



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE SECUESTRO DE
CARBONO EN LAS ESPECIES ARBÓREAS PRESENTES EN EL
CAMPUS
SALACHE MEDIANTE EL MÉTODO NO DESTRUCTIVO”**

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

Autora:
Ibarra Soto Adalyd Nahomi

Tutor:
Daza Guerra Oscar Rene

LATACUNGA – ECUADOR

Febrero 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Ibarra Soto Adalyd Nahomi, con cédula de ciudadanía No. 1728193028, declaro ser autora del presente Proyecto de Investigación: **“ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE SECUESTRO DE CARBONO EN LAS ESPECIES ARBÓREAS PRESENTES EN EL CAMPUS SALACHE MEDIANTE EL MÉTODO NO DESTRUCTIVO”**, siendo el Ingeniero Mg. Oscar Rene Daza Guerra, Tutor del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

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

Latacunga, 18 de febrero del 2025



Adalyd Nahomi Ibarra Soto
C.C: 1728193028
ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **IBARRA SOTO ADALYD NAHOMI**, identificada con cédula de ciudadanía **1728193028** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE SECUESTRO DE CARBONO EN LAS ESPECIES ARBÓREAS PRESENTES EN EL CAMPUS SALACHE MEDIANTE EL MÉTODO NO DESTRUCTIVO”**, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: abril 2021 - agosto 2021

Finalización de la carrera: octubre 2024 – marzo 2025

Aprobación en Consejo Directivo: 12 diciembre del 2024

Tutor: Ing. Oscar Rene Daza Guerra, Mg.

Tema: **“ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE SECUESTRO DE CARBONO EN LAS ESPECIES ARBÓREAS PRESENTES EN EL CAMPUS SALACHE MEDIANTE EL MÉTODO NO DESTRUCTIVO”**

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

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

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

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.

e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

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

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

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

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

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

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

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

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 18 días del mes de febrero del 2025.



Adalyd Nahomi Ibarra Soto

LA CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

LA CESIONARIA

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

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

“ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE SECUESTRO DE CARBONO EN LAS ESPECIES ARBÓREAS PRESENTES EN EL CAMPUS SALACHE MEDIANTE EL MÉTODO NO DESTRUCTIVO”, de Ibarra Soto Adalyd Nahomi, de la carrera de Ingeniería Ambiental, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del Aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, 18 de febrero del 2025



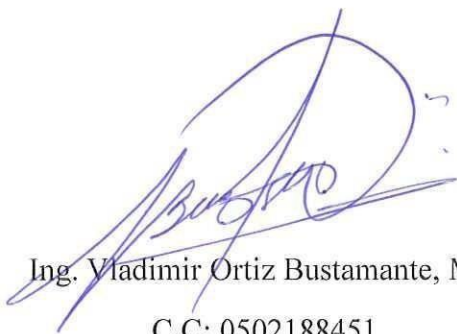
Ing. Oscar Rene Daza Guerra, Mg.
C.C: 0400689790
DOCENTE TUTOR

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, la postulante: Ibarra Soto Adalyd Nahomi, con el título del Proyecto de Investigación: **“ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE SECUESTRO DE CARBONO EN LAS ESPECIES ARBÓREAS PRESENTES EN EL CAMPUS SALACHE MEDIANTE EL MÉTODO NO DESTRUCTIVO”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

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

Latacunga, 18 de febrero del 2025



Ing. Vladimir Ortiz Bustamante, Mg.

C.C: 0502188451

LECTOR 1 (PRESIDENTE)



Ing. Kalina Fonseca Largo, Mg.

C.C: 1723534457

LECTOR 2 (MIEMBRO)



Ing. Vincent Velastegui Tapia, Mg.

CC: 0502547649

LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

Agradezco a DIOS por ser mi guía, darme fuerzas y sabiduría para lograr mis metas. A mi madre Odila Soto y familia por su apoyo incondicional. A las personas que me han acompañado durante esta trayectoria por todas las cosas buenas que me permitieron sonreír y las malas que indudablemente me ayudaron a crecer. A mi tutor Mg. Oscar Daza por su orientación en el desarrollo del presente proyecto. A mis docentes por los conocimientos y apoyo brindado.

Adalyd Nahomi Ibarra Soto

DEDICATORIA

A DIOS por haberme bendecido con mi familia. A mi madre Odila Soto por su esfuerzo y apoyo incondicional siendo un pilar fundamental en mi vida. A mi familia Soto y Pogo por estar presentes viendo por mi salud y bienestar. A mis mascotas que me acompañan desde el cielo.

Adalyd Nahomi Ibarra Soto

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

TÍTULO: “ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE SECUESTRO DE CARBONO EN LAS ESPECIES ARBÓREAS PRESENTES EN EL CAMPUS SALACHE MEDIANTE EL MÉTODO NO DESTRUCTIVO”.

