



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DEL
POTENCIAL REMEDIADOR DE *“LUPINUS MUTABILIS SWEET”*
FRENTE A CONTAMINANTES METÁLICOS EN SOLUCIONES
ACUOSAS EN QUISINCHE -COTOPAXI”**

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

Autora:

Ramos Tituaña Jaela Anahi

Tutor:

Moreno Avila Andrés Sebastián

LATACUNGA – ECUADOR

Agosto 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Ramos Tituaña Jaela Anahi, con cédula de ciudadanía No. 1724460785, declaro ser autora del presente Proyecto de Investigación: **“CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL REMEDIADOR DE *LUPINUS MUTABILIS* SWEET” FRENTE A CONTAMINANTES METÁLICOS EN SOLUCIONES ACUOSAS EN QUISINCHE -COTOPAXI** “siendo el Ingeniero Mg. Andrés Moreno, 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, 05 de agosto del 2026

Jaela Anahi Ramos Tituaña

C.C: 1724460785

ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTORA

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **RAMOS TITUAÑA JAELA ANAHI**, identificado con cédula de ciudadanía **1724460785** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA 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. – **LA 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 “LUPINUS MUTABILIS SWEET” FRENTE A CONTAMINANTES METÁLICOS EN SOLUCIONES ACUOSAS EN QUISINCHÉ - 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 Moreno Ávila Mg.

Tema: “**CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL REMEDIADOR DE “LUPINUS MUTABILIS SWEET” FRENTE A CONTAMINANTES METÁLICOS EN SOLUCIONES ACUOSAS EN QUISINCHÉ -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, **LA 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 **LA 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 **LA 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 **LA 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 **LA 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 5 días del mes de agosto del 2026.

Jaela Anahi Ramos Tituaña

LA CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

LA CESIONARIA

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

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

“CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL REMEDIADOR DE *LUPINUS MUTABILIS* SWEET” FRENTE A CONTAMINANTES METÁLICOS EN SOLUCIONES ACUOSAS EN QUISINCHE -COTOPAXI”, de Ramos Tituaña Jaela Anahi , 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 han incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, 05 de agosto del 2026

Ing. Andrés 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, la postulante: Jaela Anahi Ramos Tituaña, con el título de Proyecto de Investigación: **“CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL REMEDIADOR DE *LUPINUS MUTABILIS* SWEET” FRENTE A CONTAMINANTES METÁLICOS EN SOLUCIONES ACUOSAS EN QUISINCHE -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, 05 de agosto del 2026

Dr. Patricio Clavijo Cevallos, Ph.D.
C.C: 0501444582
LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Dr. José Antonio Andrade Valencia, Ph.D.
C.C: 0502524481
LECTOR 2 (MIEMBRO)

Ing. Isaac Eduardo Cajas Cayo, Mg.
C.C: 0502205164
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi, por haber contribuido a mi formación académica y profesional, brindándome los conocimientos y herramientas necesarios para culminar satisfactoriamente esta etapa.

De manera especial, agradezco al Ing. Andrés Moreno, tutor del presente trabajo de titulación, por su orientación, disposición y valioso acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación.

Asimismo, extiendo mi agradecimiento a Juan Diego C. y Javier Ll., por su apoyo y compañía durante mi etapa como estudiante foránea; así como a Viviana S. y Sisa J., por su amistad y respaldo a lo largo de este proceso universitario.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, contribuyeron al cumplimiento de esta importante meta académica y profesional.

Jaela Anahi Ramos Tituaña

DEDICATORIA

Dedico este logro, en primer lugar, a Dios,, por escuchar cada oración pronunciada en silencio durante este camino, por darme fuerzas en los momentos de cansancio y por permitirme llegar hasta el día en que uno de mis sueños más grandes se convierte en realidad.

A mis padres, Verónica y Vicente, porque detrás de este título existen años de esfuerzo que también les pertenecen. Con un trabajo duro y sacrificado hicieron todo lo posible para brindarme la oportunidad de estudiar y construir un mejor futuro. Mientras yo perseguía este sueño desde las aulas, ustedes trabajaban incansablemente para hacerlo posible. Gracias por enseñarme que nada valioso llega sin esfuerzo. Este título lleva mi nombre, pero también está construido con el esfuerzo de sus manos.

A mi querido Papito Mario, que hoy está en el cielo, le dedico especialmente este logro, porque terminar mi carrera fue una de las promesas más valiosas que pude hacerle antes de su partida. Hoy puedo decirle con el corazón lleno de emoción: lo logramos, abuelito. Sé cuánto anhelaba verme convertida en una profesional y espero que, desde donde se encuentre, pueda mirarme con orgullo y saber que cumplí aquella promesa que guardé siempre en mi corazón. A mi abuelita, por su inmenso amor y por representar, junto a mi abuelito, una historia de sacrificio y entrega. Ambos fueron capaces de dejar su país y comenzar nuevamente con la esperanza de brindarnos un futuro mejor a toda la familia.

A mis tíos Doris, Ronald, Paty y Mario, por su cariño, apoyo y por ser ejemplo de esfuerzo y perseverancia. Sus experiencias y enseñanzas fueron valiosas para recordarme que, aun frente a las dificultades, siempre existe una razón para levantarse y continuar.

A mi pequeña hermana Samantha y a mi prima Vania, deseo que este logro les recuerde siempre que ningún sueño es demasiado grande cuando se lucha por él con dedicación y constancia. Que confíen en ustedes mismas, que nunca permitan que una dificultad las detenga y que recuerden que, aunque el camino no siempre sea sencillo, sí es posible llegar hasta donde un día soñamos estar.

A Jorge Pilataxi, por acompañarme durante este proceso, por su paciencia, apoyo y por estar presente tanto en los buenos momentos como en aquellos días difíciles. Gracias por cada palabra de ánimo, por celebrar mis avances y por motivarme a continuar hasta el final. Finalmente, me dedico este logro a mí misma, por cada noche de esfuerzo, por las dudas, los errores, los aprendizajes y por todas aquellas veces en las que pude rendirme, pero decidí continuar. Hoy comprendo que cada sacrificio valió la pena y que cada dificultad formó parte de la profesional en la que me he convertido. A todos ustedes les pertenece una parte de este sueño cumplido.

Jaela Anahi Ramos Tituaña

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TÍTULO: “CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL REMEDIADOR DE “*LUPINUS MUTABILIS* SWEET” FRENTE A CONTAMINANTES METÁLICOS EN SOLUCIONES ACUOSAS EN QUISINCHE - COTOPAXI”.

Autora:

Ramos Tituaña Jaela Anahi

RESUMEN

La investigación evaluó el potencial remediador de *Lupinus mutabilis* Sweet frente a Fe^{3+} en soluciones acuosas mediante caracterización fitoquímica y producción de biochar. El objetivo fue identificar metabolitos secundarios en hojas, tallos, raíces y frutos, obtener biochar a partir de hoja y fruto, y analizar la influencia del precursor, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto sobre la disminución de Fe^{3+} . El estudio tuvo enfoque cuantitativo, experimental, aplicado y comparativo. La biomasa recolectada en Quisínche Bajo–Joseguango Bajo, Cotopaxi, fue acondicionada y sometida a ensayos fitoquímicos colorimétricos, valorados mediante una escala semicuantitativa de 0 a 5. Para producir biochar se utilizaron hojas y frutos carbonizados a 350, 400 y 450 °C durante 15 minutos. Los seis materiales obtenidos se evaluaron frente a una solución nominal de Fe^{3+} de 100 ppm, considerando tiempos de contacto de 0, 10, 30 y 60 minutos. La concentración residual se determinó mediante espectrofotometría UV-Visible. Los resultados fitoquímicos mostraron mayor intensidad de taninos en hojas (5), saponinas en hojas y tallos (4), alcaloides en frutos (3) y esteroides/triterpenos en frutos (3); las quinonas y antraquinonas no fueron detectadas. Los ensayos con biochar evidenciaron variaciones en la concentración residual según el precursor, la temperatura y el tiempo de contacto. Se concluyó que *Lupinus mutabilis* Sweet presenta una composición fitoquímica diferenciada entre órganos y que las condiciones de producción y aplicación del biochar modifican su comportamiento frente al Fe^{3+} . La interpretación de la eficiencia debe limitarse a lecturas incluidas dentro del intervalo válido de calibración y considerar el efecto del pH sobre la especiación del hierro. Los hallazgos aportan base experimental para valorar esta biomasa como precursor de materiales carbonosos aplicables al tratamiento del agua.

Palabras clave: biomasa vegetal, adsorción, pirólisis, tratamiento de agua, metabolitos secundarios.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL RESOURCES
TITLE: “PHYTOCHEMICAL CHARACTERIZATION AND EVALUATION OF
THE REMEDIATION POTENTIAL OF *LUPINUS MUTABILIS* SWEET AGAINST
METALLIC CONTAMINANTS IN AQUEOUS SOLUTIONS IN QUISINCHE,
COTOPAXI.”

Author:
Ramos Tituaña Jaela Anahi

ABSTRACT

This research evaluated the remediation potential of *Lupinus mutabilis* Sweet for Fe³⁺ removal from aqueous solutions through phytochemical characterization and biochar production. The objective was to identify secondary metabolites in leaves, stems, roots, and fruits; produce biochar from leaves and fruits; and analyze the influence of precursor material, pyrolysis temperature, and contact time on Fe³⁺ reduction. The study followed a quantitative, experimental, applied, and comparative approach. The biomass collected in Quisínche Bajo–Joseguango Bajo, Cotopaxi, was conditioned and subjected to colorimetric phytochemical tests, evaluated using a semi-quantitative scale ranging from 0 to 5. For biochar production, leaves and fruits were carbonized at 350, 400, and 450 °C for 15 minutes. The six resulting materials were evaluated using a nominal 100 ppm Fe³⁺ solution at contact times of 0, 10, 30, and 60 minutes. Residual iron concentration was determined by UV-Visible spectrophotometry. Phytochemical results showed the highest intensity of tannins in leaves (5), saponins in leaves and stems (4), alkaloids in fruits (3), and steroids/triterpenes in fruits (3), whereas quinones and anthraquinones were not detected. Biochar assays showed variations in residual Fe³⁺ concentration depending on the precursor material, pyrolysis temperature, and contact time. It was concluded that *Lupinus mutabilis* Sweet exhibits a differentiated phytochemical composition among its plant organs and that biochar production and application conditions influence its behavior toward Fe³⁺. The interpretation of removal efficiency should be limited to measurements within the valid calibration range and should consider the effect of pH on iron speciation. These findings provide an experimental basis for assessing this plant biomass as a precursor for carbonaceous materials applicable to water treatment.

Keywords: plant biomass, adsorption, pyrolysis, water treatment, secondary metabolites.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTORA.....	iii
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	v
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	vi
AGRADECIMIENTOS.....	vii
DEDICATORIA.....	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
ÍNDICE DE CONTENIDO	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvi
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
3. JUSTIFICACIÓN.....	3
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO	5
5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	5
6. OBJETIVO DEL PROYECTO	7
6.1. Objetivo General.....	7
6.2. Objetivos Específicos	7
7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS	8
8. MARCO TEÓRICO	10
8.1. <i>Lupinus mutabilis</i> sweet	10
8.1.1. Generalidades y clasificación taxonómica	10
8.1.2. Características botánicas y distribución	10
8.1.3. Composición química de <i>lupinus mutabilis</i>	11
8.1.4. Aprovechamiento de la biomasa de <i>lupinus mutabilis</i>	12
8.2. Metabolitos Secundarios Presentes en <i>Lupinus Mutabilis</i>	12
8.2.1. Metabolitos secundarios y su importancia fitoquímica	12
8.2.2. Alcaloides	13
8.2.3. Taninos y compuestos polifenólicos	13
8.2.4. Saponinas.....	14

8.2.5. Flavonoides.....	14
8.2.6. Cumarinas.....	15
8.2.7. Esteroides y triterpenos	16
8.2.8. Relación entre metabolitos secundarios, grupos funcionales y características del biochar	17
8.3. Hierro en Sistemas Acuicos.....	18
8.3.1. Características químicas del hierro.....	18
8.3.2. Fe^{2+} y Fe^{3+} en medios acuicos	19
8.3.3. Especiación, hidrólisis y comportamiento del Fe^{3+} en función del ph	20
8.3.4. Presencia de hierro en el agua y efectos asociados a concentraciones elevadas	20
8.3.5. Métodos empleados para la remoción de hierro en soluciones acuicas.....	21
8.4. Adsorción como Proceso de Tratamiento.....	22
8.4.1. Fundamentos del proceso de adsorción	22
8.4.2. Adsorción física y adsorción química	23
8.4.3. Interacciones Entre Iones Metálicos y Superficies Carbonosas	24
8.4.4. Influencia del Ph en la Adsorción	25
8.4.5. Influencia del Tiempo de Contacto	25
8.4.6. Influencia de la Concentración Inicial del Adsorbato	26
8.4.7. Porcentaje de Remoción y Capacidad de Adsorción.....	27
8.5. Biochar Como Material Adsorbente.....	28
8.5.1. Definición y Características del Biochar	28
8.5.2. Materias Primas Utilizadas para la Producción de Biochar	28
8.5.3. Producción de Biochar Mediante Pirólisis	29
8.5.4. Influencia de la Temperatura de Pirólisis	30
8.5.5. Porosidad y Área Superficial.....	31
8.5.6. Grupos Funcionales Superficiales	32
8.5.7. Grupos Hidroxilo, Carboxilo y Otras Funcionalidades Oxigenadas	32
8.5.8. Biochar para la Remoción de Especies Metálicas en Agua.....	33
8.6. Relación Entre la Composición Fitoquímica del Precursor y las Propiedades del Biochar	34
8.6.1. Transformación Térmica De Los Constituyentes Vegetales	34
8.6.2. Compuestos polifenólicos y grupos hidroxilo	35
8.6.3. Transformación de taninos, saponinas y alcaloides durante la carbonización	36
8.6.4. Influencia de la composición del precursor sobre la química superficial del biochar....	37

8.6.5. Posibles mecanismos de interacción entre biochar y Fe^{3+}	38
8.7. Espectrofotometría UV-Visible para la determinación de Fe(III)	39
8.7.1. Fundamento de la espectrofotometría UV-Visible.....	39
8.7.2. Ley de Beer-Lambert.....	40
8.7.3. Curva de calibración.....	40
8.7.4. Determinación espectrofotométrica de Fe(III)	41
8.7.5. Linealidad y coeficiente de determinación.....	42
8.7.6. Intervalo de calibración y extrapolación	43
8.7.7. Aplicación del análisis UV-Visible en ensayos con biochar	43
8.8. Antecedentes científicos sobre biochar y remoción de Fe(III)	44
8.8.1. Biochar como adsorbente de especies metálicas en sistemas acuosos	44
8.8.2. Influencia del precursor vegetal	44
8.8.3. Temperatura de pirólisis y comportamiento adsorbente.....	45
8.8.4. Grupos funcionales y mecanismos de retención	46
8.8.5. Particularidades del Fe(III) frente a otros iones metálicos	47
8.8.6. Relación de los antecedentes con la presente investigación.....	48
7.1. Marco Legal.....	48
7.1.1. Constitución de la República del Ecuador (2008)	48
7.1.2. Tratados y convenios internacionales.....	49
7.1.2.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	49
7.1.2.2. Convenio sobre la Diversidad Biológica (1992)	50
7.1.3. Código Orgánico del Ambiente (COA).....	50
7.1.4. Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua.....	50
7.1.5. Reglamento al Código Orgánico del Ambiente.....	50
7.1.6. Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA)	
51	
7.1.7. Acuerdo Ministerial 097-A: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua	51
8. HIPÓTESIS Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	52
8.1. Hipótesis	52
8.1.1. Hipótesis de investigación (H_1)	52
8.1.2. Hipótesis nula (H_0)	52
8.2. Variables de la investigación.....	52
8.2.1. Variable independiente	52

8.2.2.	Variable dependiente	52
8.3.	Pregunta de investigación.....	54
9.	MARCO METODOLÓGICO	54
9.1.	Área de estudio	54
9.1.1.	Ubicación geográfica.....	54
10.	Metodología.....	55
10.1.1.	Tipo de investigación	55
10.1.2.	Enfoque de la investigación.....	56
10.1.3.	Diseño experimental	57
10.1.4.	Recolección y acondicionamiento del material vegetal	58
10.2.	Caracterización fitoquímica de <i>Lupinus mutabilis</i> Sweet.	59
10.2.1.	Identificación de alcaloides	60
10.2.2.	Identificación de taninos.....	61
10.2.3.	Identificación de saponinas	61
10.2.4.	Identificación de cumarinas.....	61
10.2.5.	Identificación de quinonas y antraquinonas	62
10.2.6.	Identificación de flavonoides.....	62
10.2.7.	Identificación de esteroides y triterpenos	62
10.2.8.	Escala semicuantitativa de valoración	63
10.3.	Obtención de biocarbón de <i>Lupinus mutabilis</i> Sweet	63
10.3.1.	Cálculo del rendimiento del biochar.....	64
10.2.6.	Preparación de la solución acuosa de Fe(III).....	65
10.3.2.	Cálculo para la preparación de soluciones	66
10.3.3.	Identificación de la concentración inicial.....	67
10.3.4.	Curva de calibración para la determinación de Fe(III) mediante espectrofotometría UV-Visible	67
10.3.5.	Preparación de los patrones	68
10.3.6.	Construcción de la curva de calibración.....	69
10.3.7.	Intervalo analítico de trabajo	69
10.3.8.	Ensayo de remoción de Fe(III) mediante biochar	70
11.	COMPROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS O RESPUESTA A LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	73
12.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	74
12.1.	Resultados de la caracterización fitoquímica	74

12.1.1. Alcaloides	75
12.1.2. Taninos	76
12.1.3. Saponinas.....	77
12.1.4. Cumarinas.....	77
12.1.5. Quinonas y antraquinonas	78
12.1.6. Flavonoides.....	79
12.1.7. Esteroides y triterpenos	80
12.2. Análisis integrado del perfil fitoquímico.....	80
12.3. Resultados de la obtención del biochar	81
12.4. Evaluación de Fe(III): estado de validación de los datos	82
12.5. Criterios para la discusión final de los ensayos con Fe(III)	82
12.6. Limitaciones analíticas que deben acompañar la interpretación	83
13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
13.1. Conclusiones.....	83
13.2. Recomendaciones	84
14. BIBLIOGRAFÍA	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Beneficiarios del Proyecto de investigación	5
Tabla 2 Actividades y sistema de tareas en relación con los objetivos específicos de la investigación.....	8
Tabla 3 Operacionalización de las variables de la investigación.....	53
Tabla 4 Tratamientos establecidos en el diseño experimental	57
Tabla 5 Etapas de acondicionamiento del material vegetal de <i>Lupinus mutabilis</i> Sweet.....	59
Tabla 6 Ensayos empleados para la caracterización fitoquímica.....	60
Tabla 7 Escala semicuantitativa empleada para la evaluación e interpretación de la intensidad de las reacciones fitoquímicas en los metabolitos secundarios de <i>Lupinus mutabilis</i> Sweet...	63
Tabla 8 Condiciones empleadas para la obtención del biochar	64
Tabla 9 Registro disponible de masas durante la carbonización	65
Tabla 10 Condiciones generales de la solución empleada en los ensayos.....	66
Tabla 11 Concentraciones empleadas para la curva de calibración de Fe(III).....	68
Tabla 12 Parámetros considerados para la calibración de Fe(III).....	70
Tabla 13 Condiciones de los ensayos de remoción de Fe(III)	71
Tabla 14 Variables utilizadas para calcular la remoción de Fe(III)	72
Tabla 15 Intensidad semicuantitativa representativa de metabolitos secundarios en <i>Lupinus mutabilis</i> Sweet.	74
Tabla 16 Identificación semicuantitativa de alcaloides.	75
Tabla 17 Identificación semicuantitativa de taninos.....	76
Tabla 18 Identificación semicuantitativa de saponinas.....	77
Tabla 19 Identificación semicuantitativa de cumarinas.....	77
Tabla 20 Identificación semicuantitativa de quinonas y antraquinonas.	78
Tabla 21 Identificación semicuantitativa de flavonoides.....	79
Tabla 22 Identificación semicuantitativa de esteroides y triterpenos.	80
Tabla 23 Condiciones de producción de los biochars evaluados.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de Ubicación de la zona de estudio.....	55
--	----

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del proyecto:

“Caracterización fitoquímica y evaluación del potencial remediador de *lupinus mutabilis sweet*” frente a contaminantes metálicos en soluciones acuosas en Quisínche - Cotopaxi”

Fecha de inicio: octubre 2025

Fecha de finalización: agosto 2026

Lugar de ejecución:

Quisínche Bajo–Joseguango Bajo y laboratorios de la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador.

Facultad que auspicia:

Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales.

Carrera que auspicia:

Carrera de Ingeniería Ambiental.

Proyecto de investigación vinculado:

Equipo de trabajo:

Tutor: Moreno Avila Andrés Sebastián

Estudiante: Ramos Tituaña Jaela Anahi

LECTOR 1: Lic. Patricio Clavijo Cevallos, Ph.D.

LECTOR 2: Ing. José Antonio Andrade Valencia, Mg.

LECTOR 3: Ing Isaac Eduardo Cajas Cayo , Mg

Área de conocimiento:

Servicios y protección del ambiente.

Línea de investigación:

Análisis, conservación y aprovechamiento de la biodiversidad local.

Sub líneas de investigación de la carrera:

Manejo y conservación de la biodiversidad

Línea de vinculación:

Gestión de recursos naturales, biodiversidad, biotecnología y genética, para el desarrollo humano y social.

2. INTRODUCCIÓN

La presencia de hierro en sistemas acuáticos está condicionada por procesos de oxidación-reducción, formación de enlaces con el metal, hidrólisis y precipitación, los cuales determinan su movilidad y permanencia en la fase disuelta. Particularmente, el Fe^{3+} presenta un comportamiento fuertemente dependiente del pH y de la composición química del medio, debido a su tendencia a formar especies hidrolizadas y hidróxidos de hierro. Estas transformaciones hacen necesario considerar no solo la concentración del ion, sino también las condiciones fisicoquímicas de la solución cuando se evalúan alternativas para disminuir su presencia en agua (Neubauer et al., 2023).

El tratamiento de soluciones acuosas mediante materiales carbonosos obtenidos de biomasa constituye una alternativa de interés dentro de la ingeniería ambiental debido a la posibilidad de aprovechar residuos o recursos vegetales como precursores de adsorbentes. Entre estos materiales, el biochar presenta propiedades que dependen tanto de la naturaleza química de la biomasa como de las condiciones empleadas durante el pirólisis. La temperatura de carbonización puede modificar la porosidad, aromaticidad, alcalinidad y disponibilidad de grupos funcionales superficiales, mientras que funcionalidades oxigenadas como $-\text{OH}$ y $-\text{COOH}$ pueden participar en interacciones entre la superficie carbonosa y especies presentes en solución (Liao et al., 2022; Guo et al., 2023).

Dentro de las especies vegetales disponibles en la región andina, *Lupinus mutabilis* Sweet constituye una materia prima de interés debido a la diversidad química presente en sus diferentes órganos. La caracterización fitoquímica permite reconocer metabolitos secundarios como alcaloides, taninos, saponinas, flavonoides, cumarinas y terpenoides, cuya distribución puede variar entre hojas, tallos, raíces y frutos. En particular, los compuestos de naturaleza polifenólica presentan grupos hidroxilo, mientras que otros metabolitos incorporan funcionalidades oxigenadas o nitrogenadas que permiten caracterizar químicamente la biomasa precursora antes de su transformación térmica. Por esta razón, el análisis fitoquímico constituye una etapa complementaria para establecer diferencias composicionales entre los órganos seleccionados para la producción del material carbonoso.

La conversión de la biomasa de *L. mutabilis* en biochar permite estudiar simultáneamente la influencia del precursor vegetal y de la temperatura de pirólisis sobre el comportamiento del material frente al Fe^{3+} . Durante la carbonización ocurren procesos de deshidratación, desvolatilización y reorganización de la matriz carbonosa que modifican las características químicas originales de la biomasa; por ello, los metabolitos secundarios identificados antes del pirólisis no pueden considerarse necesariamente intactos en el biochar

resultante. No obstante, la composición inicial del precursor y la temperatura utilizada pueden influir en las propiedades superficiales desarrolladas posteriormente, haciendo pertinente comparar diferentes materiales y condiciones de producción mediante ensayos controlados de contacto con soluciones acuosas de Fe^{3+} (Liao et al., 2022; Ramírez et al., 2023).

En función de esta problemática, la presente investigación se orientó a caracterizar fitoquímicamente hojas, tallos, raíces y frutos de *Lupinus mutabilis* Sweet y evaluar biochars obtenidos a partir de la biomasa seleccionada a diferentes temperaturas de pirólisis, empleando una solución acuosa de Fe^{3+} bajo condiciones controladas de laboratorio. El comportamiento del sistema se evaluó mediante espectrofotometría UV-Visible, considerando la variación de la concentración residual en función del tiempo de contacto, con el propósito de comparar los tratamientos e identificar las condiciones experimentales de mayor desempeño. La integración de la caracterización fitoquímica con los ensayos realizados sobre el material carbonizado busca generar información sobre el aprovechamiento de una especie vegetal andina para el desarrollo de materiales de origen biológico aplicables al tratamiento de soluciones acuosas.

3. JUSTIFICACIÓN

La presencia de Fe^{3+} en soluciones acuosas constituye un problema de interés ambiental cuando sus concentraciones alteran las características fisicoquímicas del agua y favorecen procesos de hidrólisis, formación de especies insolubles y acumulación de compuestos de hierro. Su comportamiento depende estrechamente de variables como el pH y la composición del medio, por lo que su tratamiento requiere materiales capaces de interactuar con las especies presentes bajo condiciones controladas. Frente a esta necesidad, la adsorción mediante materiales carbonosos derivados de biomasa representa una alternativa de interés por la posibilidad de obtener adsorbentes a partir de recursos vegetales y orientar su aplicación hacia procesos de tratamiento de agua con menor dependencia de materiales sintéticos convencionales (Viotti et al., 2024).

El uso de biochar resulta pertinente debido a que sus propiedades dependen de la biomasa precursora y de las condiciones empleadas durante el pirólisis. La superficie de estos materiales puede presentar grupos funcionales oxigenados, principalmente hidroxilo, carboxilo y carbonilo, capaces de intervenir en procesos de complicación, intercambio iónico e interacciones electrostáticas con especies metálicas; asimismo, la temperatura de pirólisis modifica la abundancia de estas funcionalidades y la estructura del material carbonoso. En consecuencia,

evaluar biochars obtenidos a diferentes temperaturas permite establecer experimentalmente qué condición de preparación favorece una mayor disminución de Fe^{3+} en solución, sin asumir que un incremento de la temperatura produce necesariamente una mayor capacidad de adsorción (Li et al., 2024).

