cu(II) por biochar pueden incluir atracción electrostática, intercambio iónico, complejación con estructuras superficiales, interacción con la fracción mineral y retención en espacios accesibles del material carbonoso (Guo et al., 2022; Jagadeesh & Sundaram, 2023). Sin embargo, la participación de cada proceso depende de las características del biochar y de las condiciones experimentales, por lo que estos mecanismos no deben considerarse comprobados cuando no se dispone de análisis instrumentales antes y después del contacto con el contaminante (Guo et al., 2022). En estudios sin caracterización superficial, la evidencia experimental debe limitarse a la disminución de la concentración

residual, al porcentaje de remoción y a las diferencias observadas entre tratamientos y tiempos de contacto (Guo et al., 2022).

En este contexto, *Baccharis latifolia* (Ruiz & Pav.) Pers., conocida comúnmente como chilca, constituye una especie vegetal andina de interés por su disponibilidad, producción de biomasa y diversidad química (Prada et al., 2016). Las investigaciones realizadas con esta especie han reportado la presencia de flavonoides y otros compuestos fenólicos, cuya concentración puede variar entre tipos de hojas y en respuesta a las condiciones ambientales donde se desarrolla la planta (Enríquez et al., 2018). Asimismo, extractos obtenidos de hojas, flores, tallos y raíces han presentado diferencias en su actividad antioxidante y biológica, lo que demuestra que los órganos de *B. latifolia* no deben considerarse matrices químicamente equivalentes (Bayas-Morejón et al., 2020).

Los metabolitos secundarios vegetales comprenden grupos como los compuestos fenólicos, flavonoides, taninos, terpenoides y sustancias nitrogenadas, los cuales intervienen en la defensa, la señalización, la regulación fisiológica y la adaptación de las plantas frente a factores bióticos y abióticos (Erb & Kliebenstein, 2020). Su distribución depende del órgano vegetal, la etapa de desarrollo, las condiciones ambientales y las funciones fisiológicas de cada tejido, razón por la cual su identificación debe realizarse diferenciando raíz, tallo, hojas y flores (Erb & Kliebenstein, 2020). El tamizaje fitoquímico permite obtener un perfil cualitativo o semicuantitativo de la biomasa precursora, pero no determina la concentración exacta de cada compuesto ni demuestra por sí mismo su participación en la remoción de Cu(II) (Erb & Kliebenstein, 2020).

Durante la pirólisis, la biomasa vegetal atraviesa una serie de transformaciones térmicas, entre ellas la pérdida de agua y compuestos volátiles, la ruptura de estructuras orgánicas y la formación progresiva de una matriz carbonosa. Como resultado, la composición química del material obtenido difiere de manera importante de la que presentaba la planta antes del tratamiento térmico (Tomczyk et al., 2020).

Por esta razón, la detección de metabolitos secundarios en las hojas, flores, tallos o raíces de *Baccharis latifolia* no permite afirmar que dichos compuestos se conservaron sin cambios en los biochars producidos a 350, 400 y 450 °C. Las temperaturas aplicadas pudieron modificar, degradar o transformar las moléculas presentes originalmente en cada órgano vegetal (Tomczyk et al., 2020).

En consecuencia, el tamizaje fitoquímico se interpretó como una descripción de la biomasa utilizada como precursor y no como una comprobación directa de los procesos que intervinieron en la disminución de Cu(II). Para atribuir la retención del ion a mecanismos específicos sería necesario realizar análisis adicionales del material carbonizado antes y después de los ensayos de contacto (Erb & Kliebenstein, 2020; Tomczyk et al., 2020).

Con base en estos antecedentes, la investigación se planteó en dos etapas complementarias. En la primera se caracterizaron los metabolitos secundarios presentes en la raíz, el tallo, las hojas y las flores de *Baccharis latifolia*. En la segunda se evaluó el desempeño de biochars obtenidos a partir de hojas y flores para disminuir la concentración de Cu(II) en una solución acuosa sintética.

Los biochars se produjeron en condiciones limitadas de oxígeno, utilizando temperaturas de pirólisis de 350, 400 y 450 °C, con el fin de comparar la respuesta de cada tratamiento frente a distintas condiciones térmicas. La solución experimental se preparó con sulfato de cobre y presentó una concentración inicial medida de 104 mg/L de Cu(II). El comportamiento de los materiales se evaluó mediante la concentración residual y el porcentaje de remoción determinados a los 0, 10, 30 y 60 minutos de contacto.

La evaluación se concentró en el efecto del órgano vegetal empleado como precursor, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto, sin aplicar isotermas de equilibrio, modelos cinéticos o análisis termodinámicos que no formaron parte del diseño experimental. Los resultados permiten establecer el comportamiento comparativo de los biochars dentro de las condiciones analizadas, pero no demostrar mecanismos moleculares específicos debido a la ausencia de caracterización fisicoquímica e instrumental del material carbonizado. De esta manera, la investigación busca generar evidencia experimental sobre el aprovechamiento de *Baccharis latifolia* como materia prima local para producir biochar y evaluar su potencial preliminar como adsorbente de Cu(II) en soluciones acuosas.

3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La contaminación de los sistemas acuáticos por cobre constituye un problema ambiental relevante, debido a que este elemento no experimenta biodegradación y puede distribuirse entre el agua, el material suspendido, los sedimentos y los organismos expuestos. Aunque el cobre es un micronutriente esencial para diferentes procesos metabólicos, el aumento de su concentración y biodisponibilidad puede alterar la regulación iónica, inducir estrés oxidativo y ocasionar efectos adversos sobre el crecimiento, la reproducción y la supervivencia de la biota

acuática. La magnitud de estos efectos depende de la concentración de Cu(II), del tiempo de exposición y de las condiciones fisicoquímicas del medio, entre ellas el pH, la dureza, la alcalinidad y la materia orgánica disuelta (Liao et al., 2023).

El Cu(II) puede incorporarse a los cuerpos de agua mediante procesos naturales de meteorización, pero el incremento de sus concentraciones se relaciona principalmente con actividades mineras, metalúrgicas, eléctricas, agrícolas e industriales, así como con la corrosión de tuberías y la descarga de efluentes sin tratamiento adecuado. En solución acuosa, el cobre puede presentarse como ion libre Cu^{2+} o formar complejos con sustancias inorgánicas y orgánicas, por lo que su movilidad y toxicidad no dependen exclusivamente de la concentración total determinada. En consecuencia, resulta necesario investigar alternativas capaces de disminuir la concentración residual de Cu(II) y limitar su disponibilidad bajo condiciones controladas de tratamiento (Gui & Wang, 2024; Liao et al., 2023).

Para disminuir la presencia de Cu(II) en el agua se han empleado diferentes tratamientos, entre ellos la precipitación química, la coagulación-floculación, el intercambio iónico, los procesos electroquímicos, la separación por membranas y la adsorción. Si bien estas tecnologías pueden alcanzar altos porcentajes de remoción, su aplicación suele estar condicionada por la necesidad de equipos especializados, consumo energético, uso de reactivos, mantenimiento permanente y manejo posterior de los lodos o corrientes concentradas generadas durante el proceso. Estas exigencias pueden dificultar su implementación en lugares donde existen limitaciones técnicas o económicas. En este contexto, la adsorción con materiales obtenidos a partir de biomasa constituye una opción de interés, debido a la relativa sencillez del proceso, la disponibilidad de materias primas y la posibilidad de aprovechar recursos vegetales presentes en el entorno local (Jagadeesh & Sundaram, 2023).

El biochar es un material carbonoso obtenido mediante la transformación termoquímica de biomasa bajo condiciones de disponibilidad limitada de oxígeno y ha sido investigado como adsorbente para disminuir la concentración de contaminantes presentes en soluciones acuosas. Su desempeño depende de la naturaleza del precursor vegetal y de las condiciones de producción, especialmente de la temperatura de pirólisis, el tiempo de residencia y la disponibilidad de oxígeno. Por esta razón, biochars elaborados con diferentes órganos de una misma especie pueden presentar respuestas distintas frente al Cu(II), debido a las diferencias originales en la composición orgánica y mineral de cada estructura vegetal (Tomczyk et al., 2020).

La temperatura de pirólisis constituye una variable relevante porque modifica la estructura carbonosa, la aromaticidad, la fracción volátil y los componentes minerales del biochar. Estas transformaciones pueden influir en su interacción con el Cu(II), aunque el aumento de la temperatura no garantiza necesariamente una mayor remoción en todos los materiales precursores. Por consiguiente, la comparación experimental de biochars producidos a 350, 400 y 450 °C permitirá determinar cuál condición térmica presenta el comportamiento más favorable dentro del intervalo analizado, sin atribuir anticipadamente una eficiencia superior a una temperatura determinada (Guo et al., 2022; Tomczyk et al., 2020).

La selección de *Baccharis latifolia* se justifica por ser una especie vegetal distribuida en la región andina, con disponibilidad local, rápido crecimiento y producción de biomasa aprovechable. La especie también presenta interés fitoquímico, debido a que en sus tejidos se han identificado flavonoides, compuestos fenólicos y otros grupos de metabolitos secundarios relacionados con las funciones de defensa, regulación y adaptación vegetal. Además, investigaciones realizadas con hojas, flores, tallos y raíces de *B. latifolia* han evidenciado diferencias entre sus extractos, lo que respalda la evaluación separada de sus estructuras vegetales y evita considerarlas matrices químicamente equivalentes (Bayas-Morejón et al., 2020; Enríquez et al., 2018; Prada et al., 2016).

La caracterización fitoquímica de la raíz, el tallo, las hojas y las flores permitirá establecer un perfil cualitativo y semicuantitativo de los metabolitos secundarios presentes en la biomasa original. Esta información aporta al conocimiento científico de la especie y permite comparar la distribución de grupos como flavonoides, taninos, alcaloides, saponinas, esteroides y triterpenos entre sus diferentes órganos. Sin embargo, los resultados fitoquímicos deben interpretarse como una caracterización del precursor vegetal, debido a que la pirólisis transforma los compuestos orgánicos mediante procesos de deshidratación, fragmentación, desvolatilización, condensación y carbonización, por lo que no puede afirmarse que los metabolitos identificados permanezcan intactos en el biochar o sean directamente responsables de la remoción de Cu(II) (Erb & Kliebenstein, 2020; Tomczyk et al., 2020).

Desde el punto de vista científico, la investigación permitirá generar información experimental sobre el comportamiento de biochars elaborados con hojas y flores de *Baccharis latifolia* frente a una solución acuosa sintética de Cu(II). La evaluación de materiales producidos a 350, 400 y 450 °C y sometidos a tiempos de contacto de 0, 10, 30 y 60 minutos permitirá comparar la variación de la concentración residual y el porcentaje de remoción entre tratamientos. El empleo de una concentración inicial medida de 104 mg/L permitirá mantener

una condición de exposición uniforme y determinar las diferencias asociadas al órgano vegetal, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto dentro del diseño experimental ejecutado.

La investigación también se sustenta en la posibilidad de aprovechar una especie vegetal disponible en el entorno local como materia prima para la obtención de materiales carbonosos con potencial uso ambiental. En este sentido, el estudio permitió valorar el comportamiento de los biochars producidos a partir de hojas y flores de *Baccharis latifolia* bajo condiciones controladas de laboratorio.

El alcance experimental se limitó a comparar la concentración residual y el porcentaje de remoción de Cu(II) alcanzados por cada tratamiento. Por ello, no se desarrollaron isotermas de adsorción, modelos cinéticos, análisis termodinámicos ni interpretaciones moleculares definitivas. Los resultados obtenidos permitieron identificar los biochars con mejor desempeño y establecer una base técnica para estudios posteriores que incluyan caracterización instrumental, pruebas de regeneración, análisis de interferencias y evaluación en aguas reales (Guo et al., 2022; Jagadeesh & Sundaram, 2023).

Desde la perspectiva ambiental y académica, este trabajo aporta información sobre la composición fitoquímica de *Baccharis latifolia* y sobre el comportamiento de los biochars obtenidos a partir de sus diferentes estructuras vegetales. De esta manera, se amplía el conocimiento disponible acerca del aprovechamiento de una especie local y de su posible transformación en materiales con aplicación en procesos de tratamiento de agua.

Además, el estudio promueve el uso responsable de biomasa vegetal disponible en la zona y la elaboración de adsorbentes mediante procedimientos de relativa sencillez operativa. Los resultados obtenidos frente al Cu(II) podrán servir como referencia para investigaciones posteriores orientadas a mejorar las condiciones de producción del biochar, evaluar su estabilidad y seguridad ambiental, e incorporar ensayos con aguas reales. Estas etapas serán necesarias antes de considerar su aplicación en sistemas de tratamiento a mayor escala.

4 BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

Directos: La comunidad académica de la UTC y el cuerpo estudiantil de la carrera de Ingeniería Ambiental (aprox. 200 personas), quienes contarán con una base de datos científica sobre especies remediadoras locales.

Indirectos: Habitantes del cantón Latacunga y zonas aledañas a la cuenca del río Cutuchi, quienes se benefician a largo plazo de la implementación de tecnologías de limpieza de aguas que mejoran la calidad de vida y la salud del ecosistema.

5 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La presencia de cobre en los recursos hídricos está asociada principalmente con actividades productivas como la minería, la fundición y los procesos metalúrgicos. También puede originarse por la fabricación de componentes eléctricos, el uso de compuestos cúpricos en prácticas agrícolas, la corrosión de tuberías y la descarga inadecuada de residuos industriales. Estas fuentes favorecen el ingreso continuo del metal a los cuerpos de agua y aumentan el riesgo de contaminación cuando los efluentes no reciben un tratamiento adecuado (Gui & Wang, 2024; Liao et al., 2023). Debido a que el cobre no se biodegrada, puede cambiar de forma química y distribuirse entre el agua, el material suspendido, los sedimentos y los organismos acuáticos, lo que favorece su permanencia y movilidad en el ambiente (Gui & Wang, 2024; Liao et al., 2023).

El cobre constituye un micronutriente esencial que interviene en procesos enzimáticos, respiratorios y de transferencia electrónica; sin embargo, el incremento de su concentración puede alterar la regulación celular y favorecer la producción de especies reactivas de oxígeno. En los organismos acuáticos, la exposición elevada al Cu(II) puede afectar el equilibrio iónico, la respiración, el metabolismo, el comportamiento, el crecimiento y la reproducción, por lo que su carácter esencial no elimina el riesgo asociado con concentraciones excesivas o exposiciones prolongadas (Gui & Wang, 2024; Liao et al., 2023).

En soluciones acuosas, el cobre puede presentarse como ion libre Cu^{2+} o formar complejos con sustancias orgánicas e inorgánicas. Su movilidad, biodisponibilidad y toxicidad dependen de la concentración presente y de las características fisicoquímicas del medio, particularmente del pH, la dureza, la alcalinidad, la materia orgánica disuelta y la presencia de otros iones. En consecuencia, el comportamiento del Cu(II) no puede explicarse únicamente a partir de su concentración total, sino que requiere considerar las condiciones bajo las cuales se desarrolla la exposición y el tratamiento (Liao et al., 2023; Mebane et al., 2023).

Para reducir la concentración de Cu(II) en el agua se han aplicado distintos procesos, entre ellos la precipitación química, la coagulación-floculación, el intercambio iónico, los tratamientos electroquímicos, la separación por membranas y la adsorción. Aunque estas alternativas pueden alcanzar niveles importantes de remoción, su implementación no siempre resulta sencilla, ya que algunas requieren equipos especializados, suministro continuo de energía, uso de reactivos y manejo posterior de los lodos o corrientes concentradas generadas. Estas exigencias pueden limitar su aplicación en escenarios donde existen restricciones económicas, técnicas u operativas (Jagadeesh & Sundaram, 2023).

Ante estas limitaciones, la adsorción con materiales derivados de biomasa se presenta como una alternativa viable, principalmente por su operación relativamente sencilla y por la posibilidad de emplear recursos vegetales disponibles en el entorno. Dentro de este grupo se encuentra el biochar, un material carbonoso obtenido mediante la transformación termoquímica de la biomasa bajo condiciones de oxígeno limitado. Su comportamiento frente al Cu(II) no es uniforme, ya que depende tanto del tipo de precursor utilizado como de las condiciones aplicadas durante la pirólisis, especialmente de la temperatura y del tiempo de tratamiento térmico (Geleto et al., 2022; Tomczyk et al., 2020).

La temperatura de pirólisis puede modificar la estructura carbonosa, la fracción volátil, la aromaticidad, la composición mineral y la disponibilidad de sitios de interacción del biochar. No obstante, el incremento de la temperatura no produce necesariamente una mayor remoción de Cu(II), debido a que el comportamiento del material también depende de la biomasa utilizada, de la concentración del ion y de las condiciones experimentales. Por esta razón, los biochars obtenidos a diferentes temperaturas deben evaluarse de manera independiente, sin asumir previamente cuál presentará el mejor desempeño (Geleto et al., 2022; Guo et al., 2022; Tomczyk et al., 2020).

En este contexto, *Baccharis latifolia* (Ruiz & Pav.) Pers. constituye una especie vegetal de interés debido a su distribución en la región andina, su disponibilidad local y la diversidad química reportada en sus estructuras. Los antecedentes fitoquímicos de la especie señalan la presencia de compuestos fenólicos, flavonoides, alcaloides, taninos, cumarinas, esteroides, triterpenos, saponinas y lactonas sesquiterpénicas, aunque su distribución e intensidad pueden variar según el órgano vegetal, las condiciones ambientales y el procedimiento de extracción empleado (Bayas-Morejón et al., 2020; Sequeda-Castañeda et al., 2015).

Los metabolitos secundarios participan en la defensa, la señalización, la regulación fisiológica y la adaptación de las plantas frente a condiciones bióticas y abióticas. Algunos de estos compuestos contienen grupos oxigenados o nitrogenados que, desde el punto de vista químico, pueden interactuar con cationes metálicos; sin embargo, su presencia en la biomasa vegetal no demuestra por sí sola que intervengan directamente en la remoción del Cu(II) observada después de la carbonización (Erb & Kliebenstein, 2020).

Por esta razón, la caracterización fitoquímica de la raíz, el tallo, las hojas y las flores de *Baccharis latifolia* permitirá establecer un perfil cualitativo y semicuantitativo de los metabolitos presentes en la biomasa original. La comparación entre órganos resulta necesaria porque las estructuras vegetales pueden presentar composiciones y respuestas biológicas

diferentes, por lo que no deben considerarse matrices químicamente equivalentes (Bayas-Morejón et al., 2020; Erb & Kliebenstein, 2020).

Durante la pirólisis, la biomasa sufre transformaciones térmicas que modifican de manera profunda su composición original. En este proceso se producen pérdidas de agua y compuestos volátiles, ruptura de estructuras orgánicas y formación progresiva de una matriz carbonosa. Por ello, la presencia de flavonoides, taninos, alcaloides, saponinas u otros metabolitos en la planta antes del tratamiento térmico no permite afirmar que estas moléculas se conserven sin cambios en los biochars obtenidos a 350, 400 o 450 °C.

En consecuencia, los resultados del tamizaje fitoquímico deben entenderse como una caracterización de la biomasa vegetal utilizada como precursor. Estos datos aportan información sobre la composición inicial de *Baccharis latifolia*, pero no constituyen una prueba directa de los procesos responsables de la disminución de Cu(II) observada en el material carbonizado. Para establecer dichos mecanismos sería necesario complementar el estudio con análisis específicos del biochar antes y después del contacto con el ion metálico (Erb & Kliebenstein, 2020; Tomczyk et al., 2020).

Las investigaciones realizadas con *Baccharis latifolia* en zonas contaminadas se han enfocado principalmente en la capacidad de la planta viva para acumular elementos metálicos presentes en el suelo. Estos estudios han evidenciado que ciertos contaminantes pueden incorporarse y distribuirse entre raíces, tallos y hojas durante el crecimiento de la especie.

Sin embargo, estos antecedentes no permiten predecir de manera directa el comportamiento de un biochar elaborado a partir de *B. latifolia* frente al Cu(II). La absorción y la translocación de metales en una planta viva dependen de procesos fisiológicos y del transporte interno de sustancias, mientras que la disminución de Cu(II) mediante biochar ocurre por la interacción del ion con un material carbonizado. Por esta razón, ambos procesos deben analizarse de manera independiente (Franco et al., 2018).

Además, los antecedentes revisados no proporcionan información suficiente para determinar cómo influyen el órgano vegetal utilizado como precursor, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto sobre la concentración residual de Cu(II). Esta carencia impide asumir que los biochars elaborados con hojas y flores de *Baccharis latifolia* presentan el mismo desempeño o que una temperatura determinada genera necesariamente la mayor remoción del ion metálico (Geleto et al., 2022; Guo et al., 2022).

En consecuencia, el problema científico de la investigación se centra en la falta de evidencia experimental para establecer el comportamiento de los biochars elaborados con hojas y flores de *Baccharis latifolia*, a temperaturas de pirólisis de 350, 400 y 450 °C, en la remoción de Cu(II) presente en una solución acuosa sintética. Para abordar esta limitación, se requiere comparar la concentración residual y el porcentaje de remoción obtenidos a los 0, 10, 30 y 60 minutos de contacto, partiendo de una concentración inicial medida de 104 mg/L de Cu(II).

De manera complementaria, se requiere determinar los metabolitos secundarios presentes en la raíz, el tallo, las hojas y las flores de la especie y analizar sus diferencias entre estructuras vegetales. Esta relación tendrá un carácter exploratorio, debido a que los resultados fitoquímicos corresponden a la biomasa original y no demuestran la conservación de los metabolitos ni su participación directa en el comportamiento adsorbente del biochar.

Por lo tanto, la investigación busca establecer qué combinación de órgano vegetal, temperatura de pirólisis y tiempo de contacto presenta el comportamiento más favorable para disminuir la concentración de Cu(II) dentro de las condiciones experimentales evaluadas. Los resultados permitirán determinar el potencial preliminar de los biochars de *Baccharis latifolia* como adsorbentes, sin atribuir mecanismos moleculares específicos ni aplicar modelos cinéticos, isothermas de equilibrio o análisis termodinámicos que no forman parte del diseño experimental.

