



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD CIENCIAS DEL MAR

CARRERA DE BIOLOGÍA

**ESTIMACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN UN ECOSISTEMA
RESTAURADO DE LA COMUNA LOMA ALTA, DEL SISTEMA SPACUS-SE**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Previo a la obtención del Título de:

BIÓLOGA

AUTOR

GRACE ELIZABETH VILLAMAR CRUZ

DOCENTE TUTOR

BLGA. JODIE DARQUE ARTEAGA, M. SC.

DOCENTE CO-TUTOR

BLGO. KENNEDY GAIBOR PAREDES

LA LIBERTAD – ECUADOR

2026

**UNIVERSIDAD ESTATAL
PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD CIENCIAS DEL MAR
CARRERA DE BIOLOGÍA**

**ESTIMACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN UN ECOSISTEMA
RESTAURADO DE LA COMUNA LOMA ALTA, DEL SISTEMA SPACUS-SE**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Previo a la obtención del Título de:

BIÓLOGA

AUTOR

GRACE ELIZABETH VILLAMAR CRUZ

DOCENTE TUTOR

BLGA. JODIE DARQUE ARTEAGA, M. SC.

DOCENTE CO-TUTOR

BLGO. KENNEDY GAIBOR PAREDES

LA LIBERTAD – ECUADOR

2026

DECLARACIÓN DEL DOCENTE TUTOR

En mi calidad de Docente Tutor del Trabajo de Integración Curricular, " ESTIMACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN UN ECOSISTEMA RESTAURADO DE LA COMUNA LOMA ALTA, DEL SISTEMA SPACUS-SE", elaborado por GRACE ELIZABETH VILLAMAR CRUZ, estudiante de la Carrera de Biología, Facultad de Ciencias del Mar de la Universidad Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Biólogo/a, me permito declarar que luego de haber dirigido su desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por la cual, apruebo en todas sus partes, encontrándose apto para la evaluación del docente especialista.

A handwritten signature in blue ink, reading "Jodie Darquea", is written over a horizontal line.

Blga. Jodie Darquea Arteaga, M. Sc.

DOCENTE TUTOR

DECLARACIÓN DEL DOCENTE DE ÁREA

En mi calidad de Docente Especialista, del Trabajo de Integración Curricular "ESTIMACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN UN ECOSISTEMA RESTAURADO DE LA COMUNA LOMA ALTA, DEL SISTEMA SPACUS-SE", elaborado por GRACE ELIZABETH VILLAMAR CRUZ, estudiante de la Carrera de Biología, Facultad de Ciencias del Mar de la Universidad Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Bióloga, me permito declarar que luego de haber evaluado el desarrollo y estructura final del trabajo, éste cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por la cual, declaro que se encuentra apto para su sustentación.



Blgo. Gabriel Brito Vera, Ph. D

DOCENTE DE ÁREA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, porque aún en los momentos en que me faltó la fe, me permitió encontrar la fuerza necesaria para continuar y culminar esta etapa.

A mi madre, por su amor, esfuerzo y sacrificio constante, porque gracias a ella he podido llegar hasta aquí y cumplir este objetivo tan importante en mi vida.

A mi hermana, por su apoyo, su compañía y por ser una de las razones por las que puedo cerrar esta etapa con orgullo; y a mi hermanita, por ser parte de mi vida y de este logro que comparto con mi familia.

A mi abuela, por nunca perder la fe en mí, incluso en los momentos más difíciles y por brindarme siempre su cariño y confianza.

A mi padre, quien, aunque ya no esté físicamente con nosotras, permanece vivo en nuestros corazones, que me apoyó siempre y siempre recordaré: Gracias.

A mi abuelo Macario, quien hoy acompaña a mi padre, gracias por recordar siempre a su niña Grace por sus consejos y por haberme pedido que siga adelante y no me rinda.

Finalmente, dedico este trabajo a mis familiares, amigos, compañeros, docentes y guías, quienes formaron parte de este camino y contribuyeron a que lograra alcanzar esta meta.

Y, por qué no, a mis mascotas, quienes su compañía llegó en el momento adecuado para brindarme la alegría que no sabía que me faltaba y necesitaba.

Grace Elizabeth Villamar Cruz

AGRADECIMIENTOS

Tengo a tantas personas que agradecer, porque a lo largo de este camino recibí apoyo incluso en los momentos en los que ni yo misma lograba creer en mí.

En primer lugar, agradezco a mi tutora, Bióloga Jodie Darquea Arteaga, M. Sc. quien me acompañó a lo largo de esta trayectoria con paciencia, guía y compromiso. Estoy profundamente agradecida por sus enseñanzas, por su apoyo constante y por haberme orientado hasta este momento.

A mi Cotutor, Biólogo Kennedy Gaibor, por acompañarme en este proceso, su orientación y por contribuir con sus conocimientos al desarrollo de este trabajo.

A la Bióloga Ana Ágreda y Aves y Conservación, por su valioso apoyo, por creer en mí, por motivarme y permitirme ampliar mis conocimientos en áreas increíbles de la Biología.

A mi querida amiga, Jenny Rosero, por alentarme en cada paso, escucharme, apoyarme y recordarme que podía continuar en este trayecto de la vida.

Al señor Eleodoro Rodríguez, por su paciencia, compañía y apoyo como guía en el trabajo de campo, contribuyendo de manera fundamental en esta investigación.

A la Universidad Estatal Península de Santa Elena, a la Facultad Ciencias del Mar, a sus autoridades y docentes, por su contribución en mi formación académica y profesional.

Agradezco al equipo de la Dirección de Ambiente del GAD de Santa Elena por el apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto, y a la Comuna Loma Alta por permitir la realización del estudio en su territorio.

Agradezco infinitamente a todas las personas que formaron parte de este proceso, gracias por acompañarme en este camino y nunca soltarme cuando sentía que ya no podía continuar.

Gracias.

TRIBUNAL DE GRADO

Trabajo de Integración Curricular presentado por **GRACE ELIZABETH VILLAMAR CRUZ** como requisito parcial para la obtención del grado de Bióloga de la Carrera de Biología, Facultad Ciencias del Mar de la Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Trabajo de Integración Curricular **APROBADO** el: 13/09/2026



Ing. Jimmy Villón Moreno, M. Sc.

DIRECTOR DE CARRERA

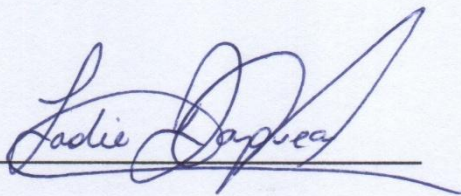
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



Blgo. Gabriel Brito Vera, Ph. D

PROFESOR DE ÁREA

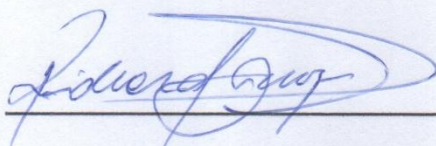
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Blga. Jodie Darquea Arteaga, M. Sc.

DOCENTE TUTOR

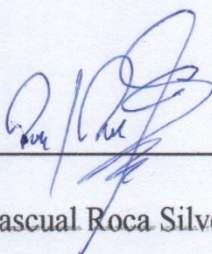
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Blgo. Richard Duque Marín, Mgtr.

DOCENTE GUÍA DE LA UIC II

MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Lcdo. Pascual Roca Silvestre, Mgtr.

SECRETARIO DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN EXPRESA

Yo, Grace Elizabeth Villamar Cruz, declaro que soy responsable de la información, datos, análisis, resultados, conclusiones y demás contenido presentado en el presente Trabajo de Integración Curricular.

Mediante la presente declaración, cedo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE) los derechos de autor y de propiedad intelectual que correspondan sobre este trabajo, de conformidad con la legislación vigente en materia de propiedad intelectual y con la normativa institucional aplicable.

Grace Villamar Cruz

Grace Elizabeth Villamar Cruz

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	XVIII
ABSTRACT.....	XIX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. JUSTIFICACIÓN	6
3. OBJETIVOS.....	8
3.1. Objetivo General.....	8
3.2. Objetivos Específicos.....	8
4. HIPÓTESIS	9
5. MARCO TEÓRICO	10
5.1. Cambio Climático	10
5.2. Gases de Efecto Invernadero	10
5.3. Dióxido de Carbono (CO₂)	10
5.4. Ciclo del Carbono	11
5.5. Flujo del carbono en ecosistemas forestales	12
5.6. Almacenamiento de carbono en ecosistemas forestales.....	13
5.6.1. Biomasa aérea (AGB)	13
5.6.2. Biomasa subterránea (BGB).....	14
5.6.3. Carbono orgánico del suelo (COS).....	15
5.6.4. Sumideros de Carbono	15

5.6.5.	Rol de los sumideros de Carbono jóvenes en los ecosistemas	16
5.7.	Reservorios de carbono	16
5.7.1.	En la atmósfera	17
5.7.2.	Biomasa forestal.....	17
5.7.3.	Suelo	17
5.8.	Restauración Ecológica	18
5.9.	Bosque	18
5.9.1.	Bosque Seco	19
5.9.2.	Bosque seco tropical (BST)	19
5.10.	Sistema Nacional de Monitoreo de Bosques y Evaluación Nacional Forestal (ENF) 19	
5.10.1.	Bosque Semidecduo de Tierras Bajas del Jama-Zapotillo.....	20
6.	MATERIALES Y MÉTODOS	21
6.1.	Enfoque de investigación.....	21
6.2.	Área de Estudio	21
6.3.	Fase de campo	22
6.3.1.	Delimitación de parcelas.....	23
6.3.2.	Inventario forestal.....	24
6.3.3.	Estructura Horizontal, Vertical y Composición Vegetal	26
6.3.3.1.	Área basal	27
6.3.3.2.	Abundancia relativa (%).....	27
6.3.3.3.	Frecuencia relativa (<i>Fr</i>).....	28

6.3.3.4.	Dominancia Relativa (<i>Dr</i>).....	28
6.3.3.5.	Índice de Valor de Importancia (IVI).....	29
6.3.4.	Densidad de individuos por hectárea	31
6.3.5.	Estimación de biomasa aérea y subterránea	32
6.3.5.1.	Biomasa aérea y biomasa subterránea.....	32
6.3.5.2.	Estimación de la biomasa aérea (AGB).....	33
6.3.6.	Conversión de biomasa a carbono	35
6.3.7.	Determinación del carbono orgánico del suelo (COS).....	36
6.4.	Fase de laboratorio	37
6.4.1.	Carbono orgánico del suelo.....	37
6.4.1.1.	Densidad aparente del suelo.....	38
6.4.2.	Cuantificación del carbono almacenado en la biomasa.....	38
6.4.3.	Cuantificación del carbono del suelo.....	39
6.4.4.	Cuantificación de la incertidumbre.....	40
6.4.5.	Análisis estadísticos.....	41
7.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	44
7.1.	Caracterización de la composición y estructura vegetal	44
7.1.1.	Identificación de Familias, Géneros y Especies.....	44
7.1.2.	Densidad de individuos por hectárea	45
7.1.3.	Índices Ecológicos de Diversidad.....	46
7.1.4.	Estructura horizontal	48

7.1.4.1.	Abundancia y Frecuencia.....	48
7.1.4.2.	Dominancia y Área Basal	50
7.1.4.3.	Índice de Valor de Importancia (IVI).....	51
7.1.5.	Estructura Vertical.....	52
7.1.6.	Clases diamétricas.....	54
7.2.	Cuantificación de biomasa y carbono almacenado.....	56
7.2.1.	Biomasa aérea y biomasa subterránea total	56
7.2.1.1.	Biomasa aérea por componente restaurado y remanente	57
7.2.1.2.	Biomasa subterránea por componente restaurado y remanente	58
7.2.2.	Biomasa total por especie	59
7.2.2.1.	Biomasa aérea por especies	60
7.2.2.2.	Biomasa subterránea por especie	62
7.2.3.	Carbono almacenado en la biomasa.....	63
7.2.3.1.	Carbono almacenado en la biomasa por parcela	63
7.2.3.2.	Carbono almacenado en la biomasa por especie.....	65
7.2.3.3.	Análisis temporal del carbono en la biomasa	67
7.3.	Carbono orgánico del suelo (COS).....	68
7.3.1.	Carbono orgánico del suelo por profundidad	68
7.3.1.1.	Análisis de las reservas de carbono orgánico del suelo según la profundidad	69
7.4.	Síntesis del almacenamiento de carbono.....	71
8.	DISCUSIÓN	73

9.	CONCLUSIONES.....	79
10.	RECOMENDACIONES.....	81
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	83
12.	ANEXOS.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	12
Figura 2	14
Figura 3	15
Figura 4	22
Figura 5	26
Figura 6	45
Figura 7	54
Figura 8	56
Figura 9	60
Figura 10	61
Figura 11	63
Figura 12	64
Figura 13	67
Figura 14	69
Figura 15	70
Figura 16	112
Figura 17	112
Figura 18	113
Figura 19	113
Figura 20	113
Figura 21	114
Figura 22	115
Figura 23	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	23
Tabla 2	30
Tabla 3	31
Tabla 4	36
Tabla 5	44
Tabla 6	46
Tabla 7	47
Tabla 8	49
Tabla 9	50
Tabla 10	52
Tabla 11	57
Tabla 12	58
Tabla 13	59
Tabla 14	107
Tabla 15	107
Tabla 16	108
Tabla 17	108
Tabla 18	109
Tabla 19	110
Tabla 20	110
Tabla 21	111
Tabla 22	111

GLOSARIO

Almacenamiento de carbono	Consiste en la cantidad de carbono retenido en un reservorio en un ecosistema en un momento determinado, se expresa por unidad de superficie.
Biomasa	Materia orgánica presente en un organismo o ecosistema, en ecología se exprese como peso seco.
Biomasa subterránea	Masa seca estimada de las raíces vivas localizadas bajo el suelo. Se pueden calcular indirectamente por medio de la biomasa aérea.
Carbono orgánico del suelo	Consiste en el carbono obtenido de la materia orgánica del suelo, es un reservorio fundamental para la estructura del suelo y ciclo de carbono.
Densidad de madera	Relación entre masa y volumen de la madera.
Incertidumbre	Nivel de variación asociado a una estimación, se origina por métodos de medición, supuestos o factores de conversión.

ABREVIATURAS

AGB	Biomasa aérea (Above-Ground Biomass)
BGB	Biomasa subterránea (Below-Ground Biomass)
C	Carbono
COS	Carbono orgánico del suelo
CO ₂	Dióxido de carbono
DAP	Diámetro a la altura del pecho
H	Altura
Rho (ρ)	Densidad de madera
Ha	Hectárea
Mg C ha ⁻¹	Megagramo de carbono por hectárea
GEI	Gases de efecto invernadero
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
SPACUS – SE	Sistema Provincial de Áreas de Conservación y Uso Sostenible de Santa Elena

RESUMEN

Los ecosistemas restaurados cumplen un rol importante en la recuperación de la cobertura vegetal y el almacenamiento de carbono en la vegetación y el suelo. No obstante, se tiene poco conocimiento sobre su aporte al carbono en fases iniciales de establecimiento, especialmente en ecosistemas de bosque seco tropical. La presente investigación tuvo como objetivo estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea, biomasa subterránea y carbono orgánico del suelo en un ecosistema restaurado del sistema SPACUS-SE, localizado en la comuna Loma Alta. Por ello, se establecieron nueve parcelas permanentes circulares de 0,04 ha, donde se registraron variables dasométricas como diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total en los tres monitoreos. La biomasa aérea se estimó a través de ecuaciones alométricas, la biomasa subterránea por la relación $BGB = AGB \times 0,28$ y el carbono aplicando el factor 0,47. El carbono orgánico del suelo se determinó por el método DUMAS en profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30 cm. Se registraron 92 individuos, distribuidos en 6 familias, 12 géneros y 13 especies. El suelo almacenó $33,91 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y se consideró el principal reservorio de carbono. La estimación del almacenamiento total fue de $35,15 \text{ Mg C ha}^{-1}$.

Palabras clave: restauración ecológica, almacenamiento de carbono, carbono orgánico del suelo, biomasa forestal, bosque seco tropical.

ABSTRACT

Restored ecosystems play an important role in the recovery of vegetation cover and in carbon storage in vegetation and soil. However, little is known about their contribution to carbon storage during the early stages of establishment, particularly in tropical dry forest ecosystems. This study aimed to estimate the carbon stored in aboveground biomass, belowground biomass, and soil organic carbon in a restored ecosystem of the SPACUS-SE system, located in the Loma Alta commune. Nine permanent circular plots of 0.04 ha were established, where dendrometric variables, such as diameter at breast height (DBH) and total height, were recorded during three monitoring events. Aboveground biomass was estimated using allometric equations, belowground biomass using the relationship $BGB = AGB \times 0.28$, and carbon content by applying a conversion factor of 0.47. Soil organic carbon was determined using the Dumas method at depths of 0–10, 10–20, and 20–30 cm. A total of 92 individuals distributed among 6 families, 12 genera, and 13 species were recorded. The soil stored 33.91 Mg C ha⁻¹ and was identified as the main carbon reservoir. The total estimated carbon storage was 35.15 Mg C ha⁻¹.

Keywords: ecological restoration, carbon storage, soil organic carbon, forest biomass, tropical dry forest.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye una amenaza global, cuyos efectos se evidencian mediante cambios en variables climáticas, como la temperatura y la precipitación, que afectan tanto a las actividades humanas como a los procesos ecológicos (Callaghan et al., 2021). El incremento de las emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente de dióxido de carbono (CO₂), constituye una de las principales causas del calentamiento global de origen antropogénico (Forster et al., 2024). Se estima que un calentamiento global de 1,5 °C o superior incrementaría el riesgo de superar varios puntos de inflexión climáticos, capaces de generar cambios sustanciales y, en muchos casos, irreversibles a escala humana, con consecuencias para la población y los ecosistemas (Armstrong McKay et al., 2022). Por esta razón, resulta necesario implementar de manera complementaria medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático (Kongsager, 2018).

En Ecuador, la pérdida y degradación de los bosques representan una presión importante sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, debido al cambio de uso del suelo asociado con la expansión agrícola (Kleemann et al., 2022). Del mismo modo, la deforestación se encuentra asociada con emisiones de CO₂ derivadas de la pérdida de cobertura forestal (Calvas et al., 2024), mientras que, en los bosques tropicales, la degradación forestal también constituye una fuente relevante de emisiones (Pearson et al., 2017). Ante esta problemática, en Ecuador se han implementado iniciativas de restauración forestal y del paisaje en ecosistemas como el Chocó Andino y el bosque seco (Wiegant et al., 2020).

La restauración ecológica se presenta como una respuesta clave frente a la degradación ambiental acelerada, dado su potencial para revertir daños ecológicos, recuperar funciones ecosistémicas que permitan contribuir a la mitigación del cambio climático (Suding, 2011), su propósito es promover la recuperación de la estructura, composición y funcionalidad de los ecosistemas, favoreciendo procesos ecológicos similares a los del ecosistema de referencia (INE et al., 2005; Chazdon, 2008; Barrera Cataño et al., 2010). Este proceso resulta necesario cuando la regeneración natural es lenta e incluso insuficiente (Blanco, 2015). Concibiéndose, la restauración como una disciplina con dimensiones ecológicas, sociales e inclusive culturales, en la que el éxito depende tanto de las dimensiones ecológicas como del contexto humano en el que se desarrolla (Aronson et al., 2006; Suding, 2011; Pérez, 2025).

La restauración ecológica se implementa mediante dos enfoques principales: la restauración activa y la restauración pasiva. Ambos enfoques son complementarios, no obstante, la primera implica intervenciones directas por parte del ser humano para acelerar la recuperación del ecosistema, como la siembra de especies nativas, control de especies invasoras, preparación del suelo e instalación de cercas para evitar perturbaciones (Holl & Aide, 2011; Suding, 2011).

En contraste, la restauración pasiva se basa en permitir que los procesos naturales de regeneración actúen sin intervención directa, limitándose a eliminar o reducir las presiones que impiden la recuperación, como el pastoreo, tala o incendios. Este enfoque suele ser efectivo en áreas donde aún existen bancos de semillas, remanentes de vegetación o alta capacidad de resiliencia ecológica (Chazdon, 2014; Meli et al., 2017).

Es así, que el éxito de estas estrategias depende de factores como historial de uso del suelo, las condiciones del sitio y las características estructurales del bosque, entre ellas la densidad arbórea y composición de especies, las mismas que permiten evaluar el avance de la recuperación ecológica (Guariguata & Ostertag, 2001; Ruiz-Jaén & Aide, 2005; Suganuma & Durigan, 2015).

A nivel global, los bosques cumplen funciones esenciales en la regulación hídrica y como sumideros de carbono (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019; FAO, 2021). Además, el mantenimiento de estas funciones depende de la estabilidad estructural y funcional del ecosistema (FAO & PNUMA, 2020). Sin embargo, la introducción de especies exóticas (Mansourian, 2021), la deforestación (Boanares y Schetini, 2014) y la, expansión agrícola - ganadera (Vargas, 2011) han provocado que extensas áreas se transformen en cultivos, pastizales y pequeños remanentes forestales, con la consecuente pérdida de biodiversidad y capacidad de almacenamiento de carbono (Barrera et al., 2005; Otero & Onaindia 2009; González et al., 2024).

En Ecuador se han implementado procesos de restauración ecológica como respuesta a la degradación de los ecosistemas y a la pérdida de cobertura vegetal. Estas iniciativas se han desarrollado en diferentes regiones del país (Ministerio del Ambiente, 2019), especialmente en ecosistemas frágiles como el bosque seco tropical (Wiegant et al., 2020). Dentro de este ecosistema destacan los procesos de almacenamiento de carbono en la biomasa y el suelo, los cuales contribuyen a la regulación de las concentraciones de CO₂ atmosférico (Rodríguez et al., 2016; Jiménez, 2021; Macías-Pro et al., 2025).

En la provincia de Santa Elena, los procesos de restauración se han desarrollado en zonas de Bosque Seco Tropical, asociados a la cordillera Chongón – Colonche, en áreas como Dos Mangas, Olón, Sinchal, Barcelona y la comuna Loma Alta con el objetivo de contribuir a la recuperación y fortalecimiento de áreas degradadas (Fondo de Inversión Ambiental Sostenible, 2024; Prefectura de Santa Elena, 2025).

La comuna Loma Alta, ubicada en la provincia de Santa Elena e integrada al Sistema Provincial de Áreas de Conservación y Uso Sustentable de Santa Elena (SPACUS-SE), se incluyó en programas de restauración activa impulsados por el Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Santa Elena y organizaciones aliadas, con el fin de recuperar áreas degradadas, y así fortalecer la riqueza biológica y los servicios ecosistémicos que proporcionan. Generando beneficios sociales, económicos y fortaleciendo a las comunidades locales (de Groot et al., 2013; Astudillo-Sánchez et al., 2019; Prefectura de Santa Elena, 2025).

Algunas especies utilizadas en la restauración activa en la Comuna Loma Alta son *Handroanthus chrysanthus* (guayacán amarillo), *Cedrela odorata* (cedro) y *Albizia guachapele* (guachapele) entre otras, reconocidas por su aporte al almacenamiento de carbono, según diversos estudios (Sánchez et al., 2014; Mendizábal-Hernández et al., 2011; Bazurto & Vélez, 2019).

En este contexto, aún existe información limitada sobre la capacidad de almacenamiento de carbono en áreas restauradas de bosque seco tropical, particularmente en

ecosistemas jóvenes que se encuentran en proceso de recuperación ecológica. El área de estudio corresponde a un bosque restaurado de cuatro años, por lo que representa una etapa temprana de recuperación. La ausencia de información sobre biomasa y carbono dificulta comprender el avance del proceso de la restauración y el potencial de estos ecosistemas para contribuir a la mitigación del cambio climático. Por tal motivo, el objetivo de esta investigación es cuantificar el carbono acumulado en el sitio a partir de la biomasa aérea, subterránea y el carbono orgánico del suelo (COS).

2. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se justifica en la necesidad de explorar el valor ecológico asociado a los procesos de restauración en la comuna Loma Alta, considerando que esta información puede aportar elementos técnicos útiles que respalden la importancia del manejo sostenible del área de estudio. Del mismo modo, analizar ecosistemas en etapas tempranas de restauración permite comprender la dinámica inicial de recuperación estructural y funcional, así como el potencial temprano de almacenamiento de carbono. En este contexto, la información generada constituye una línea base para el seguimiento del área restaurada.

Aportando la presente investigación con datos de valor sobre la organización y desarrollo de la cobertura vegetal en su fase inicial de restauración. A través del análisis de la dinámica estructural por medio de la densidad de individuos y la estructura vertical y horizontal, permitiendo entender el avance de la recuperación en su fase inicial, y la capacidad del sistema para restablecer procesos ecológicos sentando las bases para el monitoreo continuo y la gestión eficiente del ecosistema.

En este contexto, la presente investigación contribuirá al conocimiento de la funcionalidad del ecosistema en el área de restauración de Loma Alta (sistema SPACUS-SE), al cuantificar la capacidad y el potencial temprano de almacenamiento de carbono mediante la combinación de inventarios forestales, biomasa total (biomasa aérea más subterránea) ecuaciones alométricas y el análisis del carbono orgánico del suelo (COS) por el método DUMAS. Además, representando el COS un indicador importante de estabilidad ecológica,

debido a que los cambios en este componente ocurren de manera más lenta y refleja procesos de recuperación a largo plazo (FAO, 2019; Párraga García, 2025)

Estos resultados no solo van a permitir establecer una línea base sobre las reservas de carbono acumuladas para el seguimiento y monitoreo de las tasas de fijación a largo plazo mediante las parcelas permanentes, sino que también aportarán evidencia científica para validar la efectividad de las acciones de restauración en el territorio, y la conservación de los servicios ecosistémicos.

Asimismo, la evaluación del carbono orgánico del suelo (COS) resulta fundamental debido a que el suelo constituye uno de los principales reservorios de carbono en ecosistemas terrestres. Su cuantificación permitirá comprender procesos relacionados con la recuperación funcional del ecosistema, fertilidad del suelo y dinámica del ciclo del carbono, especialmente en áreas sometidas a restauración ecológica (Lal, 2004).

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

- ✚ Estimar el carbono almacenado en el área de restauración de Loma Alta del sistema SPACUS-SE, a partir de la biomasa aérea, biomasa subterránea y carbono orgánico del suelo, mediante el uso de parcelas permanentes.

3.2. Objetivos Específicos

- ✚ Caracterizar la composición y estructura vegetal del área de estudio mediante inventario forestal.
- ✚ Cuantificar el carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea, mediante ecuaciones alométricas del sitio restaurado.
- ✚ Determinar el carbono orgánico del suelo en el sitio de estudio, a través del método DUMAS.

4. HIPÓTESIS

H₁: El carbono almacenado en el área de restauración de Loma Alta (SPACUS-SE) no se distribuye de manera uniforme entre la biomasa aérea, biomasa subterránea y carbono orgánico del suelo.

5. MARCO TEÓRICO

5.1.Cambio Climático

El cambio climático se define como las alteraciones a largo plazo en las temperaturas y patrones climáticos (Ulusow, 2024). Es decir, este proceso se relaciona con el aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera, los cuales retienen parte del calor emitido por la superficie terrestre hacia el espacio, como resultado incrementa la temperatura de manera progresiva en la superficie del planeta y en las capas bajas de la atmósfera (German National Academy of Sciences Leopoldina, 2021). Causas que pueden estar relacionadas tanto directa como indirectamente por factores antropogénicos (Vera & Serrano, 2023).

5.2. Gases de Efecto Invernadero

Involucra a los gases existentes en la atmósfera que contribuyen al efecto invernadero. Su origen es natural y antrópico, el término por efecto invernadero corresponde al proceso de la radiación térmica transmitida por medio de la atmósfera consumida por este tipo de gases (CEPSA, 2015). Tal como menciona el IPCC (2021), ciertos gases de la atmósfera, como el CO₂, CH₄ y N₂O operan como capa aislante para la Tierra, calentándola y ocasionando la liberación de calor en el espacio exterior.

5.3. Dióxido de Carbono (CO₂)

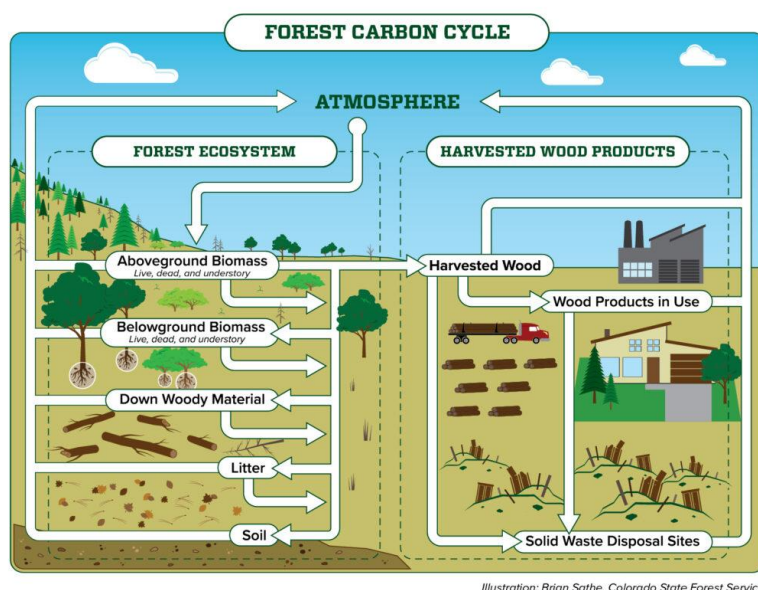
Este gas es inodoro e incoloro en condiciones ambientales, compuesto por un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno a través de enlaces covalentes, se produce por medio de combustión. Este compuesto forma parte del ciclo del carbono, en donde se intercambia en la biosfera global, actúa y regula las temperaturas (NOAA, 2024).

5.4. Ciclo del Carbono

El ciclo del carbono es un proceso dinámico natural el cual circula continuamente entre la atmósfera, suelo, océanos y seres vivos (Vorster et al., 2024). El intercambio de carbono pasa por medio de procesos como fotosíntesis, respiración, descomposición y combustión, donde, las plantas se encargan de absorber dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera produciendo su propio alimento, mientras que los organismos vivos y la materia orgánica liberan ese carbono al ambiente nuevamente. No obstante, las actividades antropogénicas como la deforestación o la quema de combustibles alteran el equilibrio natural, incrementando la concentración de CO_2 en la atmósfera y contribuyendo al cambio climático.

Figura 1

Ciclo del carbono forestal y principales reservorios



Nota. Tomado de Vorster et al. (2024).

5.5. Flujo del carbono en ecosistemas forestales

De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (2006), el flujo del carbono en ecosistemas forestales se determina por procesos de captación, almacenamiento y liberación de carbono en la atmósfera, vegetación y suelo. En los bosques ingresa por medio de la fotosíntesis, es decir, el dióxido de carbono se fija por la vegetación y se almacena a través de la biomasa aérea y subterránea. Por consiguiente, cierta parte del carbono se transfiere al suelo por medio de la hojarasca, raíces muertas y descomposición de residuos orgánicos (Burbano-Orjuela, 2018). Los disturbios tanto naturales como antrópicos cambian significativamente el flujo, modificando el balance de captura y emisiones de carbono (Ruiz, 2026). El equilibrio entre estos flujos determina si un ecosistema forestal se mantiene como un

sumidero o una fuente de carbono (Tito et al., 2009). Las fuentes de carbono incluyen: carbono terrestre, carbono biológico, carbono atmosférico y el obtenido a partir de las actividades antropogénicas, así como el de la flora y fauna (Li et al., 2024).

5.6. Almacenamiento de carbono en ecosistemas forestales

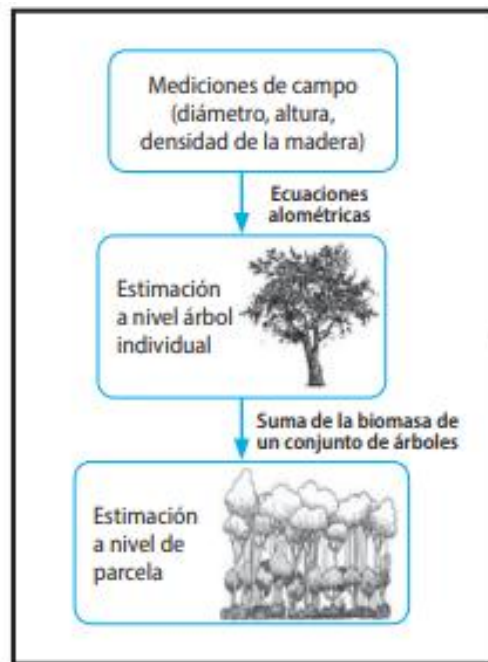
De acuerdo con el IPCC (2006), en este tipo de ecosistemas forestales se evidencia uno de los reservorios fundamentales de carbono terrestre y juegan un papel principal en la mitigación del cambio climático, al minimizar la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera (FAO, 2013).

5.6.1. Biomasa aérea (AGB)

En general, la biomasa aérea corresponde a toda la vegetación viva, desde leñosa como herbácea, sobre el suelo (incluye tallos, tocones, ramas, corteza, semillas y follaje) (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2023). La biomasa aérea constituye un reservorio de carbono en ecosistemas forestales tropicales, donde los árboles representan el mayor aporte de biomasa en comparación con otros componentes vegetales, debido a sus dimensiones y acumulación de materia orgánica (Hernández-Stefanoni et al., 2021). Es así que, uno de los métodos más utilizados para estimar la biomasa aérea es mediante ecuaciones alométricas, debido a su confiabilidad para cuantificar biomasa forestal a través de variables dasométricas como diámetro a la altura de pecho y altura de los árboles, sin necesidad de métodos destructivos (Guzmán-Santiago et al., 2024).

Figura 2

Estimación de biomasa forestal mediante mediciones de campo y ecuaciones alométricas



Nota. Tomado de Hernández-Stefanoni et al. (2021).

5.6.2. Biomasa subterránea (BGB)

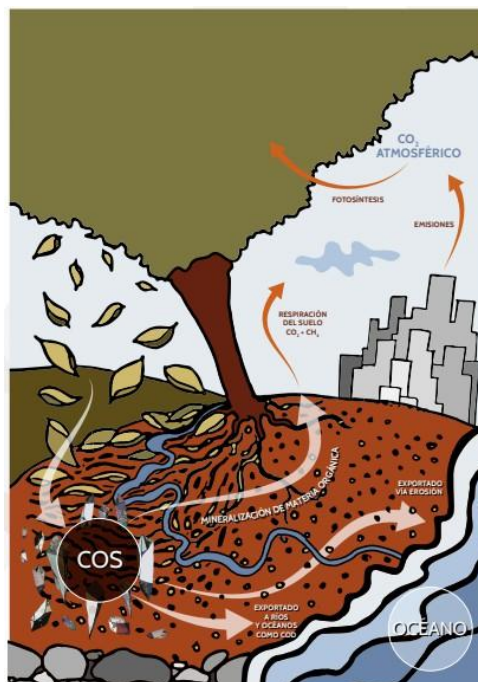
Es la masa de materia orgánica viva localizada bajo el suelo, constituida a partir de las raíces vivas de las plantas. Representando, en ecosistemas forestales, una parte fundamental del carbono total almacenado. Donde dicha magnitud se obtiene a partir de ecuaciones alométricas en conjunto con la biomasa aérea (IPCC, 2006).

5.6.3. Carbono orgánico del suelo (COS)

Hace mención al carbono presente en el suelo luego de descomponerse parcialmente de cualquier material producto de organismos vivos, conocido por ser fundamental en el ciclo global del carbono por medio de la atmósfera, vegetación, suelo, ríos y océano (FAO, 2017).

Figura 3

Carbono orgánico del suelo en el ciclo global del carbono



Nota. Tomado de FAO (2017).

5.6.4. Sumideros de Carbono

Se considera un sumidero de carbono a un depósito con la función de retener y/o secuestrar carbono de la atmósfera en forma de CO₂. De acuerdo con las Directrices sobre el Cambio Climático para gestores forestales (FAO, 2013), a medida que un ecosistema en desarrollo crece, este opera como un sumidero, puesto que el volumen de carbono almacenado mediante la fotosíntesis es mayor que el liberado a través de los procesos de respiración, descomposición y combustión (Randerson et al., 2002; Grelle et al., 2023; Pan et al., 2024).

5.6.5. Rol de los sumideros de Carbono jóvenes en los ecosistemas

Si bien el almacenamiento de carbono se asocia a estructuras boscosas maduras, lineamientos como el IPCC (2019), reconocen que los ecosistemas jóvenes actúan como sumideros dinámicos y de alta velocidad. En esta etapa, el almacenamiento se concentra en la biomasa aérea, vegetación presente y el carbono orgánico del suelo (COS) (FAO, 2013; Climate promise, 2023; Rivas, 2025).

5.7. Reservorios de carbono

En el ciclo de carbono, un reservorio de carbono, es un compartimiento localizado en el sistema terrestre en donde se almacena el carbono, en cierto tiempo determinado. En áreas forestales denominan reservorios a la biomasa aérea, subterránea, madera muerta, hojarasca e inclusive carbono orgánico del suelo. Estos sitios actúan a modo de fuente o sumidero, siempre y cuando se equilibre el flujo de entrada y salida del carbono (IPCC, 2006).

5.7.1. En la atmósfera

La atmósfera forma parte del sistema climático y actúa como un reservorio dinámico de carbono, debido al constante intercambio gaseoso que ocurre entre los ecosistemas terrestres, océanos y la atmósfera. En este proceso el carbono está principalmente en forma de CO₂ y CH₄, participando en diferentes mecanismos de retroalimentación climática (Ciais et al., 2013; IPCC, 2006). No obstante, en términos de almacenamiento total de carbono, la atmósfera almacena menores cantidades de carbono en comparación con otros reservorios como los océanos y suelos; sin embargo, desempeña un papel fundamental en la regulación del clima global y en la dinámica del ciclo del carbono (Ciais et al., 2013).

5.7.2. Biomasa forestal

En términos forestales, corresponde a la masa total de organismos vivos (tronco, ramas, raíces, hojas) presentes en un área determinada y permanecerá como un stock activo siempre que el ecosistema esté conservado (IPCC, 2006). Siendo, considerado también como un sumidero dada la capacidad de absorber mayor CO₂ del que liberan (Pan et al., 2011).

5.7.3. Suelo

En los suelos, el almacenamiento de carbono ocurre cuando el carbono fijado por la vegetación ingresa al componente edáfico mediante residuos vegetales, raíces muertas y

aportes de materia orgánica. Una parte de este carbono se incorpora a la materia orgánica del suelo y puede permanecer almacenada durante años e incluso milenios, según las condiciones ambientales y las propiedades del suelo (FAO, 2002; Lal, 2004). Debido a esta capacidad de almacenamiento, los suelos son considerados importantes reservorios de carbono y sumideros claves para la mitigación del cambio climático (Lal, 2004).

5.8. Restauración Ecológica

Se define la restauración ecológica como una herramienta técnica y científica, que permite revertir el daño en ecosistemas degradados, permitiendo que la naturaleza recupere autonomía y resiliencia a través de procesos ecológicos, para mejorar la capacidad a futuras perturbaciones, en este aspecto es necesario designar al bosque como un ente vivo, interconectado y condicionado a través de contextos sociales, históricos y ecológicos (Colomina et al., 2025).

5.9. Bosque

Un bosque corresponde, a una cobertura vegetal, que ocupa una superficie mayor a 0,5 ha, compuesta por árboles, con alturas superiores a los 5 metros y con una cobertura dosel superior al 10%, incluyendo individuos con la capacidad potencial de obtener esta altura in situ (FRA, 2015).

5.9.1. Bosque Seco

Se consideran bosques secos a ecosistemas frágiles y sometidos a perturbaciones antrópicos, donde el ser humano habita y desarrolla su vida en el territorio, aprovechando los derivados forestales maderables y no maderables. Posee importancia económica para la población rural, ya que provee productos para subsistir, del mismo modo se usa para el pastoreo de ganado caprino y vacuno (Aguirre et al., 2006). Las precipitaciones características anual de este tipo de bosque es menor a 1 600 mm y mantiene una temporada seca de entre 5 a 6 meses, en la que la precipitación disminuye hasta 100 mm (Aguirre et al., 2006).

5.9.2. Bosque seco tropical (BST)

Localizados en tierras bajas y muy calurosas, mantiene estacionalidad de lluvias, es decir, poseen épocas de sequía caracterizadas por sequías largas y extremas; y en temporada de lluvia, el bosque toma una tonalidad completamente verde, del mismo modo, sus suelos son fértiles y hospedan diversidad plantas y animales con capacidad de adaptación para sobrevivir en la época seca. Las temperaturas van desde los 25 a 35 °C y las lluvias van desde los 500 hasta 2000 mm al año (Banda-R et al., 2015).

5.10. Sistema Nacional de Monitoreo de Bosques y Evaluación Nacional Forestal (ENF)

Este sistema constituye un grupo de actores, componentes, metodologías y procesos, en donde se genera, guarda, evalúa e informa datos espaciales, biofísica y socioeconómicamente de actividades relacionadas a los bosques, ecosistemas naturales y biodiversidad asociada (SNMB, 2020).

La ENF, es el instrumento validado por el Ministerio de Ambiente y Agua que mantiene información actualizada y robusta por el estado de uso y conservación de los bosques, lo que permite garantizar la adecuada gestión (ENF, s.f.).

5.10.1. Bosque Semidecidual de Tierras Bajas del Jama-Zapotillo

Corresponde a bosques de dosel, su altura varía de 20 a 25 m, además, presentan árboles aislados de 30 m (Briones & Laje, 2021). Su fisionomía semicaducifolio, se caracteriza por un bioclima pluvial estacional subhúmedo (Macías-Pro et al., 2025). Los bosques que incluyen son arbustales y herbazales; deciduos, semidecuiduos y siempreverdes estacionales de tierras bajas hasta los 400 msnm aproximadamente (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013). Se localizan en áreas de cultivos, que fueron intervenidas y destruidas. Son áreas amenazadas debido a la importancia económica para la población rural, para suministros de subsistencia y comercio (Briones y Laje, 2021).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Enfoque de investigación

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental y alcance descriptivo. Fue cuantitativa porque se midieron variables numéricas, como biomasa aérea, biomasa subterránea y carbono orgánico del suelo, para estimar el carbono total almacenado en el área de restauración de Loma Alta. Según, Hernández Sampieri et al. (2014), este tipo de investigación se caracteriza por recolectar y analizar datos numéricos, mediante procedimientos estadísticos. Es no experimental porque no se manipularon variables independientes ni controlaron condiciones del fenómeno, es decir, se realizaron observaciones tal como suceden en el contexto natural. Y, es descriptiva, debido a que buscó determinar los valores del carbono total almacenado en el área de estudio.

6.2. Área de Estudio

El estudio se desarrolló en la comuna Loma Alta, perteneciente al cantón Santa Elena, provincia de Santa Elena, Ecuador (Figura 4). La comuna Loma Alta, se localiza principalmente en el ecosistema de Bosque Semidecidual de Tierras Bajas del Jama-Zapotillo, con temperaturas que oscilan entre 18 °C a 36 °C y precipitaciones promedio de 1200 a 1100 mm (MAE, 2010; Pincay, 2022). El área de estudio corresponde a una zona en proceso de restauración con 4 años de establecimiento.

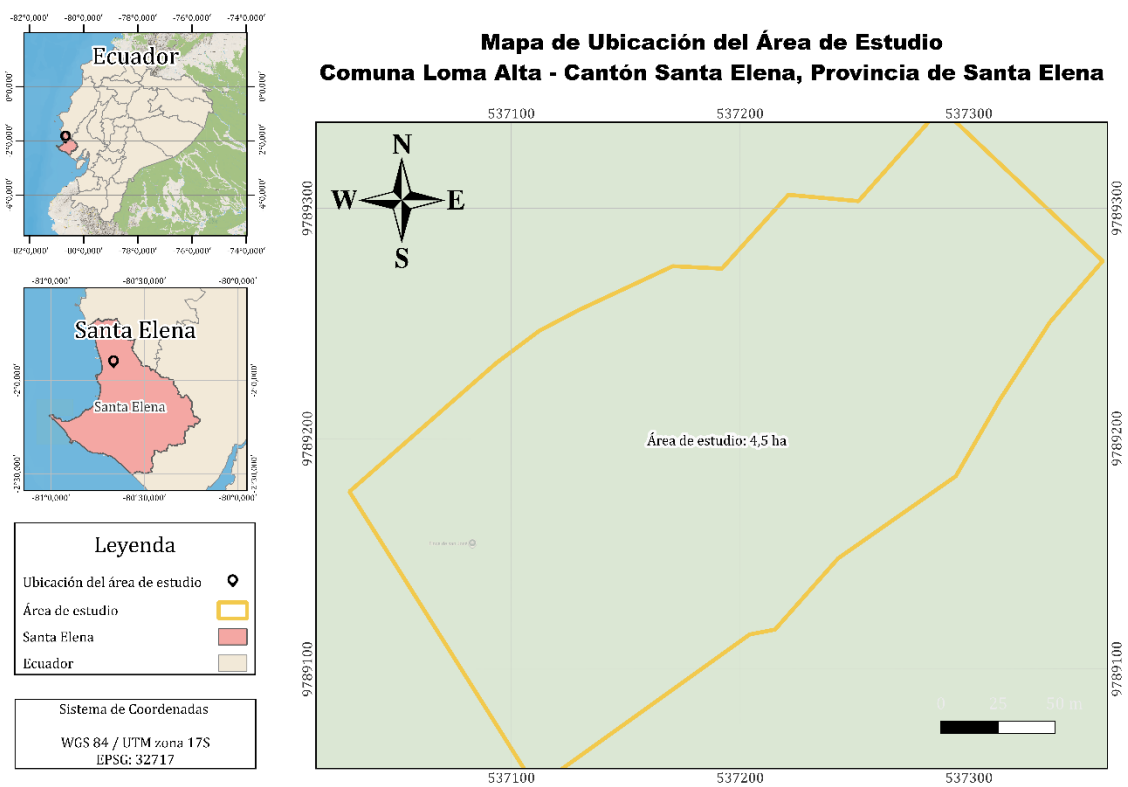
Figura 4

Ubicación geográfica del área de estudio en la Comuna Loma Alta, provincia de Santa Elena

Nota. Imagen realizada partir de imagen satelital de Google Earth.

6.3. Fase de campo

La fase de campo se llevó a cabo en la comuna Loma Alta, en el área restaurada de 4,5 ha en la zona de Los Eucaliptos, cerca del río California dentro del sistema SPACUS–SE.



6.3.1. Delimitación de parcelas

Por medio de cartografía y verificación en campo, se seleccionaron nueve parcelas permanentes circulares de área fija de 0,04 ha a través de un muestreo preferencial adaptado a la accesibilidad, transitabilidad y restricciones físicas presentes en el área restaurada (Bagangan et al., 2024; Wassihun et al., 2019). La red de parcelas se estableció en el interior de las 4,5 ha, donde se observaron condiciones similares de pendiente, tipo de suelo y composición vegetal, estas variables se encuentran entre los principales factores que determinan la variabilidad espacial de la biomasa y permite delimitar unidades relativamente homogéneas para la estimación de carbono. En contraste, la similitud de condiciones permitió considerar al área como una unidad relativamente homogénea para la estimación del almacenamiento de carbono (UNFCCC, 2015). La ubicación de cada parcela se georreferenció con un GPSmap 76CSx Garmin y las coordenadas se registraron en el sistema UTM/WGS84 (Tabla 1). Las parcelas seleccionadas para el estudio se ubicaron en las siguientes coordenadas (IPCC, 2006; Mörsdorf et al., 2015):

Tabla 1

Coordenadas geográficas de las parcelas de muestreo

Parcelas	Zona	Coordenadas	
		X	Y
001	17 M	537259	9789282
002	17 M	537205	9789280
003	17 M	537094	9789205
004	17 M	537126	9789169
005	17 M	537163	9789139
006	17 M	537079	9789146
007	17 M	537100	9789120

008	17 M	537113	9789098
009	17 M	537121	9789077

Nota. X = coordenada Este; Y = coordenada Norte, registradas en las parcelas de muestreo.