La selección de *Lupinus mutabilis* Sweet como precursor vegetal incorpora además un componente de aprovechamiento de una especie representativa de la región andina y disponible en la provincia de Cotopaxi. El interés científico de esta biomasa no se limita a su transformación en material carbonoso, sino que comprende la caracterización previa de su composición fitoquímica en hoja, tallo, raíz y fruto. El reconocimiento semicuantitativo de metabolitos secundarios como taninos, saponinas, alcaloides, flavonoides, cumarinas y esteroides/triterpenos permite diferenciar químicamente los órganos vegetales antes de la pirólisis y establecer una base experimental para comparar posteriormente el comportamiento de los biochars obtenidos a partir de los precursores seleccionados. Esta aproximación responde al vacío identificado en el proyecto inicial respecto de la relación entre el perfil fitoquímico de *L. mutabilis* y su posible aprovechamiento en procesos de remoción en medios acuosos.

Desde el punto de vista científico y metodológico, la investigación integra dos etapas que normalmente pueden estudiarse de manera independiente: la caracterización fitoquímica del precursor y la evaluación experimental del material carbonizado. Esta relación permite examinar si las diferencias composicionales iniciales entre los órganos de *L. mutabilis* Sweet coinciden con variaciones posteriores en el comportamiento de los biochars frente al Fe^{3+} . Sin embargo, debido a que el pirólisis transforma los constituyentes orgánicos originales, la presencia de metabolitos secundarios en la biomasa no se considera evidencia directa de su permanencia en el biochar; su utilización corresponde a una caracterización del precursor que posteriormente puede contrastarse con las propiedades y el desempeño del material carbonoso. La literatura señala que tanto la materia prima como la temperatura de pirólisis condicionan la presencia de grupos funcionales oxigenados y, por consiguiente, las posibles interacciones entre la superficie del biochar y los iones presentes en soluciones acuosas (Li et al., 2024).

La investigación se justifica finalmente por su aporte a la generación de evidencia experimental sobre el aprovechamiento de *Lupinus mutabilis* Sweet como precursor de biochar para el tratamiento de soluciones acuosas con Fe^{3+} . La comparación de diferentes temperaturas de pirólisis y tiempos de contacto, complementada mediante determinación espectrofotométrica UV-Visible y análisis estadístico, permitirá identificar las condiciones experimentales que

presenten el mejor desempeño dentro del intervalo estudiado. Los resultados aportarán una base técnica para investigaciones posteriores orientadas a optimizar el material, caracterizar sus propiedades superficiales y evaluar su comportamiento bajo condiciones de mayor complejidad, contribuyendo al desarrollo de alternativas de tratamiento basadas en biomasa vegetal y a las líneas de investigación en remediación ambiental de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

En la Tabla 1 se presentan el número de beneficiarios directos e indirectos correspondientes al proyecto de investigación.

Tabla 1
Beneficiarios del Proyecto de investigación

Beneficiarios directos	Beneficiarios Indirectos
Habitantes de la Parroquia Joségungo Bajo	Población del cantón Latacunga
Hombres: 1.760	Hombres: 106.010
Mujeres: 1.640	Mujeres: 11.261
Total: 3.460 habitantes	Total: 217.761 habitantes

Nota. En la presente tabla se presentan los beneficiarios del proyecto.

5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La contaminación por metales pesados constituye una de las principales problemáticas ambientales a nivel mundial debido a su elevada toxicidad y capacidad de bioacumulación en los ecosistemas. La presencia de estos contaminantes en los recursos hídricos compromete la calidad del agua, afecta el equilibrio ecológico y representa un riesgo para la salud humana, lo que ha impulsado el desarrollo de tecnologías sostenibles orientadas a su remoción, aunque existen tecnología convencionales para su remoción, como la precipitación química, el intercambio iónico, la filtración por membranas y la electrocoagulación, muchas de ellas presentan elevados costos de operación, alto consumo energético y generación de residuos secundarios. Lo que ha impulsado el desarrollo de alternativas sostenibles basadas en procesos de biosorción utilizando biomateriales de origen vegetal (Yaashikaa et al., 2024).

Diversas investigaciones han demostrado que compuestos como alcaloides, flavonoides, taninos, compuestos fenólicos, saponinas y terpenoides poseen características

químicas que favorecen la retención de contaminantes metálicos, constituyendo una alternativa ambientalmente sostenible para el tratamiento de soluciones acuosas contaminadas (Staszak & Regel-Rosocka, 2024). No obstante, de eficiencia de estos procesos depende de la composición fitoquímica de cada especie vegetal, de la distribución de los metabolitos en sus diferentes órganos y de las condiciones experimentales bajo las cuales se desarrollan los ensayos de remoción (Yaashikaa et al., 2024). Es decir, la caracterización fitoquímica constituye un paso indispensable para comprender el comportamiento de los biomateriales vegetales para así conocer su potencial de aplicación en tecnologías de remediación ambiental.

En el Ecuador, la búsqueda de alternativas sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas constituye una prioridad debido a la presión ejercida por actividades extractivas, agrícolas e industriales sobre los recursos hídricos. Investigaciones como la de (Rodríguez-Ortega et al., 2023) destacan que el país posee una amplia diversidad de especies vegetales con potencial para aplicaciones biotecnológicas y ambientales; sin embargo, muchas de ellas han sido estudiadas principalmente desde el punto de vista alimentario o agronómico, existiendo escasa información acerca de sus posibles aplicaciones como biomateriales para la remoción de contaminantes metálicos. Entre estas especies destaca *Lupinus mutabilis* Sweet (chocho andino), una leguminosa nativa de la región andina caracterizada por su elevado contenido de proteínas y por la presencia de metabolitos secundarios de interés biológico. A pesar de su importancia en la seguridad alimentaria y la agricultura andina, los esfuerzos científicos se han centrado en su mejoramiento genético, calidad nutricional y su producción agrícola, mientras que, su potencial para aplicaciones ambientales continúa siendo poco explorado.

En la provincia de Cotopaxi, una de las principales zonas productoras de *Lupinus mutabilis* Sweet en el Ecuador, el cultivo de esta especie forma parte de los sistemas agrícolas tradicionales y representa una fuente importante de ingresos para numerosos productores. No obstante, hasta el momento no se dispone de estudios locales que integren la caracterización fitoquímica de hojas, tallos, raíces y frutos con la evaluación experimental de su capacidad para remover contaminantes metálicos en soluciones acuosas. Esta ausencia de información científica limita el aprovechamiento de la especie como biomaterial de origen vegetal para aplicaciones ambientales y restringe el desarrollo de estrategias innovadoras orientadas al tratamiento sostenible de aguas contaminadas. Asimismo, se evidencia la inexistencia de investigaciones realizadas con material vegetal procedente del sector Quisinche Bajo, parroquia Joseguango Bajo, provincia de Cotopaxi, que permitan conocer la distribución de los metabolitos secundarios en los diferentes órganos de la planta y establecer su posible relación con los mecanismos de biosorción de metales pesados.

Esta investigación se ve limitada por la falta de información científica disponible sobre la composición fitoquímica de los diferentes órganos de *Lupinus mutabilis* Sweet y la influencia de sus metabolitos secundarios en el potencial remediador frente a contaminantes metálicos presentes en soluciones acuosas. Esta brecha de conocimiento dificulta el aprovechamiento de una especie vegetal ampliamente distribuida en la región andina como alternativa sostenible para procesos de remediación ambiental y limita el desarrollo de tecnologías basadas en biomasa vegetal de bajo costo, renovable y ambientalmente responsable.

6. OBJETIVO DEL PROYECTO

6.1.Objetivo General

Evaluar el potencial remediador de *Lupinus mutabilis* Sweet frente a contaminantes metálicos en soluciones acuosas, mediante su caracterización fitoquímica y ensayos experimentales controlados, con el fin de analizar su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación.

6.2.Objetivos Específicos

- Identificar cualitativamente los principales metabolitos secundarios presentes en la biomasa vegetal seleccionada mediante ensayos fitoquímicos estándar, con el fin de reconocer compuestos potencialmente involucrados en procesos de interacción con metales.
- Evaluar la capacidad de remoción de contaminantes metálicos en soluciones acuosas sintéticas utilizando biomasa vegetal bajo condiciones controladas de laboratorio, determinando el porcentaje de remoción en función del tiempo de contacto.
- Analizar el efecto de la concentración inicial del metal sobre el proceso de remoción, comparando el comportamiento de la biomasa vegetal frente a diferentes niveles de contaminación en soluciones acuosas.

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

Tabla

2

Actividades y sistema de tareas en relación con los objetivos específicos de la investigación.

OBJETIVOS	METODOLOGIA	ACTIVIDADES	RESULTADO ESPERADOS
Identificar los principales metabolitos secundarios presentes en hojas, tallos, raíces y frutos de <i>Lupinus mutabilis</i> Sweet mediante ensayos fitoquímicos.	Recolección y preparación del material vegetal.	Recolectar hojas, tallos, raíces y frutos; realizar lavado, secado, molienda y obtención de extractos; aplicar las marchas analíticas para alcaloides, flavonoides, taninos, saponinas, cumarinas, quinonas, antraquinonas, esteroides y triterpenos; registrar las reacciones mediante la escala semicuantitativa.	Perfil fitoquímico de <i>Lupinus mutabilis</i> Sweet e identificación de metabolitos secundarios por órgano vegetal.
Evaluar el potencial remediador de <i>Lupinus mutabilis</i> Sweet frente a contaminantes metálicos en soluciones acuosas mediante ensayos experimentales controlados.	Preparación de soluciones y ejecución de los ensayos de remoción.	Preparar soluciones sintéticas con contaminantes metálicos; acondicionar la biomasa; realizar los ensayos de adsorción; determinar las concentraciones iniciales y finales; registrar la eficiencia de remoción.	Determinación de la capacidad de remoción de contaminantes metálicos por la biomasa vegetal.

Analizar el efecto de la concentración inicial del contaminante metálico sobre la capacidad de remoción de <i>Lupinus mutabilis</i> Sweet.	e interpretación de resultados.	Análisis estadístico Organizar la base de datos; aplicar el análisis estadístico; comparar la eficiencia de remoción entre tratamientos; interpretar y discutir los resultados en función de la caracterización fitoquímica.	Relación entre la concentración inicial del metal y la eficiencia de remoción sustentada estadísticamente.
---	------------------------------------	--	---

Nota: Sistematización de los objetivos con su respectiva actividad, metodología y resultados

8. MARCO TEÓRICO

8.1. *Lupinus mutabilis* sweet

8.1.1. Generalidades y clasificación taxonómica

Lupinus mutabilis Sweet, conocido comúnmente en Ecuador como chocho y en otros países andinos como tarwi, corresponde a una especie leguminosa perteneciente a la familia Fabaceae y al género *Lupinus*. Su origen se encuentra asociado con la región andina de Sudamérica, donde forma parte de los sistemas agrícolas tradicionales y constituye un recurso vegetal de relevancia alimentaria, agronómica y económica. En Ecuador, la especie se encuentra estrechamente vinculada con los sistemas productivos de la Sierra y presenta una diversidad morfológica relacionada con las condiciones ambientales de las zonas donde se cultiva (Chalampunte-Flores et al., 2023).

Desde el punto de vista taxonómico, *L. mutabilis* forma parte del grupo de leguminosas del género *Lupinus*, caracterizado por especies con capacidad de adaptación a diferentes condiciones edafoclimáticas. Su condición de leguminosa también le confiere interés agronómico debido a su participación en procesos de fijación biológica de nitrógeno mediante asociaciones simbióticas con microorganismos del suelo, característica que favorece su incorporación en sistemas de rotación de cultivos. La importancia de la especie no se limita, por tanto, a la producción de grano, sino que comprende su participación dentro de los agroecosistemas andinos y el aprovechamiento potencial de diferentes fracciones de su biomasa (Chalampunte-Flores et al., 2023).

8.1.2. Características botánicas y distribución

El chocho es una planta herbácea anual que puede presentar variaciones morfológicas considerables entre ecotipos, particularmente en características relacionadas con el crecimiento, ramificación, estructuras reproductivas y producción de semillas. Esta variabilidad responde tanto al componente genético como a las condiciones ambientales de las zonas altoandinas en las que se desarrolla. En Ecuador se han identificado poblaciones de *L. mutabilis* adaptadas a diferentes condiciones ecogeográficas, lo que evidencia la plasticidad de la especie y su capacidad para desarrollarse en ambientes característicos de la región interandina (Chalampunte-Flores et al., 2023).

La distribución de *L. mutabilis* está relacionada principalmente con los Andes sudamericanos, donde ha sido cultivado históricamente como una especie alimentaria. Las condiciones de altitud, temperatura y disponibilidad hídrica influyen en su establecimiento y en

la expresión de sus características morfológicas. En el caso ecuatoriano, esta relación adquiere especial relevancia debido a la diversidad ambiental existente en la región Sierra, donde el cultivo constituye parte de los sistemas agrícolas locales. Esta adaptación territorial respalda el interés por estudiar la especie no solamente desde una perspectiva alimentaria, sino también como una fuente regional de biomasa susceptible de ser aprovechada mediante procesos de transformación termoquímica (Chalampunte-Flores et al., 2023).

8.1.3. Composición química de *lupinus mutabilis*

La composición química de *L. mutabilis* ha sido estudiada principalmente en sus semillas debido a su importancia alimentaria. Estas se caracterizan por presentar contenidos elevados de proteínas y lípidos, además de otros constituyentes minoritarios como fitoesteroles, carotenoides, tocoferoles y compuestos fenólicos. Estudios comparativos realizados con diferentes especies de *Lupinus* han demostrado que *L. mutabilis* presenta un perfil químico particular y que entre sus componentes pueden encontrarse flavonoides y otros metabolitos de interés biológico (Czubinski et al., 2021).

Dentro de los metabolitos secundarios asociados con *L. mutabilis*, los alcaloides quinolizidínicos representan uno de los grupos más característicos de la especie y están relacionados con el sabor amargo de las semillas sin procesar. A ellos se suman diferentes compuestos fenólicos y flavonoides cuya composición puede variar según el genotipo, las condiciones de cultivo y los procesos posteriores aplicados a la materia vegetal. Investigaciones mediante técnicas cromatográficas han identificado en semillas de *L. mutabilis* diversas isoflavonas y flavonas, incluidas estructuras derivadas de genisteína, apigenina y luteolina, confirmando la diversidad fitoquímica de la especie (Carvajal-Larenas et al., 2016; Chirinos et al., 2024).

Esta composición resulta relevante para la presente investigación debido a que la materia vegetal utilizada como precursor de un biochar no constituye únicamente una matriz carbonosa, sino un sistema complejo formado por componentes estructurales y sustancias químicas de diferente naturaleza. Durante la transformación térmica, estos constituyentes experimentan degradación, deshidratación, volatilización y reorganización estructural; por ello, conocer previamente la composición fitoquímica de la biomasa permite establecer diferencias entre los órganos vegetales utilizados como precursores. Esta caracterización no implica que los metabolitos secundarios permanezcan intactos después del pirólisis, sino que proporciona información sobre la naturaleza química inicial del material sometido al proceso térmico.

8.1.4. Aprovechamiento de la biomasa de *lupinus mutabilis*

El aprovechamiento de *L. mutabilis* se ha concentrado tradicionalmente en sus semillas por su contenido proteico y lipídico, mientras que otras fracciones vegetales han recibido menor atención desde la perspectiva de su valorización como biomasa. Esta situación abre posibilidades para investigar usos alternativos de hojas, tallos, raíces, vainas o fracciones derivadas del procesamiento de la planta, particularmente cuando su transformación permita obtener materiales con aplicaciones ambientales. La valorización integral de biomasa vegetal responde además a enfoques de aprovechamiento de recursos biológicos que buscan generar productos de mayor valor agregado a partir de materias primas disponibles regionalmente.

En esta investigación, el interés por *L. mutabilis* trasciende su utilización alimentaria y se orienta hacia la caracterización de diferentes órganos vegetales y su posterior aprovechamiento como precursores de materiales carbonosos. La identificación de diferencias fitoquímicas entre hoja, tallo, raíz y fruto permite seleccionar fracciones con características químicas particulares antes de someterlas a carbonización. Posteriormente, la evaluación del biochar permite establecer experimentalmente si dichas diferencias del precursor, junto con las condiciones de pirólisis, se relacionan con variaciones en el comportamiento del material frente al Fe^{3+} presente en solución acuosa. De esta manera, el aprovechamiento de *L. mutabilis* adquiere una dimensión ambiental vinculada con la valorización de biomasa y el desarrollo de materiales de origen vegetal para procesos de tratamiento.

8.2. Metabolitos Secundarios Presentes en *Lupinus Mutabilis*

8.2.1. Metabolitos secundarios y su importancia fitoquímica

Los metabolitos secundarios son sustancias producidas por las plantas que, aunque no participan directamente en todos los procesos básicos de crecimiento y reproducción, desempeñan funciones relacionadas con defensa, interacción con el ambiente, señalización y adaptación frente a factores bióticos y abióticos. Entre los principales grupos se encuentran alcaloides, compuestos fenólicos, flavonoides, taninos, terpenoides, saponinas y cumarinas, cuya distribución depende de la especie, órgano vegetal, estado de desarrollo y condiciones ambientales. En *L. mutabilis* se ha documentado particularmente la presencia de alcaloides quinolizidínicos y una diversidad de compuestos fenólicos y flavonoides (Carvajal-Larenas et al., 2016; Chirinos et al., 2024).

Desde la perspectiva de esta investigación, la caracterización fitoquímica permite establecer un perfil químico inicial de los órganos de *L. mutabilis* utilizados como materia prima. Este aspecto resulta relevante porque metabolitos como los taninos y flavonoides poseen

estructuras con grupos hidroxilo fenólicos, mientras que alcaloides y otros compuestos incorporan funcionalidades nitrogenadas u oxigenadas. Estas características permiten diferenciar químicamente los precursores antes del pirólisis, aunque no constituyen por sí mismas evidencia de los grupos funcionales existentes posteriormente en el biochar. Por ello, la caracterización fitoquímica debe interpretarse como una descripción de la biomasa inicial y no como una caracterización directa de la superficie del material carbonizado.

8.2.2. Alcaloides

Los alcaloides constituyen uno de los grupos de metabolitos secundarios más representativos del género *Lupinus*. En *L. mutabilis* predominan los alcaloides quinolizidínicos, cuya presencia se encuentra asociada con el sabor amargo característico de semillas que no han sido sometidas a procesos de desamargado. Entre los compuestos descritos para la especie se encuentran lupanina y otros derivados quinolizidínicos, cuya concentración puede variar considerablemente según el material vegetal y las condiciones de procesamiento (Carvajal-Larenas et al., 2016).

Desde el punto de vista estructural, los alcaloides se caracterizan por contener nitrógeno dentro de sus estructuras moleculares, diferenciándose de los metabolitos predominantemente fenólicos. Su identificación cualitativa en los distintos órganos de la planta permite establecer diferencias en la composición química del precursor. En el presente estudio, su relevancia se encuentra principalmente en la caracterización integral de la biomasa antes de la carbonización; cualquier posible participación posterior de funcionalidades nitrogenadas en la superficie del biochar deberá interpretarse considerando las transformaciones producidas durante el pirólisis y no como permanencia directa de los alcaloides originales.

8.2.3. Taninos y compuestos polifenólicos

Los taninos corresponden a un conjunto de compuestos polifenólicos caracterizados por presentar múltiples grupos hidroxilo asociados a estructuras aromáticas. Esta característica química favorece su capacidad para establecer interacciones con proteínas, macromoléculas y diferentes especies químicas. En las plantas cumplen funciones principalmente relacionadas con mecanismos de defensa y protección, mientras que desde una perspectiva química constituyen indicadores relevantes de la presencia de estructuras fenólicas en una determinada biomasa.

La importancia de los taninos para esta investigación radica en que su identificación permite reconocer diferencias en la abundancia relativa de estructuras polifenólicas entre los órganos vegetales estudiados. Los grupos –OH fenólicos presentes en estas moléculas forman

parte de la composición inicial de la biomasa; sin embargo, durante la carbonización pueden experimentar ruptura, condensación, deshidratación y otras transformaciones. Por esta razón, una elevada respuesta fitoquímica para taninos permite caracterizar al precursor como relativamente rico en estructuras polifenólicas, pero no demuestra que los mismos taninos ni todos sus grupos hidroxilo permanezcan disponibles en el biochar obtenido

8.2.4. Saponinas

Las saponinas constituyen un grupo de metabolitos secundarios de naturaleza glucosídica, conformados estructuralmente por una fracción no polar denominada sapogenina y una fracción constituida por cadenas de azúcares. Esta combinación les proporciona un carácter anfifílico y explica propiedades características como la formación de espuma estable en medios acuosos. Según la estructura de la aglicona, las saponinas pueden clasificarse principalmente como esteroidales o triterpénicas, y su presencia y abundancia varían ampliamente entre especies y órganos vegetales (Cheok et al., 2014).

Desde una perspectiva fitoquímica, la identificación de saponinas permite complementar la caracterización de los diferentes órganos de *Lupinus mutabilis* Sweet y reconocer diferencias en la composición química de la biomasa utilizada posteriormente como precursor del material carbonoso. Su estructura contiene numerosos grupos funcionales oxigenados asociados principalmente con las unidades glucosídicas, por lo que su detección aporta información acerca de la naturaleza química inicial de la matriz vegetal. Sin embargo, estas moléculas son susceptibles a procesos de degradación y transformación durante el calentamiento, razón por la cual su presencia en la biomasa no implica que las estructuras originales permanezcan sin modificaciones después del pirólisis.

Para la presente investigación, las saponinas se consideran principalmente un descriptor fitoquímico del precursor vegetal. Su análisis adquiere mayor valor cuando se interpreta conjuntamente con otros metabolitos, como taninos y alcaloides, debido a que el conjunto permite diferenciar químicamente hoja, tallo, raíz y fruto antes de la carbonización. Esta aproximación evita atribuir directamente a una familia de metabolitos el comportamiento posterior del biochar y permite analizar la biomasa como una matriz químicamente heterogénea cuya transformación térmica determinará las características finales del material.

8.2.5. Flavonoides

Los flavonoides pertenecen al grupo de los compuestos fenólicos y presentan una estructura básica constituida por anillos aromáticos que pueden contener diferentes sustituyentes, particularmente grupos hidroxilo. Estas variaciones estructurales originan

diferentes subgrupos, entre ellos flavonas, flavonoles, flavanonas e isoflavonas. La presencia de grupos fenólicos –OH constituye una característica química relevante de estos compuestos y determina buena parte de su reactividad y de las interacciones que pueden establecer con otras especies químicas.

En *Lupinus mutabilis* Sweet se ha confirmado experimentalmente una diversidad considerable de flavonoides. Tian et al. analizaron semillas de diez ecotipos de lupino andino mediante LC-MS e identificaron trece isoflavonas y ocho flavonas, predominando derivados glucosilados de genisteína y metoxigenisteína, además de derivados de apigenina y metil-luteolina. Los autores también encontraron diferencias entre ecotipos y demostraron que el tratamiento acuoso de desamargado modificó el contenido y el perfil de estos compuestos, evidenciando que la composición flavonoide de *L. mutabilis* puede cambiar como consecuencia del procesamiento de la biomasa (Tian et al., 2024).

La presencia de flavonoides adquiere interés en la caracterización de la materia prima debido a su naturaleza polifenólica y a la existencia de grupos hidroxilo y otros sitios oxigenados en sus estructuras. No obstante, al igual que ocurre con los taninos, estos grupos deben interpretarse como características de la biomasa antes del pirólisis. El tratamiento térmico provoca transformaciones químicas que incluyen deshidratación, ruptura de enlaces, liberación de compuestos volátiles y condensación progresiva de la estructura carbonosa, por lo que no resulta adecuado atribuir directamente los grupos funcionales superficiales del biochar a los flavonoides originalmente detectados.

8.2.6. Cumarinas

Las cumarinas corresponden a metabolitos secundarios de naturaleza fenólica cuya estructura básica deriva de un sistema benzopirónico. Las modificaciones en este núcleo estructural, mediante sustituciones como grupos hidroxilo, metoxilo o unidades glucosídicas, generan una amplia diversidad de compuestos dentro de esta familia. En las plantas pueden participar en procesos de defensa, señalización e interacción con factores ambientales, mientras que su identificación fitoquímica contribuye a establecer la diversidad de compuestos fenólicos presentes en una muestra vegetal.

Desde el punto de vista de esta investigación, las cumarinas complementan el perfil de sustancias fenólicas del precursor junto con taninos y flavonoides. Su importancia no debe establecerse únicamente a partir de su presencia o ausencia, sino mediante la comparación semicuantitativa entre los órganos vegetales estudiados. Debido a que las pruebas fitoquímicas utilizadas proporcionan respuestas ordinales de intensidad y no concentraciones absolutas, los

resultados de cumarinas deben interpretarse como evidencia semicuantitativa y no como una determinación del contenido total de compuestos fenólicos.

Esta diferenciación será necesaria posteriormente al relacionar la fitoquímica con el biochar. Una respuesta positiva para cumarinas demuestra características químicas del precursor, pero no permite afirmar que estas moléculas participen directamente en la retención de Fe^{3+} después de la carbonización. El proceso térmico transforma la matriz orgánica y modifica progresivamente la abundancia y naturaleza de los grupos funcionales superficiales, por lo que cualquier asociación entre la composición inicial y el comportamiento adsorbente deberá plantearse como una relación entre precursor, transformación térmica y material resultante.

8.2.7. Esteroides y triterpenos

Los esteroides y triterpenos pertenecen al amplio grupo de los terpenoides y se originan biosintéticamente a partir de unidades de isopreno. Los triterpenos contienen generalmente esqueletos de treinta átomos de carbono y pueden presentarse en forma libre o asociados con otras estructuras, mientras que los esteroides poseen sistemas policíclicos característicos derivados de precursores triterpénicos. Su presencia en tejidos vegetales está relacionada con funciones estructurales, fisiológicas y de protección, y constituye otro indicador de la diversidad química presente en una determinada biomasa.

A diferencia de los taninos y flavonoides, cuyo interés en esta investigación se encuentra especialmente relacionado con su naturaleza polifenólica, los esteroides y triterpenos presentan estructuras predominantemente carbonadas y diferentes patrones de funcionalización. Su identificación amplía, por tanto, la caracterización química de los órganos de *L. mutabilis* Sweet y permite reconocer que la biomasa precursora está constituida por familias de metabolitos con propiedades estructurales diferentes.