6 OBJETIVOS DEL PROYECTO

6.1 Objetivo General:

Evaluar el potencial remediador de *Baccharis latifolia* frente a contaminantes metálicos en soluciones acuosas, a través de su caracterización fitoquímica y ensayos experimentales de remoción bajo condiciones controladas de laboratorio, con el fin de proponer una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas.

6.2 Objetivos Específicos:

- Determinar el perfil fitoquímico de los extractos de *Baccharis latifolia* mediante ensayos colorimétricos para la identificación de metabolitos secundarios con afinidad potencial por metales.

- Evaluar la capacidad de remoción de metales seleccionados en soluciones acuosas sintéticas, determinando el porcentaje de remoción en función del tiempo y la concentración inicial.
- Analizar la factibilidad técnica preliminar del uso de *Baccharis latifolia* como alternativa biotecnológica para la remediación de soluciones acuosas contaminadas.

7 ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Tabla 1

Actividades correspondientes al objetivo específico 1

OBJETIVO ESPECÍFICO	ACTIVIDADES	METODOLOGÍA	RESULTADOS ESPERADOS
Determinar el perfil fitoquímico de la raíz, el tallo, las hojas y las flores de <i>Baccharis latifolia</i> mediante ensayos colorimétricos y de precipitación para la identificación cualitativa y semicuantitativa de metabolitos secundarios.	1. Recolección del material vegetal: se recolectaron por separado muestras de raíz, tallo, hojas y flores de <i>Baccharis latifolia</i> en el sector de Salache. 2. Separación y limpieza: las estructuras vegetales fueron clasificadas, codificadas y limpiadas para retirar suelo, material extraño y tejidos deteriorados. 3. Secado y trituración: cada estructura vegetal se secó en estufa a 80 °C durante 24 horas y posteriormente se trituró de manera independiente. 4. Preparación de los extractos: cada muestra seca y triturada se colocó en un recipiente identificado, se adicionaron 750 mL de etanol al 96 % y se mantuvo en	Enfoque cualitativo, experimental e in vitro, con valoración semicuantitativa. Cada órgano vegetal fue analizado como una unidad independiente. La identificación de los metabolitos secundarios se fundamentó en reacciones colorimétricas, formación de precipitados, espuma, turbidez y cambios de solubilidad. La intensidad de las respuestas fue registrada mediante la escala establecida para el estudio.	Obtención de un perfil fitoquímico diferenciado para la raíz, el tallo, las hojas y las flores de <i>Baccharis latifolia</i>. Elaboración de una matriz comparativa de presencia, ausencia e intensidad relativa de los metabolitos secundarios evaluados. Identificación de diferencias fitoquímicas entre los órganos vegetales analizados.

maceración durante 96 horas, en oscuridad y a temperatura ambiente.

5.

Filtración: los extractos fueron filtrados y almacenados

separadamente para conservar la identificación de cada órgano vegetal.

6. Tamizaje

fitoquímico: se realizaron pruebas colorimétricas y de precipitación para identificar alcaloides, flavonoides, taninos, saponinas,

esteroides,

triterpenos,

cumarinas, lactonas,

glucósidos

cardiotónicos,

antraquinonas,

quinonas y otros

grupos evaluados.

7.

Registro de

resultados: se

documentaron los

cambios de

coloración,

formación de

precipitados,

turbidez, espuma y

demás respuestas

observadas.

8.

Elaboración de la

matriz fitoquímica:

los resultados fueron

organizados y

comparados por

metabolito y

estructura vegetal.

Tabla 2

Actividades correspondientes al objetivo específico 2

OBJETIVO ESPECÍFICO	ACTIVIDADES	METODOLOGÍA	RESULTADOS ESPERADOS
------------------------	-------------	-------------	-------------------------

Evaluar la capacidad de los biochars elaborados con hojas y flores de <i>Baccharis latifolia</i>, a temperaturas de pirólisis de 350, 400 y 450 °C, para disminuir la concentración de Cu(II) en una solución acuosa sintética en función del tiempo de contacto.	1. Selección de la biomasa: se utilizaron por separado hojas y flores de <i>Baccharis latifolia</i> como materiales precursores. 2. Acondicionamiento: las hojas y flores fueron limpiadas, secadas en estufa a 80 °C durante 24 horas, trituradas y almacenadas separadamente. 3. Producción del biochar: cada precursor fue sometido a pirólisis en mufla, bajo condiciones limitadas de oxígeno, a temperaturas de 350, 400 y 450 °C. 4. Acondicionamiento del biochar: los materiales obtenidos fueron enfriados, triturados, tamizados, codificados y almacenados para los ensayos. 5. Preparación de la solución sintética: se preparó una solución de Cu(II) a partir de sulfato de cobre, con una concentración inicial medida de 104 mg/L. 6. Ensayos de adsorción: cada biochar se puso en contacto con la solución sintética durante 0, 10, 30 y 60 minutos. 7. Separación de fases: al finalizar cada tiempo de contacto, el biochar fue separado de la fase líquida. 8. Determinación de Cu(II): la concentración residual se determinó mediante espectrofotometría UV-visible. 9. Procesamiento de datos: se calcularon la concentración residual, el porcentaje de remoción y, cuando correspondió, la capacidad aparente de	Enfoque cuantitativo y experimental por lotes. El diseño consideró dos precursores vegetales —hoja y flor—, tres temperaturas de pirólisis —350, 400 y 450 °C— y cuatro tiempos de contacto —0, 10, 30 y 60 minutos—. La concentración inicial de 104 mg/L de Cu(II) se mantuvo como condición fija. La variable de respuesta principal fue la concentración residual de Cu(II), complementada con el porcentaje de remoción. No se aplicaron isotermas, modelos cinéticos ni análisis termodinámicos.	Obtención de las concentraciones residuales de Cu(II) para cada combinación de órgano vegetal, temperatura de pirólisis y tiempo de contacto. Cálculo del porcentaje de remoción alcanzado por cada tratamiento. Comparación del comportamiento de los seis biochars y determinación del tratamiento y tiempo de contacto con mejor desempeño dentro de las condiciones experimentales evaluadas.
--	---	--	--

adsorción.	10. Comparación de tratamientos: se analizaron las diferencias asociadas con el órgano vegetal, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto.
------------	---

Tabla 3
Actividades correspondientes al objetivo específico 3

OBJETIVO ESPECÍFICO	ACTIVIDADES	METODOLOGÍA	RESULTADOS ESPERADOS
Analizar la factibilidad técnica preliminar del uso de biochars elaborados con hojas y flores de <i>Baccharis latifolia</i> como materiales adsorbentes para disminuir Cu(II) en soluciones acuosas sintéticas.	1. Organización de los resultados: se integraron los datos del tamizaje fitoquímico, la producción de biochar y los ensayos de remoción de Cu(II). 2. Comparación del desempeño: se compararon las concentraciones residuales y los porcentajes de remoción obtenidos por los biochars de hoja y flor producidos a 350, 400 y 450 °C. 3. Identificación del tratamiento más favorable: se determinó la combinación de precursor vegetal, temperatura de pirólisis y tiempo de contacto que presentó el mejor comportamiento experimental. 4. Evaluación del proceso de producción: se analizaron la disponibilidad de la biomasa, las condiciones de secado, la temperatura de pirólisis, el acondicionamiento del material y la reproducibilidad del procedimiento. 5. Evaluación	Análisis comparativo, descriptivo y técnico preliminar. Se integraron los resultados cualitativos del perfil fitoquímico y los datos cuantitativos de los ensayos de adsorción, manteniendo ambos componentes como evidencias diferentes. La factibilidad fue valorada mediante criterios de desempeño experimental, requerimientos de producción, facilidad operativa, reproducibilidad, limitaciones metodológicas y gestión del material agotado.	Identificación del biochar y del tiempo de contacto con mejor comportamiento experimental. Determinación de las principales ventajas, limitaciones y requerimientos técnicos del uso de biochars de <i>Baccharis latifolia</i>. Valoración preliminar de su potencial como adsorbentes de Cu(II) bajo condiciones controladas de laboratorio y establecimiento de recomendaciones para futuras investigaciones y aplicaciones.

operacional: se consideraron el tiempo requerido para la adsorción, la facilidad de separación del biochar y los requerimientos para la determinación de Cu(II). **6. Evaluación ambiental:** se reconoció la necesidad de almacenar y gestionar adecuadamente las soluciones residuales y el biochar agotado con cobre. **7. Identificación de limitaciones:** se analizaron las restricciones asociadas con el uso de una solución sintética, una sola concentración inicial, tiempos máximos de 60 minutos y ausencia de caracterización instrumental del biochar. **8. Formulación de recomendaciones:** se establecieron necesidades de investigación futura relacionadas con aguas reales, regeneración, desorción, estabilidad del cobre retenido y manejo del biochar agotado.

8 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO-TÉCNICA

8.1 Contaminación de los sistemas acuáticos por cobre

La presencia de cobre en los sistemas acuáticos puede originarse por la meteorización de minerales y por actividades antropogénicas vinculadas con la minería, la fundición, la metalurgia, la galvanoplastia, la fabricación de conductores eléctricos, el empleo de compuestos cúpricos en la agricultura, la corrosión de tuberías y la descarga de efluentes industriales. Cuando los aportes superan la capacidad de regulación del medio, el cobre puede distribuirse entre la fase disuelta, el material particulado, los sedimentos y los organismos, por lo que su control constituye una prioridad para la protección de la calidad del agua (Liao et al., 2023; Gui & Wang, 2024).

El cobre no se biodegrada hasta desaparecer del ambiente, sino que experimenta transformaciones de estado de oxidación, complejación, precipitación, adsorción y redistribución entre compartimentos. Esta permanencia del cobre en el ambiente indica que una reducción de su concentración en la fase líquida no representa necesariamente su eliminación completa. El metal puede transferirse y acumularse en otras fases, como precipitados, sedimentos o materiales adsorbentes agotados. Por esta razón, el tratamiento no concluye con la separación del cobre del agua, sino que también debe considerar el manejo, almacenamiento y disposición adecuada del residuo sólido que lo contiene (Gui & Wang, 2024; Mebane et al., 2023).

La evaluación ambiental del cobre no debe limitarse únicamente a su concentración total, sino que también debe considerar la fracción que se encuentra disponible para interactuar con los organismos y con los distintos componentes del medio. Factores como el pH, la dureza, la alcalinidad, el carbono orgánico disuelto y la presencia de ligandos inorgánicos influyen en la forma química del metal, su movilidad y su capacidad de asociarse con superficies biológicas o minerales. En consecuencia, dos cuerpos de agua con una concentración total similar de cobre pueden presentar niveles diferentes de biodisponibilidad y toxicidad, dependiendo de sus características fisicoquímicas (Liao et al., 2023; Mebane et al., 2023).

8.2 Cobre divalente en medios acuosos

El cobre cumple una función esencial como micronutriente, ya que interviene en enzimas vinculadas con la respiración celular, el transporte de electrones, la defensa antioxidante y diversos procesos metabólicos. No obstante, cuando su concentración supera los niveles requeridos por el organismo, puede alterarse su regulación interna y favorecerse la formación de especies reactivas de oxígeno. Este desequilibrio puede ocasionar daños en membranas celulares, proteínas y material genético, debido a la participación del cobre en reacciones de oxidación-reducción (Gui & Wang, 2024).

En agua, el estado de oxidación Cu(II) es una de las formas predominantes bajo condiciones ambientales oxigenadas. El ion libre Cu^{2+} puede asociarse con hidróxidos, carbonatos, cloruros, sulfatos y moléculas orgánicas, de modo que la fracción libre representa únicamente una parte del cobre total presente en la solución. La proporción de cada especie depende de la composición química del medio y condiciona la interacción del cobre con un adsorbente (Liao et al., 2023; Mebane et al., 2023).

La toxicidad acuática del cobre se relaciona con la alteración del transporte iónico, la función branquial, la respiración y el equilibrio osmótico. En peces, la exposición aguda puede

inhibir la Na^+/K^+ -ATPasa y aumentar la pérdida de sodio, mientras que exposiciones prolongadas pueden afectar el crecimiento, el metabolismo y la reproducción; la magnitud de estas respuestas depende de la concentración, el tiempo de exposición y la biodisponibilidad del elemento (Liao et al., 2023).

8.3 Fuentes y efectos ambientales del Cu(II)

Las fuentes antropogénicas de Cu(II) comprenden la extracción y el procesamiento de minerales, la producción de aleaciones, el tratamiento de superficies metálicas, la industria eléctrica, la fabricación de pigmentos, la aplicación de fungicidas cúpricos y la corrosión de redes de distribución. Los vertidos procedentes de estas actividades pueden elevar la concentración del elemento y modificar la composición química de los cuerpos receptores, especialmente cuando el tratamiento previo es insuficiente (Liao et al., 2023; Gui & Wang, 2024).

En los ecosistemas acuáticos, el cobre puede asociarse con partículas y acumularse en sedimentos, desde donde puede movilizarse nuevamente cuando cambian el pH, el potencial de oxidación-reducción o la concentración de ligandos. Esta dinámica convierte a los sedimentos en sumideros temporales y, al mismo tiempo, en posibles fuentes secundarias de exposición para organismos bentónicos y para la columna de agua (Mebane et al., 2023; Gui & Wang, 2024).

En seres humanos, el cobre es necesario en cantidades pequeñas, pero una exposición excesiva puede ocasionar efectos gastrointestinales agudos y, bajo determinadas condiciones de susceptibilidad o exposición sostenida, alteraciones hepáticas. Por esta razón, las estrategias de tratamiento deben disminuir la concentración disponible sin perder de vista que el cobre es un elemento esencial cuyo riesgo depende de la dosis y del contexto de exposición (World Health Organization [WHO], 2022).

8.4 Tecnologías para la disminución de Cu(II) en agua

Las tecnologías utilizadas para disminuir Cu(II) incluyen precipitación química, coagulación-floculación, intercambio iónico, electrodeposición, procesos electroquímicos, separación mediante membranas y adsorción. La selección del tratamiento depende de la concentración inicial, el volumen de agua, la composición de la matriz, la calidad requerida del efluente y la gestión de los residuos generados (Jagadeesh & Sundaram, 2023).

La precipitación química permite convertir el cobre disuelto en compuestos de baja solubilidad que pueden separarse del agua. Sin embargo, este proceso genera lodos con

contenido metálico que deben estabilizarse y disponerse de forma segura. Los sistemas de membranas, por su parte, pueden alcanzar una elevada eficiencia de separación, aunque demandan energía, control del ensuciamiento y tratamiento de las corrientes concentradas. El intercambio iónico ofrece cierta selectividad frente al Cu(II), pero su rendimiento puede verse afectado por la presencia de otros iones y requiere etapas periódicas de regeneración del material utilizado (Jagadeesh & Sundaram, 2023).

La adsorción se ha consolidado como una alternativa de interés debido a la sencillez relativa de su aplicación y a la posibilidad de emplear materiales obtenidos a partir de biomasa. Sin embargo, este proceso no elimina definitivamente el Cu(II), sino que lo transfiere desde la fase líquida hacia un material sólido. Por esta razón, la evaluación del tratamiento no debe limitarse al porcentaje de remoción, sino incluir también la separación del adsorbente, la estabilidad del cobre retenido y el manejo adecuado del material una vez agotado (Jagadeesh & Sundaram, 2023; Katiyar et al., 2021).

8.5 Diferenciación conceptual del proceso evaluado

La investigación utiliza biochar elaborado a partir de tejidos vegetales, por lo que el proceso corresponde a la remoción de Cu(II) mediante un material carbonoso y no a fitorremediación con plantas vivas. La distinción es necesaria porque la fitorremediación depende de absorción radicular, transporte vascular y metabolismo, mientras que el biochar actúa como una fase sólida producida por transformación termoquímica de la biomasa (Jagadeesh & Sundaram, 2023; Tomczyk et al., 2020).

Tabla 4

Diferencias entre los principales conceptos vinculados con la investigación.

Concepto	Descripción	Aplicación o sistema
Adsorción	Acumulación de una sustancia en la superficie o en sitios accesibles de un sólido.	Biochar, carbón activado.
Absorción	Incorporación de una sustancia al volumen interno de otra fase.	Tejidos vivos, líquidos o materiales absorbentes.
Biosorción	Retención de contaminantes mediante biomasa viva o inactiva y materiales de origen biológico.	Algas, hongos, residuos vegetales y biomasa seca.
Fitorremediación	Uso de plantas vivas y de sus procesos fisiológicos para	Plantas en crecimiento y sistemas radiculares.

	extraer, estabilizar o transformar contaminantes.	
Remoción con biochar	Disminución de la concentración en la fase líquida mediante un material carbonoso obtenido por pirólisis.	Biochar de hojas y flores de <i>B. latifolia</i> .

Nota. La tesis evalúa la disminución de Cu(II) mediante biochar; por tanto, el proceso no debe describirse como rizofiltración ni como fitorremediación de una planta viva. Adaptado conceptualmente de Tomczyk et al. (2020) y Jagadeesh y Sundaram (2023).

8.6 Fundamentos de la adsorción

La adsorción es un fenómeno interfacial mediante el cual una especie presente en una fase líquida se concentra en la superficie de un sólido. El adsorbato corresponde a la sustancia retenida y el adsorbente al material que proporciona los sitios de interacción; en la presente investigación, el Cu(II) constituye el adsorbato y el biochar de *B. latifolia* actúa como adsorbente (Jagadeesh & Sundaram, 2023).

La disminución de Cu(II) puede involucrar simultáneamente interacciones electrostáticas, intercambio iónico, complejación superficial, asociación con componentes minerales y retención en zonas accesibles del material. La importancia relativa de cada vía depende del precursor y de las condiciones de producción y contacto, por lo que la concentración residual por sí sola no permite identificar el mecanismo dominante (Guo et al., 2022; Zhang et al., 2021)

En un ensayo por lotes, el adsorbente se mezcla con un volumen definido de solución durante un periodo establecido y posteriormente se separa la fase sólida. La comparación entre la concentración inicial y la concentración residual permite cuantificar la disminución del soluto, pero no demuestra que se haya alcanzado equilibrio ni que toda la disminución corresponda exclusivamente a adsorción superficial (Katiyar et al., 2021; Zhang et al., 2021).

8.7 Biochar como material adsorbente

El biochar es un material carbonoso obtenido mediante pirólisis de biomasa bajo ausencia o disponibilidad limitada de oxígeno. Su estructura y composición dependen del tipo de precursor y de las condiciones térmicas empleadas, por lo que el término biochar reúne materiales heterogéneos y no permite anticipar una capacidad universal de remoción (Tomczyk et al., 2020).

El biochar se diferencia del carbón activado porque este último atraviesa una etapa adicional de activación física o química destinada a desarrollar su red de poros y aumentar su superficie. Un biochar sin activación puede retener Cu(II), pero su desempeño debe comprobarse experimentalmente para cada materia prima y condición de producción (Jagadeesh & Sundaram, 2023; Katiyar et al., 2021).

La literatura reporta que biochars derivados de algas, residuos agrícolas, estiércoles y otras biomásas pueden disminuir Cu(II) en soluciones acuosas. Sin embargo, las capacidades publicadas no deben transferirse directamente al biochar de *B. latifolia*, porque las diferencias en precursor, pirólisis, dosis, concentración y tiempo de contacto modifican los resultados obtenidos (Katiyar et al., 2021; Zhang et al., 2021).

8.8 Biomasa precursora: hojas y flores de *Baccharis latifolia*

La biomasa vegetal contiene celulosa, hemicelulosa, lignina, sustancias extractivas y una fracción mineral cuya proporción varía entre especies y órganos. Durante la pirólisis, los distintos componentes de la biomasa no se transforman de manera uniforme, ya que cada uno responde de forma diferente a la temperatura aplicada. Estas variaciones originan materiales carbonosos con características y comportamientos particulares. Por esta razón, las hojas y las flores de *Baccharis latifolia* se consideraron precursores independientes durante la producción y evaluación de los biochars (Tomczyk et al., 2020).

Las hojas cumplen funciones relacionadas con la fotosíntesis, el intercambio gaseoso y la regulación hídrica, mientras que las flores corresponden a órganos reproductivos con una organización anatómica y una composición química propias. Estas diferencias entre tejidos pueden influir en las características del material carbonizado obtenido a partir de cada estructura vegetal. Sin embargo, el efecto real del órgano precursor sobre el desempeño del biochar frente al Cu(II) solo puede determinarse mediante la comparación directa de los tratamientos bajo las mismas condiciones experimentales (Erb & Kliebenstein, 2020; Tomczyk et al., 2020).

En esta investigación, las hojas y las flores de *Baccharis latifolia* se acondicionaron de manera independiente y se emplearon como precursores para la elaboración de seis tratamientos. Cada órgano vegetal fue sometido a temperaturas de pirólisis de 350, 400 y 450 °C. Esta organización experimental permitió evaluar por separado la influencia del tipo de precursor y de la temperatura aplicada, sin asumir que los biochars obtenidos a partir de ambas estructuras presentaban un comportamiento equivalente.

8.9 Pirólisis de la biomasa

La pirólisis es un proceso termoquímico en el que la materia orgánica se descompone bajo condiciones de oxígeno limitado. Como resultado, se obtiene una fracción sólida rica en carbono, junto con vapores condensables y gases no condensables. La proporción de estos productos varía de acuerdo con la temperatura alcanzada, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia y las características propias de la biomasa utilizada como precursor (Tomczyk et al., 2020).

Cuando se emplea una mufla sin suministro continuo de gas inerte, el procedimiento debe describirse como pirólisis en condiciones limitadas de oxígeno. El uso de recipientes cubiertos reduce la entrada de aire y limita la combustión completa, pero estos recipientes no deben cerrarse herméticamente porque la liberación de vapores y gases puede producir sobrepresión.

La transformación térmica altera profundamente los constituyentes de la biomasa. Las moléculas originales experimentan deshidratación, ruptura de enlaces, desvolatilización y condensación, de manera que los metabolitos identificados en los extractos vegetales no pueden considerarse intactos en el biochar resultante (Tomczyk et al., 2020; Erb & Kliebenstein, 2020).