Se establecieron en el sitio 9 parcelas permanentes de forma circular, y cada parcela fue considerada como una unidad muestral para el registro de las variables dendrométricas para la estimación de biomasa y carbono. Cada parcela contó con un radio de 11,28 m (equivalente a 400 m² o 0,04 ha). La forma circular permitió facilitar la delimitación en campo, reducir el error de borde, siguiendo criterios generales de inventario y monitoreo forestal (IPCC, 2006; FAO, 2017).

De acuerdo con las directrices de la FAO (2017), cada parcela circular se estableció marcando un punto central georreferenciando con una estaca resistente. Desde este punto se delimitó el radio fijo de 11,28 m utilizando una cinta métrica extendida en varias direcciones (norte, sur, este y oeste), asegurando la correcta delimitación del perímetro circular. Cabe destacar que se incluyeron en la medición todos los árboles con el fuste ubicado dentro del círculo de la parcela.

6.3.2. Inventario forestal

El inventario forestal se realizó dentro de las parcelas permanentes de muestreo. Para cada árbol se registró la especie, el diámetro a la altura del pecho (DAP), medido a 1,30 m sobre el nivel del suelo utilizando cinta diamétrica de marca Forestry Suppliers Inc., para la

altura total se estimó a través de un hipsómetro. Para la identificación taxonómica de los individuos, se siguió los lineamientos establecidos en el Manual de Inventario Forestal Nacional de la FAO (2004). Esto permitió caracterizar la composición florística y estructura de la vegetación presente en el área de estudio.

La identificación taxonómica de las especies se efectuó mediante observación morfológica en campo, apoyada en bibliografía especializada como el Catalogue of the Vascular Plants of Ecuador y Especies forestales de los bosques secos del Ecuador, además, del uso de recursos digitales especializados para complementar la verificación taxonómica de las especies registradas (FAO, 2004).

Cada parcela permanente se consideró como una unidad muestral, mientras que los árboles registrados dentro de cada parcela se consideraron unidades de observación. A cada individuo se le asignó un código de identificación mediante etiquetas, como se observa en la Figura 5.

Figura 5

Identificación y etiquetado de individuos durante el trabajo de campo



Nota. Fotografía de un individuo arbóreo identificado con etiqueta numérica para posterior registro, tomada por el autor (2026).

6.3.3. Estructura Horizontal, Vertical y Composición Vegetal

La composición florística del área se determinó mediante la identificación taxonómica de las especies y el conteo de individuos registrados en las parcelas (FAO, 2004).

Para el análisis de la estructura horizontal se estimaron los parámetros de abundancia, frecuencia y dominancia relativa, utilizando el área basal como indicador estructural. Del mismo modo, se calculó la abundancia relativa (Ar), frecuencia relativa (Fr), dominancia relativa (Dr) y el Índice de Valor de Importancia (IVI), con el fin de determinar la participación ecológica de cada especie en el área de estudio (Stiling, 1999, como se citó en Balladares & Cunuhay, 2022).

6.3.3.1. Área basal

El área basal (Ab) es una variable dendrométrica utilizada para estimar el volumen de especies arbóreas o arbustivas. Corresponde a la superficie de una sección transversal del tronco de un árbol a una altura estándar de 1,30 m sobre el nivel del suelo (altura de pecho) (Mostacedo & Fredericksen, 2000). Se determinó a través de la siguiente ecuación:

$$Ab = \frac{\pi (DAP/100)^2}{4}$$

Donde: Ab corresponde al área basal del individuo (m^2); DAP = diámetro a la altura del pecho, medido a 1,30 m del suelo y expresado en centímetros; y π : Constante matemática (3,1416)

6.3.3.2. Abundancia relativa (%)

La abundancia relativa es la proporción del número de árboles de cada especie respecto al total de individuos en el área de estudio (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Estimándose mediante la siguiente ecuación:

$$Ar\% = \frac{N_I}{N_t} \times 100$$

Donde: Ar corresponde a la abundancia relativa (%), N_i es el número de individuos de la especie i ; N_t es el número total de individuos muestreados en el área (Mena-Mosquera et al., 2020).

6.3.3.3. Frecuencia relativa (Fr)

La frecuencia relativa corresponde a una proporción o porcentaje que indica qué tan representativa es la frecuencia absoluta en referencia con respecto al valor total obtenido (Pereira, 2021).

$$Fr\% = \frac{Fasp}{\sum Fa} \times 100$$

Donde: Fr corresponde a la frecuencia relativa (%); Fa corresponde a la frecuencia absoluta de una especie; $\sum Fa$ representa la suma de frecuencias absolutas de todas las especies (%); $\sum Fa$ es igual a la sumatoria de frecuencias absolutas de las especies (%) (Mena-Mosquera et al., 2020)

6.3.3.4. Dominancia Relativa (Dr)

Es la proporción del área basal de la especie en referencia a todos los individuos presentes en la parcela de estudio que permite determinar la influencia de la especie en el área de estudio (Adriano Macas, 2024).

$$Dr\% = \frac{ab}{\sum Ab} \times 100$$

Donde: *Dr* corresponde a la dominancia relativa (%), *ab* es el área basal de cada especie (m^2); $\sum ab$ corresponde al área basal de cada especie (m^2); $\sum Ab$, corresponde al área basal total de todas las especies registradas en el área de muestreo (m^2) (Mena-Mosquera et al., 2020).

6.3.3.5. Índice de Valor de Importancia (IVI)

Este índice determina la importancia de una especie en una población o comunidad y se obtiene mediante la sumatoria de los valores porcentuales de abundancia relativa, frecuencia relativa y dominancia relativa de cada especie en el área de estudio (Magurran, 2021; Yunga, 2024). Se determinó por medio de la siguiente fórmula:

$$IVI = Fr\% + Ar\% + Dr\%$$

Donde: *IVI* es el índice de valor de importancia; *Fr* corresponde a la Frecuencia relativa (%); *Ar* es la Abundancia relativa (%); *Dr* es la dominancia relativa (%) (Mena-Mosquera et al., 2020).

6.3.3.6. Clases diamétricas

La distribución de clases diamétricas permitió determinar la estructura poblacional y el estado de desarrollo de la vegetación establecida en el área restaurada (Tabla 2). Por ello, los individuos se agruparon en intervalos diamétricos de cinco centímetros, ordenados de menor a mayor diámetro (FAO, 2002).

Tabla 2

Clasificación diamétrica de los individuos evaluados

Clase	Intervalo DAP (cm)
I	$0 \leq \text{DAP} < 5$
II	$5 \leq \text{DAP} < 10$
III	$10 \leq \text{DAP} < 15$
IV	$\text{DAP} \geq 15$

Nota. DAP = diámetro a la altura del pecho.

6.3.3.7. Estratos verticales

La estructura vertical de la vegetación se evaluó a través de la clasificación de los individuos en estratos altitudinales de acuerdo con la altura total registrada (Tabla 3) (FAO, 2002).

Tabla 3

Rangos de altura por estrato

Estrato	Rango de altura
Bajo	< 5 m
Medio	5 -12 m
Alto	> 12 m

Nota. m = metros; los rangos se utilizaron para clasificar la estructura vertical de los individuos.

6.3.4. Densidad de individuos por hectárea

La densidad de los individuos por hectárea (ind/ha) se determinó para caracterizar la estructura y abundancia de la comunidad arbórea en el área de restauración de Loma Alta (FAO, 2004). Aunque este parámetro no se utilizó de forma directa en las ecuaciones alométricas de cálculo de biomasa, su valor es necesario, para comprender la distribución de la vegetación (FAO 2004), analizar la recuperación estructural e interpretar la variabilidad en el almacenamiento de biomasa y carbono entre parcelas (IPCC, 2006). Determinándose mediante la formula:

$$D = \frac{N}{A}$$

Donde: D corresponde a la densidad de individuos (ind/ha); N pertenece al número total de individuos registrados en cada parcela; A corresponde al área de la parcela (ha).

6.3.5. Estimación de biomasa aérea y subterránea

El seguimiento de las variables dendrométricas y la estimación de la biomasa se efectuaron mediante tres monitoreos con periodicidad bimestral, correspondientes a los meses 1, 3 y 5, durante un periodo total de cinco meses. Esta periodicidad permitió realizar un seguimiento del reservorio, obtener la consistencia de las mediciones y consolidar la cuantificación total de carbono almacenado en el área de estudio

Esta estrategia se enmarca en un enfoque de monitoreo ecológico y se alinea con los lineamientos del IPCC (2006) y la FAO (2017), que recomiendan mediciones periódicas para analizar la dinámica vegetal y frecuencias más espaciadas de tiempo para componentes del suelo. Asimismo, la frecuencia adoptada se sustenta en lo realizado por Sarango & Tenempaguay (2020) quienes aplicaron esquemas similares en contextos de restauración ecológica para evaluar el almacenamiento de carbono en biomasa vegetal y suelo.

6.3.5.1. Biomasa aérea y biomasa subterránea

Para el registro de datos se emplearon fichas de campo estandarizadas y etiquetas de identificación de parcelas, mientras que la sistematización y procesamiento de datos se realizó en Microsoft Excel (última versión). La adopción de esta estrategia de monitoreo corresponde a lo señalado por Ruiz-Jaen & Aide (2005) y Gann et al., (2019), quienes destacan la importancia de un seguimiento frecuente en contextos de restauración ecológica.

6.3.5.2. Estimación de la biomasa aérea (AGB)

Para determinar la biomasa aérea, en cada parcela se registró a todos los individuos el DAP (Diámetro a la altura del pecho), la altura total de cada árbol y la especie. La identificación taxonómica permitió asignar un valor específico de densidad de la madera (ρ), para cada una de las 13 especies registradas. Estos valores se obtuvieron primordialmente de la base de datos Global Wood Density (Zanne et al., 2009) y literatura local validada para especies del bosque seco tropical. Los valores de densidad de madera utilizados en cada especie se pueden observar en Tabla 14 en Anexos. En el caso de no obtener datos a nivel de especie, se utilizó a nivel de género o familia, siguiendo las recomendaciones del IPCC (2006) y de Chave et al., (2005, 2014). La biomasa aérea total por parcela se obtuvo mediante la sumatoria de la biomasa individual de todos los individuos arbóreos registrados cuyo fuste se encontraba dentro de los límites de la unidad muestral, conforme la siguiente expresión:

1) Biomasa por árbol individual:

$$AGB_i = 0,0673 * (\rho_i * D_i^2 * H_i)^{0.976}$$

Donde: AGB_i corresponde a la biomasa aérea por árbol i , en kg; ρ_i es la densidad básica de la madera de la especie (g/cm^3); D_i corresponde al diámetro a la altura del pecho del árbol i (cm); H_i es la altura total del árbol i (m).

2) Biomasa total de la parcela

Posteriormente, la biomasa aérea total de cada parcela se obtuvo mediante la sumatoria de la biomasa aérea individual de los n individuos incluidos en la unidad muestral en cada monitoreo. El resultado se expresó en kilogramos (kg):

$$AGB_{\text{parcela}} = \sum_{i=1}^n AGB_i$$

Donde: AGB_{parcela} corresponde a la biomasa aérea total estimada en la parcela (kg); AGB_i es la biomasa aérea estimada del árbol i (kg); i representa a cada individuo; y n corresponde al número total de árboles registrados en la parcela.

6.3.5.3. Estimación de la biomasa subterránea (BGB)

La biomasa subterránea se calculó para cada parcela a partir de la biomasa aérea total previamente estimada, y se expresó en kilogramos (kg). Para la estimación de biomasa

subterránea se aplicó la relación raíz:vástago ($R = 0.28$) recomendada por Mokany et al. (2005) y utilizada en las Directrices del IPCC (2006) para bosques secos tropicales. El uso de este valor ha sido también adoptado en estudios recientes de restauración ecológica, desarrollados en regiones bioclimáticas similares, específicamente en bosque tropical seco (Rajapakshe et al., 2024) para la cuantificación de las reservas de carbono en la biomasa subterránea donde se evalúa el almacenamiento de carbono bajo condiciones similares.

$$BGB = AGB * R$$

Donde; BGB corresponde a la biomasa subterránea (kg); AGB es la biomasa aérea (kg) y R corresponde a la relación raíz:vástago (0,28).

6.3.6. Conversión de biomasa a carbono

El carbono almacenado en la biomasa se estimó aplicando el factor de conversión promedio de 0,47 propuesto por el IPCC (2006):

$$C_{kg} = (AGB + BGB) \times 0,47$$

Donde; C_{kg} corresponde al carbono almacenado en la biomasa (kg C); AGB es la biomasa aérea total (kg); BGB es la biomasa subterránea total (kg); 0,47 corresponde a la fracción de carbono presente en la biomasa seca de ecosistemas tropicales (IPCC, 2006).

6.3.7. Determinación del carbono orgánico del suelo (COS)

Para la estimación del carbono orgánico del suelo (COS), en cada parcela se tomaron muestras de material edáfico en tres intervalos de profundidad. El material correspondiente a una misma parcela y a un mismo intervalo de profundidad se mezcló y homogeneizó para formar una muestra compuesta, siguiendo las recomendaciones de la FAO (2019) y del IPCC (2019), con el fin de asegurar representatividad del análisis (Tabla 4). Posteriormente, el carbono orgánico se determinó mediante el método DUMAS, a través de la combustión seca de la muestra y cuantificación del CO₂ liberado, obteniéndose la concentración de carbono expresada en porcentaje (%).

Tabla 4

Denominación de estratos por profundidad por parcelas

Estrato de profundidad	Denominación	Muestras por parcela
0 – 10 cm	Superficial	1
10 – 20 cm	Intermedia	1
20 – 30 cm	Profunda	1

Nota. En cada parcela se tomó una muestra compuesta por cada estrato de profundidad, en total 27 muestras.

El muestreo de carbono orgánico del suelo se realizó una vez, en el mes 3 del periodo de estudio. Esta decisión se fundamentó, dado que este reservorio edáfico cambia lentamente y pueden caracterizarse adecuadamente con una medición puntual. A diferencia de la biomasa aérea, que puede mostrar ligeras variaciones en periodos cortos por el crecimiento de la

vegetación. Por consiguiente, una medición puntual permitió establecer una línea base representativa del stock del carbono edáfico (FAO, 2019; Nelson & Sommers, 1996). Las muestras de suelo se recolectaron en bolsas plásticas herméticas rotuladas, identificando sitio, parcela, y estratos de profundidad.

Para la toma de muestras de suelo en las parcelas circulares se empleó una pala de muestreo (FAO 2019), extrayéndose una muestra por cada estrato de profundidad (0–10 cm, 10–20 cm y 20–30 cm), con el fin de asegurar representatividad y confiabilidad en el análisis (FAO, 2019). Cada muestra se georreferenció con un GPSmap 76CS x de marca Garmin portátil y se mantuvo identificada hasta su traslado al laboratorio.

6.4. Fase de laboratorio

6.4.1. Carbono orgánico del suelo

Este procedimiento se determinó mediante el método DUMAS, utilizando el equipo Elemental Vario macro cube, siguiendo las directrices de la FAO (2019), el IPCC (2006) y la metodología empleada por el Laboratorio de Suelos de la Universidad de Illinois (SOP: Elemental C/N Analysis, 2021). Las muestras fueron procesadas en el Laboratorio de suelos y Nutrición Vegetal de la ESPOL. La preparación consistió en secarlas, tamizarlas a 2 mm y pulverizarlas. Posteriormente, se colocaron entre 250 a 500 mg de cada muestra en el analizador, donde se realizó una combustión seca a temperaturas entre los 900 y 1200 °C. Finalmente, una

celda de conductividad térmica cuantificó el CO₂ liberado obteniendo el porcentaje de carbono orgánico (Corg %) (SOP: Elementar C/N Analysis, 2021).

6.4.1.1. Densidad aparente del suelo

La densidad aparente del suelo (D_a) se determinó mediante el método del cilindro de volumen conocido, siguiendo las recomendaciones de la FAO (2019). Para este procedimiento, se utilizó un cilindro de PVC con un volumen interno conocido (202,68 cm³) para la extracción de las muestras del suelo en cada parcela. En campo, el cilindro se introdujo cuidadosamente en el perfil edáfico hasta su capacidad máxima, evitando la compactación la muestra. Posteriormente se retiró el material excedente para enrasar la muestra con los bordes del cilindro. Cada muestra de suelo, se colocó en una bolsa plástica rotulada con la información correspondiente al sitio, parcela y profundidad. La densidad aparente se calculó a partir de la siguiente fórmula, según la FAO (2019):

$$Densidad\ aparente\ (g/cm^{-3}) = \frac{Masa\ del\ suelo\ seco\ (g)}{Volumen\ del\ cilindro\ (cm^3)}$$

6.4.2. Cuantificación del carbono almacenado en la biomasa

El carbono almacenado en la biomasa vegetal de cada parcela se obtuvo mediante la suma del carbono contenido en la biomasa aérea y la biomasa subterránea (IPCC, 2006). Los cálculos se realizaron para cada monitoreo y los resultados se expresaron en megagramos de

carbono por hectárea (Mg C ha^{-1}), unidad equivalente a toneladas de carbono por hectárea (t C ha^{-1}).

Los valores obtenidos previamente en kilogramos de carbono se convirtieron a megagramos de carbono por hectárea mediante la siguiente ecuación:

$$C_{\text{Biomasa}} = \frac{C_{kg}}{1000 \times A}$$

Donde; C_{Biomasa} corresponde al carbono almacenado en la biomasa (Mg C ha^{-1}), C_{kg} es el carbono contenido en la biomasa (kg C); 1000 corresponde al factor de conversión de kilogramos a megagramos; y A corresponde al área considerada (ha).

Para los cálculos realizados por parcela se utilizó un área de $A = 0,04 \text{ ha}$. En las estimaciones acumuladas por especie, obtenidas mediante la suma de los individuos registrados en las nueve parcelas, se utilizó el área total muestreada $A = 0,36 \text{ ha}$.

6.4.3. Cuantificación del carbono del suelo

La concentración de carbono orgánico del suelo (COS) se determinó mediante el método DUMAS por combustión seca, a partir de la cuantificación instrumental del CO_2 liberado durante el análisis de las muestras (FAO, 2019). Posteriormente, los valores de COS que fueron representados en porcentaje, se transformaron a megagramos de carbono por hectárea (Mg C ha^{-1}), considerando la concentración de carbono, la densidad aparente del suelo

y el espesor de cada intervalo de profundidad, de acuerdo con Nelson & Sommers (1996) y el IPCC (2006). La cuantificación se realizó de manera independiente para los tres estratos de profundidad de 0 - 10, 10 - 20 y 20 - 30 cm. Dado que el muestreo edáfico se efectuó solo una vez durante el periodo de estudio, los resultados obtenidos se presentaron como una estimación o línea base de carbono edáfico en el área.

$$\text{Reserva de COS (Mg C ha}^{-1}\text{)} = C_{org} \times Da \text{ (g cm}^{-3}\text{)} \times e \text{ (cm)}$$

Donde: C_{org} corresponde a la concentración de carbono orgánico del suelo (%); Da es la densidad aparente de suelo (g cm^{-3}); y e corresponde al espesor del estrato estudiado (cm).

6.4.4. Cuantificación de la incertidumbre

La precisión de las estimaciones de carbono se estimaron mediante la desviación estándar, el error estándar de la media y el intervalo de confianza del 95 %, de acuerdo con Frey et al. (2006). Para estos cálculos, cada parcela se consideró como unidad de muestral. Para el carbono almacenado en la biomasa, las medidas de variabilidad se calcularon de forma independiente para cada uno de los tres monitoreos. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó la distribución t de Student, considerando las nueve parcelas como unidades muestrales. Por lo tanto, se emplearon ocho grados de libertad y un valor crítico de $t = 2,306$ (NIST, s.f.).

El error estándar de la media (EEM) se calculó siguiendo recomendaciones del IPCC (2006), aplicando la siguiente ecuación:

$$EEM = \frac{DE}{\sqrt{n}}$$

Donde; *EEM* corresponde al error estándar de la media; *DE* a la desviación estándar; *n* al número de parcelas evaluadas (*n* = 9) (IPCC, 2006).

Posteriormente, el intervalo de confianza del 95% (*IC*_{95%}). Este procedimiento permite expresar la precisión de las estimaciones y cuantificar la incertidumbre asociada a cada estimación (IPCC, 2006).

$$IC_{95\%} = \bar{x} \pm t \times EEM = \pm 2,306 \times EEM$$

Donde; $\bar{x}$ corresponde a la media muestral; *EEM* es el error estándar de la media; y $t_{(0,025; n - 1)}$ corresponde al valor crítico de la distribución t de Student para un intervalo de confianza del 95 %. Debido a que se consideraron nueve parcelas como unidades muestrales, se utilizaron ocho grados de libertad y un valor crítico de $t = 2,306$.

6.4.5. Análisis estadísticos

Los datos de la composición y estructura vegetal, biomasa, carbono almacenado en la biomasa y reserva de carbono orgánico del suelo, expresada en Mg C ha^{-1} , y calculada a partir de la concentración de carbono (%), la densidad y la profundidad de cada estrato se organizaron y sistematizaron en Microsoft Excel versión 2021. Se aplicó estadística descriptiva mediante el cálculo de la media y la desviación estándar. Para la caracterización ecológica de la vegetación se estimaron los índices de diversidad de Shannon-Wiener, Simpson y equitatividad de Pielou mediante el programa PAST versión 5.03.

Para analizar las diferencias en el stock de carbono orgánico del suelo (Mg C ha^{-1}) entre los intervalos de profundidad de 0–10, 10–20 y 20–30 cm, se aplicó un modelo lineal de efectos mixtos (LMM). La profundidad se consideró como efecto fijo y la parcela como efecto aleatorio, debido a que los tres intervalos fueron evaluados dentro de las nueve parcelas. El modelo empleado fue:

$$\text{Reserva de COS (Mg C ha}^{-1}) \sim \text{Profundidad} + (1 \mid \text{Parcela})$$

Donde; Reserva de COS corresponde al carbono orgánico almacenado en cada estrato, expresado en Mg C ha^{-1} ; C_{org} es la concentración de carbono orgánico determinada mediante el método DUMAS, expresada en porcentaje; D_a corresponde a la densidad aparente del suelo, expresada en g cm^{-3} ; y corresponde al espesor del estrato estudiado, expresado en centímetros.

La incorporación de la parcela como efecto aleatorio permitió considerar la relación existente entre las mediciones obtenidas dentro de una misma unidad muestral y contrastar las diferencias entre los intervalos de profundidad (Bates et al., 2015).

Para analizar la dinámica del carbono almacenado en la biomasa durante los tres monitoreos, se aplicó un modelo lineal mixto de medidas repetidas. El monitoreo se consideró como efecto fijo y la parcela como efecto aleatorio. El modelo empleado fue:

$$\text{Carbono de la biomasa (Mg C ha}^{-1}\text{)} \sim \text{Monitoreo} + (1 \mid \text{Parcela})$$

Los modelos lineales mixtos se ajustaron en el programa R a través del paquete lme4 (Bates et al., 2015). La significancia de los efectos fijos se determinó a través de pruebas F con aproximación de Satterthwaite, utilizando el paquete lmerTest (Kuznetsova et al., 2017). Al identificar diferencias significativas entre las profundidades, se ejecutaron comparaciones múltiples de medias marginales estimadas (EMMs) con el ajuste de valor de p de Holm (Holm, 1979). De este modo, se calculó el cambio neto del carbono almacenado en la biomasa entre el primer y el tercer monitoreo, junto con su intervalo de confianza del 95 %. Para todos los análisis se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

7. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

7.1. Caracterización de la composición y estructura vegetal

7.1.1. Identificación de Familias, Géneros y Especies

En el área de estudio en las 9 parcelas, se registraron 92 individuos, agrupados en 6 familias, 12 géneros y 13 especies (Tabla 5).