La relevancia de estos compuestos para la producción de biochar debe interpretarse desde la transformación integral de la biomasa y no desde la conservación individual de cada metabolito. Durante el pirólisis, las estructuras orgánicas experimentan reacciones sucesivas de degradación y reorganización que contribuyen a la formación de productos volátiles, bioaceite y una fracción carbonosa sólida. La composición inicial del precursor condiciona este proceso, pero las características finales del biochar dependen simultáneamente de la materia prima y de variables de producción como temperatura, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia.

8.2.8. Relación entre metabolitos secundarios, grupos funcionales y características del biochar

La caracterización conjunta de taninos, saponinas, alcaloides, flavonoides, cumarinas y esteroides/triterpenos permite establecer un perfil químico comparativo de los órganos de *Lupinus mutabilis* Sweet antes de su transformación térmica. Dentro de este conjunto, los taninos y flavonoides presentan especial interés por su naturaleza polifenólica y por la abundancia de grupos hidroxilo en sus estructuras; las saponinas incorporan múltiples funcionalidades oxigenadas asociadas con su fracción glucosídica, mientras que los alcaloides aportan estructuras que contienen nitrógeno. Esta diversidad permite considerar la composición fitoquímica como una característica inicial del precursor potencialmente relacionada con las propiedades que desarrolla el material durante la carbonización, pero no como una medición directa de la química superficial del biochar.

El pirólisis produce cambios progresivos en las funcionalidades químicas de la biomasa. Las reacciones de deshidratación, desoxigenación, ruptura de cadenas y condensación aromática modifican la proporción de grupos superficiales conforme aumenta la temperatura. Estudios de caracterización de biochar han mostrado que los materiales obtenidos a temperaturas relativamente menores pueden conservar una mayor presencia de determinados grupos funcionales reactivos, mientras que el incremento de la severidad térmica favorece estructuras carbonosas más condensadas y modifica sustancialmente las funcionalidades superficiales (Zhang et al., 2020).

Este comportamiento resulta particularmente relevante para interpretar biochars obtenidos a diferentes temperaturas. La presencia de grupos superficiales que contienen oxígeno, entre ellos funcionalidades asociadas con $-OH$, puede disminuir o transformarse debido a reacciones de deshidratación y condensación durante el pirólisis; simultáneamente, la estructura carbonosa adquiere mayor organización y aromaticidad. Investigaciones recientes mediante caracterización espectroscópica de biochars confirman que las señales correspondientes a grupos hidroxilo y otras funcionalidades cambian como consecuencia directa de la conversión térmica de la biomasa (Zhang et al., 2020).

Por esta razón, la relación entre fitoquímica y capacidad de retención de Fe^{3+} debe formularse mediante una secuencia conceptual: composición del precursor $\rightarrow$ transformación durante el pirólisis $\rightarrow$ propiedades superficiales del biochar $\rightarrow$ comportamiento frente al contaminante. La presencia inicial de taninos, saponinas o alcaloides puede utilizarse para diferenciar químicamente las materias primas, pero la identificación de los sitios responsables

de la interacción con Fe^{3+} requeriría caracterización directa del biochar mediante técnicas como espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) o análisis de área superficial. De esta manera, el análisis fitoquímico proporciona una base composicional para interpretar los resultados posteriores sin atribuir mecanismos que la metodología experimental no permite demostrar.

Un aspecto adicional que fortalece esta interpretación es que la composición fitoquímica de *L. mutabilis* no es uniforme. Investigaciones recientes realizadas sobre germoplasma ecuatoriano han analizado diferencias nutricionales y fitoquímicas entre materiales de esta especie, mientras que estudios cromatográficos en ecotipos andinos han demostrado variaciones en la composición y abundancia de flavonoides. En consecuencia, la biomasa de *L. mutabilis* debe entenderse como un precursor químicamente variable, lo que respalda la necesidad de caracterizar experimentalmente el material utilizado en cada investigación en lugar de asumir una composición uniforme para toda la especie (Tian et al., 2024; Rodríguez-Ortega et al., 2026).

8.3. Hierro en Sistemas Acuosos

8.3.1. Características químicas del hierro

El hierro (Fe) es un elemento químico de número atómico 26 que participa ampliamente en procesos geoquímicos, biológicos e industriales. En sistemas acuosos se encuentra principalmente en los estados de oxidación +2 y +3, correspondientes a las especies ferrosa $[\text{Fe(II)}]$ y férrica $[\text{Fe(III)}]$, respectivamente. La distribución entre ambos estados depende de las condiciones de oxidación-reducción, el pH, la concentración de oxígeno disuelto y la presencia de sustancias capaces de formar complejos con el hierro. Por esta razón, su comportamiento en agua no puede interpretarse únicamente a partir de la concentración total, sino que requiere considerar las condiciones fisicoquímicas que determinan su especiación y solubilidad (Health Canada, 2024).

En medios acuáticos oxigenados, el Fe(III) constituye generalmente el estado de oxidación predominante, aunque su permanencia como especie disuelta está limitada por su tendencia a experimentar hidrólisis y formar compuestos poco solubles. Por el contrario, bajo condiciones anóxicas o reductoras puede favorecerse la presencia de Fe(II) , cuya solubilidad suele ser mayor. Estas transformaciones permiten que el hierro participe continuamente en procesos de oxidación, reducción, disolución y precipitación, por lo que su movilidad ambiental se encuentra estrechamente relacionada con el potencial redox y el pH del medio (Health Canada, 2024).

La química del hierro también se encuentra condicionada por la presencia de materia orgánica y ligandos capaces de establecer interacciones con las especies férricas y ferrosas. Sustancias orgánicas presentes en aguas naturales pueden formar complejos con Fe(II) y Fe(III), modificando su especiación y, en determinadas condiciones, aumentando la permanencia del hierro en la fase disuelta. Este comportamiento resulta particularmente relevante en sistemas que contienen materiales derivados de biomasa, debido a que las funcionalidades químicas presentes en la materia orgánica pueden modificar las interacciones entre el hierro, el agua y las superficies sólidas (Health Canada, 2024).

8.3.2. Fe^{2+} y Fe^{3+} en medios acuosos

Las especies Fe^{2+} y Fe^{3+} presentan comportamientos diferentes en solución acuosa. El Fe^{2+} posee generalmente mayor solubilidad y puede predominar bajo condiciones reductoras, mientras que el Fe^{3+} presenta una marcada tendencia a la hidrólisis y a la formación de fases poco solubles conforme cambian las condiciones del medio. Cuando el Fe^{2+} entra en contacto con condiciones oxidantes, puede transformarse a Fe^{3+} y posteriormente formar especies hidrolizadas o precipitados de hierro, proceso que explica parte de las variaciones de color, turbidez y depósitos observados en aguas con presencia elevada del elemento (Health Canada, 2024).

En la presente investigación, el interés se concentra específicamente en el Fe^{3+} , debido a que la solución experimental se preparó utilizando una fuente de hierro férrico. Desde el punto de vista teórico, resulta necesario reconocer que escribir Fe^{3+} representa formalmente el estado de oxidación +3, pero no implica que todo el hierro permanezca como ion férrico libre durante el ensayo. Una vez incorporado al medio acuoso, el Fe(III) puede encontrarse en diferentes formas químicas dependiendo del pH, los ligandos presentes y las condiciones de la solución; por esta razón, la interpretación de su disminución experimental debe considerar la química de especiación del hierro (Health Canada, 2024).

Esta consideración resulta necesaria al estudiar la interacción entre Fe(III) y biochar, debido a que una reducción de la concentración de hierro en la fase líquida no demuestra automáticamente que la totalidad del metal haya sido retenida exclusivamente mediante adsorción superficial. Dependiendo de las condiciones experimentales pueden intervenir simultáneamente interacciones con grupos funcionales del material, formación de complejos y cambios en la solubilidad de las especies de hierro. En consecuencia, la interpretación del proceso debe considerar conjuntamente las características del adsorbente y las transformaciones químicas que puede experimentar el Fe(III) en el medio acuoso (Health Canada, 2024).

8.3.3. Especiación, hidrólisis y comportamiento del Fe^{3+} en función del pH

El Fe^{3+} posee una elevada tendencia a experimentar hidrólisis en solución acuosa. Bajo condiciones fuertemente ácidas puede mantenerse una proporción mayor de especies férricas solubles; sin embargo, conforme aumenta el pH se favorece la formación de especies hidrolizadas y posteriormente de fases de Fe(III) de baja solubilidad. La información técnica disponible para sistemas acuosos señala que el Fe^{3+} libre puede existir principalmente bajo condiciones fuertemente ácidas, mientras que en condiciones cercanas a la neutralidad predominan formas hidrolizadas y precipitados asociados con Fe(III) (Health Canada, 2024).

De manera simplificada, la hidrólisis inicial del Fe^{3+} puede representarse mediante reacciones sucesivas en las cuales las moléculas de agua coordinadas al catión pierden protones y originan especies hidroxiladas. A medida que avanza este proceso pueden desarrollarse estructuras polinucleares y fases sólidas de hierro, por lo que la concentración de Fe(III) soluble puede disminuir, aunque el hierro total permanezca dentro del sistema experimental. Esta característica hace que el pH constituya una variable fundamental en cualquier ensayo destinado a evaluar la eliminación de Fe(III) de una solución acuosa (Health Canada, 2024).

La relación entre pH y solubilidad adquiere especial importancia cuando se emplean materiales como el biochar, ya que estos pueden modificar las condiciones ácido-base del medio durante el contacto. Si el pH aumenta durante un ensayo con Fe(III), la disminución de la concentración soluble podría corresponder a una combinación de retención sobre la superficie del material y formación de especies hidrolizadas o insolubles. Por esta razón, el seguimiento simultáneo del pH y de la concentración residual constituye una herramienta necesaria para interpretar adecuadamente el comportamiento experimental y evitar atribuir toda disminución de Fe exclusivamente a un mecanismo de adsorción (Health Canada, 2024).

8.3.4. Presencia de hierro en el agua y efectos asociados a concentraciones elevadas

El hierro puede incorporarse a los sistemas acuáticos mediante procesos naturales de interacción agua-roca y suelo-agua, así como por actividades humanas y procesos de corrosión de materiales que contienen este elemento. Su concentración en el agua puede modificarse además por las condiciones de oxigenación, la presencia de materia orgánica y las características geoquímicas del entorno. En sistemas de abastecimiento, la corrosión de componentes metálicos también puede contribuir a la presencia de hierro y generar alteraciones relacionadas con depósitos y cambios en la calidad física del agua (World Health Organization [WHO], 2022; Health Canada, 2024).

La presencia elevada de hierro puede afectar las características organolépticas y operacionales del agua aun cuando las concentraciones normalmente encontradas en agua potable no constituyan necesariamente un riesgo sanitario directo. La formación de precipitados de Fe(III) puede generar coloraciones amarillas, rojizas o marrones, incrementar la turbidez y favorecer la aparición de depósitos en tuberías y otras estructuras de los sistemas de distribución. La Organización Mundial de la Salud no establece un valor guía basado en efectos sanitarios para el hierro en agua potable, aunque reconoce que su presencia puede afectar la aceptabilidad del agua (WHO, 2022).

La formación de partículas y depósitos de hierro también puede modificar las condiciones físicas del agua y producir problemas asociados con la operación de los sistemas de tratamiento y distribución. En ambientes oxigenados, el Fe(III) puede encontrarse formando suspensiones de hidróxidos férricos que posteriormente sedimentan o se depositan sobre superficies, mientras que los procesos de corrosión pueden favorecer la aparición del fenómeno conocido como “agua roja”. Estas características justifican el desarrollo y evaluación de procesos orientados a controlar la concentración de hierro y las formas químicas responsables de los problemas de calidad del agua (Health Canada, 2024; WHO, 2022).

8.3.5. Métodos empleados para la remoción de hierro en soluciones acuosas

El tratamiento de aguas que contienen hierro puede realizarse mediante diferentes estrategias fisicoquímicas cuya selección depende de la concentración inicial, estado de oxidación, pH, composición del agua y finalidad del tratamiento. Una estrategia ampliamente utilizada consiste en favorecer la oxidación de Fe(II) hacia Fe(III), seguida por la formación de especies insolubles y su posterior separación mediante procesos físicos. El ajuste del pH, la aireación, la oxidación y la filtración constituyen, por tanto, operaciones estrechamente relacionadas con la química del hierro y con su eliminación de la fase acuosa (Health Canada, 2024).

La adsorción constituye otra alternativa de interés para la disminución de especies presentes en soluciones acuosas y puede realizarse utilizando materiales de diferente naturaleza. En los últimos años, el aprovechamiento de biomasa para producir materiales carbonosos ha recibido atención debido a la posibilidad de desarrollar superficies con porosidad y grupos funcionales capaces de establecer diferentes tipos de interacción con especies disueltas. La eficiencia de estos materiales depende de las características del precursor, de las condiciones de producción del adsorbente y de variables experimentales como pH, concentración inicial y

tiempo de contacto, aspectos que deben evaluarse conjuntamente para establecer el comportamiento real del sistema.

En el caso particular del Fe(III), la evaluación de un material adsorbente exige distinguir entre la retención atribuible a interacciones con la superficie y la disminución de hierro soluble ocasionada por cambios en su especiación. Esta diferenciación resulta especialmente necesaria cuando el adsorbente modifica el pH de la solución, debido a la elevada sensibilidad del Fe(III) frente a los procesos de hidrólisis y precipitación. Por ello, la interpretación de ensayos con biochar debe fundamentarse en la concentración residual, el comportamiento del pH y, cuando la metodología lo permita, técnicas adicionales que permitan caracterizar el hierro asociado con la fase sólida (Health Canada, 2024).

Esta base teórica resulta directamente pertinente para el diseño experimental de la investigación, debido a que la evaluación de biochar frente a Fe^{3+} requiere analizar simultáneamente las características del material carbonoso, la temperatura empleada para su obtención, el tiempo de contacto y las condiciones químicas de la solución. El estudio conjunto de estas variables permite interpretar la disminución de Fe(III) con mayor rigurosidad y proporciona el fundamento necesario para diferenciar entre una respuesta atribuible al material adsorbente y otros fenómenos fisicoquímicos que pueden desarrollarse durante el ensayo

8.4. Adsorción como Proceso de Tratamiento

8.4.1. Fundamentos del proceso de adsorción

La adsorción es un fenómeno superficial mediante el cual una especie presente en una fase líquida o gaseosa se concentra sobre la superficie de un material sólido. La sustancia retenida se denomina adsorbato, mientras que el sólido sobre el cual ocurre la interacción corresponde al adsorbente. A diferencia de la absorción, donde una sustancia penetra en el volumen de otra fase, la adsorción se desarrolla principalmente en la interfase entre el sólido y el medio que contiene al contaminante. La magnitud del proceso depende de las características superficiales del adsorbente, de la naturaleza química del adsorbato y de las condiciones del medio acuoso en el que ocurre la interacción (Mei et al., 2025).

En el tratamiento de agua, la adsorción presenta interés debido a que permite disminuir la concentración de especies disueltas mediante interacciones físicas o químicas con superficies sólidas. El comportamiento del proceso puede estar condicionado por variables como el pH, concentración inicial del adsorbato, dosis del adsorbente, temperatura, tiempo de contacto y presencia de iones coexistentes. Cuando se emplea biochar, también intervienen propiedades propias del material, entre ellas el área superficial específica, distribución de poros, carga

superficial, capacidad de intercambio catiónico y presencia de grupos funcionales capaces de interactuar con las especies presentes en solución (Mei et al., 2025; Wang et al., 2022).

La adsorción de especies metálicas sobre biochar no debe interpretarse como un proceso controlado necesariamente por un único mecanismo. La literatura describe la participación conjunta de llenado de poros, atracción electrostática, intercambio iónico, complejación superficial, interacciones con estructuras aromáticas y precipitación, cuya contribución relativa depende tanto del metal como de las propiedades del material carbonoso y de la química de la solución. Por ello, la disminución experimental de Fe(III) en presencia de biochar debe analizarse considerando varios fenómenos posibles y evitando atribuir un mecanismo específico cuando no se dispone de caracterización superficial que lo demuestre (Mei et al., 2025; Kumar et al., 2024).

8.4.2. Adsorción física y adsorción química

La adsorción física o fisisorción está asociada principalmente con interacciones intermoleculares relativamente débiles y no requiere necesariamente la formación de nuevos enlaces químicos entre adsorbato y adsorbente. En materiales carbonosos, la estructura porosa y el área superficial disponible pueden proporcionar espacios donde las especies presentes en solución se aproximan y retienen sobre la superficie. La porosidad del biochar constituye, por tanto, una propiedad relevante porque determina la accesibilidad física a diferentes regiones del material y la disponibilidad de superficie para que ocurran interacciones con los contaminantes (Mei et al., 2025).

La Quimisorción comprende interacciones de mayor especificidad asociadas con la química superficial del adsorbente. En el caso de especies metálicas, los grupos funcionales que contienen oxígeno pueden participar en procesos de complicación superficial, mientras que sitios de intercambio presentes en el material pueden favorecer el reemplazo de determinados cationes por especies metálicas provenientes de la solución. La literatura sobre biochar señala que grupos hidroxilo, carboxilo y carbonilo pueden contribuir a diferentes interacciones con contaminantes inorgánicos, aunque la abundancia y reactividad de estas funcionalidades dependen de la biomasa precursora y de las condiciones de producción del biochar (Zhu et al., 2022).

La distinción entre fisisorción y quimisorción resulta conceptualmente útil, pero en un biochar real ambos tipos de interacción pueden coexistir junto con otros fenómenos. La heterogeneidad química y estructural de estos materiales permite que diferentes regiones de su superficie presenten afinidades distintas por un mismo adsorbato. En consecuencia, establecer

que un proceso experimental corresponde exclusivamente a adsorción física o química requiere evidencia adicional obtenida mediante caracterización superficial, estudios termodinámicos, modelos cinéticos u otras técnicas complementarias, y no únicamente a partir del porcentaje de remoción obtenido (Mei et al., 2025).

8.4.3. Interacciones Entre Iones Metálicos y Superficies Carbonosas

La interacción entre especies metálicas y biochar puede involucrar diversos mecanismos que actúan simultáneamente. Entre los más descritos se encuentran la atracción electrostática, intercambio iónico, complicación superficial y precipitación, además de interacciones con dominios ricos en electrones de la estructura carbonosa. La contribución de cada mecanismo está determinada por la naturaleza del ion, el pH del sistema, la composición mineral del biochar, la carga superficial y la presencia de grupos funcionales reactivos (Wang et al., 2022; Mei et al., 2025).

La complicación superficial adquiere particular relevancia cuando el biochar conserva grupos funcionales oxigenados. Funcionalidades como hidroxilos, carboxilos y cetonas pueden participar en interacciones con especies inorgánicas y modificar su afinidad por la superficie. La conservación de grupos hidroxilo y carboxilo se ha asociado especialmente con condiciones de producción de menor severidad térmica, mientras que el incremento de la temperatura de pirólisis puede modificar su abundancia como consecuencia de reacciones de deshidratación, descarboxilación y reorganización de la matriz carbonosa (Zhu et al., 2022).

El intercambio iónico representa otro mecanismo mediante el cual cationes asociados inicialmente con la superficie o con la fracción mineral del biochar pueden ser sustituidos por especies metálicas presentes en la solución. Paralelamente, la composición mineral del material puede favorecer reacciones que conduzcan a la formación de fases poco solubles. Por esta razón, los mecanismos de eliminación de especies metálicas mediante biochar dependen tanto de la fracción carbonosa como de los componentes inorgánicos presentes en el adsorbente (Mei et al., 2025; Wang et al., 2022).

Para Fe(III), esta interpretación requiere una consideración adicional: la disminución de hierro en solución puede estar acompañada por procesos de hidrólisis y precipitación dependientes del pH. En consecuencia, aunque la superficie del biochar disponga de sitios potencialmente capaces de interactuar con especies férricas, una disminución de la concentración residual no constituye por sí sola una demostración de adsorción superficial. Esta distinción será fundamental al interpretar los ensayos experimentales de la presente

investigación, especialmente cuando el contacto con el biochar produzca modificaciones del pH del sistema.

8.4.4. Influencia del Ph en la Adsorción

El pH constituye una de las variables más influyentes en la adsorción de especies metálicas debido a que modifica simultáneamente la carga superficial del adsorbente y la forma química del adsorbato. Los grupos funcionales presentes en el biochar pueden protonarse o desprotonarse según las condiciones ácido-base del medio, generando cambios en la afinidad electrostática de la superficie por las especies cargadas. Por esta razón, materiales químicamente idénticos pueden presentar comportamientos de adsorción diferentes cuando son evaluados bajo distintos valores de pH (Mei et al., 2025).

En medios fuertemente ácidos, una mayor protonación de determinados grupos superficiales puede reducir la disponibilidad de sitios con carga negativa capaces de interactuar con especies catiónicas. Conforme aumenta el pH, la desprotonación de grupos funcionales puede favorecer determinadas interacciones entre la superficie del biochar y los cationes presentes en solución. Sin embargo, esta tendencia no debe generalizarse sin considerar la especiación del contaminante, porque un cambio de pH también puede modificar la forma química y la solubilidad del metal (Kumar et al., 2024; Mei et al., 2025).

Esta consideración resulta particularmente crítica para Fe(III). Como se desarrolló anteriormente, el incremento del pH favorece su hidrólisis y puede conducir a la formación de especies poco solubles. Por ello, cuando un biochar aumenta el pH de una solución que contiene Fe(III), la reducción de la concentración soluble puede resultar de la combinación entre interacciones superficiales y procesos de hidrólisis o precipitación. El seguimiento del pH durante los ensayos constituye, en consecuencia, una variable necesaria para interpretar el comportamiento del sistema con rigor químico y evitar que toda disminución de hierro sea atribuida automáticamente a adsorción.

8.4.5. Influencia del Tiempo de Contacto

El tiempo de contacto determina la duración de la interacción entre el adsorbente y las especies presentes en solución y permite estudiar la evolución temporal del proceso. En numerosos sistemas adsorbentes se registra inicialmente una etapa rápida relacionada con una mayor disponibilidad de sitios superficiales accesibles, seguida por una fase de menor velocidad conforme estos sitios se ocupan y el sistema se aproxima a una condición de equilibrio. Sin embargo, la forma exacta de esta evolución depende del material, del adsorbato y de las condiciones experimentales utilizadas (Mei et al., 2025; Kumar et al., 2024).

La evaluación de diferentes tiempos permite determinar si la concentración residual disminuye progresivamente, alcanza una región relativamente estable o presenta variaciones posteriores. Una reducción inicial seguida por estabilidad puede ser compatible con la aproximación al equilibrio, mientras que incrementos posteriores de la concentración requieren analizar posibles procesos de desorción, cambios en la especiación, heterogeneidad experimental u otros fenómenos antes de establecer una explicación mecanística. Por esta razón, el tiempo de equilibrio no debe asignarse únicamente seleccionando el punto con menor concentración, sino evaluando la tendencia completa y, cuando existen réplicas, su variabilidad estadística (Mei et al., 2025).

Los modelos cinéticos constituyen herramientas utilizadas para describir matemáticamente la evolución de la adsorción con el tiempo. Entre los modelos frecuentemente empleados en estudios con biochar se encuentran los de pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden, además de aproximaciones relacionadas con difusión intraparticular. No obstante, un buen ajuste matemático a un determinado modelo no demuestra por sí solo el mecanismo molecular responsable de la adsorción; su utilización debe considerarse principalmente como una descripción del comportamiento cinético experimental (Mei et al., 2025; Zhang et al., 2024).

8.4.6. Influencia de la Concentración Inicial del Adsorbato

La concentración inicial establece la cantidad de adsorbato disponible para interactuar con una determinada masa de adsorbente y constituye una variable fundamental para evaluar el desempeño de los materiales. Cuando la concentración aumenta, también puede incrementarse la fuerza impulsora para la transferencia de masa desde la solución hacia la superficie; sin embargo, debido a que el número de sitios disponibles es finito, el porcentaje de remoción y la capacidad de adsorción no necesariamente varían de forma proporcional. Por esta razón, la concentración inicial debe especificarse siempre al comparar el desempeño de diferentes biochars (Mei et al., 2025).

Las comparaciones entre estudios deben realizarse con precaución cuando las concentraciones iniciales, masas de adsorbente, volúmenes de solución, valores de pH o tiempos de contacto son diferentes. Un material que alcanza un porcentaje elevado de remoción a baja concentración inicial no puede considerarse automáticamente superior a otro evaluado bajo una carga contaminante considerablemente mayor. La capacidad de adsorción expresada por unidad de masa del adsorbente proporciona información complementaria que permite

realizar comparaciones más rigurosas cuando se conocen las condiciones experimentales necesarias para calcularla (Kumar et al., 2024).

8.4.7. Porcentaje de Remoción y Capacidad de Adsorción

El porcentaje de remoción permite expresar la fracción de contaminante que deja de encontrarse en la fase líquida respecto de su concentración inicial. Para un ensayo por lotes puede calcularse mediante la relación:

$$R(\%) = \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100$$

donde C_o representa la concentración inicial del adsorbato y C_t corresponde a la concentración determinada después de un tiempo de contacto específico. Este parámetro facilita la comparación del comportamiento temporal entre tratamientos siempre que las condiciones iniciales sean equivalentes (Mei et al., 2025).

La cantidad adsorbida por unidad de masa del material en un tiempo determinado puede expresarse mediante q_t :

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

donde q_t corresponde generalmente a la cantidad retenida por unidad de masa de adsorbente, V es el volumen de la solución y m representa la masa de biochar utilizada. Cuando el sistema alcanza una condición de equilibrio, la concentración residual puede expresarse como C_e y la capacidad correspondiente como q_e . Estos parámetros son utilizados ampliamente para analizar y comparar el comportamiento de materiales adsorbentes (Mei et al., 2025; Zhang et al., 2024).

En los ensayos con Fe(III), sin embargo, el porcentaje de disminución calculado a partir de la concentración residual debe interpretarse con precaución cuando no se ha demostrado que el cambio corresponda exclusivamente a adsorción. Si simultáneamente ocurren hidrólisis, precipitación u otras transformaciones, el término remoción aparente de Fe(III) puede resultar metodológicamente más apropiado hasta disponer de evidencia que permita establecer el mecanismo dominante. Esta precisión conceptual permitirá que la discusión de los resultados de la presente investigación mantenga coherencia entre los datos obtenidos y el alcance real de las técnicas empleadas.

8.5. Biochar Como Material Adsorbente

8.5.1. Definición y Características del Biochar

El biochar es un material sólido rico en carbono obtenido mediante la transformación termoquímica de biomasa bajo condiciones de disponibilidad limitada de oxígeno. Su estructura y composición dependen directamente de la materia prima utilizada y de las condiciones aplicadas durante el proceso térmico, especialmente la temperatura de pirólisis, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia. Estas variables determinan características como el contenido de carbono, porosidad, área superficial, pH, fracción mineral y naturaleza de los grupos funcionales presentes en la superficie del material (Chen et al., 2022; Ambaye et al., 2022).