8.10 Influencia de la temperatura de pirólisis

La temperatura de pirólisis modifica simultáneamente la pérdida de materia volátil, el grado de carbonización, la organización aromática y la fracción mineral relativa del producto. Debido a que estos cambios ocurren de forma conjunta, una temperatura más elevada no garantiza por sí sola una mayor remoción de Cu(II) (Tomczyk et al., 2020; Guo et al., 2022).

Los materiales obtenidos a temperaturas moderadas pueden conservar una proporción mayor de estructuras oxigenadas derivadas del precursor, mientras que temperaturas superiores favorecen una carbonización más intensa. El efecto final sobre el Cu(II) depende de la biomasa y del conjunto de interacciones disponibles, por lo que la condición más favorable debe determinarse experimentalmente (Zhang et al., 2021; Guo et al., 2022).

Guo et al. (2022) comprobaron que la materia orgánica disuelta liberada por biochars producidos a diferentes temperaturas presentó afinidades distintas por Cu(II), lo que evidencia que el tratamiento térmico puede modificar la interacción entre el material y el ion. Este antecedente respalda la comparación de 350, 400 y 450 °C, pero no permite anticipar cuál temperatura será superior para *B. latifolia* (Guo et al., 2022).

8.11 Influencia del órgano vegetal

El tipo de biomasa utilizado influye de manera directa en la producción y el comportamiento del biochar, debido a que cada precursor presenta una composición distinta de polímeros estructurales, sustancias extractivas y componentes inorgánicos. Por ello, dos materiales sometidos a una misma temperatura de pirólisis pueden generar biochars con respuestas diferentes frente al Cu(II), aun cuando las demás condiciones experimentales se mantengan constantes (Tomczyk et al., 2020; Katiyar et al., 2021).

La comparación entre los biochars elaborados con hojas y flores permitió analizar si las diferencias propias de cada órgano vegetal se reflejaron en respuestas distintas después de la pirólisis. Para ello, el comportamiento de los tratamientos se evaluó mediante la concentración residual de Cu(II) y el porcentaje de remoción obtenido. La interpretación se mantuvo limitada a estos resultados experimentales, sin atribuir las diferencias observadas a propiedades específicas del biochar que no fueron determinadas mediante análisis instrumentales.

8.12 Mecanismos posibles de disminución de Cu(II)

De acuerdo con la literatura, la disminución de Cu(II) mediante biochar puede estar asociada con distintos procesos, como la atracción electrostática, el intercambio catiónico, la coordinación del metal con sitios disponibles en la superficie y la formación de compuestos de baja solubilidad. Estos mecanismos no necesariamente actúan de forma aislada, ya que pueden presentarse de manera simultánea y variar según el tipo de biomasa utilizada, la temperatura aplicada durante la pirólisis y la composición química de la solución tratada (Katiyar et al., 2021; Zhang et al., 2021).

La atracción electrostática puede producirse cuando la superficie del biochar presenta sitios con carga contraria a la del ion Cu^{2+} . Por otro lado, el intercambio iónico ocurre cuando el cobre desplaza cationes que se encontraban previamente asociados con el material. La complejación superficial implica la coordinación del metal con átomos donadores presentes en la superficie, mientras que la interacción con la fracción mineral puede favorecer la formación de especies poco solubles. Sin embargo, debido a que no se realizaron análisis del biochar antes y después del contacto con la solución, estos procesos deben considerarse únicamente como mecanismos posibles descritos en la literatura y no como explicaciones confirmadas para los resultados obtenidos (Guo et al., 2022; Zhang et al., 2021).

La medición de la fase líquida permitió verificar la disminución de la concentración de Cu(II) después del contacto con el biochar. Sin embargo, este resultado no permite diferenciar si el cobre fue retenido en la superficie, precipitado como una fase de menor solubilidad o

incorporado en zonas internas del material. En consecuencia, se utilizó el término **remoción**, ya que describe de forma más adecuada la reducción observada en la solución sin atribuirla a un mecanismo específico que no fue comprobado mediante técnicas instrumentales (Katiyar et al., 2021; Zhang et al., 2021).

8.13 Evaluación cuantitativa de la remoción

La concentración residual, expresada como C_t , corresponde a la cantidad de Cu(II) que permanece en la fase líquida después de un tiempo de contacto determinado. La comparación de este valor entre los tratamientos permitió identificar qué combinación de órgano vegetal, temperatura de pirólisis y tiempo de contacto mantuvo la menor concentración de cobre en la solución.

El porcentaje de remoción representa la proporción de la concentración inicial de Cu(II) que dejó de permanecer en la fase líquida después del contacto con el biochar. Este indicador permitió comparar el desempeño de los tratamientos evaluados bajo una misma concentración inicial y se calculó mediante la siguiente expresión (Katiyar et al., 2021; Zhang et al., 2021):

$$\text{Remoción (\%)} = [(C_0 - C_t) / C_0] \times 100$$

En esta ecuación, C_0 corresponde a la concentración inicial de Cu(II) medida experimentalmente, mientras que C_t representa la concentración residual determinada después de un tiempo de contacto t ; ambos valores se expresan en mg/L. Para efectuar el cálculo se utilizó la concentración inicial obtenida mediante el análisis de la solución y no únicamente el valor nominal de preparación, debido a que cualquier diferencia entre ambos se refleja directamente en el porcentaje de remoción calculado (Harris & Lucy, 2020).

Cuando se dispone de la masa seca del adsorbente y del volumen de la solución tratada, es posible estimar la capacidad aparente de remoción en un tiempo determinado, expresada como q_t , mediante una relación de balance de masa. En este caso, el subíndice t es más apropiado que e , debido a que el diseño experimental no permitió comprobar que los sistemas alcanzaran una condición de equilibrio (Katiyar et al., 2021):

$$q_t (\text{mg/g}) = [(C_0 - C_t) \times V] / m$$

En esta expresión, V representa el volumen de la solución, expresado en litros, y m corresponde a la masa seca de biochar utilizada, expresada en gramos. La capacidad aparente q_t complementa el porcentaje de remoción, debido a que relaciona la cantidad de Cu(II) retirada

de la fase líquida con la masa de material empleada. Ambos indicadores deben interpretarse únicamente dentro de las condiciones establecidas para cada ensayo (Katiyar et al., 2021; Zhang et al., 2021).

8.14 Tiempo de contacto

El tiempo de contacto corresponde al periodo durante el cual el biochar interactúa con la solución de Cu(II). En los primeros minutos puede producirse una disminución rápida de la concentración, favorecida por la disponibilidad de sitios accesibles en el material. Posteriormente, la variación puede hacerse más lenta debido a la reducción del gradiente de concentración y a la ocupación progresiva de los sitios de mayor accesibilidad. No obstante, este comportamiento debe verificarse mediante los resultados obtenidos para cada tratamiento (Araya et al., 2021; Katiyar et al., 2021).

Una variación mínima entre mediciones consecutivas puede indicar que, dentro de los intervalos evaluados, la remoción adicional de Cu(II) fue reducida. Sin embargo, esta aparente estabilidad no debe interpretarse como una condición de equilibrio, a menos que se demuestre que la concentración permanece constante durante un periodo suficiente y bajo condiciones experimentales reproducibles (Katiyar et al., 2021).

La investigación compara 0, 10, 30 y 60 minutos. La evaluación de estos tiempos de contacto permitió describir la evolución de la remoción de Cu(II) y determinar el periodo con mejor desempeño dentro del intervalo analizado. Sin embargo, la cantidad de mediciones realizadas no fue suficiente para ajustar modelos cinéticos, estimar constantes de velocidad ni identificar matemáticamente la etapa que controló el transporte del metal.

8.15 Concentración inicial

La concentración inicial establece la cantidad de Cu(II) disponible al comienzo del ensayo y el gradiente que favorece su transferencia desde la solución hacia el biochar. En experimentos realizados con diferentes niveles de concentración, un incremento de este parámetro puede aumentar la cantidad de metal retenida por unidad de masa del adsorbente. Sin embargo, el porcentaje de remoción puede disminuir cuando la disponibilidad de sitios de retención resulta insuficiente frente a la cantidad de Cu(II) presente en la solución (Jagadeesh & Sundaram, 2023; Katiyar et al., 2021).

Para analizar experimentalmente el efecto de la concentración inicial se requieren varios niveles de C_0 evaluados bajo condiciones equivalentes. Cuando se utiliza una sola

concentración, esta constituye una condición fija del ensayo y no permite determinar cómo cambiaría el desempeño ante cargas inferiores o superiores (Katiyar et al., 2021).

En la presente investigación se utilizó una concentración inicial medida de 104 mg/L de Cu(II). Por consiguiente, los resultados describen el comportamiento de los seis biochars frente a esa carga específica y no deben presentarse como evidencia del efecto de variar la concentración inicial.

8.16 *Baccharis latifolia*

8.16.1 Clasificación taxonómica y distribución

Baccharis latifolia (Ruiz & Pav.) Pers. es una especie aceptada del género *Baccharis* y de la familia Asteraceae. Su rango nativo se extiende desde el noroeste de Venezuela hasta el occidente de Sudamérica y el noroeste de Argentina, con presencia en ambientes andinos donde también recibe el nombre común de chilca (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.).

Tabla 5

Clasificación taxonómica de *Baccharis latifolia*

Categoría	Clasificación
Reino	Plantae
Orden	Asterales
Familia	Asteraceae
Género	<i>Baccharis</i>
Especie	<i>Baccharis latifolia</i> (Ruiz & Pav.) Pers.

Nota. Clasificación elaborada a partir de Plants of the World Online (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.).

La especie presenta hábito arbustivo y capacidad de establecimiento en áreas andinas intervenidas. Su disponibilidad regional y la producción de biomasa justifican su evaluación como materia prima, aunque estas características ecológicas no permiten inferir por sí mismas la eficiencia del biochar frente al Cu(II) (Royal Botanic Gardens, Kew, 2026; Prada et al., 2016).

8.16.2 Metabolitos secundarios de *Baccharis latifolia*

Los metabolitos secundarios, también denominados metabolitos especializados, comprenden compuestos que participan en la defensa, la señalización, la regulación del desarrollo y la interacción de las plantas con factores bióticos y abióticos. Sus límites funcionales no son absolutos, ya que algunos compuestos también intervienen en procesos regulatorios y en la adquisición de nutrientes (Erb & Kliebenstein, 2020).

La literatura específica de *B. latifolia* reporta compuestos fenólicos, flavonoides, alcaloides, taninos, cumarinas, esteroides, triterpenos, saponinas, lactonas sesquiterpénicas y sustancias volátiles de naturaleza terpénica. La presencia e intensidad de estos grupos depende del órgano, el estado de desarrollo, el ambiente, el solvente y el procedimiento analítico empleado (Bayas-Morejón et al., 2020; Sequeda-Castañeda et al., 2015).

Los análisis realizados en hojas de *Baccharis latifolia* han evidenciado variaciones en el contenido de flavonoides relacionadas con el tipo de hoja, la exposición a la radiación y las características del suelo. Estos antecedentes indican que el perfil fitoquímico puede variar según la población estudiada y las condiciones ambientales en las que se desarrolla la planta. Por ello, los resultados obtenidos en Salache deben interpretarse dentro de ese contexto específico y no considerarse representativos de toda la especie (Enríquez et al., 2018; Peñaranda et al., 2020).

8.16.3 Compuestos fenólicos y taninos

Los compuestos fenólicos se caracterizan por presentar uno o más anillos aromáticos asociados con grupos hidroxilo y cumplen funciones relacionadas con la defensa vegetal, la protección frente a la radiación y la respuesta ante condiciones de estrés. Dentro de este grupo se encuentran los taninos, los cuales se distinguen por su capacidad para establecer múltiples interacciones con proteínas y otras macromoléculas (de Melo et al., 2023; Erb & Kliebenstein, 2020).

Los taninos se clasifican, de manera general, en hidrolizables y condensados, grupos que presentan diferencias en su estructura química y reactividad. En un tamizaje cualitativo, la aparición de coloraciones características o la formación de precipitados se considera una evidencia presuntiva de su presencia. Sin embargo, estas respuestas no permiten identificar compuestos individuales ni establecer su concentración exacta en la muestra analizada (de Melo et al., 2023; Nortjie et al., 2022).

8.16.4 Flavonoides

Los flavonoides son compuestos fenólicos que presentan una estructura básica C6–C3–C6 y se agrupan en diversas subclases, entre ellas flavonas, flavonoles, flavanonas, antocianinas y chalconas. En las plantas intervienen en procesos como la pigmentación, la protección frente a la radiación, la señalización y la regulación de respuestas ante diferentes condiciones ambientales (Erb & Kliebenstein, 2020; Shen et al., 2022).

En *Baccharis latifolia* se ha reportado la presencia de flavonoides y actividad antioxidante en extractos obtenidos de hojas y otros órganos vegetales. Las pruebas

colorimétricas permiten comparar de manera cualitativa la respuesta de la raíz, el tallo, las hojas y las flores. Sin embargo, los cambios de color observados constituyen evidencia presuntiva y no reemplazan la separación cromatográfica ni la cuantificación específica de los compuestos presentes (Bayas-Morejón et al., 2020; Pilaquinga et al., 2021).

8.16.5 Alcaloides

Los alcaloides son metabolitos secundarios nitrogenados que presentan una gran diversidad estructural y pueden encontrarse en los tejidos vegetales como bases libres, sales o asociados con otros componentes celulares. En las plantas cumplen principalmente funciones de defensa química frente a herbívoros y patógenos, además de presentar diversas actividades biológicas (Bhambhani et al., 2021; Erb & Kliebenstein, 2020).

Las pruebas de precipitación empleadas para detectar alcaloides se basan en la formación de complejos de baja solubilidad bajo condiciones específicas. Una reacción positiva sugiere la presencia de compuestos nitrogenados compatibles con el reactivo utilizado; sin embargo, la respuesta puede estar influenciada por el solvente, el grado de acidez y la presencia de sustancias interferentes. Por esta razón, los resultados deben interpretarse únicamente de manera cualitativa o semicuantitativa (Nortjie et al., 2022).

8.16.6 Saponinas y sapogeninas

Las saponinas son glucósidos de naturaleza anfifílica constituidos por una fracción azucarada unida a una aglicona de tipo esteroidal o triterpénico. Esta estructura les permite interactuar tanto con el agua como con sustancias de carácter lipofílico, lo que favorece la disminución de la tensión superficial y la formación de espuma persistente en medios acuosos (Shakeel et al., 2025).

La formación de espuma y las reacciones colorimétricas dirigidas a la aglicona permiten detectar de manera presuntiva la presencia de saponinas o sapogeninas. Sin embargo, la intensidad de la respuesta puede variar según la eficiencia de la extracción y el tipo de compuesto presente en la muestra. Por ello, los resultados obtenidos deben interpretarse de forma cualitativa o semicuantitativa y no convertirse directamente en valores de concentración sin la aplicación de un método cuantitativo previamente validado (Nortjie et al., 2022; Shakeel et al., 2025).

8.16.7 Terpenoides, triterpenos y esteroides

Los terpenoides se originan a partir de unidades de isopreno y abarcan monoterpenos, sesquiterpenos, diterpenos y triterpenos. Los esteroides vegetales derivan de esqueletos

triterpénicos y cumplen funciones estructurales y regulatorias, mientras numerosos terpenoides participan en defensa y comunicación química (Câmara et al., 2024).

En las partes aéreas de *B. latifolia* se han identificado compuestos volátiles de naturaleza terpénica, y los tamizajes de la especie también han señalado esteroides y triterpenos. Estos antecedentes respaldan su búsqueda en los extractos, pero no implican que tales moléculas se conserven después de la pirólisis (Valarezo et al., 2013; Sequeda-Castañeda et al., 2015).

8.16.8 Cumarinas, lactonas y glucósidos cardiotónicos

Las cumarinas son metabolitos fenólicos derivados de benzopironas que participan en defensa, señalización y adquisición de micronutrientes. Algunas cumarinas pueden coordinar iones en sistemas biológicos, aunque esta propiedad no permite atribuirles directamente la remoción de Cu(II) observada en un biochar (Robe et al., 2021; Erb & Kliebenstein, 2020).

Las lactonas sesquiterpénicas contienen un anillo lactónico dentro de estructuras terpénicas y son frecuentes en Asteraceae. Los glucósidos cardiotónicos también poseen un anillo lactónico, pero unido a un núcleo esteroideal y a azúcares; debido a esta diferencia estructural, una prueba general de lactonas no identifica automáticamente glucósidos cardiotónicos (Agatha et al., 2024; Bejček et al., 2021).

8.16.9 Antraquinonas y quinonas

Una reacción positiva durante el tamizaje sugiere la presencia de compuestos compatibles con el grupo de las antraquinonas o quinonas. Sin embargo, este resultado no permite identificar sustancias individuales ni determinar su abundancia absoluta en la muestra. Por ello, la interpretación debe limitarse al carácter presuntivo y cualitativo del método colorimétrico empleado (Nortjie et al., 2022).

Una respuesta positiva en el tamizaje indica la presencia probable del grupo químico, pero no permite identificar cada antraquinona o quinona ni establecer su abundancia absoluta. La interpretación debe mantenerse dentro del alcance presuntivo del método colorimétrico (Nortjie et al., 2022).

8.16.10 Alcance del tamizaje fitoquímico

El tamizaje fitoquímico se basa en reacciones de coloración, precipitación, formación de espuma o fluorescencia para reconocer de manera presuntiva diferentes familias de metabolitos. Su principal utilidad radica en comparar los perfiles químicos de las muestras y orientar análisis posteriores. Sin embargo, la respuesta obtenida puede variar según el proceso

de extracción, el reactivo utilizado, la concentración del extracto, el tiempo de reacción y la apreciación visual del observador (Nortjie et al., 2022).

La escala basada en la ausencia o en la intensidad relativa de la respuesta permitió organizar y comparar la evidencia obtenida en raíz, tallo, hojas y flores. Sin embargo, esta valoración no representa una concentración química exacta. En consecuencia, los resultados deben interpretarse mediante expresiones como presencia presuntiva, respuesta débil, moderada o intensa, sin afirmar la identificación definitiva de moléculas individuales (Nortjie et al., 2022).

8.16.11 Antecedentes ambientales de la especie

Se han reportado estudios de *Baccharis latifolia* creciendo en suelos con presencia de elementos metálicos, lo que evidencia la capacidad de la especie para tolerar e interactuar con estos contaminantes bajo condiciones naturales de desarrollo. No obstante, estos antecedentes corresponden al ámbito de la fitorremediación y no permiten predecir de manera directa el comportamiento del biochar producido a partir de la planta durante la remoción de Cu(II) en solución acuosa (Franco et al., 2018).

La transformación de la biomasa de *Baccharis latifolia* en biochar cambia el fundamento del proceso de remoción. En la planta viva, la interacción con los contaminantes depende de mecanismos fisiológicos, como la absorción radicular, el transporte vascular y la actividad metabólica. En cambio, en el biochar se evalúa la interacción entre el Cu(II) presente en la solución y el material carbonoso obtenido mediante pirólisis. Por ello, los estudios realizados con plantas vivas respaldan el interés ambiental de la especie, pero no permiten establecer directamente la eficiencia del biochar, la cual debe determinarse mediante ensayos experimentales específicos.

8.17 Relación entre los metabolitos secundarios y el biochar

La caracterización fitoquímica permitió describir la composición cualitativa de la biomasa vegetal antes de su transformación térmica. Aunque algunos metabolitos contienen átomos de oxígeno o nitrógeno capaces de interactuar con iones metálicos en su estado original, la exposición a 350, 400 y 450 °C produce procesos de deshidratación, fragmentación, volatilización y condensación. En consecuencia, estas moléculas no necesariamente permanecen intactas después de la pirólisis, por lo que su presencia inicial no puede relacionarse de manera directa con el comportamiento posterior del biochar frente al Cu(II) (Erb & Kliebenstein, 2020; Tomczyk et al., 2020).

Las diferencias fitoquímicas observadas entre hojas y flores permiten describir las características propias de cada precursor y justifican su evaluación por separado durante la producción de biochar. No obstante, una posible relación entre la mayor intensidad de respuesta de un metabolito y una mayor remoción de Cu(II) debe interpretarse únicamente como una asociación exploratoria, ya que los resultados disponibles no permiten demostrar una relación causal ni identificar el mecanismo responsable de la retención del metal.

8.18 Determinación de Cu(II) mediante espectrofotometría UV-visible

La espectrofotometría UV-visible permite cuantificar una sustancia mediante la medición de la radiación absorbida en un intervalo determinado de longitudes de onda. En el caso del Cu(II), la determinación puede realizarse de forma directa o mediante la formación de una especie coloreada. Dentro del intervalo lineal del método, la absorbancia obtenida guarda relación con la concentración del analito presente en la solución (Harris & Lucy, 2020).

La curva de calibración debe elaborarse con soluciones estándar que abarquen el intervalo de concentraciones esperado en las muestras e incluir un blanco analítico. Cuando la respuesta de una muestra supera el rango establecido por la curva, esta debe diluirse y analizarse nuevamente. La extrapolación fuera del intervalo calibrado aumenta la incertidumbre y puede reducir la confiabilidad de la concentración calculada (Harris & Lucy, 2020).

La concentración inicial y las concentraciones residuales de Cu(II) deben determinarse mediante el mismo procedimiento analítico y bajo condiciones equivalentes de preparación y lectura. Esta uniformidad permite comparar los resultados de manera confiable y atribuir las variaciones observadas al contacto de la solución con el biochar, reduciendo la influencia de cambios en los reactivos, el tratamiento de las muestras o la respuesta instrumental (Harris & Lucy, 2020).

8.19 Factibilidad técnica y ambiental preliminar

La evaluación preliminar de la factibilidad técnica debe considerar la disponibilidad de hojas y flores, la posibilidad de reproducir la producción del biochar a 350, 400 y 450 °C, la cantidad de material requerida, el tiempo de contacto y la facilidad para separar el sólido de la solución tratada. Aunque un porcentaje elevado de remoción constituye un resultado favorable, este indicador por sí solo no permite demostrar la viabilidad del proceso a una escala mayor, debido a que también deben analizarse aspectos operativos, materiales y de manejo del biochar agotado (Jagadeesh & Sundaram, 2023).