Tabla 5

Número de Familias, Géneros y Especies localizadas en las parcelas de estudio

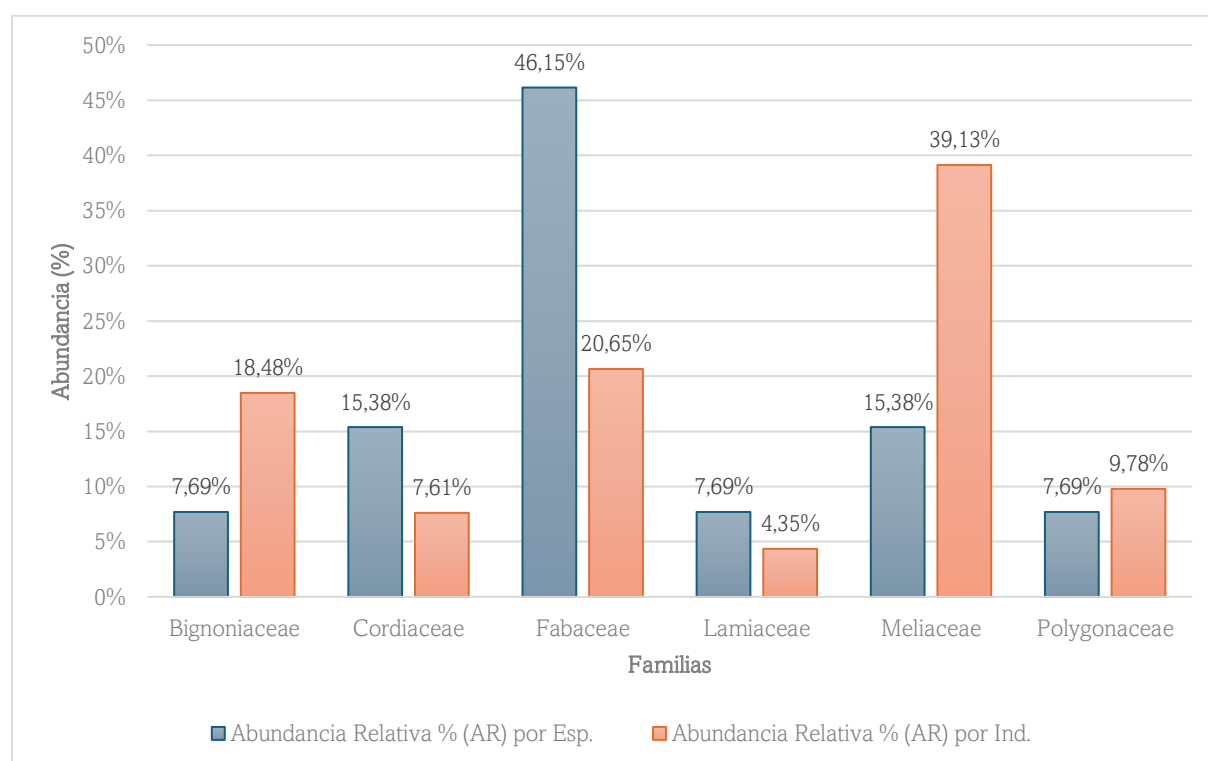
Nº	Familia	Especie (NC)	Nombre C.	N	Origen
1	Meliaceae	<i>Cedrela odorata</i>	Cedro	10	Restaurada
2	Cordiaceae	<i>Cordia alliodora</i>	Laurel	5	Restaurada
3	Cordiaceae	<i>Cordia lutea</i>	Muyuyo	2	Remanente
4	Bignoniaceae	<i>Handroanthus chrysanthus</i>	Guayacán Amarillo	17	Restaurada
5	Fabaceae	<i>Leucaena trichodes</i>	Agüia	2	Remanente
6	Fabaceae	<i>Myroxylum balsamum</i>	Balsamo	8	Restaurada
7	Fabaceae	<i>Prosopis juliflora</i>	Algarrobo	1	Remanente
8	Fabaceae	<i>Pseudalbizzia multiflora</i>	Compoño	4	Remanente
9	Fabaceae	<i>Pseudosamanea guachapele</i>	Guachapelí	3	Restaurada
10	Meliaceae	<i>Swietenia macrophylla</i>	Caoba	26	Restaurada + 1 Remanente
11	Polygonaceae	<i>Triplaris cumingiana</i>	Fernán Sánchez	9	Restaurada
12	Fabaceae	<i>Vachellia farnesiana</i>	Aromo	1	Remanente
13	Lamiaceae	<i>Vitex gigantea</i>	Pechiche	4	Restaurada
Total				92	

Nota: Los valores corresponden al número de familias, géneros y especies registradas en las nueve parcelas.

La composición florística la representó la familia Fabaceae con seis especies (46,15%), seguida de Meliaceae y Cordiaceae con dos especies cada una (15,38%). Del mismo modo, las familias Bignoniaceae, Polygonaceae y Lamiaceae, mantuvieron una especie cada una (7,69%) como se observa en la Figura 6. Los mayores valores obtenidos de individuos fueron de la familia Meliaceae, que obtuvo 36 individuos, seguida de Fabaceae con 19 individuos (20,65%) y Bignoniaceae con 17 individuos (18,48%), en contraste Cordiaceae mantuvo 7 individuos (7,61%) y Lamiaceae solo 4 individuos (4,35%).

Figura 6

Abundancia relativa por especies e individuos de las familias botánicas identificadas en el área de estudio



Nota: La abundancia relativa se obtuvo considerando el porcentaje de especies e individuos registrados en cada familia.

7.1.2. Densidad de individuos por hectárea

La densidad estimada para el área de estudio fue de 256 individuos por hectárea, valor obtenido al dividir el total de individuos registrados (92) para la superficie total muestreada de las nueve parcelas de 0,04 ha cada una (Tabla 6).

Al considerar que la densidad absoluta estimada fue de 256 ind/ha y que el área total de la restauración es de 4,5 ha, se obtuvo una densidad aproximada de 1 150 individuos para el área restaurada, siendo así este valor una estimación proyectada a partir de la superficie muestreada, como una aproximación basada en la densidad calculada por hectárea.

Tabla 6

Densidad de individuos por parcela y por hectárea

Parcelas	Número de Ind.	Densidad de Individuos por ha
001	12	300
002	12	300
003	10	250
004	7	175
005	10	250
006	12	300
007	10	250
008	9	225
009	10	250
Promedio	10,22	256

Nota: Densidad calculada en parcelas de 0,04 ha.

7.1.3. Índices Ecológicos de Diversidad

Para caracterizar la diversidad y la distribución de las especies registradas en las nueve parcelas del área de estudio, se calcularon los índices ecológicos de Shannon – Wiener, Simpson y Equitatividad de Pielou (Tabla 7).

Tabla 7

Índices ecológicos

Índices	Todo el Sitio	Componente Restaurado	Componente Remanente
Riqueza de Especies (S)	13	8	6
Número de Individuos (N)	92	81	11
Índice de Shannon – Wiener (H')	2,157	1,864	1,642
Índice de Diversidad de Simpson (1 – D)	0,8481	0,8157	0,7769
Equitatividad de Pielou (J')	0,8411	0,8964	0,9163

Nota. Datos obtenidos mediante el software estadístico PAST.

El índice de Shannon –Wiener registró un valor de $H' = 2,157$ para el área de estudio. Al determinar las categorías de origen de manera independiente, el componente restaurado alcanzó un valor superior de $H' = 1,864$ en comparación con el componente remanente $H' = 1,642$. Este valor coincidió con una mayor riqueza en el componente restaurado ($S = 8$), frente al componente remanentes ($S = 6$), destacando especies como *Swietenia macrophylla* y *Handroanthus chrysanthus*.

El índice de diversidad de Simpson registró un valor de $1 - D = 0,8481$, evidenciando una dominancia ecológica baja, es decir, ninguna especie presentó una dominancia marcada

sobre las demás. Al determinar valores por componentes, el componente restaurado presentó un valor superior de $1 - D = 0,8157$ en relación al componente remanente, que registró $1 - D = 0,7769$, lo que indica una menor dominancia en el componente restaurado.

El índice de equitatividad de Pielou (J') registró un valor general $J' = 0,8411$, indicando una distribución relativamente uniforme de los individuos entre las especies. Al analizar los componentes, el componente remanente presentó un valor de equitatividad ligeramente mayor ($J' = 0,9163$) que el componente restaurado ($J' = 0,8964$), lo que muestra una distribución equilibrada de los individuos entre las especies de componente remanente.

7.1.4. Estructura horizontal

La estructura horizontal permitió describir la organización y distribución de las especies presentes en el área de estudio mediante los parámetros ecológicos como abundancia, frecuencia, dominancia e Índice de Valor de Importancia (IVI). Dado que el ecosistema restaurado mantiene cuatro años de intervención, la vegetación tuvo características propias de una fase temprana de establecimiento, dominada principalmente por individuos juveniles con diámetros pequeños y crecimiento inicial activo.

7.1.4.1. Abundancia y Frecuencia

De acuerdo con la abundancia relativa calculada para el área de estudio (Tabla 8) las especies más representativas fueron *Swietenia macrophylla* (caoba), con 26 individuos (28,26%) del total registrado; seguida de *Handroanthus chrysanthus* (guayacán amarillo) con 17 individuos (18,48%); y *Cedrela odorata* (cedro) con 10 individuos. En conjunto, estas tres especies representaron el 57,61% de los individuos registrados en el área de estudio, exhibiendo la mayor representatividad en la comunidad vegetal.

En contraste, *Prosopis juliflora* (algarrobo) y *Vachellia farnesiana* (aromo) presentaron un individuo cada una, equivalente al 1,09 %, y se registraron sólo en una parcela, evidenciando su baja representatividad en el inventario del área de estudio.

Tabla 8

Abundancia y frecuencia de las especies identificadas

Nº	Especie (NC)	Abundancia (n)	Abundancia relativa (%)	Frecuencia absoluta (f)	Frecuencia relativa (%)
1	<i>Cedrela odorata</i>	10	10,87	5	11,36
2	<i>Cordia alliodora</i>	5	5,43	3	6,82
3	<i>Cordia lutea</i>	2	2,17	1	2,27
4	<i>Handroanthus chrysanthus</i>	17	18,48	6	13,64
5	<i>Leucaena trichodes</i>	2	2,17	1	2,27
6	<i>Myroxylum balsamum</i>	8	8,70	6	13,64
7	<i>Prosopis juliflora</i>	1	1,09	1	2,27
8	<i>Pseudalbizzia multiflora</i>	4	4,35	4	9,09
9	<i>Pseudosamanea guachapele</i>	3	3,26	2	4,55
10	<i>Swietenia macrophylla</i>	26	28,26	6	13,64
11	<i>Triplaris cumingiana</i>	9	9,78	4	9,09
12	<i>Vachellia farnesiana</i>	1	1,09	1	2,27
13	<i>Vitex gigantea</i>	4	4,35	4	9,09
		92	100,00	44	100,00

Nota. La abundancia y frecuencia fueron calculadas con base en los individuos y parcelas registradas en el área de estudio.

7.1.4.2. Dominancia y Área Basal

Las especies que registraron mayor dominancia relativa fueron *Swietenia macrophylla* (caoba) con 28,30% y un área basal de 0,1117 m², *Cedrela odorata* (cedro) con 26,47% y 0,1044 m²; y *Triplaris cumingiana* (Fernán Sánchez) con 17,99% y 0,0710 m². En conjunto, estas especies concentraron el 72,76% de la dominancia relativa total registrada del área de estudio (Tabla 9).

Los individuos remanentes presentaron una distribución variable del área basal. Cabe destacar que en una de las parcelas se registró un único individuo remanente de *Swietenia macrophylla* (caoba) con un diámetro superior al promedio, el cual realizó un aporte importante al área basal total. En contraste, *Pseudalbizzia multiflora* (compoño) y *Prosopis juliflora* (algarrobo) registraron los menores valores de dominancia relativa, con 0,29 % y 0,04 % respectivamente, lo que refleja su baja contribución al área basal del área de estudio.

Tabla 9

Dominancia relativa por especie en el área de estudio

Especies	Nombre Común	Suma de Área Basal (m ²)	Dominancia Relativa (%)
<i>Cedrela odorata</i>	Cedro	0,1044	26,47
<i>Cordia alliodora</i>	Laurel	0,0029	0,72
<i>Cordia lutea</i>	Muyuyo	0,0055	1,40
<i>Handroanthus chrysanthus</i>	Guayacán Amarillo	0,0301	7,63
<i>Leucaena trichodes</i>	Agüia	0,0054	1,36
<i>Myroxylum balsamum</i>	Balsamo	0,0139	3,51
<i>Prosopis juliflora</i>	Algarrobo	0,0002	0,04
<i>Pseudalbizzia multiflora</i>	Compoño	0,0012	0,29
<i>Pseudosamanea guachapele</i>	Guachapelí	0,0414	10,48

<i>Swietenia macrophylla</i>	Caoba	0,1117	28,30
<i>Triplaris cumingiana</i>	Fernán Sánchez	0,0710	17,99
<i>Vachellia farnesiana</i>	Aromo	0,0005	0,12
<i>Vitex gigantea</i>	Pechiche	0,0066	1,68
Total		0,3946	100

Nota. El área basal corresponde a la suma registrada por especie y la dominancia relativa expresa su proporción del área basal total.

7.1.4.3. Índice de Valor de Importancia (IVI)

El Índice de Valor de Importancia (IVI) indicó que *Swietenia macrophylla* (caoba), *Cedrela odorata* (cedro) y *Handroanthus chrysanthus* (guayacán amarillo) fueron las especies con mayor importancia ecológica dentro del área de estudio con valores de 70,20%, 48,70% y 39,74 %, respectivamente (Tabla 10). Asimismo, *Triplaris cumingiana* (Fernán Sánchez) y *Pseudosamanea guachapele* (guachapeli) registraron valores de IVI de 36,86 % y 18,29 % respectivamente.

Pese a que *Pseudosamanea guachapele* presentó una abundancia relativa baja de 3,26%, registró una dominancia relativa de 10,48%, asociada al mayor diámetro de sus individuos, lo que incrementó su valor de IVI.

En contraste, varias especies remanentes presentaron valores bajos de IVI. Sin embargo, un único individuo remanente de *Swietenia macrophylla* (caoba), debido a su mayor diámetro, realizó un aporte importante al área basal y al componente de dominancia dentro del IVI. Entre

las especies con menor representatividad se encontraron *Leucaena trichodes* (agüia) con un IVI de 5,81% y *Prosopis juliflora* (algarrobo) con 3,40%.

Tabla 10

Índice de Valor de Importancia (IVI) por especie

Especie	Abundancia Relativa (%)	Frecuencia Relativa (%)	Dominancia Relativa (%)	IVI (%)
<i>Cedrela odorata</i>	10,87	11,36	26,47	48,70
<i>Cordia alliodora</i>	5,43	6,82	0,72	12,98
<i>Cordia lutea</i>	2,17	2,27	1,40	5,84
<i>Handroanthus chrysanthus</i>	18,48	13,64	7,63	39,74
<i>Leucaena trichodes</i>	2,17	2,27	1,36	5,81
<i>Myroxylum balsamum</i>	8,70	13,64	3,51	25,85
<i>Prosopis juliflora</i>	1,09	2,27	0,04	3,40
<i>Pseudalbizzia multiflora</i>	4,35	9,09	0,29	13,73
<i>Pseudosamanea guachapele</i>	3,26	4,55	10,48	18,29
<i>Swietenia macrophylla</i>	28,26	13,64	28,30	70,20
<i>Triplaris cumingiana</i>	9,78	9,09	17,99	36,86
<i>Vachellia farnesiana</i>	1,09	2,27	0,12	3,48
<i>Vitex gigantea</i>	4,35	9,09	1,68	15,12
Total general	100	100	100	300

Nota. El índice de Valor de Importancia, corresponde a la suma de la abundancia relativa, frecuencia relativa y dominancia relativa de cada especie. La suma total del IVI es de 300%

7.1.5. Estructura Vertical

La distribución de los individuos por estratos de altura presentó variaciones durante los tres monitoreos (M1, M2 y M3) (ver Anexos, Tabla 15).

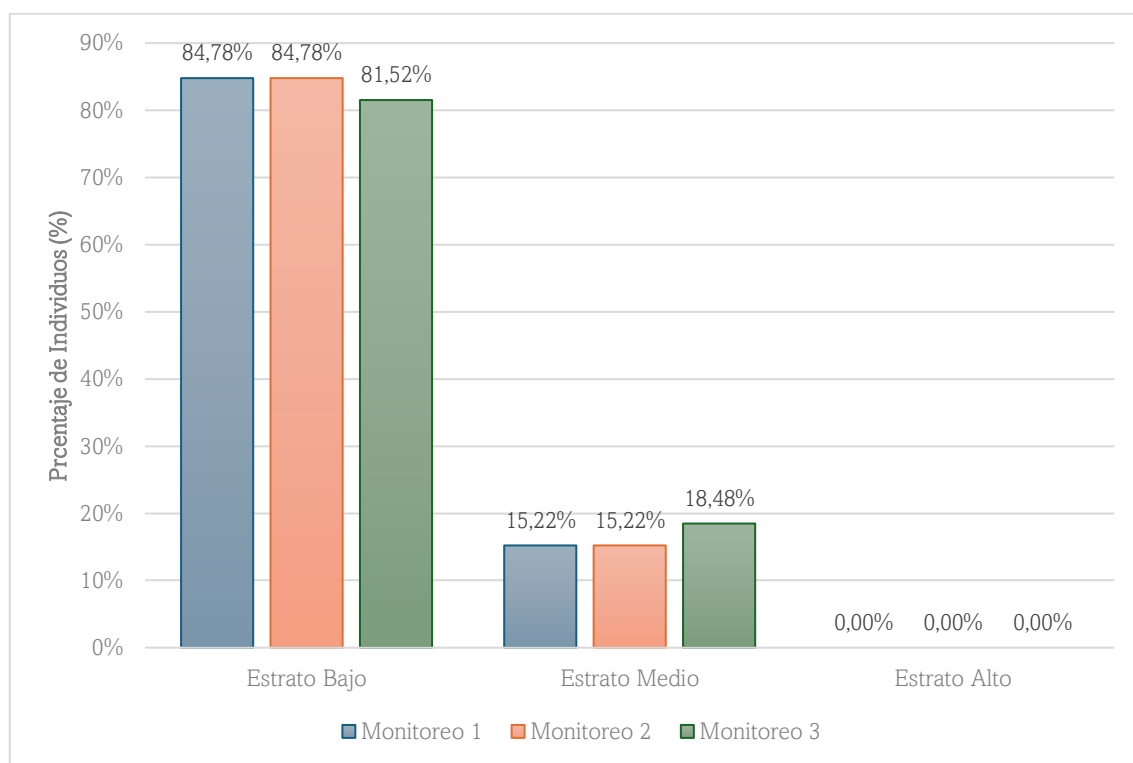
El estrato bajo concentró la mayor proporción de individuos en el periodo de estudio. En los monitoreos 1 y 2 representó el 84,78% (78 individuos), mientras que en el monitoreo 3 disminuyó al 81,52% (75 individuos).

En contraste, el estrato medio aumentó su representatividad, pasando de 15,22% (14 individuos) en los monitoreos 1 y 2 a 18,48% (17 individuos) en el monitoreo 3. La disminución de tres individuos en el estrato bajo coincidió con el aumento de tres individuos en el estrato medio, debido a su clasificación en un estrato de mayor altura en el último monitoreo.

El estrato alto no registró individuos en ninguno de los tres monitoreos (0,00%).

Figura 7

Distribución porcentual de los individuos por estratos de altura en los tres monitoreos



Nota. Proporción de individuos clasificados en estratos bajo, medio y alto para cada monitoreo.

7.1.6. Clases diamétricas

La distribución de los individuos por clases diamétricas presentó cambios durante los tres monitoreos (M1, M2 y M3) (ver en Anexos, Tabla 16).

La Clase I ($0 \leq \text{DAP} < 5$) concentró la mayor proporción de individuos durante el periodo de estudio. En el monitoreo 1 registró el 57,61% (53 individuos), disminuyendo al 54,35% (50 individuos) en el monitoreo 2 y al 52,17% (48 individuos) en el monitoreo 3. No

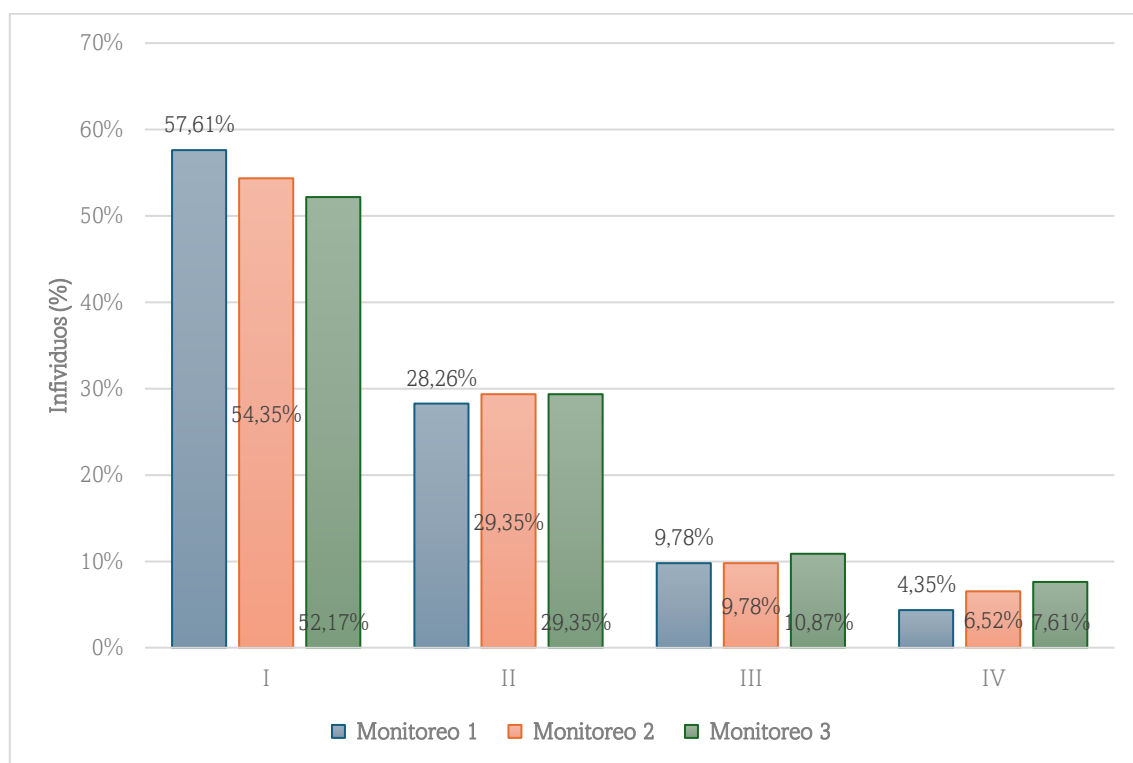
obstante, las clases diamétricas superiores aumentaron su representatividad, debido a que algunos individuos pasaron a categorías de mayor diámetro en el periodo de estudio (Figura 8).

La clase II ($5 \leq \text{DAP} < 10$) aumentó del 28,26% (26 individuos) en el Monitoreo 1 al 29,35% (27 individuos) en el monitoreo 2, manteniéndose sin cambios en el Monitoreo 3. De igual manera, la clase III ($10 \leq \text{DAP} < 15$) pasó de 9,78% (9 individuos) a 10,87% (10 individuos) en el último monitoreo.

La Clase IV ($\text{DAP} \geq 15$) registró el mayor aumento entre las clases diamétricas superiores, pasando del 4,35 % (4 individuos) en el monitoreo 1 al 6,52 % (6 individuos) en el monitoreo 2 y al 7,61 % (7 individuos) en el monitoreo 3. El individuo remanente presente en esta clase se mantuvo dentro de la misma categoría en los tres monitoreos.

Figura 8

Distribución porcentual de los individuos por clases diamétricas (DAP) en los tres monitoreos



Nota. Los valores expresan el porcentaje de individuos por clase en cada monitoreo.