El interés ambiental del biochar está relacionado con la combinación de propiedades físicas y químicas que puede desarrollar durante su producción. La estructura porosa proporciona superficie disponible para la interacción con especies presentes en solución, mientras que los grupos funcionales superficiales y los componentes minerales pueden participar en procesos de complejación, intercambio iónico, atracción electrostática y precipitación. Sin embargo, la contribución de cada mecanismo varía entre materiales, por lo que dos biochars producidos a partir de materias primas diferentes no deben considerarse químicamente equivalentes aun cuando hayan sido preparados a la misma temperatura (Wang et al., 2022; Xie et al., 2025).

La utilización de biochar en el tratamiento de soluciones acuosas también responde al interés por valorizar materiales vegetales y residuos de biomasa mediante su conversión en productos con aplicaciones ambientales. Residuos agrícolas, materiales forestales, estiércoles y otras biomásas lignocelulósicas han sido empleados como precursores, obteniéndose materiales con propiedades diferentes según su composición inicial. Esta variabilidad demuestra que la selección del precursor constituye una etapa determinante en el diseño de un biochar destinado a la retención de especies metálicas en agua (Chen et al., 2022; Hassan et al., 2020).

8.5.2. Materias Primas Utilizadas para la Producción de Biochar

La biomasa empleada para producir biochar está constituida principalmente por componentes estructurales como celulosa, hemicelulosa y lignina, además de extractivos, sustancias minerales y diferentes compuestos orgánicos presentes en los tejidos vegetales. La proporción de estos componentes varía según la especie y el órgano considerado, condicionando la respuesta de la materia prima durante el calentamiento. La celulosa y la hemicelulosa experimentan una degradación térmica importante dentro de intervalos

relativamente moderados de temperatura, mientras que la lignina presenta una degradación más amplia y progresiva, contribuyendo a la formación de la matriz carbonosa residual (Chen et al., 2025).

La composición del precursor influye posteriormente en propiedades como rendimiento de biochar, contenido de cenizas, estructura porosa, composición elemental y presencia de funcionalidades superficiales. Por esta razón, el tipo de biomasa puede modificar sustancialmente el comportamiento adsorbente del material final. Una biomasa con determinada composición lignocelulósica y mineral puede generar un biochar diferente de otro precursor sometido exactamente a las mismas condiciones térmicas, lo que explica la necesidad de considerar conjuntamente materia prima y temperatura de pirólisis al comparar materiales carbonosos (Chen et al., 2025; Obey et al., 2024).

En el caso de *Lupinus mutabilis* Sweet, esta relación resulta particularmente pertinente porque los diferentes órganos de la planta no presentan necesariamente la misma composición química. La caracterización fitoquímica previa permite reconocer diferencias entre hoja, tallo, raíz y fruto, mientras que la selección posterior de determinadas fracciones para la producción del biochar permite evaluar si dichas diferencias del precursor coinciden con cambios en el comportamiento del material carbonizado. Sin embargo, esta relación debe establecerse mediante evidencia experimental, ya que la composición fitoquímica inicial no permite predecir por sí sola las propiedades finales desarrolladas después del pirólisis (Hassan et al., 2020; Chen et al., 2025).

8.5.3. Producción de Biochar Mediante Pirólisis

El pirólisis consiste en la descomposición termoquímica de la biomasa bajo condiciones de ausencia o disponibilidad limitada de oxígeno. Durante el proceso, los constituyentes orgánicos experimentan reacciones sucesivas de deshidratación, despolimerización, fragmentación, descarboxilación y condensación, generándose una fracción gaseosa, productos líquidos condensables y una fracción sólida carbonosa correspondiente al biochar. La distribución relativa de estos productos depende principalmente de la temperatura, velocidad de calentamiento, tiempo de residencia y características químicas de la biomasa utilizada (Chen et al., 2022; Chen et al., 2025).

Durante el pirólisis también ocurre una modificación progresiva de la relación entre carbono, hidrógeno y oxígeno del material. Conforme aumenta la severidad térmica, se eliminan progresivamente compuestos volátiles y estructuras que contienen oxígeno, mientras se favorece la formación de una matriz carbonosa más condensada y aromática. Estas

transformaciones explican por qué la temperatura constituye uno de los parámetros de producción más relevantes cuando el objetivo es obtener un biochar destinado a procesos de adsorción (Obey et al., 2024; Chen et al., 2025).

El pirólisis no debe interpretarse únicamente como un proceso destinado a incrementar la cantidad de carbono del material. La transformación térmica modifica simultáneamente la porosidad, la composición mineral, el pH, la carga superficial y los grupos funcionales disponibles para interactuar con sustancias presentes en el agua. En consecuencia, seleccionar una temperatura de producción implica buscar un equilibrio entre propiedades físicas, como el desarrollo de superficie y porosidad, y propiedades químicas, como la conservación o formación de sitios superficiales reactivos (Wang et al., 2022; Obey et al., 2024).

8.5.4. Influencia de la Temperatura de Pirólisis

La temperatura de pirólisis ejerce una influencia directa sobre las propiedades fisicoquímicas del biochar. De manera general, el incremento de la temperatura favorece la pérdida de materia volátil, aumenta el grado de carbonización y aromaticidad y puede promover el desarrollo de porosidad y área superficial. Paralelamente, la eliminación progresiva de oxígeno modifica la cantidad y naturaleza de los grupos funcionales superficiales, por lo que un material producido a mayor temperatura no necesariamente presenta mayor capacidad para retener todas las especies metálicas (Obey et al., 2024; Cai et al., 2026).

Los biochars obtenidos a temperaturas relativamente moderadas pueden conservar una proporción mayor de funcionalidades superficiales oxigenadas relacionadas con estructuras hidroxilo, fenólicas y carboxílicas. Estas funcionalidades pueden participar en interacciones químicas con especies inorgánicas, mientras que el incremento de la temperatura favorece procesos de desoxigenación y condensación de la matriz carbonosa. Por otra parte, temperaturas superiores pueden incrementar el área superficial y la microporosidad, de modo que existe un compromiso entre el desarrollo estructural del material y la conservación de grupos superficiales químicamente reactivos (Xie et al., 2025; Chen et al., 2025).

Esta relación explica por qué no existe una temperatura universalmente óptima para producir biochar destinado a la adsorción de especies metálicas. La condición más favorable depende de la biomasa, del contaminante, de la química de la solución y del mecanismo predominante de retención. Una revisión reciente sobre biochar derivado de residuos agrícolas señala que la temperatura modifica propiedades como área superficial, microporosidad, pH, aromaticidad, capacidad de intercambio y contenido de sustancias volátiles, produciendo respuestas diferentes frente a distintos metales (Obey et al., 2024).

Por este motivo, la evaluación experimental de diferentes temperaturas constituye una estrategia metodológica apropiada cuando se trabaja con un precursor poco estudiado. En la presente investigación, la comparación entre biochars producidos a 350, 400 y 450 °C permitirá determinar el comportamiento del material dentro de un intervalo moderado de carbonización y establecer si las modificaciones producidas por la temperatura se reflejan en diferencias en la disminución de Fe(III). La interpretación posterior deberá considerar que la temperatura modifica simultáneamente varias propiedades del biochar y que, sin caracterización superficial complementaria, no es posible atribuir las diferencias observadas a una única propiedad (Chen et al., 2025; Obey et al., 2024).

8.5.5. Porosidad y Área Superficial

La estructura porosa del biochar se desarrolla como consecuencia de la transformación térmica y de la liberación de sustancias volátiles presentes inicialmente en la biomasa. Durante el pirólisis se generan cavidades y canales de diferentes dimensiones que pueden incrementar la superficie accesible del material. La magnitud de este desarrollo depende tanto de la estructura original del precursor como de las condiciones de carbonización, por lo que la porosidad constituye una propiedad variable y no una característica uniforme de todos los biochars (Chen et al., 2025).

El área superficial específica constituye un parámetro frecuentemente utilizado para caracterizar materiales adsorbentes, ya que una superficie accesible elevada puede proporcionar un mayor número de regiones disponibles para la interacción con los adsorbatos. Sin embargo, una mayor área superficial no garantiza por sí sola una mayor retención de especies metálicas, debido a que la química superficial, la distribución de tamaños de poro, la accesibilidad de los sitios y la composición mineral también participan en el proceso. En adsorción de especies inorgánicas, los grupos funcionales y la capacidad de intercambio pueden adquirir una importancia comparable o superior a la superficie física disponible (Wang et al., 2022; Chen et al., 2025).

La caracterización cuantitativa del área superficial y la distribución de poros suele realizarse mediante técnicas de adsorción de gases y modelos como Brunauer-Emmett-Teller (BET). Cuando esta caracterización no forma parte del diseño experimental, las diferencias en porosidad entre biochars producidos a distintas temperaturas pueden discutirse a partir de tendencias reportadas en la literatura, pero no deben presentarse como propiedades directamente demostradas para el material estudiado. Esta precisión resulta necesaria para diferenciar las características efectivamente medidas de aquellas utilizadas únicamente como

hipótesis explicativas respaldadas por antecedentes científicos (Chen et al., 2025; Wang et al., 2022).

8.5.6. Grupos Funcionales Superficiales

La superficie del biochar puede contener diferentes grupos funcionales derivados de la transformación incompleta y reorganización de los componentes de la biomasa. Entre las funcionalidades que contienen oxígeno se encuentran grupos hidroxilo, carboxilo, carbonilo, éter y otras estructuras cuya abundancia depende del precursor y de las condiciones de pirólisis. Estas funcionalidades son relevantes para aplicaciones ambientales porque pueden modificar la carga superficial, la afinidad por especies disueltas y la capacidad del material para participar en procesos de complejación o intercambio (Zhang et al., 2024; Xie et al., 2025).

Los grupos funcionales superficiales no permanecen constantes conforme aumenta la temperatura de pirólisis. Las reacciones de deshidratación, descarboxilación y desoxigenación pueden disminuir determinadas funcionalidades oxigenadas, mientras que simultáneamente se incrementa el grado de condensación de la estructura carbonosa. Estudios recientes confirman que la selección de la biomasa, temperatura, atmósfera y velocidad de calentamiento interviene directamente en la formación y transformación de los grupos funcionales oxigenados del biochar (Zhang et al., 2024).

Esta característica proporciona un vínculo conceptual con la caracterización fitoquímica desarrollada previamente. Una biomasa que contiene compuestos ricos en grupos oxigenados presenta una composición inicial diferente de otra biomasa donde predominan estructuras químicas distintas; sin embargo, la pirólisis transforma estos constituyentes y genera una nueva superficie carbonosa. En consecuencia, los metabolitos secundarios pueden utilizarse para caracterizar el precursor, mientras que técnicas como FTIR o XPS serían necesarias para establecer directamente qué grupos funcionales se encuentran presentes después de la carbonización (Zhang et al., 2024; Xie et al., 2025).

8.5.7. Grupos Hidroxilo, Carboxilo y Otras Funcionalidades Oxigenadas

Los grupos hidroxilo ($-\text{OH}$) y carboxilo ($-\text{COOH}$) forman parte de las funcionalidades oxigenadas que pueden encontrarse en la superficie de biochars producidos a partir de biomasa. Dependiendo del pH, estas estructuras pueden experimentar procesos de protonación y desprotonación que modifican la carga y reactividad de la superficie. En sistemas que contienen especies metálicas, los átomos de oxígeno presentes en estos grupos pueden participar en interacciones superficiales y procesos de coordinación, aunque su contribución relativa depende

de la naturaleza del material y de las condiciones de la solución (Zhang et al., 2024; Xie et al., 2025).

Los grupos fenólicos resultan particularmente relevantes para la conexión entre el estudio fitoquímico y el biochar, debido a que metabolitos como los taninos y flavonoides contienen múltiples grupos –OH en la biomasa original. No obstante, la identificación de estos metabolitos antes del pirólisis no demuestra que sus grupos hidroxilo permanezcan en la misma cantidad ni estructura después de la carbonización. La temperatura modifica progresivamente las funcionalidades oxigenadas y, por ello, la relación entre contenido fitoquímico y comportamiento adsorbente debe plantearse como una posible influencia de la composición del precursor sobre el material resultante, no como conservación directa de los metabolitos originales (Zhang et al., 2024; Chen et al., 2025).

Este razonamiento será especialmente útil al interpretar diferencias entre biochars obtenidos de órganos de *L. mutabilis* Sweet con perfiles fitoquímicos distintos. Si un precursor presenta mayor intensidad de taninos, saponinas u otros metabolitos, dicha característica puede utilizarse para describir diferencias químicas iniciales entre las biomásas. Sin embargo, cualquier afirmación acerca de una mayor cantidad de –OH, –COOH u otros sitios activos en el biochar final requeriría caracterización directa del material, evitando establecer una relación causal que no haya sido demostrada experimentalmente (Xie et al., 2025; Zhang et al., 2024).

8.5.8. Biochar para la Remoción de Especies Metálicas en Agua

La aplicación de biochar para disminuir especies metálicas presentes en soluciones acuosas se fundamenta en la coexistencia de mecanismos físicos y químicos. Dependiendo del sistema, pueden participar adsorción superficial, intercambio iónico, atracción electrostática, complejación con grupos funcionales y formación de precipitados asociados con componentes minerales del material. La importancia relativa de estos procesos depende de la especie metálica estudiada, del precursor, de la temperatura de pirólisis y de variables de la solución como pH y concentración inicial (Wang et al., 2022; Chen et al., 2025).

La literatura demuestra que modificar las condiciones de producción puede cambiar considerablemente la capacidad del biochar para interactuar con especies metálicas. Los materiales producidos a temperaturas menores pueden presentar mayor abundancia relativa de determinadas funcionalidades oxigenadas, mientras que aquellos preparados a temperaturas superiores suelen desarrollar mayor aromaticidad, estabilidad y, en determinados casos, mayor área superficial y microporosidad. Por esta razón, la eficiencia final depende del equilibrio entre

propiedades físicas, químicas y minerales y no puede predecirse exclusivamente a partir de la temperatura de producción (Ambaye et al., 2022; Obey et al., 2024).

Para el caso de Fe(III), el comportamiento debe analizarse con una precaución adicional debido a su elevada sensibilidad al pH. Las interacciones entre Fe(III) y los grupos superficiales del biochar pueden contribuir a su disminución en la fase acuosa; sin embargo, un incremento del pH también puede favorecer hidrólisis y formación de fases poco solubles de hierro. En consecuencia, la disminución de la concentración residual durante un ensayo con biochar puede representar la contribución simultánea de diferentes procesos, y la adsorción no debe considerarse el único mecanismo sin evidencia experimental complementaria.

La evaluación de biochars derivados de *L. mutabilis* Sweet frente a Fe(III) permite, por tanto, estudiar el efecto conjunto del tipo de biomasa, temperatura de pirólisis y tiempo de contacto sobre el comportamiento del sistema. La comparación experimental de materiales producidos a 350, 400 y 450 °C permitirá identificar la condición de mayor desempeño dentro del intervalo evaluado, mientras que la caracterización fitoquímica previa proporcionará información complementaria sobre las diferencias químicas existentes entre los precursores. La interpretación deberá integrar ambas fuentes de información sin asumir que los metabolitos originales permanecen intactos en la superficie carbonizada (Chen et al., 2025; Zhang et al., 2024).

8.6. Relación Entre la Composición Fitoquímica del Precursor y las Propiedades del Biochar

8.6.1. Transformación Térmica De Los Constituyentes Vegetales

La biomasa vegetal constituye una matriz química compleja formada principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, acompañadas por proteínas, lípidos, minerales, extractivos y metabolitos secundarios cuya proporción depende de la especie y del órgano vegetal. Esta composición inicial condiciona el comportamiento de la materia prima durante el pirólisis, debido a que cada fracción presenta diferente estabilidad térmica y genera productos distintos durante su degradación. En consecuencia, las propiedades del biochar resultante no dependen exclusivamente de la temperatura de carbonización, sino también de las características químicas y estructurales del precursor utilizado (Chen et al., 2025).

Durante el pirólisis, la biomasa experimenta procesos simultáneos de deshidratación, despolimerización, ruptura de enlaces, descarboxilación, descarbonilación y condensación, que producen la liberación progresiva de agua, gases y compuestos orgánicos volátiles. La celulosa y la hemicelulosa experimentan transformaciones importantes aproximadamente dentro del

intervalo de 200–500 °C, mientras que la degradación de la lignina ocurre en un intervalo térmico más amplio. Como consecuencia, el material sólido residual incrementa progresivamente su proporción de carbono y desarrolla una estructura química diferente a la biomasa de partida (Chen et al., 2025).

La temperatura utilizada durante el pirólisis también modifica la conservación de elementos como oxígeno, hidrógeno y nitrógeno en el material carbonizado. Los biochars obtenidos a temperaturas relativamente moderadas pueden mantener una mayor proporción de determinadas funcionalidades oxigenadas, mientras que el incremento de la temperatura favorece la eliminación progresiva de oxígeno y la formación de estructuras carbonosas más condensadas. Por esta razón, la temperatura de pirólisis representa una variable determinante para controlar simultáneamente la estructura física y la química superficial del material (Zhang et al., 2024).

8.6.2. Compuestos polifenólicos y grupos hidroxilo

Los compuestos polifenólicos se caracterizan por poseer uno o varios anillos aromáticos sustituidos por grupos hidroxilo, siendo los taninos y flavonoides dos grupos representativos dentro de esta categoría. La abundancia de grupos –OH en estas estructuras determina una parte importante de su comportamiento químico y permite utilizarlos como indicadores de la presencia de funcionalidades oxigenadas en la biomasa original. Por ello, la caracterización de metabolitos de naturaleza fenólica aporta información útil para diferenciar químicamente los órganos vegetales que posteriormente pueden utilizarse como precursores de biochar.

La relación entre los compuestos polifenólicos presentes en una biomasa y las propiedades del biochar resultante no debe interpretarse como una conservación directa de las moléculas originales. Durante el calentamiento, las estructuras fenólicas experimentan ruptura de enlaces, deshidroxilación, condensación y otras transformaciones termoquímicas; simultáneamente, parte de sus constituyentes puede incorporarse a productos volátiles o participar en la formación de la matriz carbonosa. Estudios recientes muestran que incluso diferencias en el contenido inicial de taninos de una biomasa pueden modificar las características de los productos obtenidos mediante pirólisis, lo que demuestra la influencia de la composición del precursor sobre el proceso termoquímico (Santos et al., 2026).

En el biochar resultante pueden encontrarse funcionalidades oxigenadas como grupos hidroxilo (–OH), carboxilo (–COOH), carbonilo (C=O), éter (C–O–C) y aldehído (–CHO). La naturaleza y abundancia de estas estructuras dependen de la composición inicial de la biomasa y de las condiciones de pirólisis, especialmente de la temperatura. Estas funcionalidades

adquieren relevancia ambiental porque los átomos de oxígeno pueden intervenir en interacciones superficiales con especies presentes en solución y contribuir a procesos como complejación, intercambio iónico y modificaciones de la carga superficial (Zhang et al., 2024).

8.6.3. Transformación de taninos, saponinas y alcaloides durante la carbonización

Los taninos constituyen una fracción especialmente interesante dentro de la composición fitoquímica debido a su estructura polifenólica y elevada presencia de grupos hidroxilo. Durante el pirólisis, estas moléculas no permanecen químicamente intactas, sino que experimentan degradación y reorganización conjuntamente con los demás constituyentes de la biomasa. Por esta razón, una biomasa con elevada presencia de taninos puede presentar un comportamiento termoquímico diferente respecto de otra con menor contenido, aunque la magnitud y naturaleza de dicha influencia dependen simultáneamente de la temperatura y de los demás componentes presentes en la matriz vegetal (Santos et al., 2026).

Las saponinas también presentan una estructura rica en funcionalidades oxigenadas, particularmente por la presencia de unidades glucosídicas. Sin embargo, estas estructuras orgánicas son susceptibles a degradación durante el tratamiento térmico, por lo que su identificación en la biomasa original no demuestra su permanencia en el material carbonizado. Desde la perspectiva de la producción de biochar, su utilidad en la presente investigación consiste principalmente en contribuir a la diferenciación química de los precursores antes del pirólisis, mientras que la identificación de grupos oxigenados en el producto final requeriría técnicas específicas de caracterización superficial (Zhang et al., 2024).

Los alcaloides presentan una característica diferente debido a la presencia de nitrógeno en sus estructuras. Durante el pirólisis, el nitrógeno procedente de los componentes de la biomasa puede sufrir transformaciones y encontrarse posteriormente en diferentes configuraciones dentro del biochar, entre ellas formas piridínicas, pirrólicas y cuaternarias. La distribución de estas funcionalidades depende de la materia prima y, especialmente, de la temperatura de pirólisis, por lo que la presencia inicial de compuestos nitrogenados constituye un antecedente composicional del precursor, pero no permite determinar directamente las especies nitrogenadas existentes en el biochar final (Leng et al., 2020; Leng et al., 2024).

Las funcionalidades nitrogenadas desarrolladas durante el pirólisis pueden modificar las propiedades químicas de la superficie carbonosa y participar en diferentes aplicaciones ambientales del biochar. No obstante, la transformación del nitrógeno durante el calentamiento es compleja y depende no solamente de los metabolitos secundarios, sino también de proteínas, aminoácidos y otros constituyentes nitrogenados de la biomasa. Por ello, no resulta

metodológicamente correcto asumir que una mayor intensidad de alcaloides en el análisis fitoquímico equivale necesariamente a una mayor cantidad de grupos nitrogenados activos en el biochar producido (Leng et al., 2020; Leng et al., 2024).

8.6.4. Influencia de la composición del precursor sobre la química superficial del biochar

La selección de la biomasa constituye una de las variables fundamentales para controlar las propiedades del biochar. Un metaanálisis basado en más de quinientos conjuntos de datos demostró que tanto el tipo de precursor como la temperatura de pirólisis influyen en características como área superficial, pH, contenido elemental, polaridad, estabilidad y comportamiento como adsorbente. En consecuencia, las diferencias químicas entre distintas partes de una misma planta pueden adquirir relevancia cuando estas se emplean separadamente para producir materiales carbonosos (Hassan et al., 2020).

La composición lignocelulósica también interviene directamente en el desarrollo de las propiedades superficiales. La transformación térmica de celulosa y hemicelulosa dentro de intervalos moderados de temperatura puede contribuir al desarrollo de poros y funcionalidades oxigenadas, mientras que la lignina presenta una degradación más progresiva y participa de manera importante en la formación de estructuras carbonosas aromáticas. La combinación de estos constituyentes determina, por tanto, la evolución estructural del biochar durante el calentamiento (Chen et al., 2025).

Además de los componentes lignocelulósicos, la composición elemental del precursor condiciona la química del producto carbonizado. Una revisión reciente sobre grupos funcionales oxigenados señala que biomásas con mayor contenido inicial de oxígeno pueden producir biochars con diferencias en el contenido y distribución de funcionalidades oxigenadas, aunque una fracción considerable del oxígeno se pierde durante el pirólisis. De esta manera, existe una relación entre la naturaleza química del precursor y la superficie resultante, pero dicha relación está mediada por las condiciones del proceso térmico (Zhang et al., 2024).

Esta relación permite fundamentar la caracterización fitoquímica previa de *Lupinus mutabilis* Sweet. La identificación de taninos, saponinas, alcaloides, flavonoides, cumarinas y esteroides/triterpenos permite establecer diferencias químicas entre los órganos vegetales antes del pirólisis; posteriormente, la evaluación de los biochars permite determinar si esas diferencias coinciden con comportamientos distintos frente al Fe(III). No obstante, la caracterización fitoquímica debe considerarse una variable descriptiva del precursor y no una medición de los sitios activos presentes en el material carbonizado, cuya determinación directa requeriría técnicas como FTIR, XPS o análisis elemental (Zhang et al., 2024; Leng et al., 2024).

8.6.5. Posibles mecanismos de interacción entre biochar y Fe^{3+}

Las funcionalidades oxigenadas presentes en la superficie del biochar pueden intervenir en la interacción con especies metálicas mediante diferentes mecanismos. Los grupos hidroxilo, carbonilo y carboxilo contienen átomos de oxígeno con pares electrónicos capaces de participar en procesos de coordinación superficial, mientras que la protonación o desprotonación de estos grupos modifica la carga del material y puede favorecer o limitar determinadas interacciones electrostáticas. La literatura especializada señala que la retención de especies metálicas mediante biochar generalmente resulta de la combinación de complejación superficial, intercambio iónico, interacciones electrostáticas y otros procesos dependientes de la composición del material (Xie et al., 2025).

Las funcionalidades que contienen nitrógeno también pueden modificar la reactividad superficial del biochar. Durante el pirólisis pueden generarse estructuras nitrogenadas de distinta naturaleza cuya abundancia está condicionada por la materia prima y la temperatura de producción. Estas funcionalidades han sido relacionadas con procesos de adsorción y otras aplicaciones ambientales, aunque su presencia y contribución deben confirmarse mediante caracterización del material y no inferirse únicamente a partir de la composición nitrogenada de la biomasa original (Leng et al., 2020; Leng et al., 2024).

En el caso específico del Fe^{3+} , una posible interacción con grupos superficiales oxigenados puede involucrar procesos de coordinación o complejación; sin embargo, el comportamiento del Fe(III) en agua obliga a considerar simultáneamente su hidrólisis y dependencia del pH. Por esta razón, una disminución de la concentración de hierro después del contacto con biochar no permite demostrar por sí sola que haya ocurrido exclusivamente adsorción sobre grupos $-OH$ o $-COOH$. La identificación del mecanismo dominante requeriría integrar la concentración residual con información sobre pH, composición superficial del biochar y, de ser posible, caracterización del sólido antes y después del tratamiento (Xie et al., 2025).

En consecuencia, la relación conceptual que sustenta la presente investigación no plantea que los taninos, saponinas o alcaloides originales sean directamente responsables de la retención de Fe^{3+} . La hipótesis teórica consiste en que las diferencias en la composición química de los precursores pueden influir en las características del biochar desarrollado durante la pirólisis y, posteriormente, en su comportamiento frente al Fe(III). Esta formulación permite integrar la caracterización fitoquímica y los ensayos con biochar sin establecer relaciones

causales que no hayan sido demostradas mediante técnicas específicas de caracterización superficial (Hassan et al., 2020; Zhang et al., 2024; Xie et al., 2025).

La comparación entre diferentes temperaturas de pirólisis también adquiere sentido dentro de esta relación. En intervalos térmicos moderados puede existir un equilibrio entre el desarrollo de la estructura carbonosa y la conservación de determinadas funcionalidades superficiales, mientras que temperaturas superiores favorecen una mayor condensación y transformación química del material. Por ello, la temperatura que produzca el mejor comportamiento frente a Fe(III) debe determinarse experimentalmente y no establecerse únicamente a partir de tendencias generales de la literatura, debido a que el resultado final depende de la interacción entre precursor, temperatura y condiciones de adsorción (Chen et al., 2025; Zhang et al., 2024).