Los ensayos realizados con una solución sintética permitieron comparar los tratamientos bajo condiciones controladas. Sin embargo, este tipo de matriz no reproduce la competencia entre iones, la presencia de materia orgánica ni los sólidos suspendidos que pueden encontrarse en aguas reales. En consecuencia, el desempeño observado para una concentración inicial de 104 mg/L de Cu(II) debe considerarse preliminar y no extrapolarse de manera directa a efluentes naturales o industriales sin realizar evaluaciones adicionales en matrices más complejas (Jagadeesh & Sundaram, 2023; Li et al., 2025).

El biochar agotado contiene el cobre retirado de la solución y requiere almacenamiento y gestión diferenciada. La regeneración o reutilización no debe afirmarse sin ensayos de desorción, estabilidad y ciclos sucesivos, ya que la transferencia del contaminante a un sólido genera una nueva corriente que debe manejarse de manera segura (Jagadeesh & Sundaram, 2023).

8.20 Modelo conceptual de la investigación

El modelo conceptual parte de dos precursores de *B. latifolia*, hoja y flor, sometidos de manera independiente a 350, 400 y 450 °C. Los seis biochars resultantes se ponen en contacto con una solución sintética de Cu(II) de concentración inicial medida de 104 mg/L y se determina la concentración residual a los 0, 10, 30 y 60 minutos.

La secuencia lógica del estudio puede expresarse como: órgano vegetal → temperatura de pirólisis → biochar → contacto con Cu(II) → concentración residual → porcentaje de remoción y capacidad aparente. El tamizaje fitoquímico caracteriza la raíz, el tallo, las hojas y las flores como matrices vegetales, mientras que la evaluación adsorbente utiliza exclusivamente los biochars de hoja y flor.

9 MARCO LEGAL APLICABLE

El marco legal de la presente investigación se relaciona con la protección de los recursos hídricos, la prevención de la contaminación por elementos metálicos, la gestión ambientalmente adecuada de sustancias y residuos que contienen cobre y el aprovechamiento responsable de recursos biológicos. Debido a que el estudio evaluó experimentalmente la disminución de Cu(II) en una solución acuosa sintética mediante biochars elaborados a partir de hojas y flores de *Baccharis latifolia*, las disposiciones legales se analizaron de acuerdo con su relación directa con la protección del agua, la prevención del daño ambiental y el manejo de los residuos generados durante los ensayos.

El artículo 425 de la Constitución de la República establece el orden jerárquico de aplicación de las normas en Ecuador. En consecuencia, el análisis se presenta comenzando por la Constitución y los tratados internacionales ratificados por el Estado ecuatoriano, seguido de las leyes orgánicas, reglamentos, acuerdos ministeriales y normas técnicas relacionadas con la investigación. Los valores establecidos para cobre en la normativa ambiental se utilizaron únicamente como **referencias regulatorias**, debido a que el experimento se realizó con una solución sintética bajo condiciones controladas de laboratorio y no correspondió al monitoreo de una descarga real.

9.1.1 Constitución de la República del Ecuador

El **artículo 12** reconoce el derecho humano al agua como fundamental e irrenunciable y establece que este recurso constituye patrimonio nacional estratégico de uso público y es esencial para la vida. Este principio proporciona el fundamento constitucional para el desarrollo de investigaciones orientadas a prevenir y disminuir la contaminación de los sistemas acuáticos por sustancias que puedan afectar su calidad, entre ellas los elementos metálicos presentes en efluentes y otras matrices acuosas (Asamblea Constituyente del Ecuador, 2008).

El **artículo 14** reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado y declara de interés público la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados. En este contexto, la evaluación de materiales obtenidos a partir de biomasa para disminuir la concentración de Cu(II) se relaciona con la búsqueda de alternativas orientadas al control de la contaminación y a la protección de la calidad ambiental (Asamblea Constituyente del Ecuador, 2008).

El **artículo 15** establece que el Estado promoverá el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de bajo impacto. La transformación de biomasa de *Baccharis latifolia* en biochar y su evaluación experimental frente al Cu(II) se relacionan con este principio por explorar el aprovechamiento de un material de origen vegetal. Sin embargo, los resultados obtenidos en laboratorio no permiten considerar al biochar como una tecnología validada para aplicación real sin estudios adicionales de eficiencia, regeneración, estabilidad del cobre retenido, disposición del material agotado y comportamiento en aguas reales (Asamblea Constituyente del Ecuador, 2008).

Los **artículos 71 y 72** reconocen los derechos de la naturaleza y su derecho a la restauración cuando se producen afectaciones ambientales. Estas disposiciones guardan relación con la investigación debido a que la presencia excesiva de cobre en los sistemas

acuáticos puede alterar sus condiciones naturales, mientras que el estudio de alternativas de remoción contribuye a generar conocimiento técnico orientado a la prevención y eventual recuperación de ambientes afectados (Asamblea Constituyente del Ecuador, 2008).

El **artículo 395** establece los principios ambientales que deben orientar la gestión pública y privada, entre ellos el desarrollo sustentable, la aplicación transversal de las políticas ambientales y la interpretación de las disposiciones jurídicas en el sentido más favorable a la protección de la naturaleza. En concordancia con este principio, la evaluación de un material para remover Cu(II) no debe considerar únicamente el porcentaje de remoción obtenido, sino también los residuos generados, el consumo de recursos y el destino posterior del material que retiene el metal (Asamblea Constituyente del Ecuador, 2008).

El **artículo 396** dispone la adopción de medidas oportunas para evitar impactos ambientales negativos y establece la responsabilidad objetiva por el daño ambiental. Este principio adquiere relevancia durante la manipulación de la solución sintética de Cu(II), debido a que derrames o disposiciones inadecuadas podrían trasladar el cobre desde el sistema experimental hacia el agua o el suelo. Por esta razón, los residuos líquidos y sólidos generados durante los ensayos requieren un manejo diferenciado y seguro (Asamblea Constituyente del Ecuador, 2008).

Finalmente, el **artículo 411** determina que el Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos y regulará las actividades que puedan afectar su calidad o cantidad. La presente investigación guarda relación directa con esta disposición al evaluar, a escala experimental, la capacidad de biochars de *Baccharis latifolia* para disminuir la concentración de Cu(II) presente en una fase acuosa (Asamblea Constituyente del Ecuador, 2008).

9.1.2 Convenio de Basilea

El **Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación** constituye uno de los instrumentos internacionales de mayor relación con la gestión de residuos que contienen sustancias peligrosas. Ecuador suscribió el Convenio el 22 de marzo de 1989 y depositó su instrumento de ratificación el 23 de febrero de 1993, por lo que forma parte de los compromisos internacionales asumidos por el país.

El Convenio busca reducir la generación de desechos peligrosos y asegurar que su manejo y eliminación se realicen de manera ambientalmente racional, especialmente cuando

existe movimiento entre países. Su **Anexo I incluye en la categoría Y22 a los compuestos de cobre**. Esto resulta pertinente para la investigación debido a que la solución utilizada fue preparada con $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y el biochar agotado puede contener cobre retirado de la fase líquida. Sin embargo, la presencia de cobre no permite declarar automáticamente que cualquier biochar usado constituye un desecho peligroso; su clasificación debe considerar las características de peligrosidad previstas en el Convenio y la normativa ecuatoriana aplicable.

En el contexto de esta tesis, el Convenio de Basilea refuerza la necesidad de evitar que las soluciones residuales con Cu(II) o los materiales sólidos que hayan retenido cobre sean eliminados sin control. Su aplicación en el trabajo es principalmente preventiva y de gestión ambiental, ya que no se realizaron movimientos transfronterizos de residuos.

9.1.3 Convenio sobre la Diversidad Biológica

El **Convenio sobre la Diversidad Biológica** promueve la conservación de la diversidad biológica, la utilización sostenible de sus componentes y la distribución justa de los beneficios derivados de la utilización de los recursos genéticos. Ecuador es Parte del Convenio desde el 29 de diciembre de 1993 mediante ratificación.

Su relación con esta investigación se encuentra en el aprovechamiento científico de *Baccharis latifolia*, una especie vegetal presente en la región andina. La recolección y utilización de biomasa con fines de investigación deben realizarse procurando no comprometer la conservación de las poblaciones naturales ni generar impactos innecesarios sobre el ecosistema. Este convenio no establece valores permisibles para cobre ni determina la eficiencia del biochar, pero proporciona un marco internacional para el uso responsable de los recursos biológicos.

9.1.4 Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua

La **Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua** regula la protección, conservación, recuperación y gestión del agua en el territorio ecuatoriano. Su aplicación resulta directamente relacionada con el objeto de la presente investigación debido a que el Cu(II) fue evaluado como contaminante de una fase acuosa y el estudio buscó determinar la capacidad de materiales carbonosos para disminuir su concentración.

El **artículo 64** desarrolla los derechos de la naturaleza relacionados con el agua y establece la necesidad de conservar las fuentes y los ecosistemas asociados. Esta disposición

sustenta la prevención de la incorporación de contaminantes capaces de alterar las condiciones naturales de los recursos hídricos (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014).

El **artículo 79** establece objetivos relacionados con la preservación de la cantidad y calidad del agua, así como con el control de la acumulación de sustancias tóxicas, residuos y descargas capaces de contaminar los recursos hídricos. La evaluación experimental del biochar frente al Cu(II) se relaciona con estos objetivos al estudiar una alternativa para disminuir la presencia de un elemento metálico en solución (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014).

Por su parte, el **artículo 80** establece prohibiciones y mecanismos de control sobre los vertidos y prohíbe el vertido directo o indirecto de aguas o productos residuales, aguas servidas sin tratamiento y lixiviados capaces de contaminar las aguas del dominio hídrico público. Esta disposición refuerza la obligación de evitar que las soluciones residuales con cobre generadas durante actividades experimentales sean descargadas directamente al ambiente (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014).

9.1.5 Código Orgánico del Ambiente

El **Código Orgánico del Ambiente (COA)** constituye el principal cuerpo normativo ecuatoriano en materia de gestión ambiental y regula aspectos relacionados con la prevención de impactos, la calidad ambiental, los residuos y desechos, las sustancias químicas y la reparación de daños ambientales.

El **artículo 9** establece principios ambientales como la prevención, precaución, responsabilidad integral, reparación, acceso a la información ambiental y el principio de quien contamina paga. Para esta investigación, dichos principios se relacionan con la manipulación controlada de soluciones que contienen Cu(II), la prevención de derrames y el manejo responsable del biochar después del contacto con el metal (Asamblea Nacional del Ecuador, 2017).

Los **artículos 224, 225 y 226** desarrollan los criterios generales para la gestión integral de residuos y desechos. Entre sus orientaciones se encuentran la prevención y minimización de la generación, el aprovechamiento cuando sea técnica y ambientalmente viable y, finalmente, la eliminación o disposición adecuada de aquellos materiales que no puedan ser recuperados. Estos principios son aplicables a los residuos derivados de los ensayos experimentales, particularmente las soluciones remanentes y el biochar empleado para retirar Cu(II).

Los **artículos 235, 237, 238 y 239** regulan la gestión de residuos y desechos peligrosos y especiales, estableciendo responsabilidades desde su generación hasta la eliminación o disposición final y la necesidad de contar con las autorizaciones correspondientes para las distintas fases de manejo. Esta responsabilidad resulta relevante para el laboratorio o institución donde se generaron soluciones con cobre y materiales sólidos potencialmente contaminados con el elemento (Asamblea Nacional del Ecuador, 2017).

9.1.6 Reglamento al Código Orgánico del Ambiente

El **Reglamento al Código Orgánico del Ambiente**, expedido mediante Decreto Ejecutivo No. 752, desarrolla las disposiciones del COA y establece procedimientos específicos para la gestión ambiental. El reglamento es de aplicación obligatoria en el territorio nacional para las personas naturales y jurídicas, públicas y privadas, dentro de los ámbitos regulados por el Código.

El **artículo 623** considera generador a la persona natural o jurídica que produzca residuos o desechos peligrosos o especiales derivados de sus actividades y establece la responsabilidad sobre su manejo hasta su disposición final. En el caso de trabajos desarrollados en instalaciones institucionales, el reglamento también asigna responsabilidades al operador de la actividad o instalación según corresponda.

El **artículo 626** establece, entre las obligaciones del generador, identificar y caracterizar los residuos producidos, manejarlos adecuadamente, almacenarlos bajo condiciones técnicas de seguridad, evitar su contacto con el agua y el suelo, verificar compatibilidades y entregarlos, cuando corresponda, únicamente a gestores que cuenten con autorización administrativa ambiental. Estas disposiciones resultan directamente aplicables al manejo institucional de los residuos derivados de los ensayos con Cu(II).

Los **artículos 627 y 628** complementan estas obligaciones al regular el almacenamiento temporal y establecer condiciones destinadas a evitar la dispersión de contaminantes, garantizar la separación de materiales incompatibles y mantener una identificación adecuada. Por esta razón, las soluciones residuales de Cu(II) y los biochars utilizados no deberían mezclarse con residuos ordinarios mientras no se haya determinado su clasificación y destino ambientalmente seguro.

9.1.7 Gestión de sustancias y residuos con contenido de cobre

El **Acuerdo Ministerial No. 026** establece procedimientos relacionados con el registro de generadores de desechos peligrosos y la gestión previa al licenciamiento ambiental, además de disposiciones para el transporte de materiales peligrosos. Este instrumento complementa las obligaciones desarrolladas posteriormente por el COA y su Reglamento en materia de manejo seguro de residuos (Ministerio del Ambiente, 2008).

El **Acuerdo Ministerial No. 142** contiene los listados nacionales de sustancias químicas peligrosas, residuos y desechos peligrosos y residuos o desechos especiales. La clasificación de los residuos generados durante el experimento debe realizarse de acuerdo con estos listados y con las características de peligrosidad que correspondan, evitando asumir únicamente por su origen que un residuo pertenece automáticamente a una categoría determinada.

Asimismo, la NTE INEN 2266:2013, Transporte, almacenamiento y manejo de materiales peligrosos. Requisitos, establece medidas y precauciones para el transporte, almacenamiento y manejo de productos químicos peligrosos. Su aplicación resulta pertinente para la identificación, compatibilidad, almacenamiento y manipulación de reactivos y soluciones utilizadas durante los ensayos. Documentación ambiental del propio MAATE continúa citando esta norma técnica en instrumentos de 2026.

En el caso particular de la investigación, el biochar después del contacto con la solución de Cu(II) no debe considerarse automáticamente un residuo vegetal común. El material contiene cobre retirado de la fase líquida y, debido a que no se realizaron ensayos de desorción, lixiviación o estabilidad, no se conoce la movilidad posterior del metal. Por ello, resulta técnicamente apropiado mantener este material separado, identificado y bajo manejo institucional controlado hasta establecer su clasificación y alternativa de tratamiento o disposición. Al mismo tiempo, tampoco debe afirmarse sin caracterización que todo biochar agotado es jurídicamente un desecho peligroso.

9.1.8 Código Orgánico Integral Penal

El **Código Orgánico Integral Penal (COIP)** complementa el marco ambiental al establecer consecuencias jurídicas para determinadas conductas que produzcan daños graves al ambiente.

El **artículo 251** tipifica las conductas relacionadas con la contaminación, alteración o afectación grave de cuerpos de agua, fuentes, caudales ecológicos, aguas naturales o

subterráneas realizadas en contravención de la normativa aplicable. Su relación con esta investigación se encuentra en la necesidad de evitar la descarga inadecuada de soluciones experimentales que contengan cobre (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014).

El **artículo 254** regula la gestión prohibida o no autorizada de productos, residuos, desechos o sustancias peligrosas cuando estas conductas producen daños graves a la biodiversidad o a los recursos naturales. Esta disposición refuerza la importancia de mantener un manejo adecuado de los reactivos, soluciones residuales de Cu(II) y materiales carbonosos utilizados durante los ensayos (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014).

La inclusión del COIP en el marco legal no implica que las actividades realizadas en la tesis constituyan infracciones, sino que permite evidenciar la importancia jurídica que el ordenamiento ecuatoriano asigna a la prevención de la contaminación hídrica y al manejo adecuado de sustancias y residuos potencialmente peligrosos.

10 METODOLOGÍA

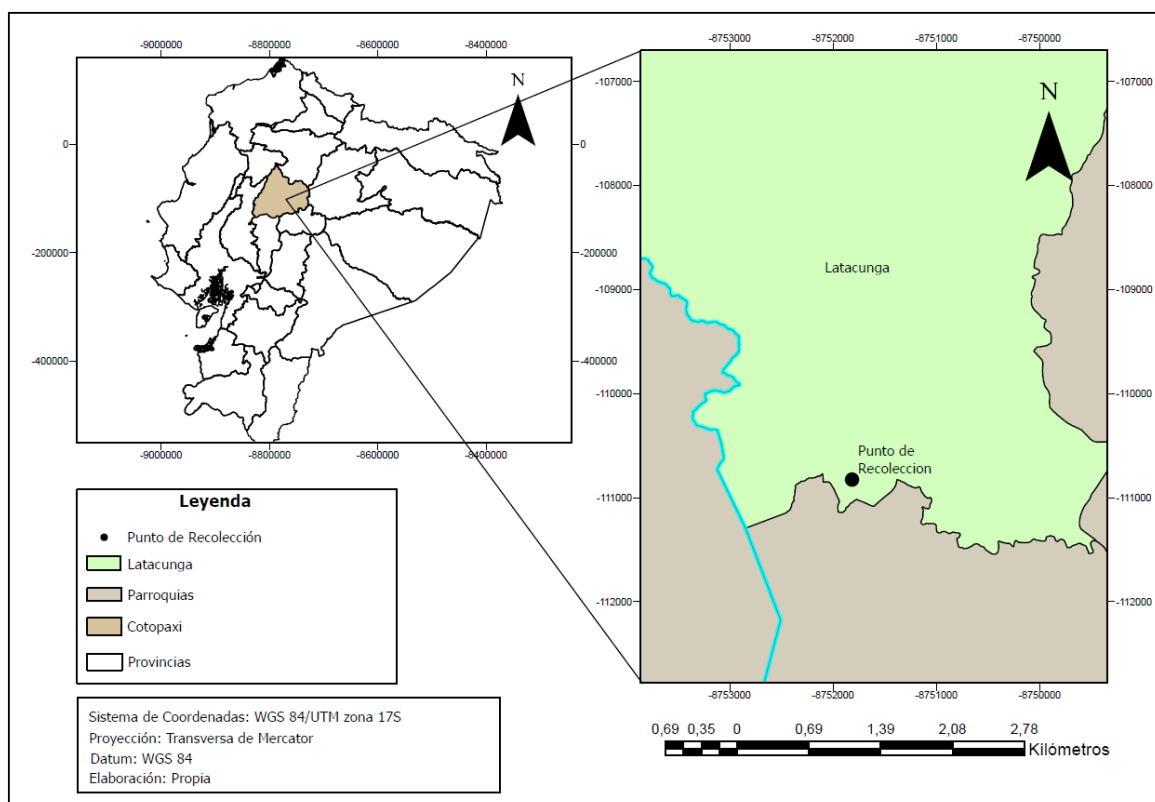
10.1 Área de estudio

La recolección del material vegetal se efectuó en el sector Salache, parroquia Eloy Alfaro, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi. El punto de recolección se ubicó en las coordenadas geográficas $-1,0022344$ de latitud y $-78,6188926$ de longitud, a una altitud de 2704 m s. n. m. La ubicación fue registrada en campo para mantener la trazabilidad del material vegetal empleado en la investigación.

El acondicionamiento de la biomasa, la preparación de los extractos etanólicos, el tamizaje fitoquímico, la producción de los biochars y los ensayos de adsorción se desarrollaron en las instalaciones de la Universidad Técnica de Cotopaxi, campus Salache, de acuerdo con la disponibilidad de los equipos requeridos en cada fase experimental.

Figura 1

*Ubicación geográfica del punto de recolección de *Baccharis latifolia* en el cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi*



Nota. Elaboración propia mediante ArcGIS, con base en la cartografía político-administrativa del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, año) y las coordenadas registradas durante la recolección del material vegetal. Sistema de coordenadas WGS 84/UTM zona 17S.

Tabla 6
Características del área de recolección

Parámetro	Descripción
Provincia	Cotopaxi
Cantón	Latacunga
Parroquia	Eloy Alfaro
Sector	Salache
Latitud	−1,0022344
Longitud	−78,6188926
Altitud	2704 m s. n. m.
Lugar de ejecución experimental	Universidad Técnica de Cotopaxi, campus Salache

Nota. Las coordenadas se expresan en grados decimales. Fuente: elaboración propia.

10.2 Enfoque, tipo y alcance de la investigación

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo experimental, complementado con un componente cualitativo y semicuantitativo destinado al tamizaje fitoquímico de la biomasa

vegetal. El componente cuantitativo comprendió la producción de biochars de hoja y flor, la exposición a una solución sintética de Cu(II), la medición de la concentración inicial y de las concentraciones residuales y el cálculo del porcentaje de remoción. El componente fitoquímico se fundamentó en la observación de cambios de coloración, precipitación, turbidez, fluorescencia, formación de interfases, espuma y decoloración (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018; Robles-García et al., 2016).

El estudio fue aplicado porque evaluó un material obtenido de una especie vegetal disponible en el contexto local. Su alcance fue descriptivo, comparativo y experimental: descriptivo para el perfil fitoquímico de raíz, tallo, hojas y flores; comparativo para los biochars obtenidos de hojas y flores a diferentes temperaturas; y experimental para la evaluación de la respuesta frente al Cu(II) durante distintos tiempos de contacto (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

10.3 Diseño de la investigación

La investigación se organizó en dos fases complementarias. La primera correspondió a la caracterización fitoquímica de los extractos etanólicos de raíz, tallo, hojas y flores de *Baccharis latifolia*. La segunda comprendió la producción separada de biochars de hoja y flor mediante pirólisis en condiciones limitadas de oxígeno, seguida de su evaluación frente a una solución acuosa sintética de Cu(II) (Araya et al., 2021; Tomczyk et al., 2020).