7.2. Cuantificación de biomasa y carbono almacenado

7.2.1. Biomasa aérea y biomasa subterránea total

La biomasa total estimada en el área de estudio presentó un aumento en los tres monitoreos, pasando de 773,32 kg en el monitoreo 1 a 947,58 kg en el monitoreo 3. Entre el primer y último se observó una diferencia de 174,27 kg equivalente al 22,54 % (Tabla 11).

La biomasa aérea pasó de 604,15 kg en el monitoreo 1 a 740,30 kg en el monitoreo 3, con una diferencia de 136,15 kg. Por su parte, la biomasa subterránea aumentó de 169,16 kg a 207,28 kg, con una diferencia de 38,12 kg.

Tabla 11

Biomasa aérea y subterránea (kg) acumulada en el área de estudio

	Biomasa Aérea (kg)	Biomasa Subterránea (kg)	Biomasa Total (kg)
Monitoreo 1	604,15	169,16	773,32
Monitoreo 2	684,79	191,74	876,53
Monitoreo 3	740,30	207,28	947,58

Nota: La biomasa total corresponde a la suma de la biomasa aérea y subterránea estimada en cada monitoreo.

7.2.1.1. Biomasa aérea por componente restaurado y remanente

La biomasa aérea se presentó de acuerdo con el origen de los individuos, considerando los componentes restaurado y remanente en los tres monitoreos (Tabla 12).

El componente restaurado registró los mayores valores de biomasa aérea durante el periodo evaluado. En el monitoreo 1 presentó 538,25 kg aumentando a 606,76 kg en el monitoreo 2 y a 657,83 kg en el monitoreo 3. Entre el primer y el último monitoreo, se observó una diferencia de 119,58 kg, equivalente al 22,22%.

El componente remanente presentó valores inferiores en los tres monitoreos, pasando de 65,90 kg en el monitoreo 1 a 78,02 kg en el monitoreo 2 y a 82,47 kg en el monitoreo 3. Entre el primer y el último monitoreo se observó una diferencia de 16,57 kg, equivalente al 25,14 %.

Tabla 12

Biomasa aérea de individuos restaurados y remanentes en los tres monitoreos

	Origen	Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3
Biomasa Aérea (kg)	Restaurados	538,25	606,76	657,83
	Remanentes	65,90	78,02	82,47
	Total	604,15	684,79	740,30

Nota. La biomasa aérea se estimó por origen de los individuos y expresada en kilogramos.

7.2.1.2. Biomasa subterránea por componente restaurado y remanente

El componente restaurado registró los mayores valores de biomasa subterránea en los tres monitoreos. En el monitoreo 1 presentó 150,71 kg, aumentando a 169,89 kg en el monitoreo 2 y a 184,19 kg en el monitoreo 3 (Tabla 13). Entre el primer y último monitoreo se observó una diferencia de 33,48 kg, equivalente al 22,22%.

El componente remanente presentó valores inferiores en el periodo evaluado, pasando de 18,45 kg en el monitoreo 1 a 21,85 kg en el monitoreo 2 y a 23,09 kg en el monitoreo 3.

Entre el primer y el último monitoreo se observó una diferencia de 4,64 kg, equivalente al 25,15 %.

Tabla 13

Biomasa subterránea de individuos restaurados y remanentes en los tres monitoreos

	Origen	Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3
Biomasa Subterránea (kg)	Restaurados	150,71	169,89	184,19
	Remanentes	18,45	21,85	23,09
	Total	169,16	191,74	207,28

Nota. Biomasa subterránea de individuos restaurados y remanentes.

7.2.2. Biomasa total por especie

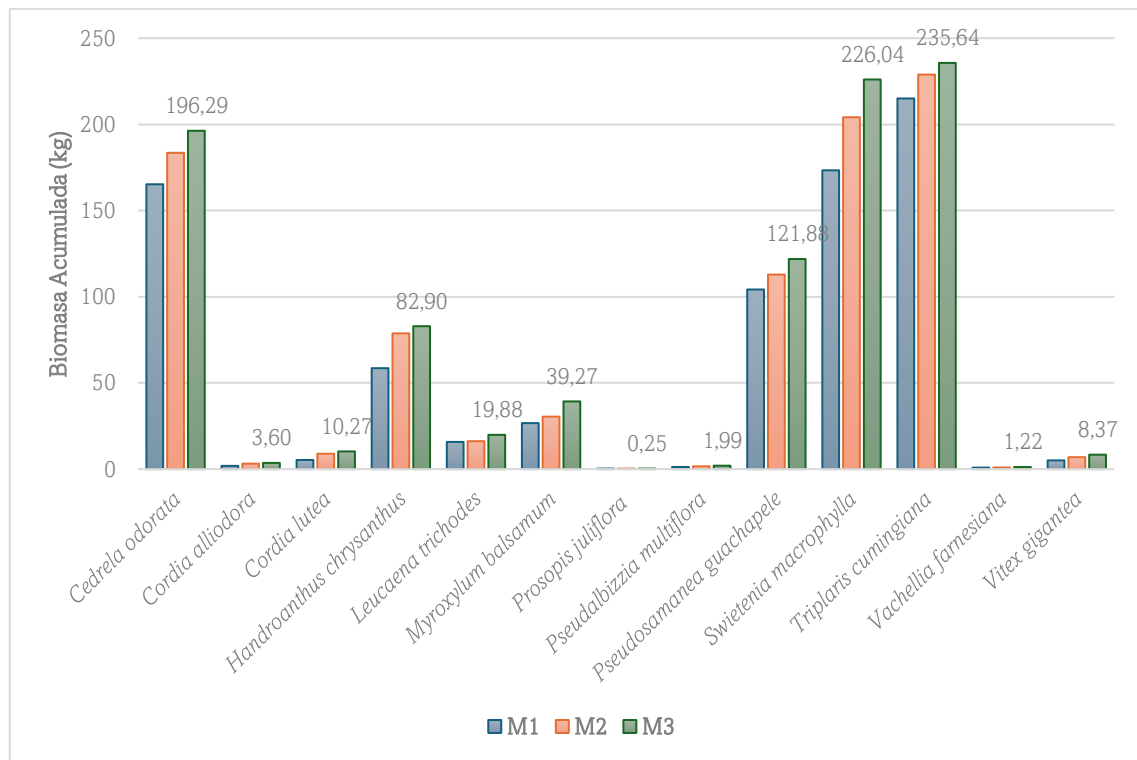
La biomasa total por especie se presentó para los tres monitoreos (Figura 9; Tabla 19, Anexos). Para describir la biomasa estimada al finalizar el periodo de estudio, se consideraron los valores correspondientes al monitoreo 3.

En el monitoreo final, las especies con los mayores valores de biomasa total fueron *Triplaris cumingiana* (Fernán Sánchez) con 235,64 kg; *Swietenia macrophylla* (caoba) con 226,04 kg; y *Cedrela odorata* (cedro) con 196,29 kg. Estas especies concentraron los mayores valores de biomasa estimada en el área de estudio.

En el caso de *Swietenia macrophylla*, un individuo remanente registrado antes del proceso de restauración presentó 71,96 kg de biomasa total en el monitoreo final. Los individuos restaurados de esta especie aportaron 154,08 kg, alcanzando un total de 226,04 kg.

Figura 9

Biomasa total por especie en los tres monitoreos



Nota. La biomasa total corresponde a la suma de la biomasa aérea y subterránea estimada por especie en cada monitoreo.

7.2.2.1. Biomasa aérea por especies

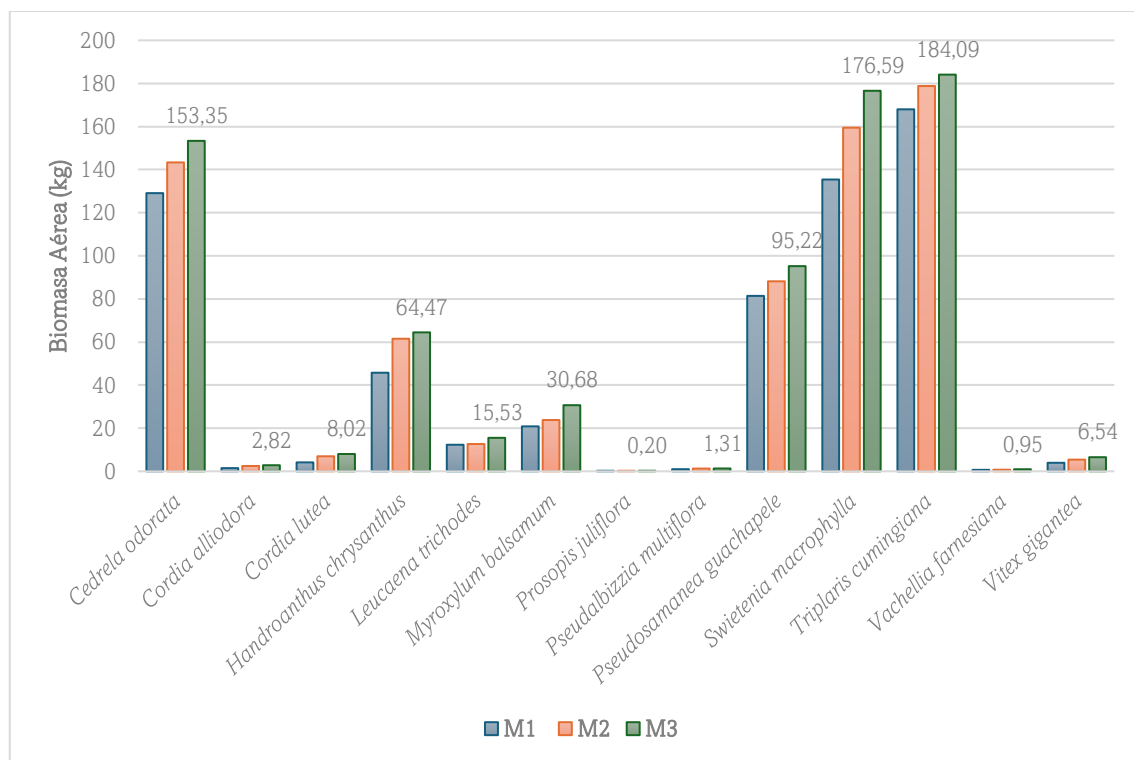
La biomasa aérea por especie se presentó en los tres monitoreos (Figura 10; Tabla 17, Anexos). Para describir los valores estimados al término del periodo de estudio, se consideró en el monitoreo 3.

En el monitoreo final, las especies con los mayores valores de biomasa aérea fueron; *Triplaris cumingiana* (Fernán Sánchez) con 184,09 kg; *Swietenia macrophylla* (caoba) con 176,59 kg; *Cedrela odorata* (cedro) con 153,35 kg; y *Pseudosamanea guachapele* (guachapeli), con 95,22 kg.

En contraste, *Prosopis juliflora* (algarrobo) presentó uno de los menores valores de biomasa aérea, con 0,20 kg y *Vachellia farnesiana* (aromo), con 0,95 kg.

Figura 10

Biomasa aérea por especie en los tres monitoreos



Nota. La biomasa aérea fue estimada por especie en cada uno de los tres monitoreos.

7.2.2.2. Biomasa subterránea por especie

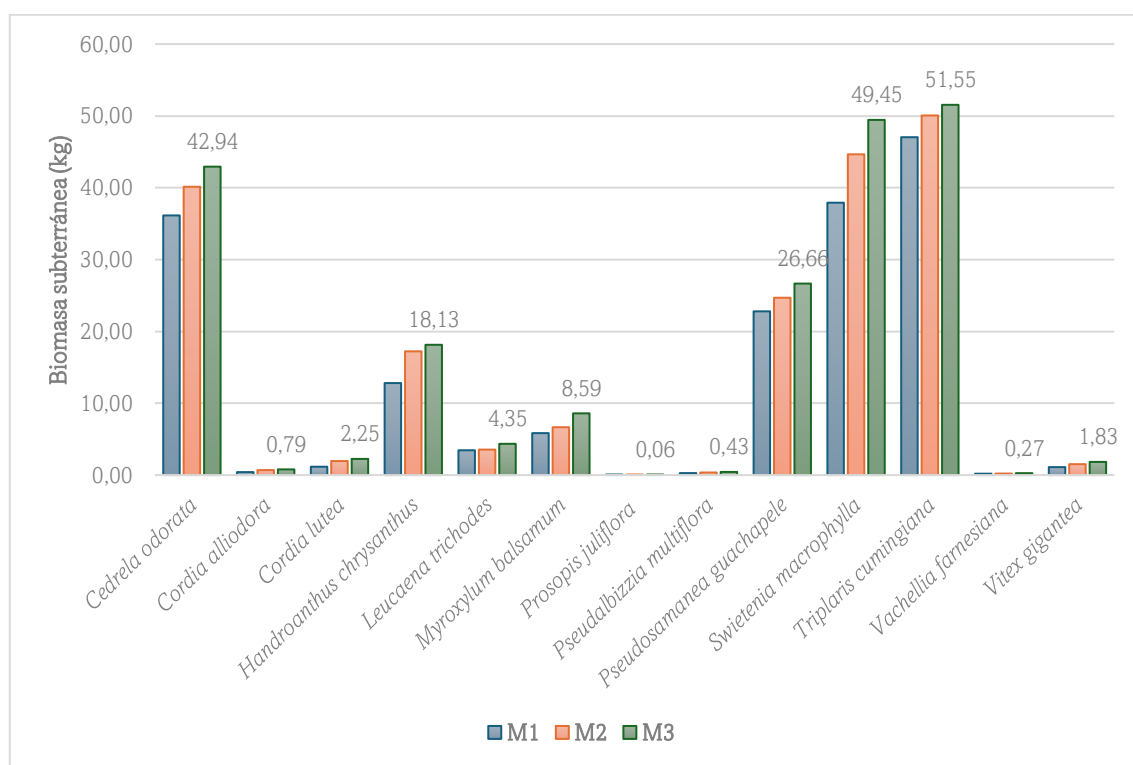
La biomasa subterránea por especie se presentó para los tres monitoreos (Figura 11; Tabla 18, Anexos). Para describir los valores estimados al término del periodo de estudio, se consideró el monitoreo 3.

En el monitoreo final, las especies con los mayores valores de biomasa subterránea *Triplaris cumingiana* (Fernán Sánchez) con 51,55 kg; *Swietenia macrophylla* (caoba) con 49,45 kg; *Cedrela odorata* (cedro) con 42,94 kg y *Pseudosamanea guachapele* (guachapeli) con 26,66 kg.

En contraste, los menores valores correspondieron a *Prosopis juliflora* (algarrobo) con 0,06 kg y *Vachellia farnesiana* (aromo) con 0,27 kg. El valor de *Pseudalbizzia multiflora* (compoño) con 0,43 kg.

Figura 11

Biomasa subterránea acumulada por especie en los tres monitoreos



Nota. La biomasa subterránea se estimó mediante el factor de conversión aplicado a la biomasa aérea por especie.

7.2.3. Carbono almacenado en la biomasa

7.2.3.1. Carbono almacenado en la biomasa por parcela

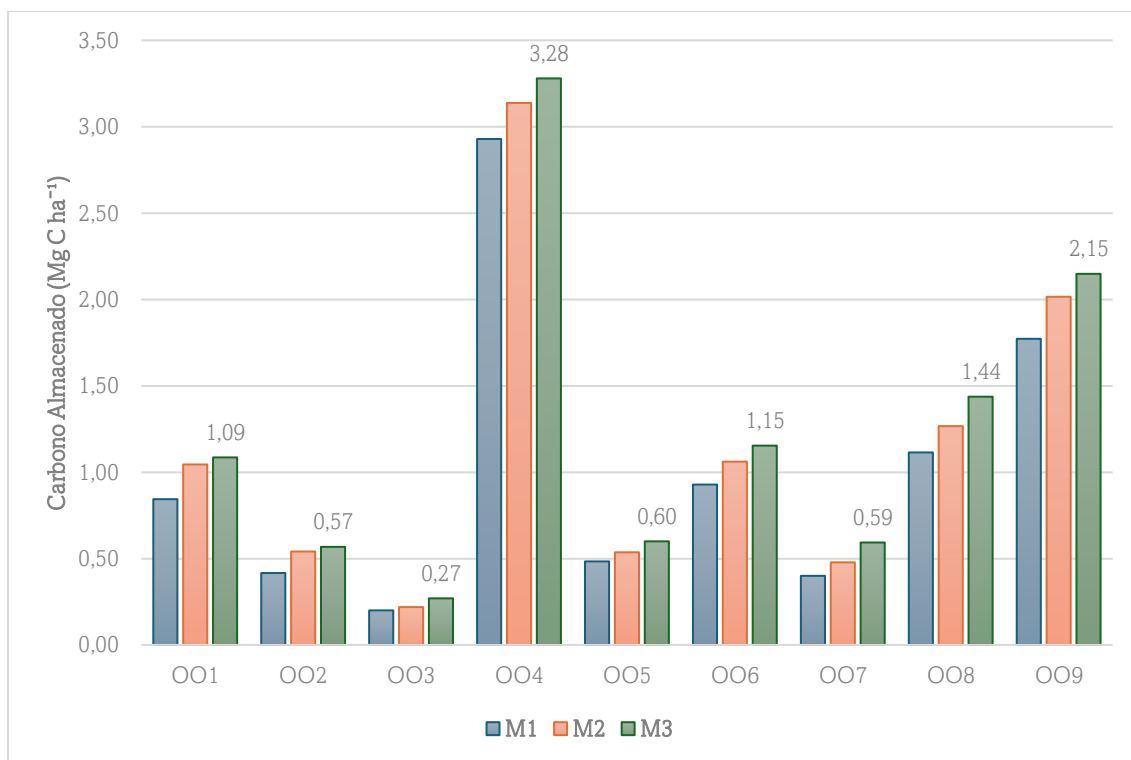
Los valores estimados de carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea presentaron variaciones entre las nueve parcelas y los tres monitoreos (Figura 12).

En el monitoreo 3, la parcela OO4 registró el mayor valor de carbono almacenado en la biomasa, con 3,28 Mg C ha⁻¹, seguida de las parcelas OO9 con 2,15 Mg C ha⁻¹, y OO8 con 1,44 Mg C ha⁻¹.

En contraste, los menores valores en el monitoreo final correspondieron a las parcelas OO3 con 0,27 Mg C ha⁻¹; OO2 con 0,57 Mg C ha⁻¹; y OO7 con 0,59 Mg C ha⁻¹. Al comparar descriptivamente el primer y el último monitoreo, las nueve parcelas presentaron valores mayores de carbono almacenado en la biomasa al término del periodo monitoreado.

Figura 12

Carbono almacenado en la biomasa por parcela en los tres monitoreos



Nota. Los valores corresponden al carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea, expresado en Mg C ha^{-1} para cada parcela y monitoreo.

7.2.3.2. Carbono almacenado en la biomasa por especie

El carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea se presentó por especie para los tres monitoreos (Figura 13). Para describir la distribución del carbono al término del periodo de estudio, se consideraron los valores correspondientes al monitoreo 3.

En el monitoreo final, las especies que registraron los mayores valores de carbono almacenado en la biomasa fueron *Triplaris cumingiana* (Fernán Sánchez), *Swietenia macrophylla* (caoba) y *Cedrela odorata* (cedro) con $0,308 \text{ Mg C ha}^{-1}$, $0,295 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y $0,256 \text{ Mg C ha}^{-1}$, respectivamente. Del mismo modo, *Pseudosamanea guachapele* (guachapelí) y

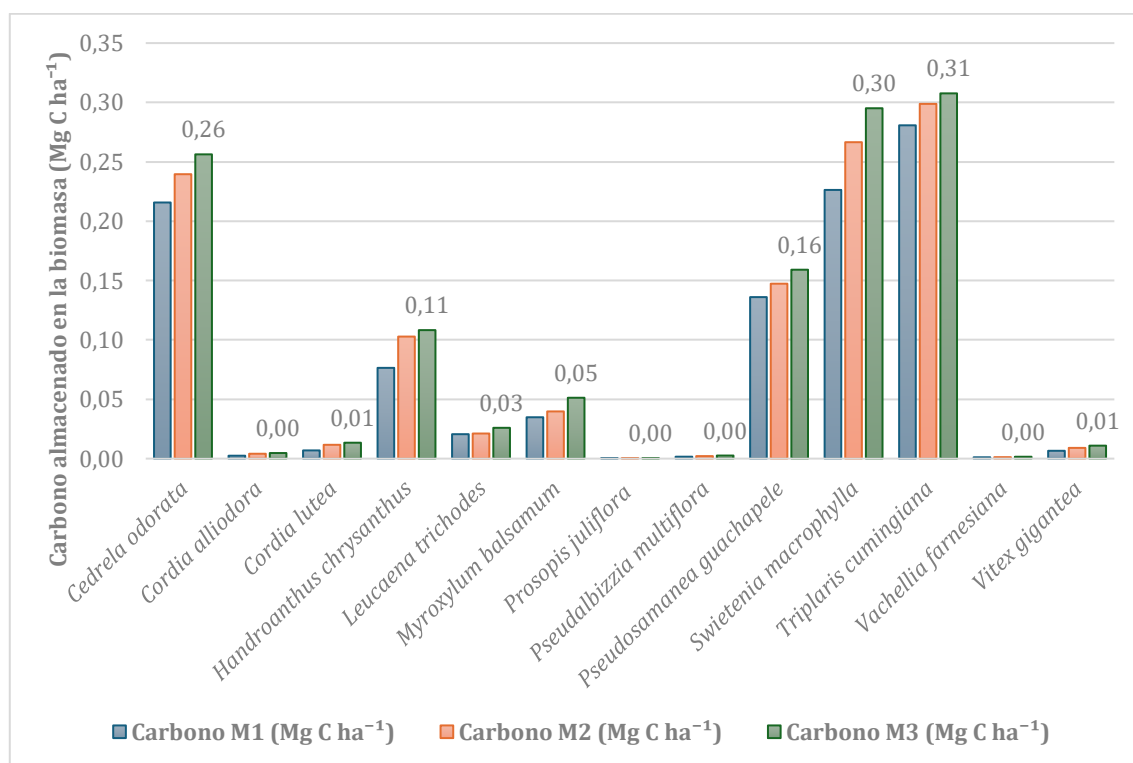
Handroanthus chrysanthus (guayacán amarillo) presentaron valores de 0,159 Mg C ha⁻¹ y 0,108 Mg C ha⁻¹, respectivamente.

En el monitoreo 3, los individuos restaurados contribuyeron con 1,10 Mg C ha⁻¹ equivalentes al 88,86% del carbono almacenado en la biomasa, mientras que los individuos remanentes aportaron 0,14 Mg C ha⁻¹, correspondientes al 11,14 %.

Entre las especies remanentes, *Swietenia macrophylla* (caoba) registró el mayor valor de carbono almacenado en la biomasa, con 0,094 Mg C ha⁻¹, seguida de *Leucaena trichodes* (agüia) con 0,026 Mg C ha⁻¹ y *Cordia lutea* (muyuyo) con 0,013 Mg C ha⁻¹. Los menores valores los obtuvieron *Prosopis juliflora* (algarrobo) con 0,0003 Mg C ha⁻¹; *Vachellia farnesiana* (aromo) con 0,0016 Mg C ha⁻¹; y *Pseudalbizzia multiflora* (compoño) con 0,0026 Mg C ha⁻¹.

Figura 13

Carbono almacenado en biomasa por especie en los tres monitoreos



Nota. Carbono almacenado en biomasa por especie en los tres monitoreos

7.2.3.3. Análisis temporal del carbono en la biomasa

Para determinar la variación temporal del carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea, se ajustó un modelo lineal mixto. El monitoreo se consideró como efecto fijo y la parcela como efecto aleatorio, debido a que las nueve parcelas fueron evaluadas en los tres monitoreos.