8.7. Espectrofotometría UV-Visible para la determinación de Fe(III)

8.7.1. Fundamento de la espectrofotometría UV-Visible

La espectrofotometría ultravioleta-visible (UV-Visible) es una técnica analítica basada en la interacción de la radiación electromagnética con las especies químicas presentes en una muestra. Cuando una solución es irradiada dentro de las regiones ultravioleta y visible del espectro, determinadas especies pueden absorber energía a longitudes de onda específicas como consecuencia de transiciones electrónicas. La cantidad de radiación absorbida puede registrarse instrumentalmente y relacionarse con la concentración de la especie responsable de la absorción, lo que permite utilizar esta técnica tanto para análisis cualitativos como cuantitativos (International Union of Pure and Applied Chemistry [IUPAC], 1988).

En un espectrofotómetro UV-Visible, la radiación seleccionada atraviesa una celda que contiene la solución problema y el equipo compara la potencia radiante incidente con aquella que emerge después de atravesar la muestra. La fracción transmitida constituye la transmitancia, mientras que la absorbancia expresa logarítmicamente la relación entre la radiación incidente y la transmitida. Debido a esta relación, un incremento de la cantidad de especie absorbente dentro de determinados límites produce un aumento de la absorbancia registrada, principio que constituye la base de la cuantificación espectrofotométrica (IUPAC, 2025).

La selección de la longitud de onda constituye una etapa relevante del procedimiento analítico debido a que la sensibilidad de la medición depende de la capacidad de la especie estudiada para absorber radiación en la región seleccionada. Para el análisis cuantitativo, la absorbancia puede medirse a una o más longitudes de onda y posteriormente relacionarse con la concentración mediante la ley de Beer-Lambert o mediante una función de calibración

construida utilizando soluciones de concentración conocida. Esta metodología permite determinar concentraciones desconocidas a partir de la respuesta instrumental obtenida bajo condiciones analíticas equivalentes (IUPAC, 1988).

8.7.2. Ley de Beer-Lambert

La relación fundamental empleada en espectrofotometría de absorción molecular corresponde a la ley de Beer-Lambert, según la cual la absorbancia de una radiación monocromática que atraviesa un medio homogéneo es proporcional a la concentración de la especie absorbente y a la longitud del trayecto óptico recorrido por la radiación. Esta relación proporciona el fundamento matemático para convertir una señal de absorbancia en información cuantitativa sobre la concentración de un analito presente en una solución (IUPAC, 2025).

La ley puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$A = \epsilon b c$$

donde A representa la absorbancia, ϵ corresponde al coeficiente de absorción molar de la especie a una longitud de onda determinada, b representa la longitud del trayecto óptico de la celda y c corresponde a la concentración molar de la especie absorbente. Cuando la longitud de paso óptico y las condiciones instrumentales permanecen constantes, la absorbancia presenta una relación proporcional con la concentración dentro del intervalo en el cual se cumple adecuadamente la ley de Beer-Lambert (IUPAC, 2025).

La proporcionalidad establecida por esta ley se cumple bajo determinadas condiciones experimentales y no debe asumirse ilimitadamente para cualquier concentración. Entre los factores que pueden producir desviaciones se encuentran cambios químicos de la especie absorbente, concentraciones fuera del intervalo de respuesta lineal, radiación no suficientemente monocromática y fenómenos de dispersión. Por esta razón, en las determinaciones cuantitativas resulta necesario comprobar experimentalmente el comportamiento de la respuesta instrumental mediante soluciones patrón y establecer el intervalo de concentración dentro del cual el procedimiento presenta un desempeño adecuado (IUPAC, 1988, 2025).

8.7.3. Curva de calibración

La curva de calibración constituye la representación de la relación entre una respuesta instrumental y cantidades o concentraciones conocidas del analito. En espectrofotometría UV-Visible se preparan soluciones patrón dentro de un intervalo definido y se determina su absorbancia bajo las mismas condiciones instrumentales; posteriormente, las concentraciones

conocidas se relacionan con las respuestas obtenidas para establecer una función matemática que permita estimar la concentración de las muestras problema (IUPAC, 2025).

Cuando la relación entre concentración y absorbancia presenta un comportamiento lineal, la función de calibración puede expresarse mediante una ecuación de primer grado:

$$A = mC + b$$

donde A corresponde a la absorbancia, C representa la concentración del analito, m es la pendiente de la recta y b corresponde a la ordenada al origen. La pendiente constituye además una medida de la sensibilidad de la calibración, debido a que expresa la magnitud del cambio de la señal instrumental producido por una variación determinada en la concentración del analito (IUPAC, 2025).

La construcción adecuada de la curva requiere que las soluciones patrón representen el intervalo de concentración relevante para las muestras que posteriormente serán analizadas. La calibración no consiste únicamente en obtener una ecuación con elevado grado de asociación entre las variables, sino en comprobar que las respuestas experimentales de los patrones concuerden adecuadamente con las respuestas predichas por la función de calibración. La evaluación de residuos, errores de regresión y otros indicadores proporciona información adicional sobre la adecuación del modelo utilizado (IUPAC, 2025).

8.7.4. Determinación espectrofotométrica de Fe(III)

La espectrofotometría UV-Visible puede utilizarse para determinar especies de hierro cuando las condiciones químicas de la solución producen una respuesta de absorción reproducible y dependiente de la concentración. En este tipo de determinaciones resulta fundamental mantener constantes las condiciones de preparación de patrones y muestras, debido a que variables como pH, composición del medio y formación de especies químicas pueden modificar el espectro de absorción. Por esta razón, la cuantificación mediante una curva de calibración requiere que los patrones y las muestras problema sean tratados mediante condiciones analíticas comparables (IUPAC, 1988).

Para una solución problema cuya absorbancia se encuentra dentro del intervalo cubierto por la calibración, la concentración puede calcularse despejando la variable correspondiente de la ecuación de la recta. Si la función se expresa como $A = mC + b$, la concentración estimada se obtiene mediante:

$$C = \frac{A - b}{m}$$

Este procedimiento permite convertir la respuesta instrumental en una concentración estimada del analito, siempre que la medición corresponda al intervalo de aplicación de la

función de calibración y que se mantengan las condiciones analíticas bajo las cuales esta fue establecida (IUPAC, 1998, 2025).

Aplicado a un ensayo de tratamiento con biochar, el procedimiento permite comparar la concentración determinada antes y después del contacto entre la solución y el material carbonoso. La concentración obtenida después de cada intervalo experimental puede considerarse concentración residual de hierro en la fase analizada y utilizarse posteriormente para calcular su disminución relativa. Sin embargo, como se fundamentó en los apartados anteriores, una disminución espectrofotométrica de Fe(III) en la fase líquida no demuestra por sí misma que todo el hierro haya sido adsorbido sobre el biochar, debido a que su especiación química también puede modificarse durante el ensayo.

8.7.5. Linealidad y coeficiente de determinación

La linealidad de un sistema de medición expresa su capacidad para proporcionar valores medidos directamente proporcionales al valor de la magnitud analizada dentro de un intervalo establecido. En una calibración analítica, la evaluación de la linealidad busca determinar el grado de concordancia entre las señales obtenidas experimentalmente para los calibradores y aquellas predichas mediante la función de calibración. Por consiguiente, la linealidad debe establecerse para un intervalo definido y no considerarse una propiedad ilimitada del procedimiento instrumental (IUPAC, 2025).

El coeficiente de determinación, expresado habitualmente como R^2 , puede utilizarse como uno de los indicadores del ajuste del modelo de regresión, y valores próximos a la unidad reflejan una fuerte correspondencia entre los valores observados y los estimados mediante el modelo. Sin embargo, un valor elevado de R^2 no constituye por sí solo una demostración suficiente de linealidad analítica, debido a que la evaluación de la calibración también puede considerar el comportamiento de los residuos y el error de regresión. En consecuencia, el coeficiente de determinación debe interpretarse conjuntamente con la distribución de los puntos experimentales y el intervalo de concentraciones evaluado (IUPAC, 2025).

Esta precisión resulta relevante para la interpretación de los resultados obtenidos mediante UV-Visible, ya que una calibración con un elevado R^2 respalda el ajuste de los puntos experimentales al modelo empleado dentro del intervalo estudiado, pero no autoriza automáticamente la extrapolación de la ecuación hacia concentraciones considerablemente superiores o inferiores. La confiabilidad de una estimación es mayor cuando la respuesta de la

muestra se encuentra comprendida dentro del intervalo establecido por los calibradores utilizados durante el procedimiento analítico (IUPAC, 1998, 2025).

8.7.6. Intervalo de calibración y extrapolación

El intervalo lineal corresponde al conjunto de valores de la magnitud para los cuales el sistema de medición mantiene la respuesta proporcional requerida por el procedimiento. Cuando una muestra genera una señal fuera de dicho intervalo, utilizar directamente la ecuación obtenida supone una extrapolación y aumenta la incertidumbre asociada con la concentración calculada. En estos casos, una práctica analítica apropiada consiste en ajustar las condiciones de la muestra, por ejemplo, mediante una dilución correctamente cuantificada, para que la respuesta se encuentre dentro del intervalo cubierto por los patrones (IUPAC, 2025).

Esta consideración adquiere especial relevancia en estudios de remoción porque las concentraciones pueden cambiar considerablemente durante el contacto con el adsorbente. La curva de calibración debe cubrir, en la medida de lo posible, las concentraciones esperadas en las muestras antes y después del tratamiento; cuando esto no ocurre, las concentraciones calculadas fuera del intervalo deben interpretarse con cautela. Por ello, la calidad de una determinación espectrofotométrica depende tanto del ajuste de la curva como del diseño del intervalo de calibración y del control de las condiciones utilizadas durante el análisis (IUPAC, 1998).

8.7.7. Aplicación del análisis UV-Visible en ensayos con biochar

En estudios realizados mediante sistemas por lotes, la espectrofotometría permite determinar la variación temporal de la concentración de un analito después de poner una solución en contacto con una cantidad definida de adsorbente. Las mediciones efectuadas a diferentes tiempos proporcionan una serie de concentraciones residuales que permiten describir la evolución del sistema y calcular parámetros como porcentaje de remoción. La validez de esta comparación requiere mantener controladas las condiciones de preparación, medición y tratamiento de las muestras durante toda la secuencia experimental.

En la presente investigación, esta base analítica permite sustentar posteriormente la evaluación de la concentración residual de Fe(III) después del contacto con los biochars producidos a diferentes temperaturas. La curva de calibración constituye el vínculo matemático entre la absorbancia registrada instrumentalmente y la concentración estimada de hierro en cada muestra, mientras que la comparación temporal permite estudiar las diferencias entre los tratamientos. La interpretación final deberá integrar estos resultados con el pH, el tipo de

precursor y la temperatura de pirólisis, evitando considerar la respuesta espectrofotométrica como evidencia independiente de un mecanismo específico de adsorción.

8.8. Antecedentes científicos sobre biochar y remoción de Fe(III)

8.8.1. Biochar como adsorbente de especies metálicas en sistemas acuosos

Durante los últimos años, el biochar ha sido ampliamente investigado como material adsorbente para el tratamiento de aguas contaminadas debido a las características superficiales que puede desarrollar durante el pirólisis. La evidencia disponible muestra que su desempeño frente a especies metálicas está condicionado por la interacción entre la biomasa precursora, temperatura de carbonización, estructura porosa, composición mineral, grupos funcionales superficiales y condiciones fisicoquímicas de la solución. Por esta razón, la capacidad de retención no constituye una propiedad constante del biochar, sino una respuesta específica de cada sistema adsorbente–adsorbato (Viotti et al., 2024; Gotore et al., 2024).

La revisión desarrollada por Viotti et al. (2024) analizó experimentos de laboratorio que emplearon biochar producido a partir de diferentes precursores para la adsorción de especies metálicas en aguas subterráneas. Los autores identificaron diferencias considerables entre los materiales estudiados y señalaron que la naturaleza de la biomasa, las condiciones de pirólisis y las características del medio acuoso condicionan el desempeño observado. Estos antecedentes respaldan la necesidad de caracterizar experimentalmente cada biochar y evitar extrapolar directamente eficiencias obtenidas con una biomasa hacia materiales producidos a partir de precursores diferentes (Viotti et al., 2024).

Este planteamiento resulta directamente aplicable al uso de *Lupinus mutabilis* Sweet, debido a que se trata de un precursor cuya composición difiere de las biomásas agrícolas convencionalmente estudiadas. La caracterización fitoquímica de sus órganos y la posterior transformación mediante pirólisis permiten abordar experimentalmente esa variabilidad desde la composición inicial de la materia prima. En consecuencia, el desempeño frente al Fe(III) debe establecerse mediante los resultados obtenidos específicamente con el biochar de *L. mutabilis* y no mediante valores de capacidad de adsorción informados para otros materiales vegetales (Viotti et al., 2024; Gotore et al., 2024).

8.8.2. Influencia del precursor vegetal

La materia prima utilizada para producir biochar constituye una de las variables responsables de las diferencias encontradas entre materiales adsorbentes. Las biomásas agrícolas presentan proporciones diferentes de celulosa, hemicelulosa, lignina, componentes

minerales y compuestos extractivos, que experimentan transformaciones específicas durante la pirólisis. Estas diferencias condicionan propiedades posteriores como contenido de carbono y cenizas, porosidad, pH, capacidad de intercambio y naturaleza de las funcionalidades superficiales, generando respuestas distintas frente a los contaminantes presentes en solución (Gotore et al., 2024).

La revisión de Gotore et al. (2024), centrada específicamente en biochars derivados de residuos agrícolas, determinó que las diferencias estructurales entre las biomásas constituyen una de las razones por las cuales materiales sometidos a temperaturas similares pueden presentar características fisicoquímicas distintas. Los autores relacionaron estas variaciones principalmente con la composición lignocelulósica y señalaron que la temperatura de pirólisis modifica posteriormente el área superficial específica, microporosidad, pH, contenido de carbono y cenizas, materia volátil y capacidad de intercambio catiónico del material (Gotore et al., 2024).

Estos antecedentes proporcionan fundamento para comparar diferentes órganos de una misma especie vegetal. Aunque hoja, tallo, raíz y fruto pertenecen a *L. mutabilis*, sus funciones fisiológicas y composición química no son idénticas, de modo que tampoco debe suponerse que generarán biochars equivalentes. La caracterización fitoquímica permite establecer parte de estas diferencias antes de la carbonización, mientras que el ensayo frente a Fe(III) permite determinar si los materiales obtenidos presentan respuestas distintas después del proceso térmico. Esta relación debe considerarse asociativa y no causal mientras no se disponga de caracterización instrumental directa de la superficie de cada biochar (Gotore et al., 2024).

8.8.3. Temperatura de pirólisis y comportamiento adsorbente

La temperatura constituye uno de los factores de producción más estudiados debido a que modifica simultáneamente numerosas propiedades del biochar. De manera general, el incremento de la temperatura puede favorecer el desarrollo de área superficial, microporosidad, contenido de carbono, aromaticidad y estabilidad estructural, mientras que también modifica la capacidad de intercambio y la abundancia de determinadas funcionalidades oxigenadas. La magnitud y dirección de estos cambios dependen del precursor, por lo que la temperatura óptima para adsorción no puede establecerse independientemente de la biomasa utilizada y de la especie química que se pretende retirar (Gotore et al., 2024).

Una síntesis cuantitativa publicada en 2025 comparó el comportamiento de biochars frente a Cd, Pb y Cu en diferentes intervalos de pirólisis. Los resultados mostraron que los materiales producidos entre 400 y 550 °C presentaron, de manera agregada, las mejoras más

elevadas para los metales incluidos en el metaanálisis. Los autores atribuyeron este comportamiento al equilibrio alcanzado entre propiedades estructurales y químicas: a temperaturas inferiores pueden conservarse más funcionalidades carboxílicas, hidroxílicas y carbonílicas, pero con menor desarrollo de superficie y porosidad, mientras que temperaturas moderadas pueden producir una combinación favorable de ambas características (Shahbaz et al., 2025).

Este antecedente no significa que el intervalo de 400–550 °C deba producir necesariamente la mayor retención de Fe(III), porque el metaanálisis mencionado estudió principalmente Cd, Pb y Cu y agrupó materiales obtenidos a partir de diferentes precursores. Su utilidad para la presente investigación consiste en demostrar que la relación entre temperatura y adsorción no es estrictamente lineal y que una temperatura superior no implica automáticamente mayor eficiencia. En consecuencia, la comparación experimental entre 350, 400 y 450 °C resulta necesaria para establecer cuál condición resulta más favorable específicamente para el biochar derivado de *L. mutabilis* Sweet frente al Fe(III) (Gotore et al., 2024; Shahbaz et al., 2025).

8.8.4. Grupos funcionales y mecanismos de retención

Los antecedentes científicos coinciden en que la retención de especies metálicas mediante biochar puede involucrar diferentes mecanismos y que su contribución depende de las propiedades del material. Entre los procesos descritos se encuentran complejación con grupos funcionales superficiales, intercambio iónico, atracción electrostática y precipitación asociada con componentes minerales, además de contribuciones relacionadas con la estructura porosa. La coexistencia de estos mecanismos explica por qué la interpretación de un proceso únicamente a partir del porcentaje de remoción resulta insuficiente para establecer la naturaleza molecular de la interacción (Gotore et al., 2024; Viotti et al., 2024).

Los biochars obtenidos a temperaturas inferiores pueden conservar relativamente más grupos oxigenados, incluidos grupos carboxilo, hidroxilo y carbonilo, mientras que el incremento de la severidad térmica modifica progresivamente estas funcionalidades y favorece una estructura carbonosa más condensada. Los antecedentes indican que estos cambios pueden alterar la interacción con cationes metálicos, debido a que las funcionalidades oxigenadas pueden participar en procesos de complejación e intercambio. Sin embargo, el efecto final depende simultáneamente del desarrollo de superficie, porosidad, composición mineral y química de la solución (Shahbaz et al., 2025; Gotore et al., 2024).

Esta evidencia resulta especialmente pertinente para relacionar posteriormente los metabolitos secundarios de *L. mutabilis* con los biochars obtenidos. Los taninos y otros polifenoles permiten identificar una biomasa inicialmente rica en estructuras con grupos hidroxilo, mientras que saponinas y alcaloides proporcionan información adicional sobre funcionalidades oxigenadas y nitrogenadas del precursor. No obstante, la pirólisis transforma estas estructuras, por lo que los antecedentes disponibles respaldan únicamente la posibilidad de que la composición inicial contribuya a condicionar el material resultante, pero no permiten afirmar que los metabolitos originales constituyan directamente los sitios de adsorción presentes después de la carbonización (Gotore et al., 2024).

8.8.5. Particularidades del Fe(III) frente a otros iones metálicos

A diferencia de algunos cationes metálicos frecuentemente empleados en estudios de adsorción con biochar, el Fe(III) presenta una marcada tendencia a experimentar hidrólisis conforme se modifican las condiciones ácido-base de la solución. Esta característica introduce una dificultad adicional en los ensayos de remoción, porque la disminución de hierro soluble puede originarse tanto por interacción con el adsorbente como por transformaciones químicas que conduzcan a especies hidrolizadas o fases sólidas. En consecuencia, los resultados obtenidos para Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} o Zn^{2+} no deben trasladarse directamente al comportamiento de Fe^{3+} sin considerar previamente las diferencias de especiación.

Esta particularidad también implica que el pH constituye una variable central cuando se evalúa Fe(III) mediante biochar. El material carbonoso puede modificar el pH de la solución debido a sus grupos superficiales y componentes minerales, mientras que el Fe(III) responde a esas modificaciones mediante cambios en su especiación. Por ello, un elevado porcentaje de disminución de hierro no permite establecer automáticamente que se produjo una adsorción equivalente sobre la superficie; la interpretación debe considerar simultáneamente la concentración residual y las condiciones químicas desarrolladas durante el contacto.

La revisión de los antecedentes realizada para esta fundamentación también permite identificar una menor disponibilidad de investigaciones recientes específicamente orientadas a Fe^{3+} como adsorbato de biochars vegetales no modificados, en comparación con la extensa literatura dedicada a Pb, Cd, Cu, Zn y Cr. Las revisiones recientes sobre biochar y especies metálicas concentran gran parte de sus análisis en estos últimos contaminantes, lo que limita las comparaciones cuantitativas directas con Fe(III) y refuerza la necesidad de interpretar experimentalmente el sistema específico biochar de *L. mutabilis*–Fe(III) (Viotti et al., 2024; Gotore et al., 2024; Shahbaz et al., 2025).

8.8.6. Relación de los antecedentes con la presente investigación

Los antecedentes revisados permiten establecer que la eficiencia de un biochar frente a especies metálicas se encuentra determinada por la interacción de múltiples variables y no únicamente por una característica aislada. El precursor condiciona la composición inicial del material, la temperatura de pirólisis transforma su estructura y química superficial, mientras que el pH, concentración inicial y tiempo de contacto controlan posteriormente las condiciones bajo las cuales ocurre la interacción con el adsorbato. Esta relación multivariable constituye el fundamento para comparar diferentes tratamientos en lugar de seleccionar un biochar únicamente por su composición fitoquímica o por su temperatura de producción (Gotore et al., 2024; Viotti et al., 2024).

Desde esta perspectiva, la caracterización fitoquímica de *L. mutabilis* Sweet aporta información sobre las diferencias químicas iniciales existentes entre los órganos vegetales, mientras que la producción de biochar a diferentes temperaturas permite evaluar el efecto de la transformación termoquímica. Posteriormente, el contacto de estos materiales con una solución de Fe(III) permite determinar experimentalmente si las diferencias entre precursor y temperatura se reflejan en variaciones de la concentración residual. Esta secuencia metodológica mantiene separados tres niveles de análisis —biomasa, biochar y comportamiento frente al Fe(III)— y evita atribuir directamente la remoción observada a metabolitos que fueron determinados antes de la pirólisis (Gotore et al., 2024).

Los antecedentes tampoco justifican establecer previamente que el biochar producido a la temperatura más elevada necesariamente presentará el mejor comportamiento. La evidencia reciente demuestra que las temperaturas moderadas pueden proporcionar un equilibrio entre el desarrollo de porosidad y la presencia de funcionalidades químicamente activas, mientras que la respuesta específica continúa dependiendo del precursor y del contaminante evaluado. En consecuencia, la selección del biochar más favorable debe derivarse de los resultados experimentales obtenidos para *L. mutabilis* Sweet y Fe(III), utilizando la literatura posteriormente para explicar las tendencias observadas y no para predeterminar el resultado del experimento (Gotore et al., 2024; Shahbaz et al., 2025).

7.1. Marco Legal

7.1.1. Constitución de la República del Ecuador (2008)

Artículo 12.- “El derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida.”

Artículo 14.- “Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, Sumak Kawsay.”

Además, establece: “Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados.”

Artículo 71.- “La naturaleza o Pacha Mama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos.”

Artículo 73.- “El Estado aplicará medidas de precaución y restricción para las actividades que puedan conducir a la extinción de especies, la destrucción de ecosistemas o la alteración permanente de los ciclos naturales.”

7.1.2. Tratados y convenios internacionales

7.1.2.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

La investigación se relaciona con los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la Organización de las Naciones Unidas dentro de la Agenda 2030.

ODS 6: Agua limpia y saneamiento

La investigación contribuye a la meta **6.3**, orientada a mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, eliminación de vertidos y disminución de sustancias peligrosas.

Meta 6.3: “De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar e incrementando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.”

ODS 12: Producción y consumo responsables

Se relaciona con la promoción de tecnologías ambientales sostenibles que permitan disminuir impactos generados por contaminantes químicos mediante soluciones basadas en la naturaleza.

ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres

La investigación aporta al conocimiento de especies vegetales nativas y su aplicación en procesos de restauración ambiental.

7.1.2.2. *Convenio sobre la Diversidad Biológica (1992)*

Artículo 1.- “Los objetivos del presente Convenio, que se han de perseguir de conformidad con sus disposiciones pertinentes, son la conservación de la diversidad biológica, la utilización sostenible de sus componentes y la participación justa y equitativa en los beneficios que se deriven de la utilización de los recursos genéticos.

7.1.3. *Código Orgánico del Ambiente (COA)*

Artículo 5. Derecho de las personas a vivir en un ambiente sano

“El derecho a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado comprende, entre otros, el derecho a la conservación, manejo sostenible y recuperación del patrimonio natural.”

Artículo 9. Principios ambientales

“En concordancia con lo establecido en la Constitución y los instrumentos internacionales ratificados por el Estado, se aplicarán los siguientes principios ambientales...”

Principio de prevención:

“El Estado, las personas naturales y jurídicas, así como las comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades, tendrán la obligación jurídica de prevenir, evitar y reducir los impactos y daños ambientales.”

7.1.4. *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua*

Artículo 64. Conservación del agua

“La naturaleza o Pacha Mama tiene derecho a la conservación de las aguas con sus propiedades como soporte esencial para todas las formas de vida.”

7.1.5. *Reglamento al Código Orgánico del Ambiente*

El Reglamento al Código Orgánico del Ambiente establece disposiciones relacionadas con la prevención y control de contaminación ambiental.

Gestión de la calidad ambiental

“La Autoridad Ambiental Nacional establecerá los mecanismos de prevención, control, seguimiento y reparación integral de los impactos ambientales generados por actividades productivas o de servicios.”

7.1.6. Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA)

Libro VI: Calidad Ambiental

El TULSMA establece criterios para la prevención y control de la contaminación ambiental.

Dentro de la normativa se establece que: “Toda acción relacionada con la gestión ambiental deberá orientarse a prevenir, controlar y mitigar los impactos ambientales negativos.”

7.1.7. Acuerdo Ministerial 097-A: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua

El Acuerdo Ministerial 097-A constituye un instrumento de la normativa ambiental ecuatoriana que establece criterios de calidad del agua de acuerdo con sus diferentes usos, así como límites aplicables a las descargas de efluentes hacia cuerpos receptores y sistemas de alcantarillado. Su Anexo 1, correspondiente a la *Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua*, contempla parámetros físicos, químicos y biológicos destinados a prevenir y controlar la contaminación del recurso hídrico (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015). Acuerdo Ministerial 097-A – documento oficial

Dentro de los parámetros regulados por esta normativa se encuentra el hierro (Fe), cuya presencia debe evaluarse de acuerdo con el tipo de cuerpo receptor, uso del agua o descarga considerada. La incorporación de este parámetro en la normativa resulta pertinente para la presente investigación, debido a que experimentalmente se estudia la disminución de la concentración de Fe(III) en solución acuosa mediante biochar obtenido a partir de *Lupinus mutabilis* Sweet. Debe señalarse que la normativa expresa el parámetro como hierro (Fe), por lo que no corresponde interpretar sus valores regulatorios como límites establecidos específicamente para el ion Fe^{3+} (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015).