La fase de producción consideró dos precursores vegetales —hoja y flor— y tres temperaturas de pirólisis —350, 400 y 450 °C—, con lo cual se obtuvieron seis tratamientos. Los órganos vegetales se mantuvieron separados para evitar que sus diferencias de composición se ocultaran mediante una mezcla de biomasa (Araya et al., 2021; Tomczyk et al., 2020).

La fase de remoción se evaluó a partir de dos elementos: la concentración inicial de Cu(II) y el tiempo de contacto. La solución presentó una concentración inicial medida de 104 mg/L, valor que se mantuvo constante en todos los tratamientos. Por esta razón, la concentración inicial se empleó como condición experimental y como referencia para los cálculos, pero no se consideró un factor con distintos niveles. El tiempo de contacto se analizó a los 0, 10, 30 y 60 minutos. Debido al alcance del diseño experimental, no se aplicaron isothermas de adsorción, modelos cinéticos, análisis termodinámicos ni estimaciones de capacidad máxima.

El tiempo cero correspondió a la concentración inicial de la solución antes del contacto efectivo con el biochar. Las concentraciones determinadas a los 10, 30 y 60 minutos

representaron la cantidad de Cu(II) que permaneció en la fase líquida después de separar el material carbonoso.

Tabla 7
Variables y condiciones de la fase de adsorción

Tipo	Variable	Nivel o unidad
Factor de tratamiento	Órgano precursor	Hoja y flor
Factor de tratamiento	Temperatura de pirólisis	350, 400 y 450 °C
Independiente	Tiempo de contacto	0, 10, 30 y 60 min
Condición inicial	Concentración inicial de Cu(II)	104 mg/L, medida experimentalmente
Dependiente	Concentración residual	mg/L
Dependiente	Remoción	%

Nota. La concentración inicial fue única; por tanto, se utilizó como condición fija y no como un factor con varios niveles. Fuente: elaboración propia.

10.4 Población, muestra y unidades de análisis

La población vegetal estuvo constituida por los individuos de *Baccharis latifolia* presentes en el sector Salache. La muestra se seleccionó mediante muestreo no probabilístico intencional, considerando ejemplares accesibles, visualmente sanos y con disponibilidad de raíz, tallo, hojas y flores (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

Para la caracterización fitoquímica se recolectaron 500 g de material fresco por cada estructura vegetal: raíz, tallo, hojas y flores. La masa total procesada en esta fase fue de 2000 g. Cada estructura se trató como una matriz independiente durante el acondicionamiento, la maceración y el tamizaje.

La biomasa destinada a la producción de biochar procedió de una recolección independiente y no del material previamente macerado con etanol. En esta fase se utilizaron exclusivamente hojas y flores, procesadas por separado. La unidad de análisis fitoquímico estuvo constituida por el extracto etanólico de cada órgano vegetal, mientras que la unidad experimental de adsorción correspondió a un recipiente independiente que contenía un tratamiento de biochar y la solución sintética de Cu(II).

10.5 Recolección e identificación botánica

La recolección se realizó manualmente y las estructuras se separaron en el lugar de muestreo. La raíz, el tallo, las hojas y las flores se colocaron en recipientes independientes y se identificaron con los códigos BL-R, BL-T, BL-H y BL-F, respectivamente. Se retiraron suelo, piedras, tejidos deteriorados y fragmentos pertenecientes a otras especies.

La identidad taxonómica se verificó mediante la comparación de las características morfológicas observadas con descripciones botánicas especializadas y con la nomenclatura aceptada para *Baccharis latifolia* (Ruiz & Pav.) Pers., perteneciente a la familia Asteraceae (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.).

10.6 Caracterización fitoquímica de la biomasa vegetal

10.6.1 Acondicionamiento del material vegetal

Los 500 g de raíz, tallo, hojas y flores se procesaron por separado. Las muestras se inspeccionaron y limpiaron para eliminar suelo, restos vegetales extraños y material deteriorado. Posteriormente, cada estructura se secó en estufa a 80 °C durante 24 horas y se trituró de manera independiente. Los equipos se limpiaron entre muestras para disminuir el riesgo de contaminación cruzada.

Las condiciones de secado se registraron como parte del procedimiento aplicado, debido a que la temperatura y el tiempo de exposición pueden modificar la estabilidad y la extracción de determinados metabolitos. Por esta razón, el perfil obtenido se interpretó como correspondiente a la biomasa sometida a las condiciones experimentales descritas (World Health Organization, 2011).

10.6.2 Preparación de los extractos etanólicos

El material seco y triturado de cada estructura se colocó en recipientes independientes con capacidad suficiente. A cada recipiente se añadieron 750 mL de etanol al 96 %, procurando que la biomasa permaneciera cubierta por el solvente. Los recipientes se sellaron y se mantuvieron durante 96 horas en oscuridad y a temperatura ambiente.

Finalizada la maceración, cada preparación se filtró por separado y los extractos se almacenaron en recipientes identificados hasta la ejecución de las pruebas. Para los ensayos se emplearon alícuotas de 1 a 2 mL, según el procedimiento específico de cada grupo de metabolitos.

Tabla 8
Condiciones aplicadas para preparar extractos etanólicos

Estructura	Código	Solvente	Tiempo de maceración	de
Raíz	BL-R	750 mL de etanol al 96 %	96 h	
Tallo	BL-T	750 mL de etanol al 96 %	96 h	
Hoja	BL-H	750 mL de etanol al 96 %	96 h	

Flor	BL-F	750 mL de etanol al 96 %	96 h
------	------	--------------------------	------

Nota. Los extractos se prepararon y conservaron de manera independiente. Fuente: elaboración propia.

10.6.3 Condiciones generales del tamizaje

Los ensayos se desarrollaron en tubos de vidrio limpios e identificados según la estructura vegetal y el grupo evaluado. Antes de agregar los reactivos se registró el color inicial del extracto y, después de cada reacción, se documentaron el color final, la turbidez, el precipitado, la suspensión, la interfase, la fluorescencia, la espuma o la decoloración observada.

Las observaciones se efectuaron contra un fondo blanco y se respaldaron mediante registro fotográfico. Las reacciones se interpretaron como pruebas cualitativas presuntivas o exploratorias, debido a que el tamizaje reconoce grupos químicos generales, pero no identifica moléculas individuales ni determina concentraciones exactas (Robles-García et al., 2016).

10.6.4 Ensayos para alcaloides

Prueba ácido–base

Se colocó 1 mL de extracto en un tubo de ensayo y se añadieron entre tres y cinco gotas de ácido clorhídrico al 10 %. Después de homogeneizar, se agregó hidróxido de sodio al 10 % gota a gota hasta alcalinizar el medio. La aparición de turbidez o precipitado blanquecino se registró como una respuesta exploratoria compatible con sustancias básicas.

Reacción de Wagner

Se mezcló 1 mL de extracto con dos o tres gotas de ácido clorhídrico al 10 % y posteriormente se añadieron dos o tres gotas del reactivo de Wagner. La formación de un precipitado marrón o marrón rojizo se consideró una respuesta presuntiva positiva para alcaloides (Robles-García et al., 2016; World Health Organization, 2011).

Ensayo de salting-out

Se colocó 1 mL de extracto en un tubo, se añadieron entre tres y cinco gotas de ácido acético y se incorporó cloruro de sodio de manera gradual hasta alcanzar saturación visible. La mezcla reposó entre cinco y diez minutos y la formación de turbidez o suspensión se registró como respuesta exploratoria.

Precipitación con taninos de té negro

Se preparó una infusión concentrada con té negro comercial, se filtró y se mezcló en proporción 1:1 con el extracto previamente acidificado. La aparición de turbidez o precipitado beige, crema u ocre se interpretó de manera exploratoria y complementaria.

10.6.5 Compuestos fenólicos y taninos

Para compuestos fenólicos se mezclaron entre 1 y 2 mL de extracto con dos a cinco gotas de cloruro férrico al 3 %. Las tonalidades verdes, azules, violetas, negras o pardo oscuras se registraron como respuestas compatibles con compuestos fenólicos (Robles-García et al., 2016; World Health Organization, 2011).

Para taninos se mezcló 1 mL del extracto con dos a cinco gotas de cloruro férrico al 10 %. Las coloraciones azul-negras, verde oscuras o negro-verdosas se consideraron respuestas presuntivas de sustancias tánicas. La prueba no se utilizó para identificar de manera definitiva taninos hidrolizables o condensados (Robles-García et al., 2016).

10.6.6 Cumarinas y estructuras lactónicas

Para cumarinas se colocaron entre 1 y 2 mL de extracto en un tubo y se suspendió en su abertura una tira de papel filtro impregnada con hidróxido de sodio al 10 %, evitando el contacto directo con la muestra. El tubo se calentó suavemente en baño María y la tira se observó bajo la lámpara ultravioleta disponible en el laboratorio (Robles-García et al., 2016; World Health Organization, 2011).

Para las estructuras lactónicas se mezclaron 2 mL del extracto con 2 mL de hidróxido de sodio al 10 %. La preparación se calentó durante cinco minutos en baño María y posteriormente se añadió ácido acético gota a gota. El cambio cromático y su posible reversión después de acidificar se registraron como respuesta exploratoria.

10.6.7 Saponinas y sapogeninas

La presencia de saponinas se evaluó mediante las reacciones aplicadas a los extractos y el registro de las respuestas de espuma o coloración definidas en la matriz experimental. Para la evaluación indirecta de sapogeninas se empleó la reacción de Salkowski, mezclando el extracto con cloroformo concentrado y añadiendo cuidadosamente ácido sulfúrico concentrado por la pared del tubo. La coloración desarrollada en la interfase se interpretó como una respuesta indirecta de núcleos triterpénicos o esteroideos (Robles-García et al., 2016; World Health Organization, 2011).

En la reacción de vainilla y ácido sulfúrico se mezcló 1 mL de extracto con 1 mL de esencia de vainilla y 2 mL de ácido sulfúrico concentrado. La preparación se mantuvo entre 10

y 15 minutos en baño María a 65 °C y posteriormente se enfrió durante cinco minutos. Las tonalidades rosadas, rojas o violetas se registraron como respuestas exploratorias, debido a que la adaptación empleó un producto comercial y no vainillina analítica de concentración conocida.

10.6.8 Antraquinonas y quinonas

Para la prueba de Bornträger se evaporaron entre 1 y 2 mL del extracto en baño María. El residuo se redisolvió en agua destilada y se extrajo con cloroformo concentrado. La fase orgánica se trató con amoníaco al 10 %, y una fase amoniacal rosada, roja o magenta se consideró compatible con antraquinonas libres (Robles-García et al., 2016; World Health Organization, 2011).

En la prueba de Bornträger modificada se trataron entre 1 y 2 mL del extracto con ácido clorhídrico y cloruro férrico como sistema de hidrólisis y oxidación previa. Después del calentamiento, enfriamiento y filtración, el filtrado se extrajo con cloroformo concentrado y la fase orgánica se trató con amoníaco al 10 % (Robles-García et al., 2016; World Health Organization, 2011).

Para la oxidación alcalina directa se mezcló el extracto con hidróxido de sodio al 10 %. Las tonalidades rojas, violetas o magenta se registraron como respuestas preliminares de compuestos quinónicos.

10.6.9 Flavonoides

En la prueba alcalina se añadieron entre tres y cinco gotas de hidróxido de sodio al 10 % a una alícuota de 1 a 2 mL de extracto. Posteriormente, se incorporó ácido clorhídrico al 10 % gota a gota. La aparición de color amarillo en medio alcalino y su disminución después de acidificar se consideró una respuesta presuntiva de flavonoides (Robles-García et al., 2016; World Health Organization, 2011).

Para el halocromismo se evaporaron entre 1 y 2 mL del extracto en baño María y se añadieron entre tres y cinco gotas de ácido sulfúrico concentrado al residuo. Las tonalidades amarillas, anaranjadas, rojizas o violetas se registraron como respuestas compatibles. Los oscurecimientos intensos se interpretaron con precaución por la posible degradación de la matriz.

La prueba de Shinoda se registró de acuerdo con su ejecución real en la matriz experimental. Las pruebas no realizadas se identificaron como ND y no se consideraron resultados negativos.

10.6.10 Triterpenos y esteroides

En la reacción de Salkowski se evaporaron 2 mL del extracto y se añadieron entre 15 y 20 gotas de ácido sulfúrico concentrado. La preparación se calentó durante dos a tres minutos y se registró el cambio de color. De forma complementaria, se mezclaron 2 mL del extracto con una gota de yodopovidona comercial al 10 % y se observó la posible disminución del color aportado por el yodo. Esta última reacción se interpretó como exploratoria y no como prueba específica de esteroides (Robles-García et al., 2016; World Health Organization, 2011).

10.6.11 Valoración semicuantitativa

Las respuestas visuales se evaluaron mediante una escala ordinal de 0 a 5, donde 0 correspondió a una prueba realizada con resultado negativo y 5 a una respuesta de intensidad muy fuerte. El código ND se asignó cuando el ensayo no fue ejecutado o cuando no se contó con información suficiente para una interpretación confiable. Esta escala permitió comparar de manera semicuantitativa la intensidad de las reacciones entre los distintos órganos vegetales, pero no representó concentraciones exactas de los metabolitos analizados.

Tabla 9
Intensidad de las respuestas fitoquímicas

Puntaje	Categoría	Interpretación
0	Negativo	Sin respuesta observable
1	Muy débil	Respuesta apenas perceptible
2	Débil	Respuesta visible de baja intensidad
3	Moderada	Respuesta claramente observable
4	Fuerte	Respuesta intensa
5	Muy fuerte	Respuesta muy intensa
ND	No determinado	Prueba no ejecutada o no interpretable

Nota. La escala es ordinal y descriptiva; no equivale a concentración. Fuente: elaboración propia.

10.7 Preparación de la biomasa destinada a biochar

La biomasa destinada a biochar se recolectó independientemente del material utilizado en la maceración etanólica. Se emplearon exclusivamente hojas y flores de *Baccharis latifolia*. Ambos órganos se limpiaron y procesaron por separado para mantener la trazabilidad de los precursores.

Las hojas y flores se secaron en estufa a 80 °C durante 24 horas. Después del secado, el material se trituro y se almacenó en recipientes identificados hasta la pirólisis. No se mezclaron

hojas y flores y no se aplicó activación química al precursor (Araya et al., 2021; Tomczyk et al., 2020).

10.8 Producción de los biochars en mufla

10.8.1 Diseño de los tratamientos

Se produjeron seis biochars mediante la combinación de dos órganos vegetales y tres temperaturas de pirólisis. Los tratamientos se codificaron como BL-H-350, BL-H-400 y BL-H-450 para hoja, y BL-F-350, BL-F-400 y BL-F-450 para flor (Araya et al., 2021; Tomczyk et al., 2020).

Tabla 10
Tratamientos Biochar

Código	Precursor	Temperatura
BL-H-350	Hoja	350 °C
BL-H-400	Hoja	400 °C
BL-H-450	Hoja	450 °C
BL-F-350	Flor	350 °C
BL-F-400	Flor	400 °C
BL-F-450	Flor	450 °C

Nota. Cada tratamiento se identificó mediante el código del precursor, la temperatura de pirólisis y el número de lote. Fuente: elaboración propia.

10.8.2 Pirólisis en condiciones limitadas de oxígeno

La producción del biochar se realizó mediante carbonización térmica controlada en una mufla. Antes de cada ciclo se pesó el crisol de porcelana vacío y se registró su masa como m_1 . Posteriormente, se colocaron entre 4,5 y 5,5 g de biomasa seca y triturada de hoja o flor y se pesó nuevamente el conjunto, registrando la masa como m_2 . El pesaje previo permitió determinar la masa seca de biomasa introducida en cada lote mediante la diferencia $m_2 - m_1$.

Cada crisol se cubrió con su tapa para limitar el ingreso de oxígeno, sin cerrarlo herméticamente, de manera que los gases y vapores formados durante el calentamiento pudieran liberarse. El uso de recipientes cubiertos dentro de una mufla constituye una estrategia de laboratorio empleada para generar condiciones restringidas de oxígeno cuando no se dispone de un flujo continuo de gas inerte (Zhou et al., 2019).

La mufla se precalentó hasta alcanzar la temperatura correspondiente a cada tratamiento: 350, 400 o 450 °C. Una vez estabilizada la temperatura, se introdujeron los crisoles y se mantuvieron durante un tiempo de residencia de 15 minutos. El mismo procedimiento se aplicó independientemente a las hojas y las flores, conservando la identificación de cada lote. El empleo de tiempos de residencia cortos, incluido un periodo de 15 minutos, ha sido

documentado para la obtención de biochars a diferentes temperaturas, mientras que estudios sobre formación rápida de material pirolítico muestran que la transformación puede producirse dentro de periodos menores a 30 minutos, dependiendo del precursor y de las condiciones térmicas (Chen et al., 2021; Iáñez-Rodríguez et al., 2020).

10.8.3 Enfriamiento y acondicionamiento

Al finalizar los 15 minutos, la mufla se apagó y se esperó el descenso de la temperatura antes de abrirla. Los crisoles se retiraron con pinzas y guantes térmicos y se colocaron en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente. El enfriamiento controlado redujo el contacto inmediato del material caliente con el oxígeno y evitó variaciones de masa ocasionadas por la absorción de humedad antes del pesaje (Iáñez-Rodríguez et al., 2020).

Una vez fríos, los crisoles con el biochar se pesaron y la masa obtenida se registró como m_3 . La masa de biochar correspondió a la diferencia $m_3 - m_1$. Además, se registraron observaciones macroscópicas como cambio de color, reducción de volumen, fragilidad y presencia de material parcialmente carbonizado; estas observaciones se utilizaron únicamente para documentar el proceso y no como caracterización fisicoquímica del biochar.

10.8.4 Medidas de seguridad durante la carbonización

Durante el manejo de la mufla se utilizaron bata, gafas de seguridad, guantes térmicos y pinzas para crisoles. No se abrieron los recipientes ni la mufla mientras se encontraban a alta temperatura, y el material carbonizado no se manipuló hasta completar el enfriamiento. Estas medidas redujeron el riesgo de quemaduras, ignición del biochar caliente y exposición directa a los vapores producidos durante la carbonización.

10.9 Rendimiento de producción

El rendimiento se calculó como un indicador operativo de la conversión de la biomasa y no como una caracterización fisicoquímica del biochar. Para cada lote se emplearon las masas registradas antes y después de la carbonización: m_1 correspondió al crisol vacío, m_2 al crisol con la biomasa seca inicial y m_3 al crisol con el biochar frío. El cálculo gravimétrico del rendimiento permite comparar la cantidad de producto sólido recuperado respecto de la masa seca alimentada al proceso (Iáñez-Rodríguez et al., 2020; Zhou et al., 2019).

$$\text{Masa inicial de biomasa (g)} = m_2 - m_1$$

$$\text{Masa de biochar (g)} = m_3 - m_1$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = [(m_3 - m_1) / (m_2 - m_1)] \times 100$$

Los rendimientos se registraron por separado para hoja y flor a 350, 400 y 450 °C. La comparación se efectuó únicamente como parte del control del proceso de producción; no se realizaron determinaciones de humedad, cenizas, materia volátil, carbono fijo, área superficial, porosidad, grupos funcionales ni otras pruebas de caracterización del biochar.

10.10 Preparación de la solución sintética de Cu(II)

La solución sintética de Cu(II) se preparó con sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Para preparar la solución, se pesaron 0,19 g de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, se disolvieron en agua destilada y se aforaron hasta un volumen final de 500 mL. Según la relación estequiométrica del compuesto, esta cantidad corresponde a una concentración nominal aproximada de 96,7 mg/L de Cu(II). No obstante, para el procesamiento de los resultados y el cálculo del porcentaje de remoción se utilizó la concentración inicial medida experimentalmente, equivalente a 104 mg/L, obtenida mediante la curva de calibración espectrofotométrica (Harris & Lucy, 2020).

La concentración inicial utilizada en los ensayos de remoción fue de 104 mg/L de Cu(II). Este valor se obtuvo a partir de una absorbancia de 0,010 y de la ecuación de calibración registrada en la hoja de cálculo experimental. La misma concentración se mantuvo en los seis tratamientos y se empleó como C_0 para calcular el porcentaje de remoción. En consecuencia, la concentración inicial se consideró una condición fija del ensayo y no un factor experimental evaluado en distintos niveles (Chen & Chen, 2022).

10.11 Ensayos de adsorción

10.11.1 Preparación del material de laboratorio

Antes de iniciar los ensayos, los recipientes, pipetas, matraces y demás dispositivos utilizados se lavaron, enjuagaron con agua y acondicionaron para su uso. Cada recipiente se rotuló con el código correspondiente al tipo de biochar, la temperatura de pirólisis, el tiempo de contacto y el número de réplica, con el fin de asegurar la correcta identificación de las muestras durante el procedimiento experimental (Araya et al., 2021; Tomczyk et al., 2020).

10.11.2 Condiciones experimentales

Los seis tratamientos de biochar se evaluaron por separado utilizando la misma solución sintética de Cu(II). El análisis se centró en el tiempo de contacto y en la variación de la concentración del metal en la fase líquida. La concentración inicial se mantuvo fija en 104 mg/L, mientras que la concentración residual se determinó después de cada periodo de contacto establecido (Araya et al., 2021; Guo et al., 2022).

10.11.3 Evaluación del tiempo de contacto

El tiempo de contacto se evaluó a los 0, 10, 30 y 60 minutos. Para evitar que la extracción sucesiva de alícuotas alterara el volumen de la solución y la relación sólido-líquido, cada intervalo se asignó a una unidad experimental independiente. El tiempo cero correspondió a la concentración inicial de Cu(II), determinada antes de poner la solución en contacto con el biochar.

Una vez cumplido cada periodo, la fase líquida se separó del material carbonoso y se midió la concentración residual de Cu(II). La evaluación temporal permitió comparar la disminución de la concentración entre los tratamientos e identificar el tiempo con mejor desempeño dentro del intervalo estudiado. Debido al alcance del diseño experimental, estos datos no se utilizaron para ajustar modelos cinéticos ni para calcular constantes de velocidad.