El modelo mostró un efecto estadísticamente significativo del monitoreo sobre el carbono almacenado en la biomasa ($F_{(2,16)} = 36,389$; $p < 0,001$). Las medias estimadas fueron de $1,01 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en M1, $1,15 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en M2 y $1,24 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en M3. Las comparaciones por pares con ajuste de Holm mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los tres monitoreos. Entre M1 y M2 se estimó un incremento de $0,137 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ($p = 0,0002$); entre M2 y M3, un incremento de $0,092 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ($p = 0,0035$); y entre M1 y M3, un incremento de $0,229 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ($p < 0,0001$) con un intervalo de confianza del 95 % entre $0,172$ y $0,286 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Estos resultados mostraron un incremento significativo del carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea en el tiempo estudiado.

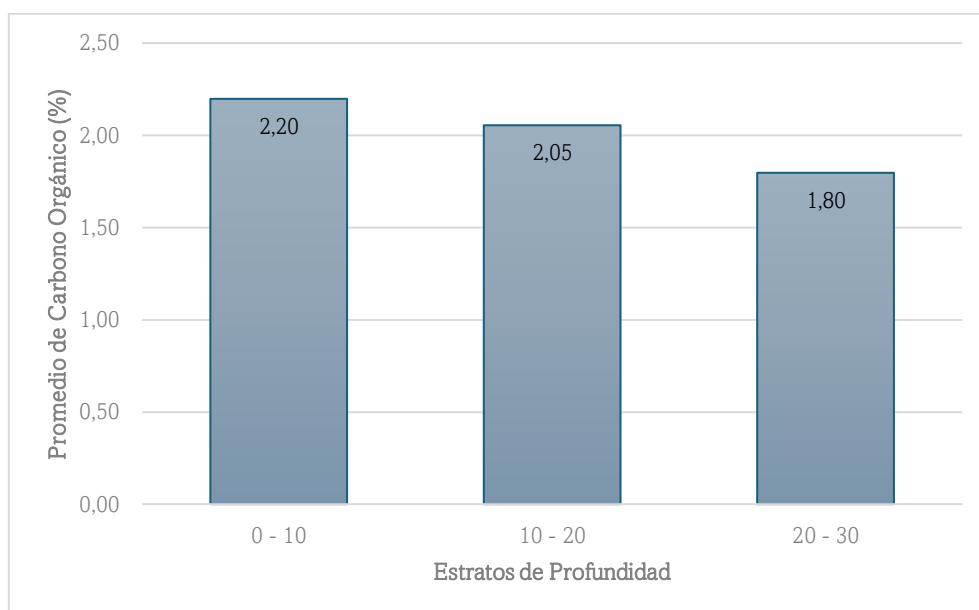
7.3. Carbono orgánico del suelo (COS)

7.3.1. Carbono orgánico del suelo por profundidad

Los valores promedio de carbono orgánico del suelo presentaron variaciones entre los intervalos de profundidad estimados (Figura 14). El estrato de 0 a 10 cm registró la mayor concentración promedio de COS, con 2,20 %, seguido del estrato de 10 a 20 cm con 2,05 %. El intervalo de 20 a 30 presentó la menor concentración promedio, con 1,80%.

Figura 14

Concentración promedio de carbono orgánico del suelo por estrato de profundidad



Nota. Los valores corresponden a la concentración promedio de carbono orgánico del suelo (%) obtenida en cada estrato de profundidad.

7.3.1.1. Análisis de las reservas de carbono orgánico del suelo según la profundidad

Para analizar las diferencias entre las profundidades estudiadas, se ajustó un modelo lineal mixto utilizando las reservas de carbono orgánico del suelo expresadas en Mg C ha^{-1} . La profundidad se consideró como efecto fijo y la parcela como efecto aleatorio, debido a que los tres intervalos de profundidad fueron evaluados dentro de cada una de las nueve parcelas.

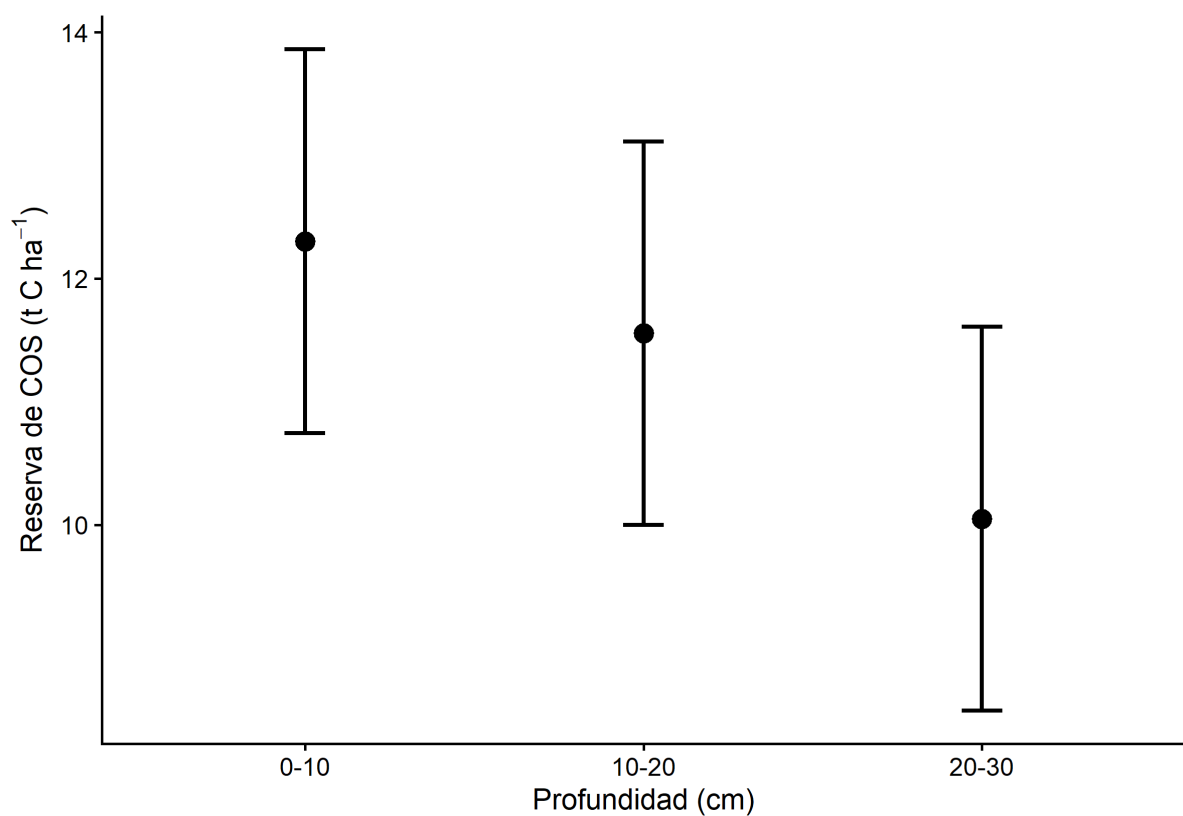
El modelo mostró un efecto estadísticamente significativo de la profundidad sobre las reservas de carbono orgánico del suelo ($F_{(2,16)} = 6,0049$; $p = 0,0113$). Las medias estimadas fueron de $12,30 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para el estrato de 0 a 10 cm, $11,56 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para el estrato de 10 a

20 cm y 10,05 Mg C ha⁻¹ para el estrato de 20 a 30 cm. Los intervalos de confianza del 95 % fueron de 10,74 a 13,90 Mg C ha⁻¹; 10,00 a 13,10 Mg C ha⁻¹ y 8,49 a 11,60 Mg C ha⁻¹ respectivamente.

Las comparaciones por pares con ajuste de Holm mostraron una diferencia estadísticamente significativa únicamente entre los estratos de 0 a 10 cm y de 20 a 30 cm ($p = 0,0109$). No se encontraron diferencias significativas entre 0 a 10 y 10 a 20 cm ($p = 0,2764$), ni entre 10 a 20 y 20 a 30 cm ($p = 0,0741$).

Figura 15

Reservas estimadas de carbono orgánico del suelo según la profundidad



Nota. Los puntos representan las medias estimadas mediante el modelo lineal mixto y las barras verticales corresponden a los intervalos de confianza del 95 %.

7.4. Síntesis del almacenamiento de carbono

Para integrar los componentes evaluados al término del periodo de estudio, se consideró el carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea correspondiente al monitoreo 3, junto con el carbono orgánico del suelo estimado a partir del muestreo realizado. Por lo tanto, estos valores constituyen una estimación puntual del almacenamiento de carbono en el ecosistema.

La reserva de carbono orgánico del suelo presentó un promedio de $33,91 \pm 5,57$ Mg C ha⁻¹. En el monitoreo 3, el carbono almacenado en la biomasa aérea registró un promedio de $0,97 \pm 0,75$ Mg C ha⁻¹, mientras que el carbono de la biomasa subterránea presentó un promedio de $0,27 \pm 0,21$ Mg C ha⁻¹. La integración de los tres componentes permitió obtener una estimación de 35,15 Mg C ha⁻¹ al final del periodo estudiado.

Al extrapolar el promedio de 35,15 Mg C ha⁻¹ sobre las 4,5 ha del área de estudio, se obtuvo una estimación aproximada de 158,18 Mg C. Este valor corresponde a una proyección basada en el promedio de las nueve parcelas y debe interpretarse como una estimación del carbono total almacenado en el ecosistema.

Los resultados evidenciaron que el carbono almacenado en el área de restauración de Loma Alta (SPACUS-SE) no se distribuyó de manera uniforme entre los componentes

evaluados. La reserva de carbono orgánico del suelo alcanzó 33,91 Mg C ha⁻¹ y representó el 96,5 % del carbono total estimado, mientras que la biomasa aérea y subterránea, en conjunto, almacenaron 1,24 Mg C ha⁻¹. Por lo tanto, los resultados respaldaron la hipótesis de investigación planteada.

7.4.1. Cuantificación de la incertidumbre

La incertidumbre de las estimaciones se calculó de manera independiente para el carbono almacenado en la biomasa en los tres monitoreos y para el carbono orgánico del suelo obtenido en el muestreo realizado. Además, se cuantificó la incertidumbre de la estimación integrada final, correspondiente a la suma del carbono orgánico del suelo y el carbono almacenado en el monitoreo 3.

El carbono almacenado en la biomasa presentó una incertidumbre relativa de 65,80 % en el monitoreo 1; 61,91 % en el monitoreo 2 y 59,25 % en el monitoreo 3. Estos valores mostraron la variabilidad existente entre las nueve parcelas evaluadas. La reserva de carbono orgánico del suelo presentó una incertidumbre relativa de 12,62 % mientras que la estimación integrada final alcanzó una incertidumbre de 13,17 %.

8. DISCUSIÓN

El carbono total estimado en los componentes estudiados del área restaurada de Loma Alta fue de 35,15 Mg C ha⁻¹. Este valor se obtuvo integrando el carbono orgánico del suelo (COS) y el carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea en el monitoreo final. El COS constituyó el principal reservorio, con 33,91 Mg C ha⁻¹, equivalente al 96,5% del total estimado, mientras que la biomasa presentó de 1,24 Mg C ha⁻¹. La diferencia entre ambos componentes estuvo marcada por el reducido aporte de la biomasa, acorde con el desarrollo estructural inicial de la vegetación estudiada.

En este contexto, el papel del proceso de restauración en los primeros cuatro años de restauración, se pueden interpretar principalmente a partir de la conservación del stock edáfico presente en el área. De Sosa et al. (2024), evaluaron un gradiente de degradación en un bosque tropical estacionalmente seco de Ecuador, encontraron que el deterioro de la cobertura vegetal estuvo relacionado por una disminución del carbono orgánico del suelo y de las funciones edáficas asociadas con este componente. Por tanto, mantener la cobertura de Loma Alta podría contribuir el mantenimiento de las condiciones del suelo y reducir su exposición a procesos de degradación. Sin embargo, debido a que no se dispuso de una medición de carbono previa al establecimiento de la restauración, no es posible determinar la variación del COS en los cuatro años de intervención. En consecuencia, el carbono obtenido en el COS, corresponde al stock edáfico estimado en el periodo de estudio y no puede atribuirse al proceso de restauración.

La restauración activa también en el establecimiento y desarrollo de la vegetación en los primeros años. Carrasco-Carballido et al. (2019), al evaluar durante tres años seis especies arbóreas establecidas para la restauración de un bosque tropical seco, registraron diferencias en su supervivencia y crecimiento, asociadas tanto con la respuesta de las especies como las propiedades iniciales del suelo. Este antecedente resulta comparable con Loma Alta por tratarse de una intervención activa en un bosque tropical seco y muestra que el desarrollo del componente vegetal no depende especies y las condiciones del área.

En referencia al componente edáfico, Xu et al. (2024) señalaron que la recuperación del carbono orgánico del suelo en la restauración forestal está influida por el tiempo transcurrido desde la intervención y por la composición de la vegetación. Los autores encontraron que las plantaciones conformadas por varias especies presentaron una recuperación más rápida del COS que los monocultivos. Estos resultados muestran que la respuesta del componente edáfico puede variar según la edad de la restauración de las especies establecidas. Por ello, los cuatro años de intervención en Loma Alta, representan una fase inicial, y se requiere continuar su seguimiento para determinar posibles cambios en el stock edáfico. De manera complementaria, Devi (2021) señala que la variación del COS entre formaciones forestales está influida por las especies arbóreas, y por variables relacionadas con el suelo, el clima y la topografía, mientras que Mayer et al. (2020), indican que prácticas de manejo pueden modificar las reservas de carbono del suelo al alterar los aportes y las pérdidas de materia orgánica. En Loma Alta, estos factores podrían explicar parte de las diferencias observadas entre las unidades de muestreo y deben considerarse al interpretar el stock edáfico registrado.

Al comparar el carbono total estimado en Loma Alta con lo reportado por Macías et al. (2020) en el bosque seco de Joa, Jipijapa, Manabí; se observó que los 35,15 Mg C ha⁻¹ obtenidos en la presente investigación fueron inferiores al intervalo de 105,02 a 112,32 Mg C ha⁻¹ registrado por dichos autores. Esta diferencia se asocia con el estado de desarrollo de la vegetación, debido a que Joa corresponde a un bosque establecido donde los individuos evaluados alcanzaron una altura promedio de 3,31 m, mientras que Loma Alta presenta cuatro años de restauración y un predominio de individuos de menores dimensiones, cuyo aporte al carbono almacenado en la biomasa fue reducido. Asimismo, las condiciones particulares de la vegetación y del suelo de cada área pueden influir en las estimaciones obtenidas. En este sentido, el estudio de Joa permite contextualizar el resultado de Loma Alta dentro de los bosques secos y muestra que el almacenamiento de carbono puede aumentar conforme se desarrolla la estructura de la vegetación.

En referencia al componente vegetal, el carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea registró valores de 1,01 Mg C ha⁻¹ en el primer monitoreo, 1,15 Mg C ha⁻¹ en el segundo y 1,24 Mg C ha⁻¹ en el tercero. Las diferencias registradas durante el periodo evaluado estuvieron asociadas con los cambios en el diámetro y la altura total de los individuos, variables que, junto con la densidad de la madera, intervienen en la ecuación alométrica de Chave et al. (2014). En el bosque seco costero ecuatoriano, Haro-Carrión et al. (2021) encontraron que la biomasa aérea varió entre tipos de cobertura en función de la composición y la estructura de la vegetación, lo que permite relacionar el menor aporte observado en Loma Alta con el predominio de individuos en el estrato bajo y en las primeras clases diamétricas.

La biomasa subterránea se estimó indirectamente mediante la relación $BGB = AGB \times 0,28$, por lo que sus valores fueron proporcionales a la biomasa aérea y no correspondieron a una medición directa del sistema radicular. Aunque este procedimiento permitió incorporar el componente subterráneo sin aplicar métodos destructivos, el uso de una relación fija podría no representar completamente las diferencias en la asignación de biomasa hacia las raíces entre las especies. Werden et al. (2023), menciona que, al evaluar especies establecidas en una restauración de bosque tropical seco, encontraron que los rasgos radiculares tuvieron importancia en la supervivencia temprana de los individuos y presentaron una relación limitada con los rasgos aéreos. En consecuencia, la biomasa subterránea obtenida en Loma Alta debe interpretarse como una aproximación derivada de la biomasa aérea, sin afirmar que el método haya subestimado el componente radicular.

Por otra parte, los tres monitoreos se realizaron durante cinco meses, por lo que permitieron describir las diferencias registradas en los mismos individuos durante ese intervalo. Este periodo no permite establecer una tasa anual ni determinar si las variaciones observadas se mantendrán a largo plazo. Dimson y Gillespie (2020), al revisar experiencias de restauración activa en bosques tropicales secos, señalaron que la corta duración de los seguimientos limita la evaluación de sus resultados a largo plazo. Por ello, los valores obtenidos en Loma Alta deben interpretarse únicamente dentro del periodo evaluado.

Las especies con mayor participación en la biomasa fueron *Triplaris cumingiana*, *Swietenia macrophylla* y *Cedrela odorata* que en conjunto alcanzaron 657,97 kg en el monitoreo final, equivalente al 69,4% de la biomasa total estimada. No obstante, su contribución respondió a características ecológicas y estructurales diferentes.

Triplaris cumingiana registró la mayor biomasa, con 235,64 kg. Esta especie presenta un crecimiento rápido en los primeros años, como observaron Cabrera-Verdesoto et al. (2019), quienes encontraron una relación positiva entre la edad, el diámetro y la altura de individuos establecidos en un sistema agroforestal, permitiendo así su aporte y destacando como una de las principales en este estudio. Además, Haro-Carrión et al. (2021) reconocieron a *T. cumingiana* como una especie característica del bosque seco costero ecuatoriano, lo que destaca su representatividad ecológica dentro del ecosistema restaurado.

Por su parte, *Swietenia macrophylla* registró 226,04 kg y fue la especie con mayor abundancia con 26 individuos. Su aporte se relacionó con el número de individuos, las dimensiones obtenidas y la presencia de un individuo remanente. Los resultados de Cabrera-Verdesoto et al. (2023) mostraron que esta especie presentó mayor crecimiento inicial en altura y diámetro que *T. cumingiana* bajo condiciones evaluadas de vivero. Del mismo modo, Vallejos et al. (2020) estudiaron la especie en un sistema agroforestal en Ecuador, registrando un desarrollo progresivo de altura y basal en su establecimiento. Grogan et al. (2005) encontraron un crecimiento reducido de las plántulas bajo el sotobosque y una respuesta considerablemente mayor cuando se incrementó la apertura del dosel. Por ello, estas condiciones favorecen su desarrollo y a la vez permiten tener mayor participación en la biomasa registrada en este estudio.

En el caso de *Cedrela odorata*, registró 196,29 kg de biomasa con diez individuos. Esta especie se desarrolla en climas tropicales estacionalmente secos y puede establecerse en espacios abiertos, con bordes y sectores intervenidos, condiciones similares con áreas sometidas a restauración. No obstante, su crecimiento depende de las características del sitio y

del manejo; Palacios Herrera et al, (2015), en un ensayo de enriquecimiento forestal realizado en Ecuador, registró una supervivencia del 85%, aunque su crecimiento fue menor. Del mismo modo, Álvarez-Aquino y Williams-Linera (2012), al evaluar esta especie durante dos años en una restauración de bosque tropical seco, encontraron que *C. odorata* presentó una tasa relativa de crecimiento alta, pero la menor supervivencia entre las especies estudiadas, con valores de entre 3 y 7 %. También determinaron que el crecimiento fue mayor durante la estación lluviosa. En Loma alta el desarrollo alcanzado por sus individuos permitió que se ubique entre las especies con mayor aporte.

9. CONCLUSIONES

-  El área restaurada de Loma Alta presentó una estimación del almacenamiento de carbono de 35,15 Mg C ha⁻¹, obtenida al considerar el COS del único muestreo y el carbono almacenado en la biomasa del monitoreo final. El carbono orgánico del suelo representó aproximadamente el 96,5% del carbono total estimado, por lo que constituyó el principal reservorio frente al carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea.

-  La composición vegetal del área de estudio estuvo conformada por 92 individuos, agrupados en 6 familias, 12 géneros y 13 especies. La estructura estuvo dominada por los individuos ubicados en el estrato inferior y en las primeras clases diamétricas, sin presencia de individuos en el estrato superior, lo que evidenció el desarrollo estructural inicial de la vegetación del área restaurada. *Swietenia macrophylla*, *Cedrela odorata* y *Handroanthus chrysanthus* presentaron los mayores valores de importancia ecológica.

-  La aplicación de ecuaciones alométricas permitió cuantificar la biomasa aérea y subterránea de los individuos evaluados. La biomasa aérea fue el principal componente de la biomasa total, mientras que la biomasa subterránea presentó una contribución menor. Del mismo modo, los individuos establecidos en la restauración concentraron mayor proporción de la biomasa estimada, en comparación con los individuos remanentes.

✚ La reserva de carbono orgánico del suelo almacenada en los estratos de 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 30 cm alcanzó 33,91 Mg C ha⁻¹. Las reservas promedio disminuyeron conforme aumentó la profundidad, con medias estimadas de 12,30 Mg C ha⁻¹ para el primer estrato, 11,56 Mg C ha⁻¹ para el segundo estrato y 10,05 Mg C ha⁻¹ para el tercer estrato. El modelo lineal mixto mostró un efecto significativo de la profundidad, $F_{(2,16)} = 6,0049$; $p = 0,0113$. Las comparaciones por pares con ajuste de Holm mostraron una diferencia significativa sólo entre los estratos de 0 a 10 y 20 a 30 cm ($p = 0,0109$).

10. RECOMENDACIONES

-  Mantener el seguimiento de las parcelas permanentes establecidas en el área restaurada de Loma Alta, con el fin de observar a mediano y largo plazo los cambios en la biomasa aérea, biomasa subterránea y carbono almacenado. En futuros estudios, se recomienda ampliar el periodo de monitoreo y de ser posible, incorporar parcelas adicionales que mejoren la representación espacial del área restaurada.

-  Realizar futuras estimaciones de carbono orgánico del suelo (COS) en función al tiempo, conservando las mismas parcelas y estratos de profundidad de 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 30 cm, con el propósito de identificar posibles cambios temporales y determinar si el comportamiento observado entre las profundidades se mantiene en futuros estudios.

-  Incorporar variables climáticas, como precipitación, temperatura y disponibilidad hídrica, dado que la estacionalidad puede influir en la productividad vegetal, crecimiento de individuos y acumulación de biomasa, permitiendo relacionar el carbono almacenado con las condiciones ambientales del área de estudio.

-  Evaluar el crecimiento y supervivencia de las especies utilizadas en la restauración, con el propósito de identificar aquellas con mayor adaptación a las condiciones ambientales del área de estudio y conocer su contribución al desarrollo de la vegetación y al almacenamiento de carbono en fases posteriores de restauración.

 Incorporar en futuras investigaciones un sitio de referencia ecológicamente comparable, como un área de bosque con mayor grado de madurez o en buen estado de conservación, que permita contrastar los valores de carbono almacenado y las variables evaluadas en el área restaurada de Loma Alta.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Adriano Macas, M. A. (2024). *Composición florística y estructura del Bosque y Vegetación Protectora Prosperina en la ciudad de Guayaquil*. Escuela Superior Politécnica del Litoral: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/65962/1/T-115241%20VIDA-383%20ADRIANO%20MACAS%20MAYRA.pdf>
- Aguirre, Z. (2012). Especies forestales de los Bosques Secos del Ecuador. *Ministerio del Ambiente de Ecuador*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/Bosques-Secos4.pdf>
- Aguirre, Z. (2016). Especies forestales mas aprovechadas del sur del Ecuador. *Universidad Nacional de Loja*, 128.
- Aguirre, Z., Kvist, L. P., y T, O. S. (2006). Bosques secos en Ecuador y su diversidad. *Botánica Económica de los Andes Centrales*, 162 - 187. <https://beisa.dk/Publications/BEISA%20Book%20pdfer/Capitulo%2011.pdf>
- Almeida, D., Broadbent, E. N., Zambrano, A. M., Wilkinson, B. E., Ferrerira, M. E., Chazdon, R., . . . Brancalion, P. H. (2019). Monitoring the structure of forest restoration plantations with a drone-lidar system. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79, 192 - 198. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0303243418311954>
- Álvarez, E., Velásquez, C., Cogollo, Á., y Benítez, D. (2013). Densidad básica del fuste de árboles del Bosque seco en la Costa de Colombia. *Revista Intropica*, 8, 17 - 28.