En la investigación, la concentración inicial de 100 ppm de Fe(III) corresponde a una condición establecida dentro del diseño experimental para evaluar y comparar el comportamiento de los biochars obtenidos a diferentes temperaturas de pirólisis y tiempos de contacto. Por esta razón, dicha concentración no representa un límite máximo permisible establecido por el Acuerdo Ministerial 097-A. Los valores normativos correspondientes al hierro podrán emplearse como referencia ambiental, siempre que se especifique la categoría de agua o descarga con la cual se efectúa la comparación, evitando establecer una equivalencia directa entre la solución sintética utilizada en laboratorio y un efluente real (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015).

De esta manera, el Acuerdo Ministerial 097-A proporciona el sustento normativo para relacionar el estudio experimental con la protección de la calidad del recurso hídrico. La determinación de la concentración inicial y residual de Fe(III) permite evaluar cuantitativamente la disminución del hierro presente en la fase acuosa después del contacto con el biochar; sin embargo, la comparación con la normativa deberá realizarse únicamente como referencia y considerando las condiciones específicas establecidas para cada uso del agua o tipo de descarga (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015).

8. HIPÓTESIS Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

8.1. Hipótesis

8.1.1. Hipótesis de investigación (H_1)

La temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto influyen significativamente en la disminución de la concentración de Fe(III) en solución acuosa mediante biochar obtenido a partir de *Lupinus mutabilis* Sweet, presentándose diferencias en la eficiencia de remoción entre los tratamientos evaluados.

8.1.2. Hipótesis nula (H_0)

La temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto no influyen significativamente en la disminución de la concentración de Fe(III) en solución acuosa mediante biochar obtenido a partir de *Lupinus mutabilis* Sweet, por lo que no existen diferencias significativas en la eficiencia de remoción entre los tratamientos evaluados.

8.2. Variables de la investigación

Las variables se establecieron de acuerdo con las condiciones experimentales empleadas para evaluar la remoción de Fe(III) mediante biochar obtenido de *Lupinus mutabilis* Sweet.

8.2.1. Variable independiente

La variable dependiente corresponde a la remoción de Fe(III) en solución acuosa, determinada mediante la concentración residual obtenida por espectrofotometría UV-Visible y expresada en ppm y porcentaje de remoción. Esta variable permitió comparar el desempeño de los diferentes biochars según las condiciones experimentales evaluadas.

8.2.2. Variable dependiente

La variable independiente corresponde a las condiciones experimentales del biochar, considerando la temperatura de pirólisis (350, 400 y 450 °C), el tiempo de contacto (0, 10, 30

y 60 minutos) y el tipo de precursor vegetal (hoja y fruto). Estas condiciones fueron evaluadas para determinar su influencia sobre el comportamiento del biochar frente al Fe(III).

Tabla 3

Operacionalización de las variables de la investigación.

Tipo de variable	Variable	Dimensión	Indicador	Técnica / instrumento	Unidad o escala
Independiente	Tipo de precursor vegetal	Biomasa utilizada para producir biochar	Hoja / fruto	Selección y preparación de biomasa	Categoría
Independiente	Temperatura de pirólisis	Condición térmica de producción del biochar	350, 400 y 450 °C	Horno / sistema de pirólisis	°C
Independiente	Tiempo de contacto	Interacción biochar–solución de Fe(III)	0, 10, 30 y 60 min	Cronómetro	min
Dependiente	Concentración residual de Fe(III)	Hierro presente en la fase acuosa después del tratamiento	Concentración determinada por UV-Visible	Espectrofotometría UV-Visible	ppm
Dependiente	Remoción de Fe(III)	Disminución de la concentración respecto al valor inicial	Porcentaje de remoción	Cálculo a partir de (C ₀) y (C _t)	%
Complementaria	Perfil fitoquímico del precursor	Presencia e intensidad de metabolitos secundarios	Alcaloides, taninos, saponinas, flavonoides, cumarinas, esteroides/triterpenos	Pruebas fitoquímicas colorimétricas	Escala 0–5

Nota. La tabla presenta la operacionalización de las variables consideradas en la investigación para evaluar la remoción de Fe(III) mediante biochar obtenido de *Lupinus*

mutabilis Sweet. Se describen las variables independientes, dependiente y complementaria, junto con sus dimensiones, indicadores, técnicas de medición y unidades o escalas empleadas durante el desarrollo experimental.

8.3. Pregunta de investigación

¿La combinación del precursor vegetal, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto influye en la remoción de Fe(III) en solución acuosa mediante biochar de *Lupinus mutabilis* Sweet?

9. MARCO METODOLÓGICO

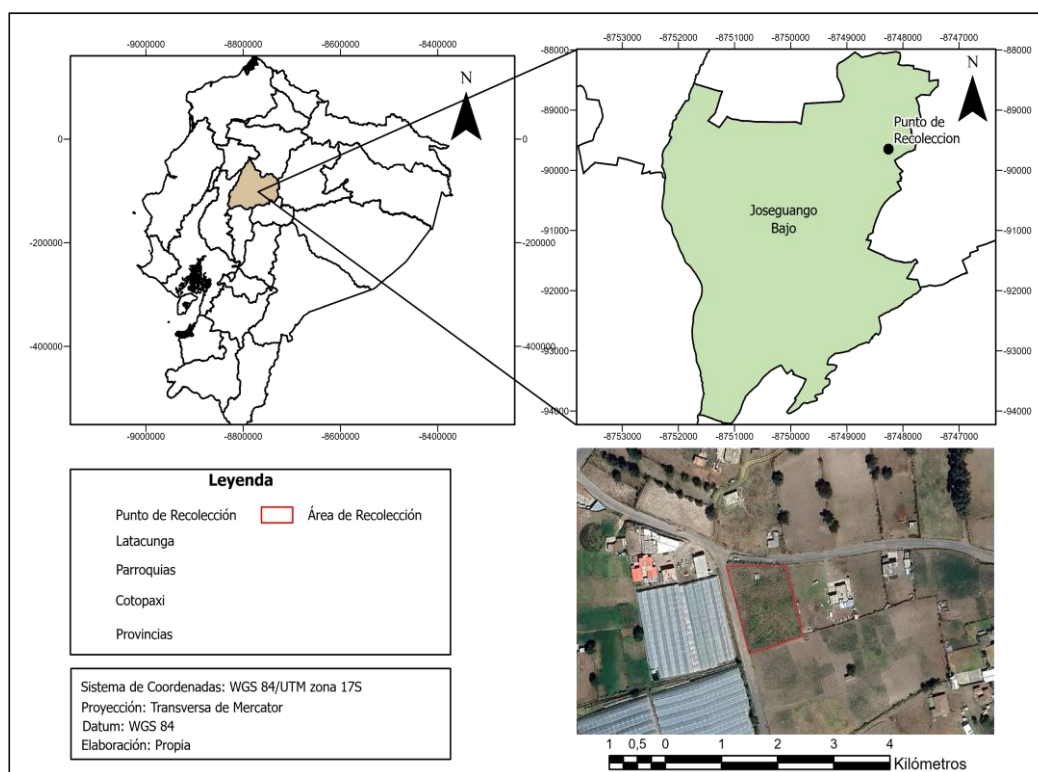
9.1. Área de estudio

La investigación se desarrolló considerando como área de procedencia de la materia prima vegetal el sector Joseguango Bajo, provincia de Cotopaxi, Ecuador, donde se efectuó la recolección del material de *Lupinus mutabilis* Sweet utilizado posteriormente en las etapas experimentales. El área de recolección fue delimitada cartográficamente con el propósito de establecer la procedencia geográfica del material vegetal y garantizar la trazabilidad de las muestras utilizadas durante la investigación. El mapa proporcionado identifica tanto el área de estudio como el punto específico de recolección.

La selección del área respondió a la disponibilidad de *L. mutabilis* Sweet y a la posibilidad de obtener el material vegetal requerido para su posterior acondicionamiento, caracterización fitoquímica y elaboración de biochar. A partir de la recolección se obtuvieron las diferentes partes vegetales consideradas durante la fase inicial del estudio, mientras que las etapas posteriores fueron desarrolladas bajo condiciones experimentales

9.1.1. Ubicación geográfica

El punto de recolección de *Lupinus mutabilis* Sweet se localizó en Joseguango Bajo, provincia de Cotopaxi, Ecuador. Para la representación espacial del sitio se utilizó el sistema de coordenadas WGS 84/UTM zona 17S, con proyección Transversa de Mercator y datum WGS 84. La cartografía elaborada permite identificar la ubicación del área de recolección dentro del territorio provincial y delimita gráficamente el sitio del cual procedió la biomasa utilizada en la investigación.

Figura 1*Mapa de Ubicación de la zona de estudio.*

Nota. La figura representa la localización geográfica y delimitación del área de recolección del material vegetal utilizado en la investigación, mediante el sistema de coordenadas WGS 84/UTM zona 17S. Elaboración propia.

10. Metodología

La metodología se estructuró de acuerdo con los objetivos planteados y con las diferentes etapas experimentales desarrolladas durante la investigación. El procedimiento comprendió la recolección y acondicionamiento de la biomasa de *Lupinus mutabilis* Sweet, la caracterización fitoquímica de las partes vegetales, la obtención de biochar mediante pirólisis a diferentes temperaturas y la evaluación de su comportamiento frente a una solución acuosa de Fe(III). La concentración residual de hierro se determinó mediante espectrofotometría UV-Visible, permitiendo comparar los tratamientos en función del tipo de precursor, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto.

10.1.1. Tipo de investigación

La investigación fue de enfoque cuantitativo, experimental, aplicado y comparativo. Se consideró cuantitativa debido a que las variables de respuesta fueron determinadas mediante mediciones experimentales, principalmente a partir de la concentración residual de Fe(III)

expresada en ppm y del porcentaje de remoción calculado después del tratamiento con biochar. Asimismo, la caracterización fitoquímica incorporó una valoración semicuantitativa de las reacciones observadas, mediante una escala de intensidad establecida para las diferentes pruebas realizadas.

El estudio presentó un carácter experimental, debido a que se modificaron de manera controlada las condiciones asociadas con la producción y evaluación del biochar. Se consideraron como factores el tipo de precursor vegetal —hoja y fruto—, la temperatura de pirólisis a 350, 400 y 450 °C y los tiempos de contacto de 0, 10, 30 y 60 minutos. La respuesta de los tratamientos fue evaluada mediante la variación de la concentración de Fe(III) en la fase acuosa, determinada instrumentalmente mediante espectrofotometría UV-Visible.

La investigación fue además de tipo aplicado, debido a que se orientó a evaluar el potencial de un material carbonoso obtenido de *L. mutabilis* Sweet como alternativa para disminuir la concentración de Fe(III) presente en una solución acuosa. El estudio no se limitó a describir las características de la biomasa, sino que comprendió su transformación mediante pirólisis y la posterior evaluación experimental del material obtenido frente al contaminante seleccionado.

Finalmente, el estudio presentó un alcance comparativo, puesto que se contrastó el comportamiento de los biochars obtenidos bajo diferentes condiciones de producción y tiempos de contacto. Esta comparación permitió establecer experimentalmente las diferencias entre los tratamientos y posteriormente determinar, mediante el análisis estadístico, la influencia de los factores estudiados sobre la remoción de Fe(III). La caracterización fitoquímica se empleó como información complementaria para analizar las diferencias químicas de los precursores, sin atribuir directamente a los metabolitos secundarios los mecanismos de retención desarrollados después del pirólisis.

10.1.2. Enfoque de la investigación

La investigación presentó un enfoque cuantitativo, debido a que se basó principalmente en la obtención, medición y análisis de datos numéricos generados durante las diferentes etapas experimentales. Entre las variables consideradas se encontraron la temperatura de pirólisis, el tiempo de contacto, la concentración residual de Fe(III) y el porcentaje de remoción obtenido para cada tratamiento.

Este enfoque permitió comparar objetivamente el comportamiento de los biochars elaborados a partir de hoja y fruto de *Lupinus mutabilis* Sweet, sometidos a temperaturas de 350, 400 y 450 °C. La concentración de Fe(III) fue determinada mediante espectrofotometría

UV-Visible, lo que permitió establecer diferencias entre los tratamientos a partir de mediciones instrumentales.

De manera complementaria, la caracterización fitoquímica se evaluó mediante una escala semicuantitativa de 0 a 5, utilizada para representar la intensidad de las reacciones observadas en los distintos órganos vegetales. Esta información se empleó como apoyo para describir las características químicas de la biomasa precursora, sin sustituir el enfoque cuantitativo principal del estudio.

10.1.3. Diseño experimental

El diseño experimental se estructuró para evaluar la influencia del tipo de precursor vegetal, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto sobre la remoción de Fe(III) en solución acuosa mediante biochar obtenido de *Lupino cambiante* Dulce.

Para la elaboración del biochar se utilizaron dos precursores vegetales: hoja y fruto. Cada uno fue sometido a tres temperaturas de pirólisis: 350, 400 y 450°C , 15 minutos. La combinación de estos factores permitió obtener seis tratamientos de biochar.

Posteriormente, cada biochar fue evaluado frente a una solución acuosa de Fe(III) con una concentración nominal inicial de 100 ppm. Las mediciones se realizaron a los 0, 10, 30 y 60 minutos de contacto, con el propósito de determinar la variación de la concentración residual de Fe(III) en función del tiempo.

Tabla 4

Tratamientos establecidos en el diseño experimental

Tratamiento	Precursor	Temperatura de pirólisis	Tiempo de residencia
T1	Hoja	350 °C	15 min
T2	Fruto	350 °C	15 min
T3	Hoja	400 °C	15 min
T4	Fruto	400 °C	15 min
T5	Hoja	450 °C	15 min
T6	Fruto	450 °C	15 min

Nota. La tabla representa los seis tratamientos obtenidos mediante la combinación de dos tipos de precursores vegetales y tres temperaturas de pirólisis, manteniendo constante un tiempo de residencia de 15 minutos. Elaboración propia

Las variables independientes fueron el tipo de precursor vegetal, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto. Como variable de respuesta se consideró la concentración residual de Fe(III), expresada en ppm, a partir de la cual se determinó el porcentaje de remoción mediante:

$$R(\%) = \frac{do0 - dot}{do0} \times 100 \quad (1)$$

donde:

- R = porcentaje de remoción de Fe(III);
- do0 = concentración inicial de Fe(III), en ppm;
- dot = concentración residual de Fe(III) al tiempo t, una ppm.

El diseño permitió comparar el efecto del tipo de precursor, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto sobre la disminución de la concentración de Fe(III). Durante los ensayos, las demás condiciones experimentales, como el volumen de solución y la cantidad de biochar utilizada, debieron mantenerse constantes para que las diferencias observadas pudieran relacionarse con los factores estudiados.

10.1.4. Recolección y acondicionamiento del material vegetal

El material vegetal de *Lupinus mutabilis* Sweet fue recolectado en el sector Quisínche Bajo, parroquia Joseguango Bajo, provincia de Cotopaxi,

Durante la recolección se seleccionaron diferentes órganos de la planta, correspondientes a hojas, tallos, raíces y frutos, los cuales fueron separados para evitar la mezcla entre muestras y permitir su posterior caracterización fitoquímica de manera independiente. La selección de estos órganos respondió al propósito de identificar diferencias en la presencia e intensidad de metabolitos secundarios entre las distintas estructuras de *L. mutabilis* swee.

Posteriormente, el material vegetal fue sometido a un proceso de limpieza y lavado con agua destilada, con la finalidad de retirar partículas de suelo y otros materiales externos adheridos a la superficie. Después del lavado, la biomasa fue secada y posteriormente triturada hasta reducir su tamaño y obtener un material adecuado para las etapas experimentales. El protocolo inicial de la investigación estableció como operaciones de acondicionamiento el lavado, secado y molienda de la biomasa vegetal.

Una vez acondicionadas, las muestras correspondientes a hoja, tallo, raíz y fruto fueron mantenidas separadas para su utilización en la caracterización fitoquímica. Para la etapa de producción de biochar se seleccionaron específicamente hojas y frutos secos, los cuales fueron

triturados previamente al proceso de carbonización térmica. La guía experimental de obtención de biochar confirma que la biomasa empleada debía encontrarse seca y triturada antes del pesaje y tratamiento en mufla.

Tabla 5

*Etapas de acondicionamiento del material vegetal de *Lupinus mutabilis* Sweet*

Etapas	Procedimiento	Material obtenido
Recolección	Obtención de material vegetal en Quisínche Bajo–Joseguango Bajo	Biomasa vegetal
Separación	Clasificación por órgano vegetal	Hoja, tallo, raíz y fruto
Limpieza	Retiro de material externo y lavado con agua destilada	Material vegetal limpio
Secado	Eliminación de humedad de la biomasa	Biomasa seca
Trituración	Reducción del tamaño del material vegetal	Material vegetal triturado
Selección experimental	Separación según el análisis posterior	Hoja, tallo, raíz y fruto para fitoquímica; hoja y fruto para biochar

Nota. La tabla representa las etapas desarrolladas para el acondicionamiento de *Lupinus mutabilis* Sweet desde su recolección hasta la obtención del material vegetal utilizado en la caracterización fitoquímica y en la elaboración del biochar

10.2. Caracterización fitoquímica de *Lupinus mutabilis* Sweet.

La caracterización fitoquímica se realizó en las muestras de hoja, tallo, raíz y fruto de *Lupinus mutabilis* Sweet, previamente acondicionadas. Para cada órgano vegetal se empleó un macerado alcohólico como muestra de análisis y se aplicaron ensayos colorimétricos orientados a identificar diferentes grupos de metabolitos secundarios. La evaluación comprendió alcaloides, flavonoides, taninos, saponinas, cumarinas, quinonas y antraquinonas, así como esteroides y triterpenos.

Los ensayos se desarrollaron en tubos de ensayo utilizando alícuotas independientes de cada extracto, con el propósito de evitar interferencias entre las diferentes reacciones.

Dependiendo de la prueba, la identificación se fundamentó en cambios de color, formación de precipitados, generación de espuma, fluorescencia o modificaciones de coloración producidas después de adicionar los reactivos correspondientes.

Tabla 6

Ensayos empleados para la caracterización fitoquímica

Metabolito secundario	Pruebas consideradas	Evidencia evaluada
Alcaloides	Ácido-base, ácido tánico y prueba complementaria registrada	Cambio de color, turbidez o precipitación
Taninos	Coordinación con hierro y oxidación con agua de cal	Cambio de color o formación de complejo
Saponinas	Espuma, Salkowski adaptado y vainillina	Espuma persistente y cambio de color
Cumarinas	Fluorescencia UV, apertura/cierre lactónico y coordinación con hierro	Fluorescencia y cambio reversible de color
Quinonas y antraquinonas	Bornträger, Bornträger modificado y oxidación alcalina	Coloración de la fase alcalina
Flavonoides	Shinoda, NaOH y prueba complementaria	Cambio de color
Esteroides y triterpenos	Salkowski y prueba complementaria	Formación de anillo o cambio cromático

Nota . La tabla representa los grupos de metabolitos secundarios considerados durante el tamizaje fitoquímico de hojas, tallos, raíces y frutos de *Lupinus mutabilis* Sweet, así como las respuestas visuales utilizadas para establecer la presencia o ausencia de cada grupo químico

10.2.1. Identificación de alcaloides

Para la identificación de alcaloides se utilizaron alícuotas del macerado alcohólico correspondiente a cada órgano vegetal. Una de las pruebas se realizó mediante acidificación previa del extracto, mientras que la reacción con ácido tánico se fundamentó en la formación de turbidez o precipitado después de poner en contacto el extracto acidificado con una solución rica en taninos. El procedimiento empleado contempló aproximadamente 2 mL de macerado alcohólico por ensayo.

Las respuestas obtenidas fueron valoradas según la intensidad del cambio observado y posteriormente registradas mediante la escala semicuantitativa establecida para la investigación.

10.2.2. Identificación de taninos

La identificación de taninos se realizó mediante pruebas basadas en su capacidad de producir reacciones de coordinación con iones de hierro y cambios cromáticos en condiciones alcalinas. Para la prueba de coordinación se emplearon aproximadamente 1 a 2 mL del macerado alcohólico, a los cuales se adicionaron entre 3 y 5 gotas de la solución rica en hierro, registrándose posteriormente la variación de color.

En la prueba de oxidación alcalina se colocaron 2 mL del macerado alcohólico y se añadieron aproximadamente 1 a 2 mL de agua de cal. La mezcla fue agitada y posteriormente se registraron los cambios cromáticos o la formación de precipitado producidos durante la reacción.

10.2.3. Identificación de saponinas

Las saponinas fueron evaluadas mediante las pruebas de espuma, Salkowski adaptado y vainillina. En la prueba de espuma se consideró como evidencia de respuesta la formación y persistencia de espuma después de la agitación de la muestra; esta prueba permitió aprovechar las propiedades tensioactivas características de este grupo de metabolitos. La matriz experimental confirma que la prueba de espuma fue utilizada durante la caracterización.

Para la prueba de Salkowski adaptado se utilizaron 2 mL de macerado alcohólico, evaporando previamente el solvente mediante baño María y adicionando posteriormente el reactivo ácido. En el ensayo con vainillina se mezcló 1 mL de muestra con 1 mL de vainillina, seguido de la adición del medio ácido y calentamiento a aproximadamente 65 °C durante 10 a 15 minutos; posteriormente se enfrió la muestra para estabilizar la reacción cromática.

10.2.4. Identificación de cumarinas

La identificación de cumarinas comprendió pruebas de fluorescencia bajo luz UV, apertura y cierre del anillo lactónico y coordinación con hierro. Para la prueba de fluorescencia se utilizó el extracto vegetal y un medio alcalino, observándose posteriormente la muestra bajo iluminación ultravioleta.

Para la apertura y cierre lactónico se emplearon aproximadamente 2 mL de muestra, adicionando inicialmente una solución alcalina y posteriormente un medio ácido para determinar la reversibilidad del cambio cromático. En la prueba de coordinación se utilizaron

2 mL del macerado alcohólico y entre 3 y 5 gotas de una solución rica en hierro, registrándose cualquier cambio de coloración producido después de la reacción.

10.2.5. Identificación de quinonas y antraquinonas

Las quinonas y antraquinonas fueron investigadas mediante las pruebas de Bornträger, Bornträger modificado y oxidación alcalina directa. En el procedimiento de Bornträger se evaporó inicialmente el alcohol presente en el macerado; posteriormente, el residuo fue acondicionado con agua y una fase de extracción, y finalmente se adicionó una solución alcalina para observar la coloración de la fase correspondiente.

En el ensayo de oxidación alcalina se utilizaron 2 mL del macerado alcohólico, adicionando entre 3 y 5 gotas de NaOH al 10 % y registrando inmediatamente la respuesta cromática. La presencia o ausencia de reacción fue posteriormente expresada mediante la escala semicuantitativa.

10.2.6. Identificación de flavonoides

Los flavonoides fueron evaluados mediante pruebas colorimétricas, entre ellas Shinoda y reacción alcalina con NaOH. Para la prueba alcalina se utilizaron entre 1 y 2 mL del macerado alcohólico, a los cuales se adicionaron de 3 a 5 gotas de NaOH al 10 %; posteriormente, el medio fue acidificado para comprobar la modificación de la coloración.

En el ensayo de Shinoda se emplearon aproximadamente 2 mL del macerado alcohólico, fragmentos de zinc metálico y entre 5 y 10 gotas de HCl, registrándose la presencia de efervescencia y los cambios cromáticos producidos durante la reacción.

10.2.7. Identificación de esteroides y triterpenos

Para la identificación de esteroides y triterpenos se utilizaron pruebas colorimétricas basadas en la reacción de los componentes lipídicos del extracto frente a un medio ácido. En el ensayo de Salkowski se utilizaron aproximadamente 2 mL del macerado alcohólico, se evaporó el solvente mediante calentamiento y posteriormente se adicionó el reactivo ácido sobre el residuo obtenido, registrándose los cambios de color producidos.

Las respuestas observadas en estos ensayos fueron registradas siguiendo el mismo procedimiento empleado para los demás metabolitos y posteriormente convertidas a valores semicuantitativos.

10.2.8. Escala semicuantitativa de valoración

Para estandarizar la interpretación de las respuestas fitoquímicas, se utilizó una escala ordinal comprendida entre 0 y 5, mediante la cual se asignó un valor de acuerdo con la intensidad visual observada durante cada ensayo. La escala permitió transformar las observaciones cualitativas en categorías comparables entre los diferentes órganos vegetales.

Tabla 7

*Escala semicuantitativa empleada para la evaluación e interpretación de la intensidad de las reacciones fitoquímicas en los metabolitos secundarios de *Lupinus mutabilis* Sweet.*

Valor	Símbolo	Clasificación	Criterio visual	Interpretación
0	–	Negativo	Sin cambio respecto al blanco o al color inicial	Ausencia de metabolitos detectables
1	+	Muy débil	Cambio apenas perceptible	Presencia traza
2	++	Débil	Cambio visible de baja intensidad	Presencia baja
3	+++	Moderado	Cambio claro y estable	Presencia moderada
4	++++	Fuerte	Cambio intenso y evidente	Presencia alta
5	+++++	Muy fuerte	Cambio máximo, precipitado abundante o color muy intenso	Presencia muy alta

Nota. La tabla representa la escala semicuantitativa empleada para clasificar la intensidad de las respuestas observadas durante los ensayos fitoquímicos. Los valores corresponden a categorías de intensidad visual y no representan concentraciones absolutas de los metabolitos secundarios.

10.3. Obtención de biocarbón de *Lupinus mutabilis* Sweet

Para la obtención del biochar se utilizaron hojas y frutos secos de *Lupinus mutabilis* Sweet, previamente acondicionados y triturados. Estos órganos vegetales fueron seleccionados como precursores para comparar el efecto de la temperatura de carbonización sobre el material obtenido y su posterior comportamiento frente al Fe(III).

La carbonización se realizó en una mufla, utilizando crisoles de porcelana, balanza analítica, pinzas, guantes térmicos, espátula y papel aluminio. Antes del tratamiento térmico se registró la masa del crisol vacío (m_1); posteriormente, se incorporaron 5 g de biomasa vegetal y se registró nuevamente la masa correspondiente al crisol más la muestra (m_2). Los crisoles fueron cubiertos para limitar el ingreso de oxígeno durante el calentamiento.