10.11.4 Concentración inicial

La concentración inicial medida fue de 104 mg/L de Cu(II) y se mantuvo constante en todos los tratamientos y tiempos de contacto. En consecuencia, este valor se consideró una condición fija del ensayo y no una variable independiente evaluada en distintos niveles.

10.11.5 Control analítico

Para la calibración se incluyó un blanco con concentración de 0 mg/L, cuya absorbancia fue de 0,0000. Tanto las soluciones estándar como las muestras se procesaron mediante el mismo procedimiento analítico y bajo condiciones equivalentes de lectura, con el propósito de mantener la comparabilidad de las respuestas obtenidas (Cantwell, 2025; Chen & Chen, 2022).

10.12 Separación del biochar y preparación de las muestras

Una vez finalizado cada tiempo de contacto, el biochar se separó de la fase líquida antes de realizar la medición espectrofotométrica. Este procedimiento permitió reducir la presencia de partículas suspendidas y la turbidez, factores que podrían dispersar la radiación y alterar la absorbancia asociada con la concentración de Cu(II) en la muestra (Harris & Lucy, 2020).

Las alícuotas recuperadas se analizaron mediante el mismo procedimiento aplicado a las soluciones estándar y a la solución inicial de Cu(II). Antes de la lectura no se efectuaron tratamientos adicionales que pudieran modificar la composición de las muestras o alterar su respuesta óptica, con el fin de mantener condiciones analíticas comparables durante todas las mediciones (Cantwell, 2025).

10.13 Determinación de Cu(II) mediante espectrofotometría UV-visible

La concentración de Cu(II) se determinó mediante espectrofotometría UV-visible con un equipo Orbeco-Hellige. La cuantificación se realizó mediante calibración externa, relacionando las concentraciones conocidas de los estándares con sus respectivas absorbancias (Chen & Chen, 2022; Cantwell, 2025).

La curva se construyó con estándares de 0, 20, 40, 60, 80 y 100 mg/L, cuyas absorbancias fueron 0,0000; 0,0013; 0,0035; 0,0058; 0,0075 y 0,0100, respectivamente. La tendencia lineal consignada en el archivo experimental fue $A = 0,0001C - 0,0004$, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,994$; por tanto, la concentración se calculó mediante $C = (A + 0,0004)/0,0001$, donde A corresponde a la absorbancia y C a la concentración de Cu(II) expresada en mg/L (Chen & Chen, 2022).

Tabla 11
Concentración y absorbancia

Concentración de Cu(II) (mg/L)	Absorbancia
0	0,0000
20	0,0013
40	0,0035
60	0,0058
80	0,0075
100	0,0100

10.14 Control y aseguramiento de la calidad analítica

La concentración inicial y las concentraciones residuales de Cu(II) se determinaron mediante la misma curva de calibración y bajo un procedimiento instrumental uniforme. El blanco de 0 mg/L se utilizó para establecer la respuesta basal del sistema, mientras que el coeficiente de determinación se empleó como un indicador descriptivo del ajuste lineal de la curva de calibración (Cantwell, 2025; Chen & Chen, 2022).

Para cada medición se registraron el código del tratamiento, el tiempo de contacto, la absorbancia obtenida y la concentración calculada. Los resultados se expresaron en mg/L y se organizaron de acuerdo con el órgano vegetal utilizado como precursor y la temperatura aplicada durante la pirólisis (Araya et al., 2021; Cantwell, 2025).

10.15 Cálculo del porcentaje de remoción

$$\text{Remoción (\%)} = [(C_0 - C_t) / C_0] \times 100$$

C_0 representa la concentración inicial de Cu(II), C_t la concentración residual después del tiempo de contacto t y ambas se expresan en mg/L. Para todos los tratamientos se utilizó

$C_0 = 104 \text{ mg/L}$, de modo que la comparación se efectuó a partir de la disminución de C_t y del porcentaje de remoción alcanzado (Araya et al., 2021).

10.16 Organización y análisis de los resultados

Los resultados se organizaron según el órgano vegetal utilizado como precursor, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto. Para cada tratamiento se registraron la absorbancia, la concentración residual de Cu(II) y el porcentaje de remoción correspondiente (Araya et al., 2021; Tomczyk et al., 2020).

Además, se elaboraron gráficos de concentración residual y porcentaje de remoción en función del tiempo para los biochars de hoja y flor obtenidos a 350, 400 y 450 °C. La comparación de estas respuestas permitió identificar el tratamiento que presentó la menor concentración residual de Cu(II) y la mayor remoción dentro del intervalo evaluado, comprendido entre 0 y 60 minutos.

La concentración inicial de Cu(II), establecida en 104 mg/L, se mantuvo constante en todos los tratamientos y no se evaluó en distintos niveles. Por esta razón, no se construyeron isothermas de adsorción, no se ajustaron modelos cinéticos ni se realizaron análisis termodinámicos. El análisis se limitó a describir y comparar la variación de la concentración residual y del porcentaje de remoción en función del tiempo de contacto (Araya et al., 2021; Guo et al., 2022).

11 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se organizaron en dos componentes complementarios: el perfil fitoquímico de la biomasa original de *Baccharis latifolia* y la disminución de Cu(II) en una solución acuosa sintética mediante biochars elaborados a partir de hojas y flores. El tamizaje fitoquímico se interpretó de manera cualitativa y semicuantitativa, mientras que el desempeño de los biochars se evaluó mediante la concentración residual y el porcentaje de remoción registrados a los 0, 10, 30 y 60 minutos. Debido a que el archivo experimental contenía un solo valor por cada combinación de órgano precursor, temperatura de pirólisis y tiempo de contacto, los resultados se analizaron como tendencias descriptivas y no se aplicaron pruebas de significancia estadística. Además, el perfil fitoquímico de la biomasa se interpretó de forma independiente al comportamiento del biochar, ya que la pirólisis modifica la matriz orgánica y no permite asumir que los metabolitos detectados antes del tratamiento térmico permanezcan intactos en el material carbonizado (Erb & Kliebenstein, 2020; Tomczyk et al., 2020).

11.1 Recolección y acondicionamiento del material vegetal

El material vegetal de *Baccharis latifolia* se recolectó en el sector Salache, parroquia Eloy Alfaro, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, en las coordenadas $-1,0022344$ de latitud y $-78,6188926$ de longitud, a una altitud de 2704 m s. n. m. Después de la recolección, la planta se separó en raíz, tallo, hojas y flores. De cada órgano se obtuvieron 500 g de material fresco, con una masa total de 2000 g destinada al tamizaje fitoquímico. Cada órgano fue limpiado, identificado y procesado por separado; posteriormente, el material se secó a 80 °C durante 24 horas y se trituró antes de la extracción etanólica. La separación por órganos permitió conservar la trazabilidad y comparar respuestas fitoquímicas que pueden variar según la función fisiológica, el estado del tejido y las condiciones ambientales del sitio de crecimiento (Enríquez et al., 2018; Erb & Kliebenstein, 2020).

Tabla 12
Características del material vegetal recolectado

Código	Estructura vegetal	Masa fresca inicial	Coordenadas	Altitud
BL-T	Tallo	500 g	$-1,0022344; -78,6188926$	2704 m s. n. m.
BL-H	Hoja	500 g	$-1,0022344; -78,6188926$	2704 m s. n. m.
BL-F	Flor	500 g	$-1,0022344; -78,6188926$	2704 m s. n. m.
BL-R	Raíz	500 g	$-1,0022344; -78,6188926$	2704 m s. n. m.

Nota. La masa correspondió al material fresco antes del secado. Fuente: elaboración propia con base en el registro de campo.

11.2 Resultados del tamizaje fitoquímico

11.2.1 Perfil fitoquímico general

El tamizaje evidenció diferencias entre tallo, flor, raíz y hoja. Las respuestas de mayor intensidad correspondieron a los compuestos fenólicos y taninos: tallo y flor alcanzaron 5/5 en ambos grupos, mientras que la hoja presentó 5/5 para compuestos fenólicos y 4/5 para taninos. La flor mostró además la mayor respuesta integrada para flavonoides, con 4/5, seguida del tallo con 3/5; la raíz y la hoja alcanzaron 2/5. Las pruebas para alcaloides mostraron una respuesta global de mayor intensidad en las hojas, mientras que el tallo, las flores y la raíz presentaron señales débiles. En las pruebas de cumarinas, antraquinonas y quinonas no se observaron las respuestas diagnósticas esperadas bajo las condiciones experimentales aplicadas. Estos resultados correspondieron a intensidades visuales y no a concentraciones químicas, por lo que permitieron comparar de manera cualitativa y semicuantitativa los extractos de los distintos órganos. Sin embargo, no permitieron cuantificar metabolitos individuales ni establecer una

relación causal entre su presencia y la remoción de Cu(II) por los biochars (Bayas-Morejón et al., 2020; Erb & Kliebenstein, 2020; Loja Herrera et al., 2017).

Tabla 13

Síntesis semicuantitativa del perfil fitoquímico de Baccharis latifolia

Grupo evaluado	Tallo	Flor	Raíz	Hoja	Interpretación general
Compuestos fenólicos	5	5	1	5	Muy fuerte en tallo, flor y hoja
Taninos	5	5	3	4	Muy fuerte en tallo y flor; fuerte en hoja
Flavonoides	3	4	2	2	Mayor intensidad en flor
Alcaloides	1	1	1	2	Evidencia preliminar mayor en hoja
Sapogeninas	2	2	0	1	Respuesta indirecta y exploratoria
Cumarinas	0	0	0	0	No detectadas en los ensayos aplicados
Antraquinonas y quinonas	0	0	0	0	No detectadas en los ensayos aplicados

Nota. Escala: 0 = negativo; 1 = muy débil; 2 = débil; 3 = moderado; 4 = fuerte; 5 = muy fuerte. Fuente: elaboración propia.

11.2.2 Compuestos fenólicos y taninos

La reacción general con cloruro férrico al 3 % produjo coloraciones negras o verde-negruzcas intensas en el tallo, las flores y las hojas, con una puntuación de 5/5. En contraste, la raíz presentó una tonalidad ámbar o pardo-anaranjada, correspondiente a una intensidad de 1/5. En la prueba específica para taninos, el tallo y las flores mostraron respuestas muy fuertes de 5/5, mientras que las hojas alcanzaron una intensidad fuerte de 4/5 y la raíz una respuesta moderada de 3/5. La coincidencia entre ambos ensayos respaldó la presencia presuntiva de una fracción polifenólica importante, principalmente en el tallo, las flores y las hojas.

No obstante, la intensidad de la coloración pudo estar influida por la composición de cada matriz, la concentración del extracto y las condiciones de reacción, por lo que las puntuaciones obtenidas no representaron concentraciones analíticas. Aunque los grupos hidroxilo de los compuestos fenólicos pueden interactuar con cationes en la biomasa sin transformar, estos resultados no demuestran que los taninos originales permanecieran intactos después de la pirólisis ni que fueran responsables directos de la disminución de Cu(II)

observada en los ensayos con biochar (Enríquez et al., 2018; Loja Herrera et al., 2017; Tomczyk et al., 2020).

Tabla 14
Resultados de compuestos fenólicos y taninos

Estructura	Compuestos fenólicos: efecto	Puntuación	Taninos: efecto	Puntuación
Tallo	Coloración intensa	negra 5	Negro o azul-negro intenso	5
Flor	Coloración intensa	negra 5	Negro intenso	5
Raíz	Ámbar o anaranjado	pardo- 1	Marrón oscuro	3
Hoja	Verde-negruzco negro	a 5	Oscurecimiento intenso compatible con respuesta fuerte	4

Nota. La reacción con FeCl_3 se interpretó como una prueba general de compuestos fenólicos. Fuente: elaboración propia.

11.2.3 Flavonoides

Los flavonoides se detectaron de manera presuntiva en las cuatro estructuras vegetales evaluadas. Las flores presentaron la mayor intensidad, con una puntuación de 4/5 tanto en la prueba alcalina como en la reacción de halocromismo con ácido sulfúrico. El tallo mostró una respuesta moderada de 3/5, mientras que la raíz y las hojas alcanzaron una intensidad de 2/5. La coincidencia entre ambas pruebas fue más evidente en flores y tallo, lo que reforzó la identificación cualitativa de este grupo de metabolitos en dichos órganos. La distribución observada fue compatible con la variabilidad fitoquímica descrita para *Baccharis latifolia*, cuyo contenido de flavonoides puede cambiar según el tejido analizado y las condiciones ambientales de crecimiento. Sin embargo, las reacciones colorimétricas no permitieron identificar compuestos individuales ni determinar su concentración. En consecuencia, el perfil de flavonoides se interpretó como una característica de la biomasa original y no como evidencia de un mecanismo específico de remoción de Cu(II) por el biochar (Enríquez et al., 2018; Erb & Kliebenstein, 2020).

Tabla 15
Resultados integrados de las pruebas realizadas para flavonoides

Estructura	Prueba alcalina	Halocromismo H_2SO_4	con	Resultado integrado
Tallo	3	3		3
Flor	4	4		4
Raíz	2	2		2

Hoja	2	2	2
------	---	---	---

Nota. Se incluyeron únicamente las pruebas realizadas. Fuente: elaboración propia.

11.2.4 Alcaloides

La hoja presentó la respuesta más consistente para alcaloides. En Wagner alcanzó 3/5, acompañada de una coloración pardo-oscura, pérdida de transparencia y posible precipitación fina; las pruebas con taninos de té negro y ácido-base alcanzaron 2/5. En tallo, flor y raíz, Wagner fue negativo y las pruebas complementarias produjeron respuestas muy débiles de 1/5. La mediana descriptiva de las determinaciones realizadas fue 2/5 para hoja y 1/5 para los demás órganos. El resultado de la hoja se consideró preliminar porque la matriz presentó una elevada respuesta fenólica que pudo contribuir al oscurecimiento. En consecuencia, la identificación se limitó a señalar una evidencia presuntiva mayor en el tejido foliar, sin afirmar la presencia de un alcaloide específico ni su concentración (Erb & Kliebenstein, 2020).

Tabla 16

Resultados de las pruebas realizadas para alcaloides

Estructura	Wagner	Taninos de té negro	Ácido-base	Resultado integrado
Tallo	0	1	1	1
Flor	0	1	1	1
Raíz	0	1	1	1
Hoja	3	2	2	2

Nota. El resultado integrado correspondió a la mediana descriptiva de las pruebas realizadas. Fuente: elaboración propia.

11.2.5 Sapogeninas relacionadas con saponinas

Las pruebas indirectas de sapogeninas produjeron respuestas débiles en tallo y flor, ausencia de respuesta en raíz y una señal muy débil en hoja. El tallo presentó 3/5 en Salkowski bifásico y 2/5 en las otras dos pruebas; la flor alcanzó 2/5 en Salkowski y en la reacción ácido-acética, pero fue negativa con vainilla y ácido sulfúrico; la raíz fue negativa en las tres determinaciones. En la hoja, Salkowski alcanzó 2/5 y la prueba con vainilla fue negativa. La interpretación se mantuvo como exploratoria porque estas reacciones detectaron principalmente núcleos esteroidales o triterpénicos y no confirmaron la estructura completa de una saponina. Además, el empleo de reactivos comerciales redujo la estandarización y limitó la comparación cuantitativa entre órganos (Erb & Kliebenstein, 2020).

Tabla 17
Resultados de las pruebas indirectas de sapogeninas

Estructura	Prueba realizada	Puntuación	Interpretación
Tallo	Salkowski bifásico	3	Moderada
Tallo	Prueba ácido-acética adaptada	2	Débil
Tallo	Vainilla comercial-H ₂ SO ₄	2	Débil
Flor	Salkowski bifásico	2	Débil
Flor	Prueba ácido-acética adaptada	2	Débil
Flor	Vainilla comercial-H ₂ SO ₄	0	Negativa
Raíz	Salkowski bifásico	0	Negativa
Raíz	Prueba ácido-acética adaptada	0	Negativa
Raíz	Vainilla comercial-H ₂ SO ₄	0	Negativa
Hoja	Salkowski bifásico	2	Débil
Hoja	Vainilla comercial-H ₂ SO ₄	0	Negativa

Nota. Se omitieron las determinaciones no realizadas. Fuente: elaboración propia con base en la matriz experimental.

11.2.6 Triterpenos y esteroides

En las estructuras evaluadas, Salkowski directo produjo oscurecimientos muy intensos de 5/5 en tallo, flor y raíz. La prueba de decoloración con yodopovidona mostró respuestas débiles de 2/5 en tallo y flor y fue negativa en raíz. La mediana descriptiva fue 3/5 para tallo y flor y 2/5 para raíz. La discordancia entre los procedimientos redujo la confianza de la identificación, debido a que el ácido fuerte pudo inducir deshidratación, oxidación o carbonización de la matriz, mientras que la decoloración del yodo no fue exclusiva de triterpenos o esteroides. Por ello, los resultados se consideraron evidencia exploratoria y no una confirmación estructural (Erb & Kliebenstein, 2020).

Tabla 18
Resultados exploratorios de triterpenos y esteroides

Estructura	Salkowski directo	Yodopovidona	Mediana descriptiva
Tallo	5	2	3
Flor	5	2	3
Raíz	5	0	2

Nota. Se incluyeron únicamente las estructuras y pruebas realizadas. La mediana no representó un promedio de réplicas. Fuente: elaboración propia.

11.2.7 Cumarinas, antraquinonas y quinonas

Las pruebas de fluorescencia alcalina y respuesta ácido-base no produjeron señales compatibles con cumarinas en ninguna estructura. Los cambios observados con cloruro férrico se interpretaron como respuestas generales de compuestos fenólicos y no como confirmación

de cumarinas. De manera similar, Bornträger, Bornträger modificada y la oxidación alcalina directa no desarrollaron las tonalidades rosadas, rojas, violetas o magenta esperadas para antraquinonas y quinonas. En consecuencia, estos grupos no fueron detectados bajo las condiciones experimentales. Un resultado de cero indicó ausencia de la respuesta diagnóstica en el ensayo realizado, pero no demostró la ausencia absoluta del metabolito en la especie, debido a los límites propios de las pruebas cualitativas y del procedimiento de extracción (Erb & Kliebenstein, 2020).

Tabla 19
Resultados de cumarinas, antraquinonas y quinonas

Grupo	Tallo	Flor	Raíz	Hoja
Cumarinas	0	0	0	0
Antraquinonas y quinonas	0	0	0	0

Nota. Cero indicó que la prueba fue realizada y no produjo la respuesta esperada.

Fuente: elaboración propia.

11.2.8 Alcance del perfil fitoquímico frente a la adsorción

El perfil fitoquímico confirmó que la biomasa de *Baccharis latifolia* no presentó una composición uniforme entre órganos. La flor y el tallo concentraron las respuestas más intensas para fenoles, taninos y flavonoides, mientras que la hoja destacó por taninos fuertes y la mayor evidencia preliminar de alcaloides. Sin embargo, estos resultados correspondieron a extractos etanólicos obtenidos de la biomasa antes de la pirólisis. La exposición a 350, 400 y 450 °C provoca transformaciones térmicas que pueden degradar, fragmentar o modificar los compuestos presentes originalmente en el material vegetal. Por esta razón, no fue posible atribuir la remoción de Cu(II) a flavonoides, taninos, alcaloides o saponinas específicos. La relación entre el perfil fitoquímico y el desempeño de los biochars se interpretó únicamente de forma exploratoria, considerando las diferencias entre los órganos utilizados como precursores y la respuesta posterior de los materiales carbonizados (Guo et al., 2022; Tomczyk et al., 2020).

11.3 Producción y rendimiento del biochar

La producción de biochar se evaluó a partir de las variaciones de masa registradas antes y después del tratamiento térmico. La masa seca inicial de la biomasa se determinó mediante la diferencia entre la masa del crisol con la muestra antes de la pirólisis (m_2) y la masa del crisol vacío (m_1). De manera similar, la masa neta del biochar se calculó restando la masa del crisol vacío (m_1) de la masa del crisol con el material carbonizado (m_3). El rendimiento expresó la proporción de biomasa seca que permaneció como material sólido después de la pirólisis y se

consideró un indicador operativo del proceso, no una caracterización fisicoquímica del biochar (Wystalska & Kwarciak-Kozłowska, 2021).

Tabla 20

Rendimiento de los biochars elaborados con hojas y flores de Baccharis latifolia

Precursor	Temperatura (°C)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	Biomasa inicial (g)	Biochar obtenido (g)	Rendimiento (%)
Hoja	350	40,96	46,32	43,24	5,36	2,28	42,54
Flor	350	47,82	53,10	49,99	5,28	2,17	41,10
Hoja	400	40,96	46,35	43,63	5,39	2,67	49,54
Flor	400	47,82	52,33	50,42	4,51	2,60	57,65
Hoja	450	40,96	46,23	42,82	5,27	1,86	35,29
Flor	450	47,82	53,27	49,64	5,45	1,82	33,39

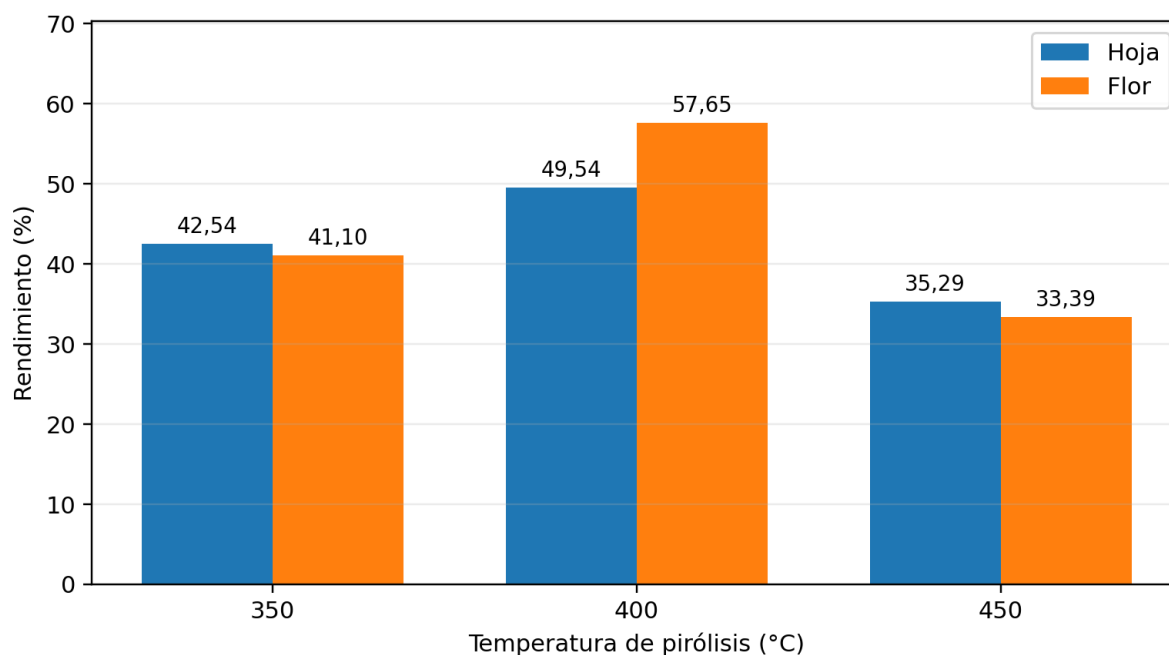
Nota. m₁ = masa del crisol vacío; m₂ = masa del crisol con biomasa seca; m₃ = masa del crisol con biochar. El rendimiento se calculó con las masas netas obtenidas por diferencia. Fuente: elaboración propia con base en los registros experimentales.