- Alvarez-Aquino, C., y Williams-Linera, G. (2012). Seedling Survival and Growth of Tree Species: Site Condition and Seasonality in Tropical Dry Forest Restoration. *Botanical Sciences*, 90(3), 341 - 351. <https://doi.org/10.17129/botsci.395>
- Angulo Díaz, D. S., y León Manrique, D. A. (2024). *Estimación de Carbono retenido en zonas de restauración asistida de bosque seco tropical en el proyecto hidroeléctrico el Quimbo, Huila - Colombia*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas: <https://fedemaderas.org.co/wp-content/uploads/2024/10/ESTIMACION-DE-CARBONO-RETENIDO-EN-ZONAS-DE-RESTAURACION-ASISTIDA-DE-BOSQUE-SECO-TROPICAL.pdf>
- Armstrong McKay, D. I., Staal, A., Abrams, J. F., Winkelmann, R., Sakschewski, B., Loriani, S., . . . Lenton, T. M. (2022). Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, 377(6611). <https://doi.org/10.1126/science.abn7950>
- Aronson, J., Clewell, A. F., Blignaut, J. N., y f, S. J. (2006). Ecological restoration: A new frontier for nature conservation and economics. *Journal for Nature Conservation*, 14(3 - 4), 135 - 139. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1617138106000240>
- Aryal, D. R., De Jong, B., Sánchez-Silva, S., Haas-Ek, A., Esparza-Olguin, L., Ochoa-Gaona, S., . . . Morales-Ruiz, D. (2024). Biomass recovery along a tropical forest succession: Trends on tree diversity, wood traits and stand structure. *Forest Ecology and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121709>
- Astudillo-Sánchez, E., Flor, J. P., Medina, G., y Medina, A. (2019). Gestión de los bosques tropicales estacionalmente secos de la provincia de Santa Elena, Ecuador: una perspectiva desde la conservación. *Revista Industrial Data*, 22(2), 117 - 138. <https://pdfs.semanticscholar.org/f218/0a5a6673caad34197d7e65158d91bad6fbae.pdf>

- Astudillo-Sánchez, E., Pérez, J., Troccoli, L., y Aponte, H. (2019). Composición, estructura y diversidad vegetal de la Reserva Ecológica Comunal Loma Alta, Santa Elena, Ecuador. *Revista Mexicana de Biodiversidad*.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/rmbiodiv/v90/2007-8706-rmbiodiv-90-e902871.pdf>
- Bagangan, R. B., Carantes, N. N., y Taynan, R. M. (2024). Biomass, Carbon Stock, and Economic Value Assessment of Daclan Communal Forest Parcel IV in Tublay, Benguet. *Mountain Journal of Science and Interdisciplinary Research*, 84(1), 29 - 45.
<https://journals.bsu.edu.ph/mjsir/article/view/399/417>
- Balladares, M. J., y Cunuhay, J. P. (2022). *Composición Florística y Estructural del Bosque Protector Pedro Franco Dávila, Cantón Palenque - Provincia de los Ríos*. Universidad Técnica Estatal de Quevedo.
- Banda-R, K., Weintritt, J., y Gómez, M. J. (2015). *Bosque Seco Tropical*. DRYFLOR:
<http://www.dryflor.info/files/Cartilla%20Bosque%20Seco.pdf>
- Barros-Díaz, C. (2024). Cordillera Chongón-Colonche: Evaluando la pérdida forestal y la necesidad de un nuevo estatus de conservación. *Investigativo*, 1(21). Investigativo:
<https://doi.org/10.31095/investigatio.2024.21.2>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M., y Walker, S. C. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1).
<https://doi.org/https://www.jstatsoft.org/article/view/v067i01>
- Bazurto, M., y Vélez, S. (2019). *Captación de carbono en (Cordia alliodora) y (Albizia guachapele) como servicio ambiental para propuesta de plan de reforestación en Mata Palo*. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López:
<https://repositorio.esпам.edu.ec/bitstream/42000/1218/1/TTMA85.pdf>

- Becker, C., y López, B. (1998). Conservation value of a garua forest in the dry season: a bird survey in Reserva Ecológica de Loma Alta, Ecuador.
- Benavides, J. d., Octavio, T., Flores-Garnica, J., y Rueda, A. (2021). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono aéreos de *Cedrela odorata* L. en plantaciones forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(65).
https://www.researchgate.net/publication/352525430_Ecuaciones_alometricas_para_estimar_biomasa_y_carbono_aereos_de_Cedrela_odorata_L_en_plantaciones_forestales
- Bindoff, N., Cheung, W., Kairo, J., Arístegui, J., Guinder, V., Hallberg, R., . . . Rama, B. (2019). Changing Ocean Marine Ecosystems, and Dependent Communities. En H.-O. Pörtner, D. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, . . . A. Alegría, *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (pp. 447 - 587). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2022/03/07_SROCC_Ch05_FINAL.pdf
- Blanco, N. Y. (2015). *Identificación y priorización de áreas para restauración ecológica en el distrito de Kosñipata, Provincia de Paucartambo - Cusco*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco:
<https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/129>
- Briones, K. D., y Laje, L. L. (2021). *Estructura y diversidad de la cobertura arbórea del bosque semideciduo de tierras bajas de los cantones Santa Ana y 24 de Mayo*. Universidad Estatal del Sur de Manabí:
<https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/3428/1/ALVAREZ%20BRIONE%20KATHERYN-MENENDEZ%20LAJE%20LAURA.pdf>

- Brown, S., y Lugo, A. (1992). Aboveground biomass estimates for tropical moist forest of the Brazilian amazon. *Interciencia*, 17(1), 8 - 18. Interciencia: https://philip.inpa.gov.br/publ_livres/Other%20side-outro%20lado/Brown%20&%20Lugo%20biomass/Brown%20and%20Lugo%201992-Aboveground%20biomass%20estimates.pdf
- Burbano-Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82 - 96. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183501.85>
- Cabrera Verdesoto, C. A., Suatunce-Cunuhay, P. J., Cervantes Borbor, J. W., y Tapia-Zúñiga, M. V. (2018). Determinación del incremento medio anual de *Tectona grandis* L.F., Y *Triplaris cumingiana* FISCH., establecidos en sistema agroforestal con cacao (*Theobroma Cacao* L.). *Polo del Conocimiento*, 4(7), 23 - 31. https://www.researchgate.net/publication/335576264_Determinacion_del_incremento_medio_anual_de_Tectona_grandis_LF_Y_Triplaris_cumingiana_FISCH_establecidos_en_sistema_agroforestal_con_cacao_Theobroma_Cacao_L
- Callaghan, M., Schleussner, C.-F., Nath, S., Lejeune, Q., Knutson, T. R., Reichstein, M., . . . Maa, N. v. (2021). Machine learning-based evidence and attribution mapping of 100,000 climate impact studies. *Naturaleza y cambio climático*, 11, 966 - 972. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-783398/v2>
- Calvas, B., Castro, L. M., Kindu, M., Bingham, L., Pintado, K., Celi, J. T., . . . Cueva-Ortiz, J. (2024). Large differences between observed and expected Ecuadorian deforestation from 2001 to 2009: a counterfactual simulation approach. *Reg Environ Change*, 24(94). <https://doi.org/10.1007/s10113-024-02253-0>

- Carrasco-Carballido, V., Martínez-Garza, C., Jiménez-Hernández, H., Márquez-Torres, F., y Campo, J. (2019). Effects of Initial Soil Properties on Three-Year Performance of Six Tree Species in Tropical Dry Forest Restoration Plantings. *Forest*, 10(5), 428. <https://doi.org/10.3390/f10050428>
- Carrión, P., Villavicencio, E., Becerra, J., y Castillo, R. (2022). Monitoreo de riqueza y abundancia de avifauna urbana en dos áreas verdes de Manta, Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 102 - 110. <https://doi.org/10.29166/revfig.v14i2.3729>
- Casas, A. R., y Rodríguez, L. E. (2024). *Estimación de la captura de dióxido de carbono por plantas herbáceas predominantes del humedal Pucush Uclo - Junín, 2023*. Universidad Continental: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/15743/1/IV_FIN_107_T_E_Aguilar_Gaspar_2024.pdf
- Castillo, J., Lezcano, S., González, M., y Guerra, J. (2017). *Análisis de la Varianza (ANOVA)*. Universidad Tecnológica de Panamá: https://www.academia.edu/36223426/An%C3%A1lisis_de_la_Varianza_ANOVA_An%C3%A1lisis_Estad%C3%ADstico
- Castillo, R. R., Bello, V. E., Loor, B. Y., y Ayón, H. C. (2022). Captura de carbono del arbolado de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 5. <https://doi.org/10.46380/rias.v5.e262>
- CEPSA. (2015). *El Cambio Climático y los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en Cepsa*. Dossier Cepsa: https://www.moevegloab.com/stfls/CepsaCom/Coorp_Comp/Medio%20Ambiente_Seguridad_Calidad/Art%C3%ADculos/Dossier-Cambio-Climatico-y-GEI.pdf

- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., . . . Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Ecosystem Ecology*, 145, 87 - 99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., . . . Muller-L, H. C. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177 - 3190.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chiidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W., . . . Muller-Landau, H. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Chazdon, R. L. (2008). Beyond Deforestation: Restoring Forests and Ecosystem Services on Degraded Lands. *Science*, 320(5882), 1458 - 1460. <https://doi.org/10.1126/science.1155365>
- Chazdon, R. L. (2014). *Second Growth: The Promise of Tropical Forest Regeneration in an Age of Deforestation*. University of Chicago. https://books.google.com.ec/books?id=EYhFAwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=e&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Chazdon, R., Broadbent, E., Rozendaal, D., Bongers, F., y Poorter, L. (2016). Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. *Science Advances*, 2(5). <https://doi.org/https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1501639>
- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., . . . Thornton, P. (2013). Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. En T. D. Stocker, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, A. Nauels, . . . P. Midgley, *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report*

of the Intergovernmental Panel on Climate Change (p. (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Colomina, D., Aguado, J., y Melero, M. (2025). *Manual de Restauración Ecológica: Cómo devolver la vida al paisaje*. WWF: <https://wwf.es.awsassets.panda.org/downloads/2025-manual-restauracion-ecologica.pdf>

De Sosa, L. L., Panettieri, I. C., Griffith, D. M., Espinosa, C. I., Jara-Guerrero, A., Plaza, C., y Madejón, E. (2024). Ecosystem function associated with soil organic carbon declines with tropical dry forest degradation. *Land Degradation & Development*, 35(6), 2109 - 2121. <https://doi.org/10.1002/ldr.5047>

Devi, A. S. (2021). Influence of trees and associated variables on soil organic carbon: a review. *Journal of Ecology and Environment*, 45(5). <https://doi.org/10.1186/s41610-021-00180-3>

Dimson, M., y Gillespie, T. W. (2020). Trends in active restoration of tropical dry forest: Methods, metrics, and outcomes. *Forest Ecology and Management*, 467. https://www.researchgate.net/publication/340874211_Trends_in_active_restoration_of_tropical_dry_forest_Methods_metrics_and_outcomes

Dzib, G. A. (2021). *Estructura, diversidad y captura de carbono en áreas asociadas a procesos de restauración productiva en Calakmul*. ECOSUR: https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/2594/1/61411_Documento.pdf

ENF. (s.f.). *¿Qué es la ENF?* Evaluación Nacional Forestal: https://enf.ambiente.gob.ec/web_enf/

- FAO. (2002). *Captura de Carbono en los Suelos para un Mejor Manejo de la Tierra*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación: <https://www.fao.org/4/y2779s/y2779s00.htm#Contents>
- FAO. (2004). *Inventario forestal nacional - Manual de campo - Modelo*. Forest management Division: <https://openknowledge.fao.org/items/f9a1a828-cfe5-41ad-8dfb-c16c11269934>
- FAO. (2013). *Directrices sobre el cambio climático para los gestores forestales*. Estudio FAO Montes N ° 172. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.: <https://www.fao.org/4/i3383s/i3383s.pdf>
- FAO. (2013). *National Forest Monitoring Systems: Monitoring and Measurement, Reporting and Verification (M & MRV) in the context of REDD+ Activities*. FAO: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/bd12c9b1-7b5a-4e20-9e62-736bf33575d9/content>
- FAO. (2017). *Mapa de Carbono Orgánico del Suelo*. ITPS: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/0321e0f3-9e17-4f9f-9430-253d0f67f736/content>
- FAO. (2019). *Procedimiento operativo estándar para el análisis de carbono orgánico del suelo: Walkley-Black. Métodos de titulación y colorimétrico*. Red Global de Laboratorio de suelo: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/3e255ff1-5a67-4d60-af9d-a3a37cb16a1f/content>
- FAO. (2019). *Procedimiento operativo estándar para la determinación de carbono total del suelo: Método de combustión seca*. GLOSOLAN: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/3f9b500e-1be8-4988-b58c-d64db545718d/content>

- Feijoo, C., Cartuche-Peralta, K., Pucha-Cofrep, D., Espinoza-Ami, F., Zhingre, W., y Homeier, J. (2025). Densidad de la madera en 22 especies del bosque seco del sur de Ecuador a lo largo de dos gradientes altitudinales. *Bosques Latitud Cero*, 15(1), 44 - 56. <https://doi.org/http://doi.org/10.54753/blc.v15i1.2324>
- Fischer et al. (2026). GWDD v.2. <https://doi.org/https://zenodo.org/records/18262736>
- Fondo de Inversión Ambiental Sostenible. (2024). *Culmina con éxito la restauración forestal de 250 hectáreas en la cordillera Chongón Colonche*. Fondo de Inversión Ambiental Sostenible: <https://fias.org.ec/restauracion-forestal-de-250-hectareas/>
- Forest Ecology and Management. (2005). Growth response by big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla*) advance seedling regeneration to overhead canopy release in southeast Pará, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 24(2 - 3), 399 - 412. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.09.013>
- Forster, P. M., Smith, C., Walsh, T., Lamb, W. F., Lamboll, R., Hall, B., . . . Andrew, R. (2024). Indicators of Global Climate Change 2023: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth Syst. Sci. Data*, 16(6), 2625 - 2658. <https://doi.org/10.5194/essd-16-2625-2024>, 2024
- FRA. (2015). *Documento de Trabajo de la Evaluación de los Recursos Forestales No. 180*. FRA: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f45f75f4-de20-4525-9f11-398d513b71d5/content>
- Frey, C., Penman, J., Hanle, L., Monni, S., y Ogle, S. (2006). Capítulo 3: Incertidumbress. En *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero: Volumen 1: Orientación general y generación de informes* . https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/1_Volume1/V1_3_Ch3_Uncertainties.pdf.

- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., . . . W., K. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, 27(1), S1 - S46.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/rec.13035?msockid=14678e83358e607626759bcd3492619c>
- Garavito, P. L. (2022). *Propuesta para la revegetalización con especies nativas como forma de compensación de Huella de Carbono*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas:
<https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/0a8a2266-2d5c-4e8a-a716-7f6cda201091/content>
- German National Academy of Sciences Leopoldina. (2021). *Climate change: causes, consequences and possible actions*. German National Academy of Sciences Leopoldina:
https://www.leopoldina.org/fileadmin/Migrierte_Daten/Publikationen/Dokumente/Factsheet_Klimawandel_1.1_EN_web.pdf
- González, L., Granda, V., Muñoz, L., Torrea, S., y Aguirre, Z. (2024). Contexto e implicaciones de la restauración ecológica y de paisajes. *Bosques Latitud Cero*, 14(1), 123 - 136.
https://www.researchgate.net/profile/Leonardo-Gonzalez-22/publication/377571117_Contexto_e_implicaciones_de_la_restauracion_ecologica_y_de_paisajes/links/67fe59d0bd3f1930dd5ebd27/Contexto-e-implicaciones-de-la-restauracion-ecologica-y-de-paisajes.pdf
- González, V., y Zamora, C. (2023). *Árboles frutales y maderables melíferos de la provincia de Manabí*. Uleam: <https://munayi.uleam.edu.ec/wp-content/uploads/2023/10/libro-arboles-meliferos.pdf>

- Grelle, A., Hedwall, P.-O., Strömgren, M., Håkansson, C., y Bergh, J. (2023). From source to sink – recovery of the carbon balance in young forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 330. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109290>
- Guale, J. (2024). *Estudio de la vegetación arbórea del bosque seco tropical en la comuna Salanguillo - Parroquia Colonche*. Universidad Estatal Península de Santa Elena: <https://repositorio.upse.edu.ec/server/api/core/bitstreams/49a083b2-ef20-4427-bfdc-49760c6e543e/content>
- Guzmán-Santiago, J. C., H. M.-P., Vargas-Larreta, B., Cárdenas, M. G., y Marroquín-Morales, P. (2024). Estimación de biomasa y carbono aéreo en bosques templados del sur de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(2). <https://doi.org/10.19136/era.a11n2.3934>
- Haro-Carrion, X., Loiselle, B., y Putz, F. E. (2021). Tree Species Diversity, Composition and Aboveground Biomass Across Dry Forest Land-Cover Types in Coastal Ecuador. *Tropical Conservation Science*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1177/1940082921995415>
- Heiskanen, J., Betemariam, E. A., y Packalen, P. (2013). Field measurement guidelines for aboveground biomass. *Building Biocarbon and Rural Development in West Africa (BIODEV)*. <https://www.cifor-icraf.org/publications/downloads/Publications/PDFS/RP16065.pdf>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Del Pilar Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta Edición ed.). México: McGraw - Hill.
- Hernández, G. J. (2016). *Elementos básicos de estadística descriptiva para el análisis de datos*. Medellín: Luis Antonio. https://www.funlam.edu.co/uploads/fondoeditorial/120_Ebook-elementos_basicos.pdf

- Hernández-Stefanoni, J. L., Santiago, M. Á., Mauricio, J. A., Jean-Francois, Dzul, F. T., y Rada, J. M. (2021). *Mapeo de la biomasa aérea de los bosques mediante datos de sensores remotos* y R. El Colegio de la Frontera Sur y Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.: https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Ligas_Interes/2021/Portada_extendida_MANUAL_BIOMASA_ISBN_CICY.pdf
- Holl, K., y Aide, T. (2011). When and where to actively restore ecosystems? 261(10), 1558 - 1563. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112710003750>
- Holm, S. (1979). A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. *Scand J Statis*, 6, 65 - 70. <https://www.ime.usp.br/~abe/lista/pdf4R8xPVzCnX.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems - Summary for Policymakers*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/29261>
- IPCC. (2006). Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. En H. Aalde, P. Gonzalez, M. Gytarsky, T. Krug, W. A. Kurz, S. Ogle, . . . N. Ravindranath, *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_04_Ch4_Forest_Land.pdf
- IPCC. (2021). *Cambio Climático 2021: Un resumen para todo el mundo*. IPCC: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGI_Summary_ForAll_Spanish.pdf
- Jimenez, K. (2021). *Inventario de bienes y servicios ecosistemicos del Archipiélago Jambelí y su estado de conservación*. UTMACH:

<http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/17451/1/ECFCS-2021-GEA-DE00033.pdf>

- Jumbo-Arévalo, C. A., Arévalo, C. D., y Ramirez-Cando, L. J. (2018). Medición de Carbono del estrato arbóreo del bosque natutal Tinajillas-Limón Indanza, Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 27(1), 51 - 63. <https://revistas.ups.edu.ec/index.php/granja/article/view/27.2018.04>
- Kleemann, J., Zamora, C., Villacis-Chiluisa, A. B., Cuenca, P., Koo, H., Noh, J. K., . . . Thiel, M. (2022). Deforestation in Continental Ecuador with a Focus on Protected Areas. *Land*, 11(2), 268. <https://doi.org/10.3390/land11020268>
- Kongsager, R. (2018). Linking Climate Change Adaptation and Mitigation: A Review with Evidence from the Land-Use Sectors. *Land*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/land7040158>
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., y Christensen, R. H. (2017). lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82(13). <https://www.jstatsoft.org/article/view/v082i13>
- Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 304, 1623 - 1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Li, C., Wang, Y., Yi, Y., Wang, X., Santos, C. A., y Liu, Q. (2024). A review of reservoir carbon Cycling: Key Processes, influencing factors and. *Ecological Indicators*, 166. <https://pdf.sciencedirectassets.com/272241/1-s2.0-S1470160X23X0020X/1-s2.0-S1470160X24009683/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjED0aCXVzLWVhc3QtMSJIMEYCIQCQXG2Xgl2ALm6GX2Q6%2B%2Fe6TtKhNUcX43sNEFFyR2bdlQlhAltYgKksqb7DD75E1QgcmnoHJnx34v0zYW5xBILg>

- López, B. D., y Yagual, M. A. (2023). *Diseño de un plan piloto de restauración ecosistémica en la comuna San Marcos de Santa Elena*. Escuela Superior Politécnica del Litoral: <https://dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/60904/T-114339%20%20VIDA-346.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Macías, C. S., Escobar, K. M., Sancán, G. S., Chávez, W. A., Choez, A. M., F. V., . . . Iglesias-Abad, S. (2020). Influencia del gradiente altitudinal sobre la estimación del carbono almacenado en biomasa aérea viva y en suelos del "Bosque y vegetación protector El Artesan - EcuadorianHands". Joa, Jipijapa. *Ecosistemas*, 29(1). <https://produccioncientifica.usal.es/documentos/6620102362f14c04d83933a1?lang=gl>
- Macías-Pro, M., Castro, E. J., Moreira Castro, J. M., Montoya Terán, J. M., y Zamora-Ledezma, E. (2025). Does the carbon pool vary among Ecuador's tropical dry forests and seasons? Experimental evidence from spatio-temporal assessments. *Environmental Science Advances*, 4(10), 1663 - 1683. <https://doi.org/10.1039/d5va00018a>
- Mayer, M., Prescott, C., Abaker, W., Augusto, L., Cécillon, L., Dias, G., . . . Vesterdal, L. (2020). Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management*, 446. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>
- Medina, M., Rojas, R., Bustamante, W., Loaiza, R., Martel, C., y Castillo, R. (2023). *Metodología de la investigación: Técnicas e instrumentos de investigación*. Puno: Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C. <https://doi.org/10.35622/inudi.b.080>
- Mejía Giraldo, L. M. (2009). *Análisis Estadístico de Sistemas Ecológicos*. Universidad La Gran Colombia:

https://www.ugc.edu.co/sede/armenia/files/editorial/analisis_estadistico_de_sistemas_ecologicos.pdf

Meli, P., Holl, K. D., Benayas, J. M., Jones, H. P., Jones, P. C., Montoya, D., y Mateos, D. M. (2017). A global review of past land use, climate, and active vs. passive restoration effects on forest recovery. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0171368>

Mena-Mosquera, V. E., Andrade C., H. J., y Torres-Torres, J. J. (2020). Composición florística, estructura y diversidad del bosque pluvial tropical de la subcuenca del río Munguidó, Quibdó, Chocó, Colombia. *Ciencias Agrícolas*, 16(1). <https://www.redalyc.org/journal/2654/265464211015/265464211015.pdf>

Mendizábal-Hernández, L. d., Alba-Landa, J., Ramírez, J. M., Cruz-Jiménez, H., y Ramírez-García, E. O. (2011). Captura de Carbono por *Cedrela odorata* L. en una prueba genética. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(4), 107 - 113. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v2n4/v2n4a9.pdf>

Miguel, M. F., Butterfield, H. S., y Lortie, C. J. (2020). *A meta-analysis contrasting active versus passive restoration practices in dryland agricultural ecosystems*. PMCID: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7690292/>

Ministerio de Ambiente y Energía. (2014). *Mapa Interactivo*. Ministerio de Ambiente y Energía: <http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Ordenamiento forestal productivo para la zona de reserva campesina del departamento del Guaviare*. República de Colombia : https://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2207/technical/PP%20-%202021.%20Parcelas%20de%20investigacion.pdf?v=1709419717

Ministerio del Ambiente. (2019). *Plan Nacional de Restauración Forestal 2019 - 2030*.

Ministerio del Ambiente: https://initiative20x20.org/sites/default/files/2021-08/MAE_2019_Plan%20Nacional_Restauracion%20%282%29%20%281%29.pdf

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2013). *Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental*. Subsecretaría de Patrimonio Natural.