La biomasa de hoja y fruto fue sometida independientemente a temperaturas de 350, 400 y 450 °C, manteniendo un tiempo de residencia de 15 minutos para cada tratamiento. La

mufla fue precalentada hasta alcanzar la temperatura correspondiente y, una vez alcanzada, los crisoles fueron introducidos durante el tiempo establecido. Finalizado el proceso, se permitió el descenso de la temperatura antes de abrir el equipo. Posteriormente, los crisoles fueron retirados con pinzas y se dejaron enfriar antes del pesaje final.

Después del enfriamiento se registró la masa del crisol con el biochar obtenido (m_3). El material carbonizado de cada tratamiento se mantuvo identificado según el tipo de precursor y la temperatura empleada para evitar mezclas durante los posteriores ensayos con Fe(III).

Tabla 8

Condiciones empleadas para la obtención del biochar

Código	Precursor vegetal	Temperatura de carbonizació	Tiempo de residencia
H350	Hoja	350 °C	15 min
H400	Hoja	400 °C	15 min
H450	Hoja	450 °C	15 min
F350	Fruto	350 °C	15 min
F400	Fruto	400 °C	15 min
F450	Fruto	450 °C	15 min

Nota. La tabla representa las condiciones experimentales utilizadas para producir los seis biochars de *Lupinus mutabilis* Sweet, mediante la combinación de dos precursores vegetales y tres temperaturas de carbonización, manteniendo constante un tiempo de residencia de 15 minutos. Elaboración propia con base en la guía de laboratorio proporcionada.

10.3.1. Cálculo del rendimiento del biochar

El rendimiento del proceso de carbonización se determinó a partir de la masa inicial de biomasa y la masa final de biochar. Para ello se emplearon las siguientes expresiones:

$$m_i = m_2 - m_1$$

$$m_b = m_3 - m_1$$

$$R (\%) = (m_b / m_i) \times 100$$

$$m_1 = \text{masa del crisol vacío (g)}$$

m_2 = masa del crisol más biomasa antes de la carbonización (g)

m_3 = masa del crisol más biochar después de la carbonización (g)

m_i = masa inicial de biomasa (g)

m_b = masa final de biochar (g)

R = rendimiento del biochar (%)

Tabla 9

Registro disponible de masas durante la carbonización

Muestra	m₁ (g)	m₂ (g)	m₃ (g)
Hoja 350 °C	46,59	46,64	42,77
Fruto 350 °C	46,59	46,64	43,67
Hoja 400 °C	46,59	46,64	35,10
Fruto 400 °C	46,59	46,64	35,77
Hoja 450 °C	46,59	46,64	30,18
Fruto 450 °C	46,59	46,64	33,13

Nota. La tabla presenta los valores registrados en la guía experimental para el pesaje de los crisoles antes y después de la carbonización. Estos datos deben verificarse antes del cálculo definitivo del rendimiento debido a inconsistencias entre las masas registradas y los 5 g de biomasa indicados en el procedimiento.

Como verificación del registro disponible, al utilizar literalmente los valores $m_1 = 46,59$ g y $m_2 = 46,64$ g se obtiene:

$$m_i = 46,64 - 46,59 = 0,05 \text{ g}$$

Sin embargo, el procedimiento indica que se incorporaron 5 g de biomasa, por lo que debería existir aproximadamente una diferencia de 5 g entre m_1 y m_2 . Además, algunos valores de m_3 son inferiores a la masa registrada del crisol vacío, lo que produciría masas negativas de biochar. Por esta razón, no es metodológicamente correcto calcular todavía los porcentajes de rendimiento con estos valores; primero deben comprobarse los pesos originales del laboratorio.

Esquema del procedimiento

Biomasa seca → Trituración → Pesaje → Carbonización → 15 min → Enfriamiento → Pesaje final → Biochar

10.2.6. Preparación de la solución acuosa de Fe(III)

Para evaluar el comportamiento de los biochars obtenidos a partir de *Lupinus mutabilis* Sweet se preparó una solución acuosa sintética de Fe(III). El uso de una solución preparada en laboratorio permitió trabajar con una concentración inicial conocida y mantener una condición comparable entre los diferentes tratamientos.

Como fuente de Fe(III) se empleó cloruro férrico (FeCl_3) y la preparación se realizó en medio ácido mediante ácido clorhídrico (HCl). A partir de la solución preparada se estableció una solución de trabajo con una concentración nominal de 100 ppm de Fe(III), utilizada posteriormente en los ensayos de contacto con los seis biochars.

Durante la preparación se utilizó material volumétrico limpio para evitar modificaciones en la concentración de la solución. Una vez preparada, la solución fue homogeneizada y mantenida debidamente identificada hasta su utilización en los ensayos experimentales.

Tabla 10

Condiciones generales de la solución empleada en los ensayos

Parámetro	Condición
Ion evaluado	Fe(III)
Fuente de hierro	Cloruro férrico (FeCl ₃)
Medio	Acuoso acidificado
Reactivo utilizado para acidificación	HCl
Concentración nominal de trabajo	100 ppm
Aplicación	Ensayos de contacto con biochar
Precusores evaluados	Hoja y fruto
Temperaturas del biochar	350, 400 y 450 °C

Nota. La tabla presenta las condiciones generales utilizadas para preparar la solución sintética de Fe(III) empleada en la evaluación de los biochars obtenidos de hoja y fruto de Lupinus mutabilis Sweet. Elaboración propia.

10.3.2. Cálculo para la preparación de soluciones

Cuando la solución de trabajo se obtiene mediante dilución de una solución madre, el volumen requerido se determina mediante la relación de dilución:

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

Despejando el volumen de solución madre:

$$V_1 = (C_2 \times V_2) / C_1$$

C_1 = concentración de la solución madre, en ppm;

V_1 = volumen de solución madre que debe tomarse;

C_2 = concentración requerida de la solución de trabajo, en ppm;

V_2 = volumen final de la solución preparada.

Para esta investigación, la concentración nominal de trabajo fue:

$$C_2 = 100 \text{ ppm}$$

Por lo tanto, la expresión general aplicada queda:

$$V_1 = (100 \text{ ppm} \times V_2) / C_1$$

Precisión metodológica. No se incorporó un cálculo numérico definitivo porque en los registros proporcionados no constan de forma verificable la concentración de la solución madre ni el volumen final preparado. Tampoco se especifica de manera concluyente si el cloruro férrico utilizado fue FeCl_3 anhidro o $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, dato que debe confirmarse si la solución madre se preparó directamente a partir de la sal.

10.3.3. Identificación de la concentración inicial

La concentración utilizada para establecer los tratamientos fue de 100 ppm de Fe(III), considerada como concentración nominal inicial de la solución experimental. Posteriormente, esta solución fue analizada mediante espectrofotometría UV-Visible; por ello, en el capítulo de resultados deberá diferenciarse entre la concentración nominal preparada y la concentración obtenida instrumentalmente mediante la curva de calibración.

En metodología se registra la concentración nominal como:

Concentración nominal = 100 ppm

La concentración calculada a partir de la absorbancia constituye un resultado analítico y deberá presentarse en el apartado de resultados, junto con la ecuación de calibración y el correspondiente control del intervalo lineal.

Esquema del procedimiento

$\text{FeCl}_3 \rightarrow$ preparación de solución de Fe(III) $\rightarrow$ medio ácido con HCl $\rightarrow$ homogeneización $\rightarrow$ 100 ppm $\rightarrow$ ensayos con biochar

10.3.4. Curva de calibración para la determinación de Fe(III) mediante espectrofotometría UV-Visible

Para determinar la concentración de Fe(III) presente en las soluciones experimentales se empleó espectrofotometría UV-Visible. Previamente a la lectura de las muestras tratadas con biochar, se construyó una curva de calibración utilizando soluciones patrón de concentración conocida, con el propósito de establecer la relación entre la concentración de Fe(III) y la absorbancia registrada por el equipo.

La curva se estableció dentro de un intervalo de 0 a 100 ppm de Fe(III). De acuerdo con los registros experimentales disponibles, se consideraron patrones correspondientes a 0, 20, 40, 60, 80 y 100 ppm. Cada solución fue analizada bajo las mismas condiciones instrumentales, utilizando el patrón de 0 ppm como referencia del sistema.

Tabla 11*Concentraciones empleadas para la curva de calibración de Fe(III)*

Patrón	Concentración de Fe(III) (ppm)
P0	0
P1	20
P2	40
P3	60
P4	80
P5	100

Nota. La tabla representa las concentraciones patrón empleadas para establecer la curva de calibración de Fe(III) en un intervalo analítico comprendido entre 0 y 100 ppm. Elaboración propia.

10.3.5. Preparación de los patrones

Cuando los patrones se obtienen mediante dilución de una solución de mayor concentración, el volumen requerido para cada estándar se determina mediante la ecuación de dilución:

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

Despejando el volumen de solución de partida:

$$V_1 = (C_2 \times V_2) / C_1$$

C_1 = concentración de la solución de partida;

V_1 = volumen tomado de la solución de partida;

C_2 = concentración requerida del patrón;

V_2 = volumen final del patrón.

Por ejemplo, para preparar el patrón de 20 ppm, la expresión general empleada sería:

$$V_1 = (20 \text{ ppm} \times V_2) / C_1$$

El mismo procedimiento se aplica para obtener los patrones de 40, 60, 80 y 100 ppm. Los volúmenes numéricos definitivos deben calcularse con la concentración real de la solución de partida y el volumen final utilizado experimentalmente.

10.3.6. Construcción de la curva de calibración

Una vez registradas las absorbancias de los patrones, se representó la concentración de Fe(III) en el eje X y la absorbancia en el eje Y. Los datos se ajustaron mediante regresión lineal, empleando la expresión general:

$$A = mC + b$$

A = absorbancia registrada;

C = concentración de Fe(III), en ppm;

m = pendiente de la curva;

b = intercepto.

A partir de esta relación, la concentración de una muestra desconocida se determina despejando C:

$$C = (A - b) / m$$

Esta ecuación permitió transformar las absorbancias de las muestras experimentales en concentraciones residuales de Fe(III), siempre que las lecturas se encontraran dentro del intervalo cubierto por los patrones utilizados en la calibración.

10.3.7. Intervalo analítico de trabajo

La curva de calibración utilizada comprendió concentraciones entre 0 y 100 ppm:

$$0 \leq C \leq 100 \text{ ppm}$$

Por lo tanto, las muestras utilizadas para la cuantificación deben presentar una respuesta instrumental comprendida dentro del intervalo definido por los patrones. Las lecturas que superen el límite superior de calibración no deben interpretarse automáticamente mediante extrapolación; en esos casos corresponde realizar una verificación adicional y, cuando proceda, una dilución previa de la muestra.

Tabla 12*Parámetros considerados para la calibración de Fe(III)*

Parámetro	Condición
Técnica analítica	Espectrofotometría UV-Visible
Analito	Fe(III)
Intervalo de calibración	0-100 ppm
Número de patrones	6
Concentraciones	0, 20, 40, 60, 80 y 100 ppm
Variable independiente	Concentración de Fe(III)
Variable instrumental	Absorbancia
Modelo de calibración	Regresión lineal
Expresión general	$A = mC + b$

Nota. La tabla resume las condiciones consideradas para establecer la relación entre la concentración de Fe(III) y la respuesta de absorbancia mediante espectrofotometría UV-Visible. Elaboración propia.

Esquema del procedimiento

Solución de Fe(III) → patrones 0-100 ppm → lectura UV-Vis → absorbancia → regresión lineal → $A = mC + b$ → determinación de C

Precisión metodológica. La longitud de onda empleada en el espectrofotómetro y el coeficiente de determinación (R^2) definitivo deben incorporarse a partir del registro instrumental o de la gráfica final de calibración, ya que esos valores no se encuentran confirmados de forma concluyente en la documentación disponible

10.3.8. Ensayo de remoción de Fe(III) mediante biochar

Los ensayos de remoción se realizaron mediante un sistema experimental tipo batch, utilizando los biochars obtenidos a partir de hoja y fruto de *Lupinus mutabilis* Sweet. Este procedimiento permitió poner en contacto el material carbonoso con una solución acuosa sintética de Fe(III) y evaluar la variación de la concentración del metal en función del tiempo de contacto.

Se evaluaron seis biochars, correspondientes a hoja y fruto carbonizados a 350, 400 y 450 °C durante 15 minutos. Cada material fue puesto en contacto con una solución de Fe(III) de 100 ppm de concentración nominal inicial, manteniendo esta condición como referencia común para todos los tratamientos.

Las muestras fueron evaluadas a los 0, 10, 30 y 60 minutos. El tiempo 0 se consideró como referencia inicial, mientras que las mediciones posteriores permitieron establecer la evolución de la concentración residual de Fe(III) durante el contacto con cada biochar.

Tabla 13

Condiciones de los ensayos de remoción de Fe(III)

Tratamiento	Precursor del biochar	Temperatura de pirólisis	Fe(III) inicial	Tiempos de contacto
H350	Hoja	350 °C	100 ppm	0, 10, 30 y 60 min
H400	Hoja	400 °C	100 ppm	0, 10, 30 y 60 min
H450	Hoja	450 °C	100 ppm	0, 10, 30 y 60 min
F350	Fruto	350 °C	100 ppm	0, 10, 30 y 60 min
F400	Fruto	400 °C	100 ppm	0, 10, 30 y 60 min
F450	Fruto	450 °C	100 ppm	0, 10, 30 y 60 min

Nota. La tabla representa las condiciones utilizadas para evaluar la disminución de Fe(III) mediante los seis biochars obtenidos de Lupinus mutabilis Sweet, considerando el tipo de precursor, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto. Elaboración propia.

10.3.8.1. Desarrollo del ensayo

Para cada tratamiento se dispuso la solución de Fe(III) y se incorporó el biochar correspondiente, previamente identificado según el precursor vegetal y la temperatura de producción. A partir del momento de contacto se inició el registro del tiempo experimental y se efectuaron las evaluaciones correspondientes a 0, 10, 30 y 60 minutos.

Durante los ensayos se registró también el pH de las soluciones, con el propósito de documentar las variaciones producidas durante la interacción entre el biochar y el medio acuoso. Este parámetro se consideró como una variable monitoreada, debido a que no se dispone de evidencia suficiente para afirmar que se mantuvo constante mediante ajuste químico durante todos los tratamientos.

Una vez alcanzado cada tiempo de evaluación, se separó la fase líquida de la fase sólida y la muestra líquida fue utilizada para la lectura mediante espectrofotometría UV-Visible. Las absorbancias obtenidas se relacionaron posteriormente con la curva de calibración para estimar la concentración residual de Fe(III).

10.3.8.2. Cálculo del porcentaje de remoción

A partir de la concentración inicial y de la concentración residual obtenida en cada tiempo, se calculó el porcentaje de remoción de Fe(III) mediante:

$$R (\%) = [(C_0 - C_t) / C_0] \times 100$$

R = porcentaje de remoción de Fe(III);

C₀ = concentración inicial de Fe(III), en ppm;

C_t = concentración residual de Fe(III) al tiempo t, en ppm.

Ejemplo de aplicación del cálculo

Para mostrar la aplicación de la ecuación, si una muestra presenta una concentración inicial de 100 ppm y una concentración residual hipotética de 25 ppm, el porcentaje de remoción se obtiene de la siguiente manera:

$$R (\%) = [(100 - 25) / 100] \times 100$$

$$R (\%) = 75 \%$$

El ejemplo anterior tiene únicamente una finalidad demostrativa. Los porcentajes definitivos de la investigación deben calcularse con las concentraciones experimentales obtenidas para cada tratamiento.

Tabla 14

Variables utilizadas para calcular la remoción de Fe(III)

Parámetro	Símbolo	Unidad	Descripción
Concentración inicial	C ₀	ppm	Fe(III) antes del contacto con el biochar
Concentración residual	C _t	ppm	Fe(III) determinado después del tiempo de contacto
Tiempo de contacto	t	min	0, 10, 30 y 60 min
Remoción	R	%	Disminución porcentual de Fe(III)

Nota. La tabla presenta los parámetros empleados para determinar cuantitativamente la disminución de Fe(III) durante los ensayos con biochar de *Lupinus mutabilis* Sweet. Elaboración propia.

10.3.8.3. Control del intervalo de calibración

Para la cuantificación se consideró el intervalo establecido mediante los patrones de la curva de calibración. Las absorbancias correspondientes a las muestras debían encontrarse dentro del rango cubierto experimentalmente por los estándares utilizados.

Cuando una lectura se encuentra por encima del límite superior de la curva, la concentración no debe calcularse mediante extrapolación como si se tratara de una medición válida dentro del intervalo calibrado. En estos casos, el dato debe identificarse como fuera del rango analítico y considerarse durante la interpretación de los resultados.

El esquema general de cálculo fue el siguiente:

Absorbancia → *ecuación de calibración* → C_i (ppm) → R (%)

De esta manera, para cada condición experimental se obtuvo una concentración residual y, cuando la lectura se encontró dentro del intervalo analíticamente válido, su correspondiente porcentaje de remoción.

11. COMPROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS O RESPUESTA A LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

La pregunta de investigación planteada fue: ¿La combinación del precursor vegetal, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto influye en la remoción de Fe(III) en solución acuosa mediante biochar de *Lupinus mutabilis* Sweet? Los resultados experimentales permitieron responder afirmativamente, debido a que se observaron variaciones en la concentración residual y en el porcentaje de remoción de Fe(III) entre los biochars de hoja y fruto producidos a 350, 400 y 450 °C y evaluados a diferentes tiempos de contacto. Considerando una concentración inicial instrumental de 96 ppm, el biochar de hoja a 350 °C alcanzó 93,75 % , 93,44 % a los 10 minutos, mientras que la hoja a 400 °C alcanzó 91,98 % a los 30 minutos. En el biochar de fruto a 350 °C se observó una respuesta dependiente del tiempo, pasando de 10,42% de remoción a 83,33 % a los 30 minutos y 92,71 % a los 60 minutos. Estas variaciones muestran que la respuesta no fue uniforme y que la combinación del precursor, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto influyó en la disminución de Fe(III). Por tanto, se rechaza la hipótesis nula (H_0), que plantea ausencia de influencia de las condiciones experimentales, y se acepta la hipótesis de investigación (H_1), que establece que dichos factores influyen en la remoción de Fe(III). Esta decisión se sustenta en las diferencias experimentales observadas entre los tratamientos; por ello, si no se dispone de réplicas y una

prueba inferencial, debe interpretarse como una comprobación experimental descriptiva y no como evidencia de significancia estadística.

12. ANÁLISIS Y RESULTADOS

El análisis se desarrolló a partir de los datos experimentales obtenidos durante la caracterización fitoquímica de *Lupinus mutabilis* Sweet y de los registros generados en la evaluación de biochar frente a Fe(III). La presentación de los resultados mantiene separados los datos observados de su interpretación científica. En la caracterización fitoquímica se utilizó la escala semicuantitativa de 0 a 5 establecida en el estudio, mientras que para los ensayos con Fe(III) la interpretación cuantitativa se condicionó a la validez de la curva de calibración y al intervalo analítico de las lecturas UV-Visible.

12.1. Resultados de la caracterización fitoquímica

La caracterización fitoquímica mostró una distribución heterogénea de metabolitos secundarios entre hojas, tallos, raíces y frutos. Los mayores valores representativos se registraron para taninos en hojas (5), saponinas en hojas y tallos (4) y alcaloides en frutos (3). Las cumarinas se detectaron con intensidades bajas a débiles en los cuatro órganos, mientras que los flavonoides y los esteroides/triterpenos presentaron respuestas de menor intensidad. Las quinonas y antraquinonas registraron valores de 0 en todos los órganos evaluados. Estos valores corresponden a intensidad visual semicuantitativa y no deben interpretarse como concentraciones absolutas.

Tabla 15

Intensidad semicuantitativa representativa de metabolitos secundarios en Lupinus mutabilis Sweet.

Metabolito	Hoja	Tallo	Raíz	Fruto	Valor representativo
Alcaloides	1	2	2	3	2
Flavonoides	1	2	0	1	1
Taninos	5	0	2	0	2
Saponinas	4	4	0	0	2
Cumarinas	1	2	1	2	2
Esteroides y triterpenos	1	0	1	3	1
Quinonas y antraquinonas	0	0	0	0	0

Nota. Escala: 0 = negativo; 1 = positivo muy débil; 2 = positivo débil; 3 = positivo moderado; 4 = positivo fuerte; 5 = positivo muy fuerte. Fuente: elaboración propia con datos experimentales (2026).

12.1.1. Alcaloides

Tabla 16

Identificación semicuantitativa de alcaloides.

Órgano	Ácido-base	Ácido tánico	Cloruro férrico	Valor representativo
Hoja	0	1	0	1
Tallo	0	3	1	2
Raíz	0	4	0	2
Fruto	5	2	NR	3

Nota. NR = ensayo no representativo. Fuente: elaboración propia con datos experimentales (2026).

Los alcaloides presentaron la mayor intensidad representativa en el fruto (3), seguido por tallo y raíz (2), mientras que la hoja registró un valor de 1. La prueba ácido-base produjo una respuesta máxima en el fruto (5) y valores nulos en los demás órganos; en cambio, el ácido tánico mostró una distribución más amplia, con el valor más alto en la raíz (4). La diferencia entre pruebas indica que la respuesta cualitativa dependió del reactivo empleado y de la composición particular de cada órgano, por lo que el valor representativo resume una tendencia y no una cuantificación de alcaloides.

La mayor respuesta en el fruto es compatible con la relevancia de los alcaloides quinolizidínicos en especies del género *Lupinus* y con la variabilidad química descrita para *L. mutabilis*. Estudios recientes confirman que el contenido de alcaloides en germoplasma ecuatoriano puede variar de manera considerable entre genotipos, mientras que la literatura del género reconoce a estos compuestos como metabolitos nitrogenados vinculados a funciones defensivas. En consecuencia, el perfil obtenido respalda la existencia de diferencias químicas entre los órganos, pero no permite atribuir de manera directa la posterior remoción de Fe(III) a los alcaloides del precursor, debido a que la carbonización modifica profundamente la estructura química original de la biomasa (Rodríguez-Ortega et al., 2026).

12.1.2. Taninos

Tabla 17

Identificación semicuantitativa de taninos.

Órgano	Coordinación con hierro	Agua de cal	Valor representativo
Hoja	5	5	5
Tallo	0	0	0
Raíz	2	2	2
Fruto	0	0	0

Nota. Los valores corresponden a la intensidad de las respuestas observadas en los ensayos aplicados. Fuente: elaboración propia (2026).

Los taninos mostraron la respuesta más intensa de toda la caracterización fitoquímica. La hoja alcanzó un valor de 5 en los dos ensayos y mantuvo un valor representativo de 5; la raíz presentó intensidad 2, mientras que tallo y fruto no registraron respuesta positiva. La coincidencia entre las dos pruebas en cada órgano proporciona consistencia interna al resultado y muestra una distribución marcada hacia el tejido foliar.

Este patrón resulta relevante para interpretar la composición del precursor, ya que los taninos pertenecen a grupos polifenólicos ricos en funciones oxigenadas. Sin embargo, el efecto de estos compuestos sobre el biochar no debe plantearse como una conservación directa del metabolito después de la pirólisis. La transformación térmica entre 350 y 450 °C puede degradar moléculas orgánicas originales y generar una superficie carbonosa con una nueva distribución de grupos hidroxilo, carboxilo y carbonilo. Por ello, la elevada intensidad de taninos en hoja puede considerarse una característica inicial de la biomasa que potencialmente influye en su evolución térmica, pero la existencia de sitios específicos de complejación en el biochar requeriría técnicas como FTIR o XPS para ser demostrada (Chen et al., 2024).

12.1.3. Saponinas

Tabla 18

Identificación semicuantitativa de saponinas.

Órgano	Espuma	Salkowski adaptado	Vainillina	Valor representativo
Hoja	5	4	4	4
Tallo	5	4	4	4
Raíz	0	0	0	0
Fruto	0	0	0	0

Nota. Fuente: elaboración propia con datos experimentales (2026).

Las saponinas presentaron un patrón definido entre órganos: hoja y tallo registraron los valores más altos, con intensidad 5 en la prueba de espuma y 4 en los ensayos de Salkowski adaptado y vainillina; raíz y fruto presentaron valores de 0 en todas las pruebas. La concordancia entre los tres ensayos permitió asignar un valor representativo de 4 a hoja y tallo, evidenciando una distribución preferente en los órganos aéreos evaluados.

La respuesta obtenida describe la composición de la biomasa antes del tratamiento térmico. Durante la carbonización, las saponinas no deben considerarse moléculas intactas responsables de la interacción con Fe(III); sus estructuras orgánicas experimentan descomposición y reorganización. La utilidad de este resultado reside en mostrar que hoja y fruto parten de composiciones químicas muy distintas: la hoja combina taninos y saponinas de alta intensidad, mientras que el fruto carece de ambos grupos detectables. Esta diferencia puede contribuir a la formación de superficies carbonosas distintas después del pirólisis, junto con otros factores como celulosa, hemicelulosa, lignina y contenido mineral del precursor (Chen et al., 2024; Ghorbani & Amirahmadi, 2025).

12.1.4. Cumarinas

Tabla 19

Identificación semicuantitativa de cumarinas.

Órgano	UV	Apertura/cierre lactónico	Coordinación con hierro	Valor representativo
Hoja	0	2	0	1
Tallo	0	5	0	2
Raíz	0	3	0	1
Fruto	0	5	0	2

Nota. Fuente: elaboración propia con datos experimentales (2026).

Las cumarinas presentaron valores representativos bajos: 1 en hoja y raíz, y 2 en tallo y fruto. La señal se concentró en la prueba de apertura y cierre lactónico, donde tallo y fruto alcanzaron intensidad 5, mientras que las pruebas UV y de coordinación con hierro no mostraron respuesta positiva en los registros consolidados. Esta diferencia entre ensayos aconseja interpretar la presencia de cumarinas con cautela, debido a que la señal global depende principalmente de una de las pruebas utilizadas.

Desde el punto de vista de la relación precursor-biochar, estos valores muestran una composición aromática diferencial, pero no demuestran que las cumarinas sean responsables de la remoción posterior de Fe(III). El pirólisis produce deshidratación, descarboxilación, ruptura de enlaces y progresiva aromatización de la biomasa; por ello, la discusión debe centrarse en la posible influencia de la composición inicial sobre la química superficial resultante, no en la permanencia de metabolitos individuales. La literatura reciente sobre biochar confirma que el precursor y la temperatura de pirólisis gobiernan conjuntamente la distribución de funciones oxigenadas y la estructura porosa del material carbonoso (Chen et al., 2024).

12.1.5. Quinonas y antraquinonas

Tabla 20

Identificación semicuantitativa de quinonas y antraquinonas.

Órgano	Bornträger	Bornträger modificado	Oxidación alcalina	Valor representativo
Hoja	0	0	0	0
Tallo	0	0	0	0
Raíz	0	0	0	0
Fruto	0	0	0	0

Nota. Fuente: elaboración propia con datos experimentales (2026).