Los rendimientos variaron entre 33,39 % y 57,65 %. El valor más alto correspondió al biochar de flor producido a 400 °C, con 2,60 g de producto y 57,65 % de rendimiento, seguido del biochar de hoja a 400 °C, con 2,67 g y 49,54 %. A 350 °C, la hoja y la flor presentaron rendimientos semejantes de 42,54 % y 41,10 %, respectivamente; a 450 °C se obtuvieron los valores más bajos, con 35,29 % para hoja y 33,39 % para flor. Estos resultados describieron la conversión de los lotes procesados durante 15 minutos y no permitieron establecer una tendencia estadística debido a que se contó con un único registro por tratamiento.

La reducción del rendimiento entre 400 y 450 °C fue coherente con la mayor pérdida de compuestos volátiles que suele acompañar el incremento de la temperatura de pirólisis. No obstante, el aumento observado entre 350 y 400 °C en ambos precursores no siguió una disminución térmica progresiva y debe interpretarse con cautela, porque el rendimiento también puede variar por la composición del órgano vegetal, el contenido inicial de humedad, la distribución de la muestra en el crisol y las condiciones reales de calentamiento del lote (Vercruysse et al., 2021; Wystalska & Kwarciak-Kozłowska, 2021).

Figura 2

Rendimiento de los biochars según órgano vegetal y temperatura de pirólisis



Nota. Los porcentajes corresponden a un lote por combinación de órgano vegetal y temperatura. Fuente: elaboración propia.

El rendimiento de producción no presentó una relación directa con la remoción de Cu(II). La flor a 400 °C produjo el mayor rendimiento, pero alcanzó 57,69 % de remoción a los 60 minutos; en contraste, la flor a 450 °C presentó el rendimiento más bajo y alcanzó 76,92 % de remoción. La hoja a 400 °C combinó un rendimiento de 49,54 % con 76,92 % de remoción. Esta comparación indicó que conservar una mayor proporción de masa sólida no implicó necesariamente un mejor desempeño adsorbente, debido a que la retención de Cu(II) depende de la interacción entre el precursor, la temperatura de producción y las condiciones de contacto, variables que deben evaluarse experimentalmente para cada material (Geleto et al., 2022; Guo et al., 2022; Liu et al., 2022).

11.4 Curva de calibración y concentración inicial de Cu(II)

La curva de calibración se construyó con patrones de 0, 20, 40, 60, 80 y 100 mg/L de Cu(II), cuyas absorbancias fueron 0,0000; 0,0013; 0,0035; 0,0058; 0,0075 y 0,0100, respectivamente. La regresión lineal obtenida fue $A = 0,0001C - 0,0004$, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,994$. Al despejar la ecuación, la concentración se calculó mediante $C = (A + 0,0004)/0,0001$. La absorbancia inicial de 0,0100 se convirtió en una concentración operativa de 104 mg/L de Cu(II), valor utilizado como C_0 en todos los cálculos de remoción.

Este resultado quedó ligeramente por encima del patrón superior de 100 mg/L; por ello, su empleo correspondió a una extrapolación corta de la recta y debe considerarse una limitación del procedimiento analítico, aunque se mantuvo por ser el valor registrado en el procesamiento experimental.

Tabla 21

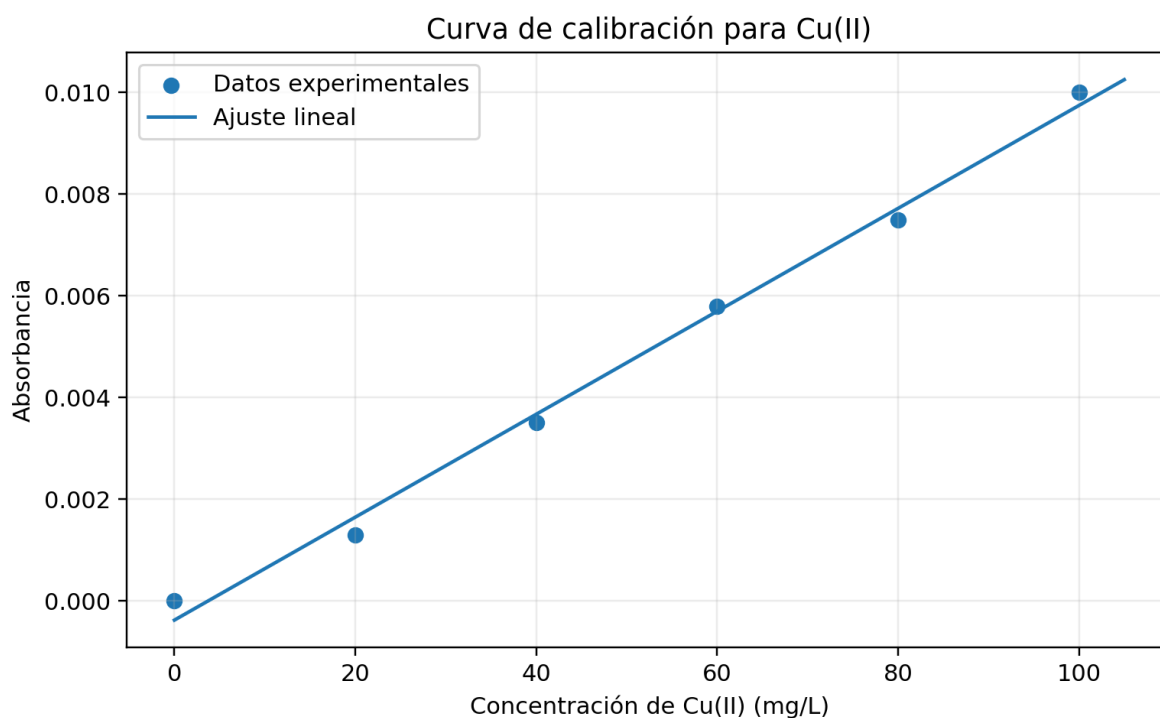
Datos experimentales de la curva de calibración de Cu(II)

Concentración (mg/L)	Absorbancia
0	0,0000
20	0,0013
40	0,0035
60	0,0058
80	0,0075
100	0,0100

Nota. Ecuación reportada: $A = 0,0001C - 0,0004$; $R^2 = 0,994$. Fuente: elaboración propia con base en Absorbancia Juan.xlsx.

Figura 3

Curva de calibración para la determinación de Cu(II)



Nota. Los puntos representan las absorbancias registradas y la línea corresponde al ajuste lineal. Fuente: elaboración propia.

11.5 Efecto del tiempo de contacto sobre la concentración residual de Cu(II)

La concentración residual disminuyó en los seis tratamientos conforme aumentó el tiempo de contacto. A los 10 minutos, el biochar de hoja producido a 400 °C presentó la mayor disminución, con 44 mg/L y una remoción de 57,69 %. En el mismo intervalo, la flor a 450 °C alcanzó 64 mg/L y 38,46 %, mientras que la flor a 350 °C registró 74 mg/L y 28,85 %. A los 30 minutos, hoja a 400 °C y flor a 450 °C coincidieron en 34 mg/L, equivalentes a 67,31 % de remoción; la flor a 350 °C alcanzó 44 mg/L y 57,69 %. Al finalizar los 60 minutos, los menores valores residuales fueron 24 mg/L para hoja a 400 °C y flor a 450 °C, con una remoción de 76,92 %. Debido a que todos los tratamientos continuaron disminuyendo su concentración entre 30 y 60 minutos, el intervalo evaluado no permitió demostrar que se hubiera alcanzado equilibrio o una meseta de adsorción. La disminución progresiva durante el intervalo analizado fue consistente con ensayos experimentales en los que el tiempo de contacto condicionó la captación de Cu(II) por materiales carbonizados; sin embargo, la comparación directa entre estudios requiere cautela por las diferencias de precursor, dosis y condiciones de operación (Guo et al., 2022; Liu et al., 2022).

Tabla 22

Concentración residual de Cu(II) según tratamiento y tiempo de contacto

Tratamiento	0 min	10 min	30 min	60 min
Hoja 350 °C	104	94	64	54
Flor 350 °C	104	74	44	34
Hoja 400 °C	104	44	34	24
Flor 400 °C	104	94	64	44
Hoja 450 °C	104	84	64	54
Flor 450 °C	104	64	34	24

Nota. Concentraciones expresadas en mg/L. $C_0 = 104$ mg/L.

Tabla 23

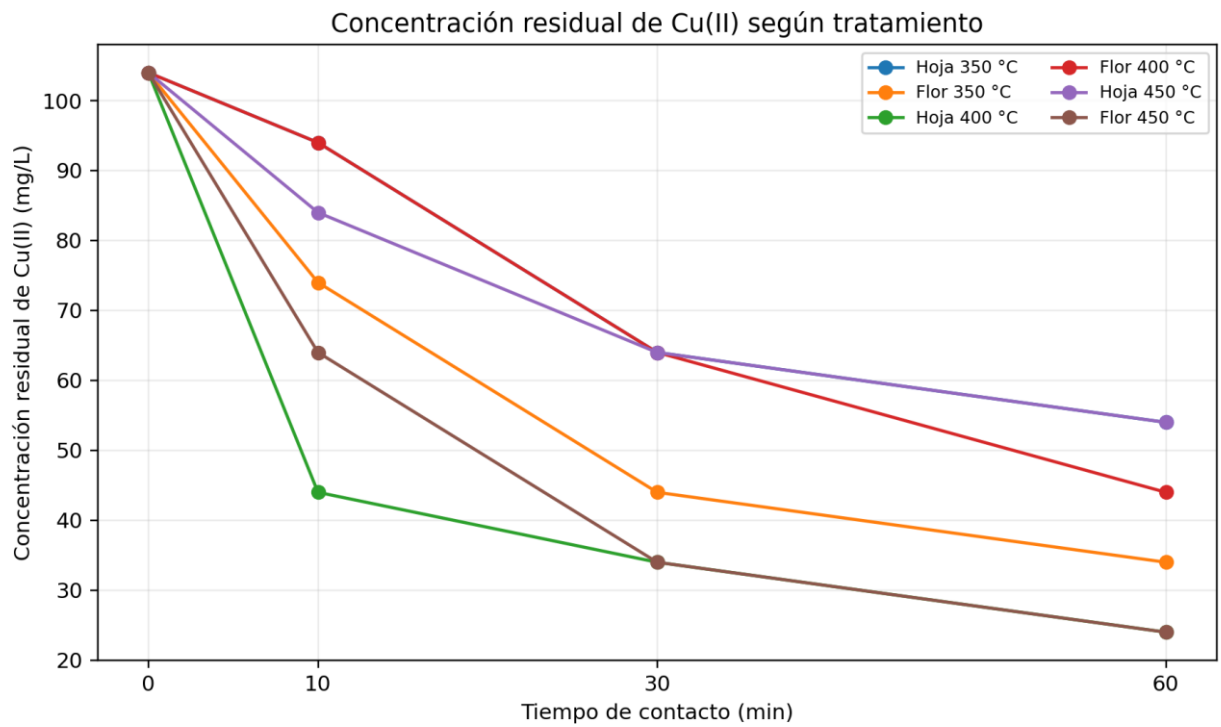
Porcentaje de remoción de Cu(II) según tratamiento y tiempo de contacto

Tratamiento	0 min	10 min	30 min	60 min
Hoja 350 °C	0,00 %	9,62 %	38,46 %	48,08 %
Flor 350 °C	0,00 %	28,85 %	57,69 %	67,31 %
Hoja 400 °C	0,00 %	57,69 %	67,31 %	76,92 %
Flor 400 °C	0,00 %	9,62 %	38,46 %	57,69 %
Hoja 450 °C	0,00 %	19,23 %	38,46 %	48,08 %
Flor 450 °C	0,00 %	38,46 %	67,31 %	76,92 %

Nota. Remoción calculada como $[(C_0 - C_t)/C_0] \times 100$. Fuente: elaboración propia.

Figura 4

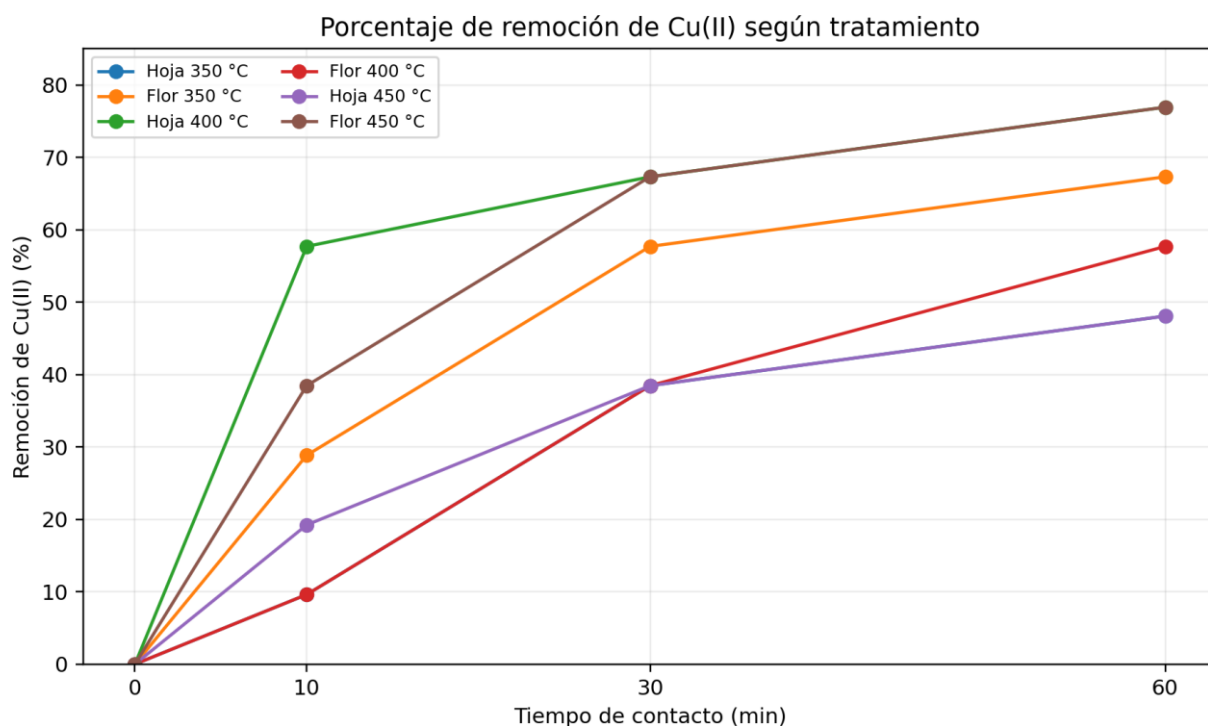
Variación de la concentración residual de Cu(II) con el tiempo de contacto



Nota. Se muestran únicamente los tiempos definidos para el análisis final: 0, 10, 30 y 60 minutos. Fuente: elaboración propia.

Figura 5

Variación del porcentaje de remoción de Cu(II) con el tiempo de contacto



Nota. Los porcentajes se calcularon a partir de una concentración inicial de 104 mg/L.
Fuente: elaboración propia.

11.5.1 Comparación entre órgano vegetal y temperatura de pirólisis

La comparación descriptiva evidenció que la temperatura con mejor desempeño dependió del órgano precursor. En los biochars de hoja, 400 °C produjo la mayor remoción durante todo el intervalo: 57,69 % a los 10 minutos, 67,31 % a los 30 minutos y 76,92 % a los 60 minutos. Los biochars de hoja a 350 y 450 °C terminaron con el mismo valor de 48,08 %, aunque a los 10 minutos la hoja a 450 °C mostró una disminución inicial superior. En los biochars de flor, 450 °C presentó la mayor remoción final, con 76,92 %, seguido de 350 °C con 67,31 % y 400 °C con 57,69 %. Al comparar órganos dentro de cada temperatura, la flor superó a la hoja a 350 y 450 °C, mientras que la hoja superó a la flor a 400 °C. Este patrón indicó que el comportamiento no dependió únicamente de aumentar la temperatura, sino de la combinación entre órgano vegetal y condición térmica. Sin caracterización del biochar, estas diferencias no permitieron confirmar mecanismos o propiedades responsables (Tomczyk et al., 2020; Guo et al., 2022; Jagadeesh & Sundaram, 2023).

Tabla 24*Comparación de los tratamientos al finalizar 60 minutos*

Orden descriptivo	Tratamiento	Concentración residual (mg/L)	Remoción (%)
1	Hoja 400 °C	24	76,92
1	Flor 450 °C	24	76,92
2	Flor 350 °C	34	67,31
3	Flor 400 °C	44	57,69
4	Hoja 350 °C	54	48,08
4	Hoja 450 °C	54	48,08

Nota. El orden corresponde a la remoción registrada a los 60 minutos. La comparación estadística exploratoria de los tratamientos se presenta en la sección 10.6. Fuente: elaboración propia.

11.6 Análisis estadístico exploratorio

El archivo experimental presentó una sola observación para cada combinación de tratamiento y tiempo de contacto. Por esta razón, se aplicó un ANOVA de dos vías sin replicación únicamente como análisis exploratorio; en este diseño, la variación correspondiente a la interacción tratamiento $\times$ tiempo no puede separarse del error experimental, por lo que los resultados no deben interpretarse como evidencia confirmatoria equivalente a un diseño con réplicas independientes (Montgomery, 2019).

El análisis indicó diferencias en el porcentaje de remoción entre los seis tratamientos, $F(5, 15) = 6,65$; $p = 0,0019$; $\eta^2 p = 0,689$. También se detectó un efecto del tiempo de contacto, $F(3, 15) = 60,68$; $p < 0,001$; $\eta^2 p = 0,924$. Estos valores mostraron que, dentro del conjunto de datos analizado, la variación asociada con el tiempo fue mayor que la atribuida al tratamiento; sin embargo, ambos efectos permanecieron condicionados por la ausencia de replicación experimental. Fuente: elaboración propia.

Tabla 25*ANOVA de dos vías sin replicación para el porcentaje de remoción de Cu(II)*

Fuente	Suma de gl	Cuadrado medio	F	p	
Tratamiento	2527,120	5	505,424	6,649	0,0019
Tiempo	13837,525	3	4612,508	60,676	< 0,001
Residual (interacción + error)	1140,286	15	76,019	—	—
Total	17504,931	23	—	—	—

Nota. El término residual integra la interacción tratamiento $\times$ tiempo y el error, debido a que no existieron réplicas independientes por celda experimental. Fuente: elaboración propia.

Después del ANOVA se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey HSD sobre las medias marginales de remoción. La prueba se utilizó de manera exploratoria, con $\alpha = 0,05$ y un valor HSD de 20,03 puntos porcentuales para los tratamientos; las medias que comparten al menos una letra no presentaron una diferencia detectada bajo este procedimiento (Tukey, 1949).

Tabla 26

Agrupación exploratoria de Tukey para los tratamientos de biochar

Tratamiento	Media de remoción (%)	Grupo	Interpretación
Hoja 400 °C	50,48	a	Mayor media; no difirió de flor 450 °C ni de flor 350 °C
Flor 450 °C	45,67	Ab	No difirió de hoja 400 °C, flor 350 °C, flor 400 °C ni hoja 450 °C
Flor 350 °C	38,46	abc	Grupo intermedio sin diferencias detectadas frente a los demás tratamientos
Flor 400 °C	26,44	Bc	Media menor que hoja 400 °C
Hoja 450 °C	26,44	Bc	Media menor que hoja 400 °C
Hoja 350 °C	24,04	C	Media menor que hoja 400 °C y flor 450 °C

Nota. HSD = 20,03 puntos porcentuales. Medias con al menos una letra común no presentaron diferencias detectadas a $\alpha = 0,05$. El agrupamiento es exploratorio por la ausencia de replicación. Fuente: elaboración propia.

La hoja producida a 400 °C presentó la mayor media global de remoción, con 50,48 %, y fue estadísticamente diferente de hoja 350 °C, flor 400 °C y hoja 450 °C en el análisis exploratorio. La flor producida a 450 °C alcanzó una media de 45,67 % y se diferenció únicamente de hoja 350 °C. La flor a 350 °C ocupó una posición intermedia y no presentó diferencias detectadas frente a los otros tratamientos, lo que reflejó el solapamiento de las respuestas durante los cuatro tiempos considerados. Fuente: elaboración propia.

Para el tiempo de contacto, la prueba de Tukey utilizó un HSD de 14,51 puntos porcentuales. Las medias de 30 y 60 minutos compartieron el mismo grupo, mientras que 0 y 10 minutos formaron grupos separados, lo que indicó que la mayor parte del aumento de la remoción ocurrió entre el inicio del ensayo y los 30 minutos. Fuente: elaboración propia.