[https://www.researchgate.net/profile/Silvia-Salgado-](https://www.researchgate.net/profile/Silvia-Salgado-3/publication/268268323_Propuesta_Metodologica_para_la_Representacion_Cartografica_de_los_Ecosistemas_del_Ecuador_Continental/links/546e270a0cf2b5fc17605746/Propuesta-Metodologica-para-la-Representacion-)

[3/publication/268268323_Propuesta_Metodologica_para_la_Representacion_Cartografica_de_los_Ecosistemas_del_Ecuador_Continental/links/546e270a0cf2b5fc17605746/Propuesta-Metodologica-para-la-Representacion-](https://www.researchgate.net/profile/Silvia-Salgado-3/publication/268268323_Propuesta_Metodologica_para_la_Representacion_Cartografica_de_los_Ecosistemas_del_Ecuador_Continental/links/546e270a0cf2b5fc17605746/Propuesta-Metodologica-para-la-Representacion-)

Mokany, K., Raison, R. J., y Prokushkin, A. S. (2005). Critical analysis of root:shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, 12(1), 84 - 96.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x>

Mörsdorf, M. A., Ravolainen, V. T., Støvern, L. E., Yoccoz, N. G., Jónsdóttir, I. S., y Bråthen, K. A. (2015). Definition of sampling units begets conclusions in ecology: the case of habitats for plant communities. *Peer J*, 3. <https://doi.org/10.7717/peerj.815>

Mostacedo, B., y Fredericksen, T. S. (2000). *Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal*. BOLFOR: <http://www.bionica.info/biblioteca/mostacedo2000ecologiavegetal.pdf>

Nelson, D. W., y Sommers, L. E. (1996). Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. En *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5.3. SSSA Book Series.

NIST. (s.f.). *Límites de confianza para la media*. NIST: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda352.htm>

NOAA. (2024). *Quantifying the Ocean Carbon Sink*. National Centers for Environmental Information: <https://www.ncei.noaa.gov/news/quantifying-ocean-carbon-sink>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *Términos y Definiciones*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/cdd2d882-02a5-4970-9ec8-2d78f3cd3ed6/content>

Ovando, M. L. (2014). *Identificación de áreas prioritarias para restauración ecológica, en la región Chignahuapan - Zacatlán, Puebla*. IEECA: http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/2292/Gonzalez_Ovando_ML_MC_Forestal_2014.pdf?sequence=3

Palacios Herrera, B., Aguirre Mendoza, Z., y Lozano, D. (2015). Experiencias de enriquecimiento forestal en bosque secundario en la microcuenca “El Padmi”, Zamora Chinchipe Ecuador. *Palacios Herrera, Byron [1] ; Aguirre Mendoza, Zhofre [1] ; Lozano, Deicy [1], 5(1)*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9354918>

Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R. A., Kauppi, P., Kurz, W. A., . . . McGuire, A. D. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333(6045), 988 - 993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>

Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L., Houghton, R. A., Fang, J., Kauppi, P. E., . . . Schepaschenko, D. (2024). The enduring world forest carbon sink. *Nature*, 631, 563 - 569.

Párraga García, M. I. (2025). *Estimación de carbono almacenado en biomasa aérea sobre el suelo en un sistema agroforestal con café en el CECAD del cantón Jipijapa*. Universidad Estatal del Sur de Manabí:

[https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/7942/1/P%
c3%ada%20Michael%20Iv%
c3%a1n.pdf](https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/7942/1/P%c3%a1rraga%20Garc%
c3%ada%20Michael%20Iv%c3%a1n.pdf)

Pearson, T. R., Brown, S., Murray, L., y Sidman, G. (2017). Greenhouse gas emissions from tropical forest degradation: an underestimated source. *Carbon Balance Manage*, 12(3).
<https://doi.org/10.1186/s13021-017-0072-2>

Pereira, P. V. (2021). *Estadística distribución de frecuencias y representación gráfica*.
Universidad de San Marcos :
<https://repositorio.usam.ac.cr/xmlui/bitstream/handle/11506/1409/LEC%20EST%20003%202021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Pérez, Á. V. (2025). *Descripción del proceso silvicultural en proyectos de restauración con fines de compensación de huella de Carbono*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas: <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/b80201f6-7076-43da-9b16-6a135d332bb8/content>

Picard, N., Saint-André, L., y Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: Del trabajo de campo a la predicción*. as Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement: <https://www.fao.org/4/i3058s/i3058s.pdf>

Pietrzykowski, M., Świątek, B., Woś, B., Klamerus-Iwan, A., Maśior, P., Pająk, M., . . . Chodak, M. (2025). The effect of forest disturbances and regeneration scenario on soil organic carbon pools and fluxes: a review. *Journal of Forestry Research*, 36(12).
<https://doi.org/10.1007/s11676-024-01807-6>

Pincay, L. (2022). *Diversidad y Abundancia de anuros en el bosque en conservación Comuna Loma Alta y Dos Mangas de la Cordillera Chongón Colonche - Santa Elena, 2022*.

Universidad Estatal Península de Santa Elena:
<https://repositorio.upse.edu.ec/server/api/core/bitstreams/2c2cdd0b-865e-4205-b8e3-f78423ccffa6/content>

Prefectura de Santa Elena. (2025). *SPACUS impulsa acciones para protección del Bosque seco tropical de Chongón - Coloche*. Prefectura de Santa Elena:
<https://www.santaelena.gob.ec/index.php/noticias-menu/boletines/1355-spacus-impulsa-acciones-para-proteccion-del-bosque-seco-tropical-de-chongon-colonche>

Quéré, C. L., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., . . . Bopp, L. (2018). *Global Carbon Budget 2018*. <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>

Rajapakshe, R., Karthigesu, J., Thavananthan, S., Sivachandiran, S., Navaneetham, V., y Sinnamani, S. (2024). Restoring a dry tropical forest through assisted natural regeneration: enhancing tree diversity, structure, and carbon stock. *Trees, Forests and People*, 17. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666719324001237>

Randerson, J. T., Chapin, F. S., Harden, J. W., Neff, J. C., y Harmon, M. E. (2002). Net ecosystem production: A comprehensive measure of net carbon accumulation by ecosystems. *Ecological Applications*, 12(4), 937 - 947.
<https://andrewsforest.oregonstate.edu/sites/default/files/lter/pubs/pdf/pub3124.pdf>

Red Española de Ciudades por el Clima. (2009). *Los Sumideros de Carbono a Nivel Local*. Red Española de Ciudades por el Clima:
<https://redciudadesclima.es/sites/default/files/c2dd700737802664a97469104e56f17d.pdf>

Rivas, U. D. (2025). *Evaluación de captación de carbono y abundancia de las especies Trichilia pallida y Matasia coloradum en el bosque "La Esperanza", Manabí*.
Universidad Agraria del Ecuador:

<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/RIVAS%20UTRERAS%20DANIELA%20ISABEL.pdf>

Rodríguez, A. N., y Zambrano, R. A. (2024). *Estudio de la cacería furtiva y la deforestación en el bosque protector Chongón - Colonche del cantón Pedro Carbo - Provincia del Guayas*. Universidad Estatal del Sur de Manabí: <https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/6191/1/Ordo%c3%blez%20Rodriguez%20Alejandro%20Neil%20-%20Raul%20Ariel%20Saltos%20Zambrano.pdf>

Rügnitz, T. M., León, M. C., y Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. Centro Mundial Agroflorestal (ICRAF) / Consorcio Iniciativa Amazônica (IA): <https://www.cifor-icraf.org/publications/downloads/Publications/PDFS/B16293.pdf>

Ruiz, A. D. (2026). *La actividad antrópica y el cambio climático*. Universidad César Vallejo: <https://www.ucv.edu.pe/noticias/la-actividad-antropica-y-el-cambio-climatico>

Ruiz-Jaen, M. C., y Aide, T. M. (2005). Restoration Success: How Is It Being Measured? *Restoration Ecology*, 13(3), 569 -577.

Sánchez, A. R., Rodríguez, A. G., Eguiarte, D. G., Corral, J. A., Solorio, J. d., Alcocer, E. L., y Mireles, M. A. (2014). Estimación de biomasa aérea en plantaciones de *Cedrela odorata* L. y *Swietenia macrophylla* King. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(25), 8 - 17. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v5n25/v5n25a2.pdf>

Sánchez, P. M., y Barrezueta, L. D. (2023). Centros de datos verdes en Ecuador: Una estrategia para disminuir la emisión de CO₂ en los Centros de Datos ecuatorianos. *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, 16(1), 1 - 18. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8955428>

- Sarango, F., y Tenempaguay, W. (2020). *Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea, necromasa (hojarasca) y en el suelo en un bosque de pino en la comuna Paquizhapa (provincia de Loja)*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19153/1/UPS-CT008822.pdf>
- SNMB. (2020). *Sistema Nacional de Monitoreo de Bosques*. <https://snmb.ambiente.gob.ec/snmb/>
- SOP: Elementar C/N Analysis. (2021). *SOP: Elementar C/N Analysis*. Soils Lab, University of Illinois Urbana-Champaign. Urbana, IL: <https://margenot.cropsciences.illinois.edu/methods-sops/>
- Suding, K. N. (2011). Toward an Era of Restoration in Ecology: Successes, Failures, and Opportunities Ahead. *Annual review of ecology, evolution and systematics*, 42, 465 - 487.
- Suganuma, M., y Durigan, G. (2015). Indicators of restoration success in riparian tropical forests using multiple reference ecosystems: Indicators of riparian forests restoration success. *Restoration Ecology*, 23(3), 238 - 251.
- Trujillo-Miranda, A. L., Toledo-Aceves, T., López-Barrera, F., y Gerez-Fernández, P. (2018). Active versus passive restoration: Recovery of cloud forest structure, diversity and soil condition in abandoned pastures. *Ecological Engineering*, 117, 50 - 61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.03.011>
- Ulusow, A. (2024). Climate change, causes, economic impact and mitigation. *International Journal of Scientific Research Updates*, 8(1). <https://doi.org/10.53430/ijrsru.2024.8.1.0043>

- UNFCCC. (2015). *Measurements for Estimation of Carbon Stocks in Afforestation and Reforestation Project Activities under the Clean Development Mechanism: A field Manual*. United Nations Framework Convention on Climate Change : https://unfccc.int/resource/docs/publications/cdm_afforestation_field-manual_web.pdf
- Vallejos, H., Añazco, M., Vizcaíno, M., Paredes, H., y Ruiz, J. (2020). Comportamiento de *Alnus nepalensis* D. Don en asocio con tres especies forestales *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F.Blaque, *Swietenia macrophylla* King, y *Cordia alliodora* Ruiz & Pav. bajo sistema agroforestal. *Environment Sciences*, 13(1), 49 - 56. <https://doi.org/10.18779/cyt.v13i1.347>
- Vera, A. R., y Serrano, M. I. (2023). Refugiado climático: hacia la garantía en el ejercicio efectivo de los derechos de las personas en movilidad humana. *UISRAEL*, 10(2), 173 - 190. <https://doi.org/10.35290/rcui.v10n2.2023.686>
- Vorster, A. G., Choi, C. T., Prentice, A. M., Young, N., Kuegler, O., Gaetani, M., . . . Bucholz, E. (2024). *Colorado Forest Carbon Inventory: Forest Ecosystem and Harvested Wood Product Carbon Accounting Framework Through 2019*. Colorado State Forest Service Report. Fort Collins, CO: Colorado State Forest Service: https://csfs.colostate.edu/wp-content/uploads/2025/01/CSFS_CarbonAccountingReport_2024_FINAL_accessible.pdf
- Wassihun, A. N., Hussin, Y. A., Van Leeuwen, L. M., y Latif, Z. A. (2019). Effect of forest stand density on the estimation of above ground biomass/carbon stock using airborne and terrestrial LIDAR derived tree parameters in tropical rain forest, Malaysia. *Environmental Systems Research*, 8(27). <https://link.springer.com/article/10.1186/s40068-019-0155-z>

- Werden, L. K., Averill, C., Crowther, T. W., Calderón-Morales, E., Toro, L., Alvarado, J. P., . . . Powers, J. S. (2023). Below-ground traits mediate tree survival in a tropical dry forest restoration. *Philosophical Transactions B*, 378(1867).
<https://royalsocietypublishing.org/rstb/article/378/1867/20210067/42665/Below-ground-traits-mediate-tree-survival-in-a>
- Wiegant, D., Peralvo, M., Oel, P. v., y Dewulf, A. (2020). Five scale challenges in Ecuadorian forest and landscape restoration governance. *Land Use Policy*, 96.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104686>
- Xu, S., Eisenhauer, N., Zeng, Z., y Xiaohan Mo, Y. D. (2024). Drivers of soil organic carbon recovery under forest restoration: a global meta-analysis. *Carbon Research*, 3(80).
<https://doi.org/10.1007/s44246-024-00165-6>
- Yunga, C. G. (2024). *Evaluación de la restauración pasiva en tres estadios sucesionales de la vegetación en la Reserva Natural El Cristal, Loja, Ecuador*. Universidad Nacional de Loja: <https://dspace.unl.edu.ec/server/api/core/bitstreams/0378183e-5839-4c13-8227-efe1f5209647/content>
- Zanne, A. E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D. A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S. L., . . . Chave, J. (2009). Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. *Dryad*.
<https://datadryad.org/dataset/doi:10.5061/dryad.234>

12. ANEXOS

Tabla 14

Densidad de madera por especie y fuente bibliográfica

ID	Nombre Científico	Densidad de madera (ρ)	Fuente
1	<i>Cedrela odorata</i>	0,42	(Fischer et al., 2026)
2	<i>Cordia alliodora</i>	0,49	(Fischer et al., 2026)
3	<i>Cordia lutea</i>	0,54	(Feijoo et al., 2025)
4	<i>Handroanthus chrysanthus</i>	0,82	(Fischer et al., 2026)
5	<i>Leucaena trichodes</i>	0,63	(Feijoo et al., 2025)
6	<i>Myroxylum balsamum</i>	0,78	(Fischer et al., 2026)
7	<i>Prosopis juliflora</i>	0,67	(Álvarez et al., 2013)
8	<i>Pseudalbizzia multiflora</i>	0,68	(Fischer et al., 2026)
9	<i>Pseudosamanea guachapele</i>	0,57	(Fischer et al., 2026)
10	<i>Swietenia macrophylla</i>	0,48	(Fischer et al., 2026)
11	<i>Triplaris cumingiana</i>	0,50	(Fischer et al., 2026)
12	<i>Vachellia farnesiana</i>	0,73	(Fischer et al., 2026)
13	<i>Vitex gigantea</i>	0,50	(Fischer et al., 2026)

Nota. La densidad de madera (ρ) se expresó en g/cm³ y se recopilaron de las fuentes bibliográficas indicadas para su aplicación en la ecuación alométrica de biomasa aérea

Tabla 15

Distribución de individuos por estrato de altura, origen y monitoreo

Clase	Intervalo de Altura (m)	Origen	Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3
Estrato Bajo	Altura < 5,0 m	Remanentes	8	8	8
		Restaurados	70	70	67
		Total por estrato	78	78	75
Estrato Medio	5,0 ≤ Altura < 12,0 m	Remanentes	3	3	3
		Restaurados	11	11	14
		Total por estrato	14	14	17
Estrato	Altura ≥ 12,0 m	Remanentes	0	0	0

Alto	Restaurados	0	0	0
	Total por estrato	0	0	0

Nota. Los valores corresponden al número de individuos remanentes y restaurados registrados en cada monitoreo.

Tabla 16

Distribución de individuos por clase diamétrica, origen y monitoreo

Clase	Origen	Monitoreo 1 (n)	Monitoreo 2 (n)	Monitoreo 3 (n)
Clase I	Remanentes	9	8	8
	Restaurados	44	42	40
	Total Clase I	53	50	48
Clase II	Remanentes	1	2	2
	Restaurados	25	25	25
	Total Clase II	26	27	27
Clase III	Remanentes	0	0	0
	Restaurados	9	9	10
	Total Clase III	9	9	10
Clase IV	Remanentes	1	1	1
	Restaurados	3	5	6
	Total Clase IV	4	6	7

Nota. Los valores corresponden al número de individuos remanentes y restaurados en cada monitoreo.

Tabla 17

Biomasa aérea por especie durante los tres monitoreos

Especies (NC)	Biomasa aérea M1 (kg)	Biomasa aérea M2 (kg)	Biomasa aérea M3 (kg)
<i>Cedrela odorata</i>	129,09	143,35	153,35
<i>Cordia alliodora</i>	1,47	2,46	2,82
<i>Cordia lutea</i>	4,14	6,97	8,02
<i>Handroanthus chrysanthus</i>	45,74	61,52	64,77

<i>Leucaena trichodes</i>	12,32	12,65	15,53
<i>Myroxylum balsamum</i>	20,85	23,79	30,68
<i>Prosopis juliflora</i>	0,13	0,17	0,20
<i>Pseudalbizzia multiflora</i>	0,97	1,27	1,55
<i>Pseudosamanea guachapele</i>	81,41	88,17	95,22
<i>Swietenia macrophylla</i>	135,42	159,48	176,59
<i>Triplaris cumingiana</i>	167,99	178,80	184,09
<i>Vachellia farnesiana</i>	0,67	0,74	0,95
<i>Vitex gigantea</i>	3,95	5,41	6,54
Total general	604,15	684,79	740,30

Nota. Los valores corresponden a la biomasa aérea acumulada por especie durante los tres monitoreos, expresada en kilogramos.

Tabla 18

Biomasa subterránea por especie en los tres monitoreos

Nombre científico	Biomasa subterránea M1 (kg)	Biomasa subterránea M2 (kg)	Biomasa subterránea M3 (kg)
<i>Cedrela odorata</i>	36,15	40,14	42,94
<i>Cordia alliodora</i>	0,41	0,69	0,79
<i>Cordia lutea</i>	1,16	1,95	2,25
<i>Handroanthus chrysanthus</i>	12,81	17,22	18,13
<i>Leucaena trichodes</i>	3,45	3,54	4,35
<i>Myroxylum balsamum</i>	5,84	6,66	8,59
<i>Prosopis juliflora</i>	0,04	0,05	0,06
<i>Pseudalbizzia multiflora</i>	0,27	0,36	0,43
<i>Pseudosamanea guachapele</i>	22,79	24,69	26,66
<i>Swietenia macrophylla</i>	37,92	44,65	49,45
<i>Triplaris cumingiana</i>	47,04	50,06	51,55
<i>Vachellia farnesiana</i>	0,19	0,21	0,27
<i>Vitex gigantea</i>	1,11	1,52	1,83
Total general	169,16	191,74	207,28

Nota. Los valores corresponden a la biomasa subterránea acumulada por especie en los tres monitoreos, estimada a partir de la biomasa aérea.

Tabla 19

Biomasa total por especie durante los tres monitoreos

Nombre Científico	Biomasa total M1 (kg)	Biomasa total M2 (kg)	Biomasa total M3 (kg)
<i>Cedrela odorata</i>	165,24	183,49	196,29
<i>Cordia alliodora</i>	1,88	3,15	3,60
<i>Cordia lutea</i>	5,29	8,92	10,27
<i>Handroanthus chrysanthus</i>	58,55	78,74	82,90
<i>Leucaena trichodes</i>	15,77	16,20	19,88
<i>Myroxylum balsamum</i>	26,69	30,45	39,27
<i>Prosopis juliflora</i>	0,16	0,22	0,25
<i>Pseudalbizzia multiflora</i>	1,25	1,63	1,99
<i>Pseudosamanea guachapele</i>	104,20	112,86	121,88
<i>Swietenia macrophylla</i>	173,34	204,13	226,04
<i>Triplaris cumingiana</i>	215,03	228,86	235,64
<i>Vachellia farnesiana</i>	0,86	0,95	1,22
<i>Vitex gigantea</i>	5,05	6,93	8,37
Total general	773,32	876,53	947,58

Nota. Los valores corresponden a la biomasa total acumulada por especie en los tres monitoreos, obtenida a través de la suma de biomasa aérea y subterránea.

Tabla 20

Carbono almacenado en biomasa por origen en los tres monitoreos

Origen	Carbono M1 (Mg C ha⁻¹)	Carbono M2 (Mg C ha⁻¹)	Carbono M3 (Mg C ha⁻¹)
Remanente	0,11	0,13	0,14
Restaurado	0,90	1,01	1,10
Total general	1,01	1,14	1,24

Nota. Los valores corresponden al carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea según el origen de los individuos en los tres monitoreos.

Tabla 21

Carbono total del ecosistema por parcela

Parcela	Carbono total M3 (Mg C ha⁻¹)	Carbono Orgánico del Suelo (Mg C ha⁻¹)	Carbono de la Biomasa (Mg C ha⁻¹)
OO1	42,90	41,81	1,09
OO2	29,28	28,71	0,57
OO3	31,95	31,69	0,27
OO4	42,34	39,06	3,28
OO5	34,30	33,70	0,60
OO6	38,32	37,16	1,15
OO7	32,43	31,84	0,59
OO8	25,32	23,88	1,44
OO9	39,47	37,32	2,15
Promedio	35,15	33,91	1,24

Nota. El carbono total corresponde a la suma del carbono orgánico del suelo y el carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea en el monitoreo final.

Tabla 22

Incertidumbre de las estimaciones de carbono almacenado

Estimación	n	Promedio (Mg C ha⁻¹)	Desviación estándar	Error estándar	Margen de error 95 %	Incertidumbre relativa (%)
Biomasa M1	9	1,01	0,86	0,29	0,66	65,80
Biomasa M2	9	1,15	0,92	0,31	0,71	61,91
Biomasa M3	9	1,24	0,95	0,32	0,73	59,25
COS	9	33,91	5,57	1,86	4,28	12,62
Final	9	35,15	6,02	2,01	4,63	13,17

Nota. La incertidumbre se calculó considerando las nueve parcelas como unidades muestrales. Los valores de los monitoreos 1, 2 y 3 corresponden únicamente al carbono almacenado en la biomasa. El carbono orgánico del suelo corresponde al único muestreo realizado, mientras que la estimación integrada final corresponde a la suma del carbono orgánico y el carbono almacenado en la biomasa en el monitoreo 3.

Figura 16

Toma de muestras de suelo para el análisis del COS



Nota. Levantamiento de muestras del suelo en compañía del Tutor y Cotutor.

Figura 17

Toma de muestras de suelo por estrato de profundidad



Nota. Muestreo del suelo realizado por estrato de profundidad en el área de estudio.

Figura 18

Toma de muestra de suelo según estrato de profundidad



Nota. Muestra de suelo obtenida según el estrato de profundidad establecido para el análisis de carbono orgánico del suelo.

Figura 19

Identificación de la parcela permanente OO3 en el área de estudio



Nota. Parcela en el área de estudio.

Figura 20

Muestra de suelo colocada en funda ziploc para su traslado al laboratorio



Nota. Almacenamiento de muestra para traslado.

Figura 21

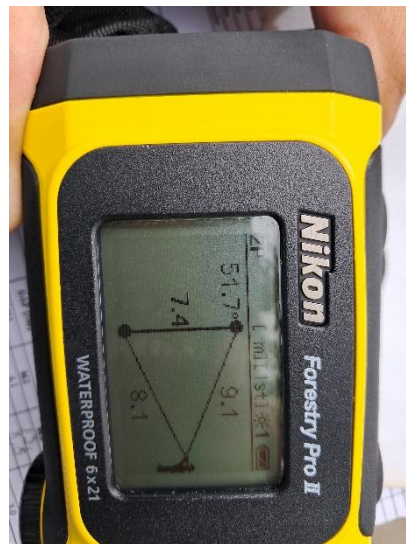
Pesaje de muestras de suelo en laboratorio



Nota. Pesaje de las muestras de suelo previo a secar

Figura 22

Medición de altura con hipsómetro Nikon Forestry Pro II



Nota. Equipo utilizado para la medición de altura de los individuos árboles.

Figura 23

Acompañamiento de la tutora, cotutor y guía en el trabajo de campo



Nota. Acompañamiento de los docentes y guía en el área de estudio.