Las quinonas y antraquinonas registraron valores de 0 en los tres ensayos y en los cuatro órganos estudiados. Bajo las condiciones de extracción y detección empleadas, no se obtuvo evidencia colorimétrica de estos grupos metabólicos. El resultado debe expresarse como ausencia de detección y no como ausencia absoluta en la especie, debido a que se trata de pruebas cualitativas cuya respuesta depende de la concentración del analito, del procedimiento de extracción y de la sensibilidad del reactivo.

La ausencia de señal para quinonas/antraquinonas permite delimitar el perfil fitoquímico experimental y evita atribuirles un papel en la comparación entre precursores. En la interpretación del biochar resulta más apropiado considerar los grupos que sí mostraron

respuestas diferenciales y, sobre todo, las transformaciones inducidas por la pirólisis. La adsorción de metales en biochar suele depender de un conjunto de propiedades superficiales —porosidad, carga, grupos funcionales y fracción mineral— que no pueden inferirse únicamente a partir del tamizaje fitoquímico del material vegetal original (Ghorbani & Amirahmadi, 2025).

12.1.6. Flavonoides

Tabla 21

Identificación semicuantitativa de flavonoides.

Órgano	Shinoda	NaOH	AlCl ₃	Valor representativo
Hoja	1	2	1	1
Tallo	2	2	2	2
Raíz	0	0	0	0
Fruto	0	1	1	1

Nota. Fuente: elaboración propia con datos experimentales (2026).

Los flavonoides mostraron una intensidad general baja. El tallo alcanzó un valor representativo de 2 y presentó valores uniformes de 2 en las tres pruebas; hoja y fruto registraron un valor representativo de 1, mientras que la raíz fue negativa. La distribución obtenida indica que este grupo no fue dominante respecto de taninos o saponinas, aunque estuvo presente en tres de los cuatro órganos analizados.

La detección de flavonoides en *L. mutabilis* es consistente con estudios instrumentales recientes. Tian et al. (2024) caracterizaron isoflavonas y flavonas en semillas de lupino andino mediante LC-MS, demostrando una diversidad de compuestos flavonoides que varía entre ecotipos y con el procesamiento. El tamizaje de la presente investigación no permite identificar moléculas individuales ni establecer concentraciones, por lo que la comparación debe limitarse a confirmar que la presencia de este grupo es químicamente plausible en la especie. Asimismo, no puede asumirse que estos flavonoides sobrevivan intactos a 350–450 °C; su aporte al biochar debe interpretarse, en todo caso, a través de las transformaciones térmicas del precursor y de la química superficial generada posteriormente (Tian et al., 2024; Chen et al., 2024).

12.1.7. Esteroides y triterpenos

Tabla 22

Identificación semicuantitativa de esteroides y triterpenos.

Órgano	Liebermann- Burchard	Salkowski	Valor representativo
Hoja	1	1	1
Tallo	0	0	0
Raíz	1	1	1
Fruto	3	2	3

Nota. Fuente: elaboración propia con datos experimentales (2026).

Los esteroides y triterpenos presentaron su mayor valor representativo en el fruto (3). Hoja y raíz alcanzaron una intensidad de 1, mientras que el tallo fue negativo. En el fruto, la prueba de Liebermann-Burchard registró intensidad 3 y Salkowski intensidad 2, lo que permitió diferenciar este precursor de la hoja, donde ambos ensayos presentaron respuestas débiles.

La diferencia entre hoja y fruto refuerza la existencia de dos precursores con perfiles químicos contrastantes. No obstante, estos metabolitos son de naturaleza orgánica y sufrirán transformaciones durante la carbonización. Por ello, cualquier asociación posterior con la eficiencia frente a Fe(III) debe formularse como una relación entre composición inicial del precursor, proceso térmico y propiedades del biochar resultante. Esta cautela es necesaria porque la literatura sobre adsorción con biochar atribuye el desempeño no a un metabolito aislado, sino a la combinación entre tipo de materia prima, temperatura, porosidad, área superficial, grupos funcionales y contenido mineral (Ghorbani & Amirahmadi, 2025).

12.2. Análisis integrado del perfil fitoquímico

El perfil consolidado muestra dos precursores con características contrastantes. La hoja presentó la mayor intensidad de taninos (5) y saponinas (4), además de respuestas bajas para alcaloides, flavonoides, cumarinas y esteroides/triterpenos. El fruto, en cambio, mostró mayor intensidad de alcaloides (3) y esteroides/triterpenos (3), cumarinas con valor 2 y ausencia de taninos y saponinas. Esta diferenciación es pertinente para la fase de biochar, porque la naturaleza de la materia prima condiciona las rutas de descomposición térmica y las propiedades del sólido carbonoso. Sin embargo, el tamizaje no permite afirmar que los grupos fitoquímicos observados permanezcan intactos en el biochar ni que constituyan directamente los sitios de adsorción de Fe(III).

La literatura reciente confirma que *L. mutabilis* posee una composición fitoquímica variable entre genotipos y que sus semillas contienen alcaloides y flavonoides, entre otros compuestos bioactivos. Rodríguez-Ortega et al. (2026) documentaron diferencias de composición en germoplasma ecuatoriano, mientras que Tian et al. (2024) identificaron trece isoflavonas y ocho flavonas en semillas de lupino andino. Esta variabilidad respalda la necesidad de interpretar los resultados del presente estudio como propios del material recolectado y de las condiciones de extracción utilizadas, evitando extrapolaciones a toda la especie. En términos de aplicación ambiental, el valor del tamizaje reside en caracterizar el precursor antes de la pirólisis y proporcionar una base para discutir, de manera prudente, por qué hoja y fruto pueden originar biochars con comportamientos distintos.

12.3. Resultados de la obtención del biochar

Se obtuvieron seis materiales carbonosos a partir de hoja y fruto de *L. mutabilis* Sweet, utilizando temperaturas de 350, 400 y 450 °C y un tiempo de residencia constante de 15 minutos. Este arreglo permitió comparar dos materias primas bajo tres condiciones térmicas. Los registros de la guía de laboratorio contienen masas iniciales y finales; sin embargo, los valores consignados presentan una inconsistencia aritmética: la diferencia entre la masa del crisol vacío (46,59 g) y el crisol con biomasa (46,64 g) equivale a 0,05 g, aunque el procedimiento indica una carga de 5 g. Además, algunos pesos finales son inferiores a la masa del crisol vacío. En consecuencia, no se calculó el rendimiento porcentual del biochar a partir de esos registros, porque produciría masas negativas o rendimientos físicamente imposibles.

Tabla 23

Condiciones de producción de los biochars evaluados

Código	Precursor	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia (min)
H350	Hoja	350	15
H400	Hoja	400	15
H450	Hoja	450	15
F350	Fruto	350	15
F400	Fruto	400	15
F450	Fruto	450	15

Nota. Los seis materiales fueron producidos con el mismo tiempo de residencia. Fuente: elaboración propia a partir de la guía experimental (2026).

La temperatura de pirólisis es una variable crítica porque modifica simultáneamente la porosidad, el grado de carbonización y la abundancia de grupos funcionales superficiales. Revisiones recientes muestran que temperaturas bajas pueden conservar una mayor proporción de grupos oxigenados, mientras que el aumento de temperatura favorece la aromatización y el desarrollo de porosidad, aunque puede reducir determinados grupos carboxilo e hidroxilo. Por ello, no existe una temperatura universalmente óptima para todos los metales y precursores; el desempeño debe establecerse con los datos experimentales de cada sistema (Chen et al., 2024; Ghorbani & Amirahmadi, 2025).

12.4. Evaluación de Fe(III): estado de validación de los datos

Los ensayos de remoción se estructuraron con una solución nominal inicial de Fe(III) de 100 ppm y cuatro tiempos de contacto: 0, 10, 30 y 60 minutos. La combinación de seis biochars y cuatro tiempos generó 24 condiciones precursor-temperatura-tiempo. La variable de respuesta fue la concentración residual de Fe(III), determinada mediante UV-Visible y utilizada para calcular el porcentaje de remoción. Esta organización permite comparar el efecto del precursor, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto una vez que las lecturas analíticas hayan sido validadas.

12.5. Criterios para la discusión final de los ensayos con Fe(III)

Cuando se validen las absorbancias finales, la comparación deberá realizarse de forma secuencial entre H350, H400, H450, F350, F400 y F450 para cada tiempo de contacto. El tratamiento con mejor comportamiento será aquel que presente la menor concentración residual y el mayor porcentaje de remoción dentro del intervalo válido de calibración. La evolución entre 0 y 60 minutos permitirá establecer si la respuesta se estabiliza dentro del periodo estudiado; solo en ese caso podrá hablarse de una aproximación al equilibrio experimental, sin confundir estabilidad temporal con la demostración de un modelo cinético.

La interpretación de las diferencias entre temperaturas deberá mantenerse vinculada a propiedades plausibles del biochar, sin presentarlas como mecanismos demostrados. Los biochars producidos a menor temperatura pueden conservar más funciones oxigenadas capaces de participar en interacciones de superficie, mientras que temperaturas mayores pueden incrementar la porosidad y el grado de aromatización. La evidencia reciente muestra que el efecto de la temperatura depende del metal y del precursor, y que la sorción de cationes puede involucrar simultáneamente complejación superficial, intercambio iónico, atracción electrostática y precipitación mineral. En este estudio, la ausencia de FTIR, XPS o BET impide

asignar cuantitativamente estos mecanismos a los biochars de *L. mutabilis* Sweet (Chen et al., 2024; Ghorbani & Amirahmadi, 2025).

12.6. Limitaciones analíticas que deben acompañar la interpretación

La interpretación final debe reconocer cuatro restricciones metodológicas. Primero, el tamizaje fitoquímico es semicuantitativo y no determina concentraciones de metabolitos. Segundo, los metabolitos fueron medidos en la biomasa precursora y no en el biochar después de la pirólisis. Tercero, los registros de masa utilizados para el cálculo del rendimiento de biochar requieren corrección antes de generar porcentajes. Cuarto, las absorbancias de Fe(III) que se encuentren fuera del intervalo de calibración no deben convertirse en concentraciones mediante extrapolación no validada. Estas restricciones no invalidan el experimento, pero delimitan el alcance de las inferencias y deben incorporarse al discutir el desempeño de los tratamientos.

También debe considerarse el pH como variable interpretativa. Si el biochar modificó el pH de la solución, la disminución de Fe(III) disuelto no puede atribuirse únicamente a la adsorción sobre el sólido, debido a la tendencia del Fe(III) a hidrolizarse y formar especies poco solubles. Por ello, la discusión definitiva deberá integrar concentración residual, porcentaje de remoción, pH y condiciones de pirólisis, diferenciando la evidencia directamente medida de los mecanismos propuestos como explicación científica (Irto et al., 2023).

13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

13.1. Conclusiones

La caracterización fitoquímica permitió reconocer que *Lupinus mutabilis* Sweet no presenta la misma composición en todos sus órganos. En hojas, tallos, raíces y frutos se identificaron alcaloides, flavonoides, taninos, saponinas, cumarinas y esteroides/triterpenos, mientras que las quinonas y antraquinonas no mostraron respuesta en las pruebas realizadas. Las hojas destacaron por la mayor intensidad de taninos (5) y saponinas (4), mientras que en los frutos se observaron mayores valores de alcaloides (3) y esteroides/triterpenos (3). Estas diferencias permitieron conocer mejor la composición química de cada parte de la planta y sirvieron como base para seleccionar los precursores utilizados posteriormente en la elaboración del biochar.

A partir de hojas y frutos de *Lupinus mutabilis* Sweet se obtuvieron seis biochars mediante tratamientos de 350, 400 y 450 °C durante 15 minutos. Al poner estos materiales en contacto con una solución acuosa de Fe(III), se observaron cambios en la concentración residual

a los 0, 10, 30 y 60 minutos. Esto mostró que tanto la temperatura empleada para producir el biochar como el tiempo de contacto influyeron en la respuesta del sistema. Sin embargo, para definir con seguridad cuál tratamiento presentó la mayor eficiencia, es necesario considerar únicamente las lecturas que se encuentren dentro del intervalo válido de calibración del método UV-Visible.

La comparación entre los tratamientos mostró que el tipo de precursor, la temperatura de pirólisis y el tiempo de contacto influyeron en el comportamiento del biochar frente al Fe(III). Los materiales obtenidos de hoja y fruto respondieron de manera diferente bajo las temperaturas evaluadas, lo que permitió reconocer tendencias entre las condiciones experimentales. Aun así, estas diferencias deben interpretarse de forma descriptiva, ya que la falta de suficientes réplicas independientes y la necesidad de validar completamente algunas lecturas instrumentales no permiten afirmar, por el momento, que existan diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

13.2. Recomendaciones

Se recomienda a la academia y a futuros investigadores complementar la caracterización fitoquímica de *Lupinus mutabilis* Sweet mediante técnicas instrumentales que permitan identificar y cuantificar con mayor precisión los metabolitos presentes en cada órgano vegetal. Esto permitiría profundizar en el conocimiento químico de la especie y relacionar de mejor manera la composición inicial de la biomasa con las características del biochar obtenido después de la pirólisis.

También se recomienda fortalecer los ensayos de Fe(III) mediante una planificación analítica que considere diluciones cuando las absorbancias superen el intervalo de calibración, además de registrar de forma constante la masa de biochar, el volumen de solución y el pH. Para futuras investigaciones desarrolladas en el ámbito académico, sería conveniente trabajar con al menos tres réplicas independientes por tratamiento, lo que permitiría obtener resultados más confiables y aplicar análisis estadísticos con mayor respaldo.

Finalmente, se recomienda que desde la academia se promuevan nuevas investigaciones sobre el aprovechamiento de biomasa vegetal local, ampliando el diseño experimental con diferentes precursores, temperaturas de pirólisis y tiempos de contacto. La incorporación de técnicas como FTIR, análisis BET y microscopía electrónica permitiría conocer con mayor detalle las propiedades superficiales del biochar y comprender mejor su comportamiento frente al Fe(III). Asimismo, se sugiere controlar y registrar el pH durante los ensayos, ya que este

parámetro puede influir en la forma química del hierro y en su disminución dentro de la solución.

14. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019, 6730305. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- Alloway, B. J. (Ed.). (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). *Green chemistry: Theory and practice*. Oxford University Press.
- Asamblea Constituyente de Montecristi. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Suplemento del Registro Oficial No. 449, 20 de octubre de 2008.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2014). *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua*. Segundo Suplemento del Registro Oficial No. 305, 6 de agosto de 2014.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2017). *Código Orgánico del Ambiente*. Suplemento del Registro Oficial No. 983, 12 de abril de 2017.
- Bebeli, P. J., Lazaridi, E., Chatzigeorgiou, T., Suso, M.-J., Hein, W., Alexopoulos, A. A., Canha, G., van Haren, R. J. F., Jóhannsson, M. H., Mateos, C., Neves-Martins, J., Prins, U., Setas, F., Simioniuc, D. P., Talhinas, P., & van den Berg, M. (2020). State and progress of Andean lupin cultivation in Europe: A review. *Agronomy*, 10(7), 1038. <https://doi.org/10.3390/agronomy10071038>
- Biswal, B. K., & Balasubramanian, R. (2023). Use of biochar as a low-cost adsorbent for removal of heavy metals from water and wastewater: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110986. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110986>

- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6(9), e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Carvajal-Larenas, F. E., Linnemann, A. R., Nout, M. J. R., Koziol, M., & van Boekel, M. A. J. S. (2016). *Lupinus mutabilis*: Composition, uses, toxicology, and debittering. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(9), 1454–1487. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.772089>
- Cha, J. S., Park, S. H., Jung, S.-C., Ryu, C., Jeon, J.-K., Shin, M.-C., & Park, Y.-K. (2016). Production and utilization of biochar: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 40, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>
- Chalampunte-Flores, D., Mosquera-Losada, M. R., De Ron, A. M., Tapia Bastidas, C., & Sørensen, M. (2023). Morphological and ecogeographical diversity of the Andean lupine (*Lupinus mutabilis* Sweet) in the High Andean Region of Ecuador. *Agronomy*, 13(8), 2064. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082064>
- Chen, J., Zhou, J., Zheng, W., Leng, S., Ai, Z., Zhang, W., Yang, Z., Yang, J., Xu, Z., Cao, J., Zhang, M., Leng, L., & Li, H. (2024). A complete review on the oxygen-containing functional groups of biochar: Formation mechanisms, detection methods, engineering, and applications. *Science of the Total Environment*, 946, 174081. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174081>
- Citarella, A., Vittorio, S., Dank, C., & Ielo, L. (2024). Syntheses, reactivity, and biological applications of coumarins. *Frontiers in Chemistry*, 12, 1362992. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1362992>
- Cortés-Avendaño, P., Tarvainen, M., Suomela, J.-P., Glorio-Paulet, P., Yang, B., & Repo-Carrasco-Valencia, R. (2020). Profile and content of residual alkaloids in ten ecotypes of *Lupinus mutabilis* Sweet after aqueous debittering process. *Plant Foods for Human Nutrition*, 75(2), 184–191. <https://doi.org/10.1007/s11130-020-00799-y>
- Cowan, M. M. (1999). Plant products as antimicrobial agents. *Clinical Microbiology Reviews*, 12(4), 564–582. <https://doi.org/10.1128/CMR.12.4.564>
- Czubinski, J., Grygier, A., & Siger, A. (2021). *Lupinus mutabilis* seed composition and its comparison with other lupin species. *Journal of Food Composition and Analysis*, 99, 103875. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103875>
- Erdogan-Kablan, S., Yayla, S., Hurkul, M. M., Cetinkaya, A., Nemutlu, E., & Ozkan, S. A. (2025). Recent advancements in the bioactive alkaloids analysis in plant and biological specimen: From the perspective of activity, sample preparation, and analytical method

- selection. *Journal of Chromatography B: Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences*, 1258, 124592. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2025.124592>
- Evans, W. C. (2009). *Trease and Evans' pharmacognosy* (16th ed.). Saunders Elsevier.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
- Ghorbani, M., & Amirahmadi, E. (2025). Optimizing biochar for heavy metal remediation: A meta-analysis of modification methods and pyrolysis conditions. *Environments*, 12(11), 399. <https://doi.org/10.3390/environments12110399>
- Gotore, O., Masere, T. P., & Muronda, M. T. (2024). The immobilization and adsorption mechanisms of agro-waste based biochar: A review on the effectiveness of pyrolytic temperatures on heavy metal removal. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, 92–103. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.04.002>
- Harborne, J. B. (1998). *Phytochemical methods: A guide to modern techniques of plant analysis* (3rd ed.). Chapman & Hall.
- Health Canada. (2024). *Guidelines for Canadian drinking water quality: Guideline technical document – Iron*. Government of Canada. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/publications/healthy-living/guidelines-canadian-drinking-water-quality-guideline-technical-document-iron.html>
- International Union of Pure and Applied Chemistry. (2025). Beer–Lambert law. In *Compendium of Chemical Terminology (the Gold Book)* (5th ed., online version 5.0.0). <https://doi.org/10.1351/goldbook.B00626>
- Inyang, M. I., Gao, B., Yao, Y., Xue, Y., Zimmerman, A., Mosa, A., Pullammanappallil, P., Ok, Y. S., & Cao, X. (2016). A review of biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(4), 406–433. <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1096880>
- Irto, A., Cigala, R. M., De Stefano, C., & Crea, F. (2023). Advances in iron(III) hydrolysis studies. Effect of the metal concentration, ionic medium and ionic strength. *Journal of Molecular Liquids*, 391, 123361. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123361>
- Jacobsen, S.-E., & Mujica, A. (2006). El tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet.) y sus parientes silvestres. In M. Moraes R., B. Øllgaard, L. P. Kvist, F. Borchsenius, & H. Balslev

- (Eds.), *Botánica económica de los Andes Centrales* (pp. 458–482). Universidad Mayor de San Andrés.
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60–72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
- Kumar, S., & Pandey, A. K. (2013). Chemistry and biological activities of flavonoids: An overview. *The Scientific World Journal*, 2013, 162750. <https://doi.org/10.1155/2013/162750>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed.). Routledge.
- Liu, K., Abdullah, A. A., Huang, M., Nishioka, T., Altaf-Ul-Amin, M., & Kanaya, S. (2017). Novel approach to classify plants based on metabolite-content similarity. *BioMed Research International*, 2017, 5296729. <https://doi.org/10.1155/2017/5296729>
- Lustre Sánchez, H. (2022). Los superpoderes de las plantas: Los metabolitos secundarios en su adaptación y defensa. *Revista Digital Universitaria*, 23(2), 1–13. <https://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2022.23.2.10>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015). *Acuerdo Ministerial No. 097-A: Expídense los anexos del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente*. Edición Especial del Registro Oficial No. 387, 4 de noviembre de 2015.
- Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y. S., & Pittman, C. U., Jr. (2014). Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent—A critical review. *Bioresource Technology*, 160, 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.120>
- Presidencia de la República del Ecuador. (2019). *Reglamento al Código Orgánico del Ambiente* (Decreto Ejecutivo No. 752). Suplemento del Registro Oficial No. 507, 12 de junio de 2019.
- Punetha, A., Kumar, D., Suryavanshi, P., Padalia, R. C., & Venkatesha, K. T. (2022). Environmental abiotic stress and secondary metabolites production in medicinal plants: A review. *Journal of Agricultural Sciences*, 28(3), 351–362. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.999117>
- Qasem, N. A. A., Mohammed, R. H., & Lawal, D. U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: A comprehensive and critical review. *npj Clean Water*, 4, 36. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>

- Qiu, B., Tao, X., Wang, H., Li, W., Ding, X., & Chu, H. (2021). Biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 155, 105081. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105081>
- Qiu, M., Liu, L., Ling, Q., Cai, Y., Yu, S., Wang, S., Fu, D., Hu, B., & Wang, X. (2022). Biochar for the removal of contaminants from soil and water: A review. *Biochar*, 4, 19. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00146-1>
- 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>
- Rodríguez-Ortega, D., Samaniego, I., Zambrano, J. L., Llerena-Silva, W., Lopez, L., Marcía-Fuentes, J., Pereira-Lorenzo, S., & Ochoa-Cervantez, D. (2026). Nutritional and phytochemical composition of Andean *Lupinus mutabilis* Sweet germplasm from Ecuador. *Plants*, 15(13), 2008. <https://doi.org/10.3390/plants15132008>
- Royal Botanic Gardens, Kew. (n.d.). *Lupinus mutabilis* Sweet. *Plants of the World Online*. Retrieved August 6, 2026, from <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:504808-1>
- Rumipamba Ganán, J. A. (2021). *Extracción y caracterización de los crudos de saponinas de los residuos (cáscara y semilla) del aguacate Persea americana de las variedades Hass y Fuerte* [Trabajo de titulación, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio Institucional de la Universidad Central del Ecuador. <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/994b25bc-974a-460e-914a-22c15f7c6fa9/content>
- Salcedo Luna, F. S. (2018). *Extracción e identificación de los metabolitos secundarios, antocianinas, antraquinonas y flavonoides presentes en la hoja de la especie Justicia spicigera Schltdl (sacatinta) para su uso cosmético* [Tesis de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Biblioteca USAC. http://www.biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_4077.pdf
- Santos, C. N., Ferreira, R. B., & Teixeira, A. R. (1997). Seed proteins of *Lupinus mutabilis*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(10), 3821–3825. <https://doi.org/10.1021/jf970075v>
- Shrestha, R., Ban, S., Devkota, S., Sharma, S., Joshi, R., Tiwari, A. P., Kim, H. Y., & Joshi, M. K. (2021). Technological trends in heavy metals removal from industrial wastewater: A

- review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105688. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105688>
- Silva Guaranda, N. K., & Villegas Cárdenas, E. A. (2023). *Regeneración natural, diversidad y estructura de la vegetación de área disturbada del campus María Auxiliadora de la Universidad Politécnica Salesiana Guayaquil, Ecuador* [Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26280>
- Staszak, K., & Regel-Rosocka, M. (2024). Removing heavy metals: Cutting-edge strategies and advancements in biosorption technology. *Materials*, 17(5), 1155. <https://doi.org/10.3390/ma17051155>
- Sutherland, C., Chitto, B. S., & Samlal, A. (2023). The status of scientific development on the application of biosorption of heavy metals at laboratory and pilot-scale: A review. *Desalination and Water Treatment*, 299, 13–49. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29699>
- Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., & Yang, Z. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*, 125, 70–85. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.058>
- Tian, Y., Cortés-Avendaño, P., Yang, B., Glorio-Paulet, P., Repo-Carrasco-Valencia, R., & Suomela, J.-P. (2024). Flavonoid diversity in bitter and debittered seeds of Andean lupin (*Lupinus mutabilis* Sweet). *Food Chemistry*, 442, 138411. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138411>
- Tran, H. N., You, S.-J., Hosseini-Bandegharai, A., & Chao, H.-P. (2017). Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review. *Water Research*, 120, 88–116. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.014>
- Villacrés, E., Álvarez, J., & Rosell, C. M. (2020). Effects of two debittering processes on the alkaloid content and quality characteristics of lupin (*Lupinus mutabilis* Sweet). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(5), 2166–2175. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10240>
- Volesky, B. (2007). Biosorption and me. *Water Research*, 41(18), 4017–4029. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.05.062>
- Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1002–1022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>

- Wink, M. (2015). Modes of action of herbal medicines and plant secondary metabolites. *Medicines*, 2(3), 251–286. <https://doi.org/10.3390/medicines2030251>
- World Health Organization. (2022). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>
- Xia, T., Li, Z., Xu, M., Lu, J., & Cai, G. (2025). Structural characteristics, biological functions, and modification strategies of soybean saponins: Biotransformation potential through structure–activity relationship modulation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73(37), 23147–23160. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c08941>
- Xu, Z., Ullah, N., Duan, Y., Hou, Z., Liu, A., & Xu, L. (2023). Editorial: Plant secondary metabolites and their effects on environmental adaptation based on functional genomics. *Frontiers in Genetics*, 14, 1211639. <https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1211639>
- Yaashikaa, P. R., Senthil Kumar, P., Varjani, S., & Saravanan, A. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, 28, e00570. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>
- Younes, A. H., & Mustafa, Y. F. (2024). Plant-derived coumarins: A narrative review of their structural and biomedical diversity. *Chemistry & Biodiversity*, 21(6), e202400344. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202400344>
- Zamora-Ledezma, C., Negrete-Bolagay, D., Figueroa, F., Zamora-Ledezma, E., Ni, M., Alexis, F., & Guerrero, V. H. (2021). Heavy metal water pollution: <A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101504. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101504>
- Zaynab, M., Khan, J., Al-Yahyai, R., Saddar, M., & Li, S. (2024). Toxicity of coumarins in plant defense against pathogens. *Toxicon*, 250, 108118. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2024.108118>