Tabla 27

Agrupación exploratoria de Tukey para el tiempo de contacto

Tiempo (min)	Media de remoción (%)	Grupo
60	62,50	A
30	51,28	A

10	27,24	B
0	0,00	C

Nota. HSD = 14,51 puntos porcentuales. Las medias de 30 y 60 minutos no presentaron una diferencia detectada; las demás comparaciones fueron diferentes a $\alpha = 0,05$. Fuente: elaboración propia.

Aunque el ANOVA y la prueba de Tukey permitieron resumir las diferencias observadas entre los tratamientos, sus resultados deben interpretarse únicamente con carácter exploratorio. La confirmación de los efectos del órgano precursor, la temperatura de pirólisis, el tiempo de contacto y sus posibles interacciones requiere réplicas independientes para cada combinación experimental. Esto permitiría estimar adecuadamente el error experimental y comprobar los supuestos de normalidad, independencia y homogeneidad de varianzas necesarios para la aplicación de pruebas inferenciales (Montgomery, 2019).

11.7 Evaluación técnica preliminar

Dentro de las condiciones evaluadas, los tratamientos elaborados con hojas a 400 °C y flores a 450 °C presentaron el mejor desempeño, al reducir la concentración de Cu(II) de 104 a 24 mg/L después de 60 minutos, equivalente a una remoción de 76,92 %. El biochar de hojas producido a 400 °C mostró la disminución más rápida durante los primeros 10 minutos, mientras que el material obtenido de flores a 450 °C alcanzó un desempeño equivalente a partir de los 30 minutos. Estos resultados evidenciaron el potencial preliminar de ambos materiales para disminuir la concentración de Cu(II) en una solución sintética.

Sin embargo, la concentración residual obtenida no debe utilizarse como evidencia directa de cumplimiento de límites establecidos para descargas o agua potable, debido a que los ensayos se realizaron con una matriz preparada, una sola concentración inicial y sin los interferentes presentes en aguas reales. Además, no se evaluaron la regeneración del material, la desorción, la estabilidad del cobre retenido ni la disposición final del biochar agotado. En consecuencia, la factibilidad se restringió al comportamiento observado bajo las condiciones experimentales del estudio y no constituyó una validación para su aplicación a escala real (Jagadeesh & Sundaram, 2023; Liao et al., 2023).

12 CONCLUSIONES

El tamizaje fitoquímico permitió determinar que la raíz, el tallo, las hojas y las flores de *Baccharis latifolia* presentaron perfiles diferenciados de metabolitos secundarios. Los compuestos fenólicos alcanzaron una intensidad muy fuerte en tallo, flor y hoja, con puntuaciones de 5/5, mientras que los taninos mostraron respuestas muy fuertes en tallo y flor,

de 5/5, una respuesta fuerte en hoja, de 4/5, y moderada en raíz, de 3/5. La flor presentó la mayor intensidad de flavonoides, con 4/5, seguida del tallo con 3/5, mientras que la hoja mostró la evidencia preliminar más consistente de alcaloides. Las sapogeninas y los núcleos triterpénicos o esteroidales produjeron respuestas débiles o exploratorias, mientras que las cumarinas, antraquinonas y quinonas no fueron detectadas bajo las condiciones aplicadas. Estos resultados confirmaron que los órganos vegetales no poseen una composición fitoquímica uniforme; sin embargo, las respuestas obtenidas correspondieron a la biomasa original y no demostraron que los metabolitos permanecieran intactos después de la pirólisis ni que fueran responsables directos de la remoción de Cu(II).

La evaluación de los seis biochars demostró que el órgano vegetal, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto influyeron en la disminución de Cu(II) en la solución sintética con una concentración inicial de 104 mg/L. Los mejores resultados a los 60 minutos correspondieron al biochar de hoja producido a 400 °C y al biochar de flor obtenido a 450 °C, ambos con una concentración residual de 24 mg/L y una remoción de 76,92 %. El biochar de hoja a 400 °C presentó la respuesta más rápida, al alcanzar 57,69 % de remoción a los 10 minutos y 67,31 % a los 30 minutos, mientras que la flor a 450 °C alcanzó 38,46 % y 67,31 % en los mismos periodos. El análisis exploratorio de varianza mostró diferencias asociadas con los tratamientos y con el tiempo de contacto, siendo mayor la variación atribuida al tiempo; no obstante, estos resultados deben interpretarse con precaución debido a la ausencia de réplicas independientes.

La producción de biochar presentó rendimientos comprendidos entre 33,39 % y 57,65 %. El mayor rendimiento de producción se obtuvo con el biochar de flores elaborado a 400 °C, con 57,65 %, seguido del biochar de hojas producido a la misma temperatura, con 49,54 %. No obstante, el tratamiento de flores a 400 °C no presentó la mayor remoción de Cu(II). En contraste, el biochar de flores obtenido a 450 °C registró el menor rendimiento, con 33,39 %, pero alcanzó una remoción final de 76,92 %. Estos resultados evidenciaron que una mayor recuperación de masa carbonizada no se tradujo necesariamente en un mejor desempeño frente al Cu(II). Por ello, la selección del tratamiento más conveniente debe considerar de manera conjunta el rendimiento de producción, el porcentaje de remoción y el tiempo necesario para alcanzar la respuesta observada.

En relación con la factibilidad técnica preliminar, los resultados obtenidos respaldaron el potencial de los biochars elaborados con hojas a 400 °C y flores a 450 °C para disminuir la concentración de Cu(II) bajo condiciones controladas de laboratorio. La disponibilidad local de

Baccharis latifolia, el acondicionamiento relativamente sencillo de la biomasa, el corto tiempo de pirólisis y los porcentajes de remoción alcanzados constituyeron aspectos favorables para continuar evaluando estos materiales.

No obstante, la factibilidad se limitó al nivel experimental, debido a que se utilizó una solución sintética, una única concentración inicial, un solo registro por combinación de tratamiento y un tiempo máximo de contacto de 60 minutos. Tampoco se analizaron matrices acuosas reales, interferencias químicas, procesos de regeneración o desorción, estabilidad del cobre retenido ni alternativas para la disposición final del biochar agotado. Por ello, los biochars de *Baccharis latifolia* se consideraron materiales preliminares con resultados favorables para la remoción de Cu(II), aunque su aplicación a mayor escala requiere validaciones adicionales y un manejo seguro del material que concentra el cobre retirado de la solución.

13 RECOMENDACIONES

1. Se recomienda repetir la producción de los biochars y los ensayos de remoción con al menos tres réplicas independientes para cada combinación de órgano vegetal, temperatura de pirólisis y tiempo de contacto. Esto permitiría estimar el error experimental, analizar las posibles interacciones entre los factores y aplicar un ANOVA factorial seguido de la prueba de Tukey con carácter confirmatorio. De esta manera, se superaría la limitación del análisis exploratorio realizado a partir de una sola observación por tratamiento y tiempo evaluado (Montgomery, 2019).
2. Se recomienda ampliar el diseño experimental mediante la incorporación de diferentes concentraciones iniciales de Cu(II) y tiempos de contacto superiores a 60 minutos. La evaluación de varios niveles de concentración permitiría determinar la respuesta de los biochars frente a distintas cargas de cobre. Asimismo, un periodo de seguimiento más prolongado ayudaría a establecer si la remoción continúa aumentando o alcanza una respuesta estable bajo condiciones experimentales reproducibles (Jagadeesh & Sundaram, 2023; Katiyar et al., 2021).
3. Se recomienda fortalecer el control de calidad del método espectrofotométrico mediante el uso de estándares que cubran concentraciones superiores a 104 mg/L, réplicas de

calibración, blancos analíticos, controles independientes y verificaciones periódicas de la ecuación obtenida. Estas medidas permitirían evitar extrapolaciones fuera del intervalo calibrado y mejorar la confiabilidad, precisión y trazabilidad de las concentraciones residuales empleadas en el cálculo del porcentaje de remoción (Cantwell, 2025; Harris & Lucy, 2020). Se recomienda evaluar los biochars de hoja producidos a 400 °C y de flor obtenidos a 450 °C en aguas reales o soluciones sintéticas con mayor complejidad, considerando pH, materia orgánica, dureza, turbidez e iones competidores. También deberán realizarse ensayos de desorción, regeneración y estabilidad del Cu(II) retenido, con el propósito de establecer la posibilidad de reutilización del material y definir una gestión segura del biochar agotado antes de plantear su aplicación a mayor escala (Guo et al., 2022; Jagadeesh & Sundaram, 2023; Li et al., 2025).

14 REFERENCIAS

- Agatha, O., Mutwil-Anderwald, D., Tan, J. Y., & Mutwil, M. (2024). Plant sesquiterpene lactones. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 379(1914), 20230350. <https://doi.org/10.1098/rstb.2023.0350>
- Araya, M., Rivas, J., Sepúlveda, G., Espinoza-González, C., Lira, S., Meynard, A., Blanco, E., Escalona, N., Ginocchio, R., Garrido-Ramírez, E., & Contreras-Porcía, L. (2021). Effect of pyrolysis temperature on copper aqueous removal capability of biochar derived from the kelp *Macrocystis pyrifera*. *Applied Sciences*, 11(19), 9223. <https://doi.org/10.3390/app11199223>
- Asamblea Constituyente del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Registro Oficial No. 449, 20 de octubre de 2008.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2014). *Código Orgánico Integral Penal*. Registro Oficial Suplemento No. 180, 10 de febrero de 2014, con sus reformas vigentes.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2014). *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua*. Registro Oficial Suplemento No. 305, 6 de agosto de 2014.

- Asamblea Nacional del Ecuador. (2017). *Código Orgánico del Ambiente*. Registro Oficial Suplemento No. 983, 12 de abril de 2017.
- Bayas-Morejón, F., Ramón, R., García-Pazmiño, M., & Mite-Cárdenas, G. (2020). Antibacterial and antioxidant effect of natural extracts from *Baccharis latifolia* (chilca). *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 18(5), 489–493. <https://doi.org/10.22124/cjes.2020.4476>
- Bejček, J., Jurášek, M., Spiwok, V., & Rimpelová, S. (2021). Quo vadis cardiac glycoside research? *Toxins*, 13(5), 344. <https://doi.org/10.3390/toxins13050344>
- Bhambhani, S., Kondhare, K. R., & Giri, A. P. (2021). Diversity in chemical structures and biological properties of plant alkaloids. *Molecules*, 26(11), 3374. <https://doi.org/10.3390/molecules26113374>
- Câmara, J. S., Perestrelo, R., Ferreira, R., Berenguer, C. V., Pereira, J. A. M., & Castilho, P. C. (2024). Plant-derived terpenoids: A plethora of bioactive compounds with several health functions and industrial applications—A comprehensive overview. *Molecules*, 29(16), 3861. <https://doi.org/10.3390/molecules29163861>
- Cantwell, H. (Ed.). (2025). *Eurachem guide: The fitness for purpose of analytical methods—A laboratory guide to method validation and related topics* (3rd ed.). Eurachem. https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/MV_guide_3rd_ed_V1_EN.pdf
- Chen, H.-Y., & Chen, C. (2022). Evaluation of calibration equations by using regression analysis: An example of chemical analysis. *Sensors*, 22(2), 447. <https://doi.org/10.3390/s22020447>
- Chen, Z., Wang, J., Wang, Y., Li, B., & Wang, M. (2021). Rapid formation of pyrogenic char (biochar) with high and low sorption capacity towards organic chemicals. *Environmental Pollution*, 273, 116472. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116472>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2018). *Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe*. Naciones Unidas.
- Convenio sobre la Diversidad Biológica. (1992). *Convenio sobre la Diversidad Biológica*. Naciones Unidas. Ecuador es Parte desde el 29 de diciembre de 1993.
- de Melo, L. F. M., de Queiroz Aquino-Martins, V. G., da Silva, A. P., Oliveira Rocha, H. A., & Scortecchi, K. C. (2023). Biological and pharmacological aspects of tannins and

- potential biotechnological applications. *Food Chemistry*, 414, 135645. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135645>
- Enríquez, S., Quispe, R. E., Amurrio, P., Peñaranda, J. C., Calle, A., Orsag, V., & Almanza, G. R. (2018). Flavonoid contents in leaves of *Baccharis latifolia*, according to the type of leaf, and its dependence on the physicochemical properties of soils. *Revista Boliviana de Química*, 35(5), 146–154.
- Erb, M., & Kliebenstein, D. J. (2020). Plant secondary metabolites as defenses, regulators, and primary metabolites: The blurred functional trichotomy. *Plant Physiology*, 184(1), 39–52. <https://doi.org/10.1104/pp.20.00433>
- Franco, H. A., Celis, C., Forero, S., Pombo, L. M., & Rodríguez, O. E. (2018). Phytoremediating activity of *Baccharis latifolia* in soils contaminated with heavy metals. *International Journal of Current Pharmaceutical Review and Research*, 9(4), 38–43.
- Geleto, M. A., Forján, R., Arco-Lázaro, E., Covelo, E. F., Marcet, P., & Cerqueira, B. (2022). Influence of pyrolysis temperature and feedstock biomass on Cu^{2+} , Pb^{2+} , and Zn^{2+} sorption capacity of biochar. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 11857–11866. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-03989-0>
- Gui, W., & Wang, W.-X. (2024). Copper redox state in cells and aquatic organisms: Implication for toxicity. *Journal of Hazardous Materials*, 476, 135039. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135039>
- Guo, X., Peng, Y., Li, N., Tian, Y., Dai, L., Wu, Y., & Huang, Y. (2022). Effect of biochar-derived DOM on the interaction between Cu(II) and biochar prepared at different pyrolysis temperatures. *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126739. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126739>
- Harris, D. C., & Lucy, C. A. (2020). *Quantitative chemical analysis* (10th ed.). W. H. Freeman.
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Education.
- Iáñez-Rodríguez, I., Calero, M., Blázquez, G., & Martín-Lara, M. Á. (2020). Greenhouse crop residue and its derived biochar: Potential as adsorbent of cobalt from aqueous solutions. *Water*, 12(5), 1282. <https://doi.org/10.3390/w12051282>

- Jagadeesh, N., & Sundaram, B. (2023). Adsorption of pollutants from wastewater by biochar: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9, 100226. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100226>
- Katiyar, R., Patel, A. K., Nguyen, T.-B., Singhanian, R. R., Chen, C.-W., & Dong, C.-D. (2021). Adsorption of copper(II) in aqueous solution using biochars derived from *Ascophyllum nodosum* seaweed. *Bioresource Technology*, 328, 124829. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124829>
- Li, Y., Zhao, B., & Shang, T. (2025). Adsorption of copper(II) in biochar-humic acid-water system. *Scientific Reports*, 15, 24273. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09880-5>
- Liao, W., Zhu, Z., Feng, C., Yan, Z., Hong, Y., Liu, D., & Jin, X. (2023). Toxicity mechanisms and bioavailability of copper to fish based on an adverse outcome pathway analysis. *Journal of Environmental Sciences*, 127, 495–507. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.06.002>
- Liu, J., Wang, H., Ma, N., Zhou, B., Chen, H., & Yuan, R. (2022). Optimization of the raw materials of biochars for the adsorption of heavy metal ions from aqueous solution. *Water Science & Technology*, 85(10), 2869–2881. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.158>
- Loja Herrera, B., Alvarado Yarasca, Á., Salazar Granara, A., Ramos Yica, E., & Jurado, B. (2017). Cribado fitoquímico del *Baccharis latifolia* (R&P.) Pers. (chilca). *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 22(1), 1–7.
- Mebane, C. A., Chowdhury, M. J., DeForest, D. K., & Paquin, P. R. (2023). Bioavailability and toxicity models of copper to freshwater life: The state of regulatory science. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 42(11), 2367–2390. <https://doi.org/10.1002/etc.5736>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2008). *Acuerdo Ministerial No. 026. Procedimientos para registro de generadores de desechos peligrosos, gestión de desechos peligrosos previo al licenciamiento ambiental y para el transporte de materiales peligrosos.*
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2012). *Acuerdo Ministerial No. 142. Listados nacionales de sustancias químicas peligrosas, desechos peligrosos y especiales.*

- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015). *Acuerdo Ministerial No. 097-A. Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente*. Registro Oficial Edición Especial No. 387, 4 de noviembre de 2015.
- Montgomery, D. C. (2019). *Design and analysis of experiments* (10th ed.). Wiley.
- Nortjie, E., Basitere, M., Moyo, D., & Nyamukamba, P. (2022). Extraction methods, quantitative and qualitative phytochemical screening of medicinal plants for antimicrobial textiles: A review. *Plants*, 11(15), 2011. <https://doi.org/10.3390/plants11152011>
- Peñaranda, J. C., Rodrigo, G. C., Ticona-Bustillos, A. R., Valenzuela, E. C., Ramos, S., San Martín, A., Ghezzi, F. G., & Almanza, G. R. (2020). Variación en la concentración de flavonoides y clorofila, y cambios en la morfología y anatomía foliar, debidos a radiación visible (PAR) o ultravioleta (UVA, UVB) en *Baccharis latifolia*. *Revista Boliviana de Química*, 37(5), 210–222. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.37.5.1>
- Pilaquinga, F., Granja, C., Jara, E., Moncada-Basualto, M., Pozo-Martínez, J., Fernández, L., Espinoza-Montero, P., Debut, A., López, F., & Olea-Azar, C. (2021). Total phenolic composition and antioxidant activity of silver nanoparticles using aqueous extract of chilca leaves (*Baccharis latifolia*). *American Journal of Applied Sciences*, 18, 79–91. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2021.79.91>
- Prada, J., Ordúz-Díaz, L. L., & Coy-Barrera, E. (2016). *Baccharis latifolia*: Una Asteraceae poco valorada con potencialidad química y biológica en el Neotrópico. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(1), 92–105. <https://doi.org/10.18359/rfcb.1858>
- Presidencia de la República del Ecuador. (2003). *Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente*. Decreto Ejecutivo No. 3516. Registro Oficial Edición Especial No. 2, 31 de marzo de 2003.
- Presidencia de la República del Ecuador. (2019). *Reglamento al Código Orgánico del Ambiente*. Decreto Ejecutivo No. 752. Registro Oficial Suplemento No. 507, 12 de junio de 2019, con sus reformas vigentes.
- Robe, K., Izquierdo, E., Vignols, F., Rouached, H., & Dubos, C. (2021). The coumarins: Secondary metabolites playing a primary role in plant nutrition and health. *Trends in Plant Science*, 26(3), 248–259. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.10.008>

- Robles-García, M. A., Aguilar, A. J., Gutiérrez-Lomelí, M., Rodríguez-Félix, F., Morales-Del-Río, J. A., Guerrero-Medina, P. J., Madrigal-Pulido, J. A., & Del-Toro-Sánchez, C. L. (2016). Identificación cualitativa de metabolitos secundarios y determinación de la citotoxicidad de extractos de tempisque (*Sideroxylum capiri* Pittier). *Biotecnia*, 18(3), 3–8. <https://doi.org/10.18633/bt.v18i3.293>
- Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). *Baccharis latifolia* (Ruiz & Pav.) Pers. Plants of the World Online. Recuperado el 5 de agosto de 2026, de <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:183399-1>
- Secretaría del Convenio de Basilea. (1989). *Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Sequeda-Castañeda, L. G., Célis, C., & Luengas-Caicedo, P. E. (2015). Phytochemical and therapeutic use of *Baccharis latifolia* (Ruiz & Pav.) Pers. (Asteraceae). *PharmacologyOnline*, 2, 14–17.
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2013). *NTE INEN 2266:2013. Transporte, almacenamiento y manejo de materiales peligrosos. Requisitos*
- Shakeel, A., Noor, J. J., Jan, U., Gul, A., Handoo, Z., & Ashraf, N. (2025). Saponins, the unexplored secondary metabolites in plant defense: Opportunities in integrated pest management. *Plants*, 14(6), 861. <https://doi.org/10.3390/plants14060861>
- Shen, N., Wang, T., Gan, Q., Liu, S., Wang, L., & Jin, B. (2022). Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity. *Food Chemistry*, 383, 132531. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132531>
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19, 191–215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
- Tukey, J. W. (1949). Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, 5(2), 99–114. <https://doi.org/10.2307/3001913>
- Valarezo, E., Rosales, J., Morocho, V., Cartuche, L., Guaya, D., Ojeda-Riascos, S., Armijos, C., & González, S. (2013). Chemical composition, antifungal and antibacterial activity of the essential oil from *Baccharis latifolia* (Ruiz & Pav.) Pers. (Asteraceae) from Loja,

- Ecuador. *Journal of Essential Oil Research*, 25(3), 233–238.
<https://doi.org/10.1080/10412905.2013.775679>
- Vercruysse, W., Smeets, J., Haeldermans, T., Joos, B., Hardy, A., Samyn, P., Yperman, J., Vanreppelen, K., Carleer, R., Adriaenssens, P., Marchal, W., & Vandamme, D. (2021). Biochar from raw and spent common ivy: Impact of preprocessing and pyrolysis temperature on biochar properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 159, 105294. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105294>
- Wang, P., Wei, J., Hua, X., Dong, G., Dziedzic, K., Wahab, A.-T., Efferth, T., Sun, W., & Ma, P. (2024). Plant anthraquinones: Classification, distribution, biosynthesis, and regulation. *Journal of Cellular Physiology*, 239(10), e31063. <https://doi.org/10.1002/jcp.31063>
- World Health Organization. (2011). *Quality control methods for herbal materials*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241500739>
- World Health Organization. (2022). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>
- Wystalska, K., & Kwarciak-Kozłowska, A. (2021). The effect of biodegradable waste pyrolysis temperatures on selected biochar properties. *Materials*, 14(7), 1644. <https://doi.org/10.3390/ma14071644>
- Zhang, P., Zhang, X., Yuan, X., Xie, R., & Han, L. (2021). Characteristics, adsorption behaviors, Cu(II) adsorption mechanisms by cow manure biochar derived at various pyrolysis temperatures. *Bioresource Technology*, 331, 125013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125013>
- Zhou, R., Zhang, M., Zhou, J., & Wang, J. (2019). Optimization of biochar preparation from the stem of *Eichhornia crassipes* using response surface methodology on adsorption of Cd²⁺. *Scientific Reports*, 9, 17538. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54105-1>