Autora: Ibarra Soto
Adalyd Nahomi

RESUMEN

El presente proyecto de investigación tuvo como objetivo principal estimar el potencial de secuestro de carbono en las especies arbóreas presentes en el campus Salache mediante el método no destructivo, para ello se empleó una investigación de tipo bibliográfica, descriptiva, de campo y cuantitativa que permitió realizar un inventario forestal para la identificación y caracterización detallada de la vegetación arbórea dominante del campus, así como, la medición de parámetros dendrométricos, específicamente del diámetro a altura del pecho (DAP) y altura total, en el cual se aplicaron ecuaciones alométricas con base a modelos matemáticos no destructivos para la estimación del secuestro de carbono, utilizando técnicas como el Índice de Valor de Importancia (IVI) para determinar la dominancia de especies y el uso de software QGIS para el análisis espacial y representación gráfica de los datos. Los resultados evidenciaron que el campus Salache alberga 1,405 individuos arbóreos, distribuidos en 24 especies diferentes, con un secuestro total de 1,825,897 toneladas de CO₂; donde las especies con mayor capacidad de almacenamiento de carbono fueron *Pinus radiata* con 768,515 toneladas, *Cupressus sempervirens* con 502,637 toneladas y *Eucalyptus globulus* con 222,907 toneladas, representando más del 80 % del secuestro total, además se determinó que la Zona C: Parte Baja del campus Salache almacena el mayor porcentaje de carbono con el 40.35 % del total debido a la abundancia de especies identificadas en comparación con la Zona B: Parte Media, con 31.49 % del total y la Zona A: Parte Alta, con 28.16 % del total, lo que indica variaciones en la capacidad de captura según la densidad y tipo de especies presentes, asimismo, se evidenció que las especies nativas presentan una menor acumulación de carbono en comparación con especies introducidas, lo que sugiere la necesidad de fortalecer programas de reforestación con especies autóctonas.

Palabras clave: secuestro de carbono, biomasa, especies arbóreas, mitigación.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL RESOURCES

THEME: “ESTIMATION OF THE CARBON SEQUESTRATION POTENTIAL OF TREE SPECIES PRESENT IN THE SALACHE CAMPUS USING THE NON-DESTRUCTIVE METHOD”

Author:

Ibarra Soto Adalyd Nahomi

ABSTRACT

The main objective of this research project was to estimate the carbon sequestration potential of the tree species present in the Salache campus using the non-destructive method, for this purpose, a bibliographic, descriptive, field and quantitative research was used to carry out a forest inventory for the identification and detailed characterization of the dominant tree vegetation of the campus, as well as, Allometric equations were then applied based on non-destructive mathematical models to estimate carbon sequestration, using techniques such as the Importance Value Index (IVI) to determine species dominance and the use of QGIS software for spatial analysis and graphic representation of the data. The results evidenced that the Salache campus hosts 1,405 arboreal individuals, distributed in 24 different species, with a total sequestration of 1,825,897 tons of CO₂; where the species with the highest carbon storage capacity were *Pinus radiata* with 768,515 tons, *Cupressus sempervirens* with 502,637 tons and *Eucalyptus globulus* with 222,907 tons, representing more than 80% of the total sequestration, it was also determined that Zone C: Lower Part of the Salache campus stores the highest percentage of carbon with 40.35 % of the total due to the abundance of identified species compared to Zone B: Middle Part, with 31.49 % of the total and Zone A: Upper Part, with 28.16 % of the total, which indicates variations in the capture capacity according to the density and type of species present, also, it was evidenced that native species have a lower carbon accumulation compared to introduced species, which suggests the need to strengthen reforestation programs with native species.

Keywords: carbon sequestration, biomass, tree species, mitigation.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR	iii
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
1 INFORMACIÓN GENERAL	1
2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	1
3 BENEFICIARIOS DEL PROYECTO	3
4 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
5 OBJETIVOS	4
5.1 General	4
5.2 Específicos	4
6 ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS	4
7 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA	5
7.1 Marco Teórico	5

Cambio Climático	
5	Causas del cambio climático
	6
7.1.1	La generación de energía..... 6
7.1.2	Productos de fabricación
	6
7.1.3	La tala de los bosques..... 7
7.1.4	El uso del transporte
	7
7.1.5	La producción de alimentos
	7
7.1.6	La energía en los edificios
	7
7.1.7	Consumo excesivo
	8
	Consecuencias del cambio climático
	8
7.1.8	Pérdida de biodiversidad y ecosistemas
	8
	xi
7.1.9	Elevación de las temperaturas
	9
7.1.10	Tormentas más potentes
	9
7.1.11	Aumento de las sequías
	9
7.1.12	Aumento del nivel del océano y calentamiento del agua
	10
7.1.13	Desaparición de especies
	10
7.1.14	Escasez de alimentos
	10
7.1.15	Riesgos para la salud
	10
7.1.16	Pobreza y desplazamiento
	11
	Emisiones de CO2 en Ecuador
	11
	Huella de carbono
	11

7.1.17	Huella de carbono en el Ecuador	12
	Métodos de secuestro de carbono	12
7.1.18	Sumidero de carbono	12
7.1.19	Secuestro de carbono biológico	12
7.1.20	Secuestro de carbono geológico	13
7.1.21	Secuestro de carbono oceánico	13
7.1.22	Captura y Almacenamiento de carbono (CAC)	13
	Proceso de secuestro de carbono en especies arbóreas	13
7.1.23	Primera fase	14
7.1.24	Segunda fase	14
7.1.25	Tercera fase.....	14
	Especies arbóreas que secuestran carbono	15
	Métodos de cuantificación del secuestro de carbono	16
7.1.26	Métodos directos o destructivos	16
7.1.27	Métodos indirectos o no destructivos	16
	Ciclo del carbono	16
	Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC)	17

	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC)	17
8	VALIDACIÓN DE LA PREGUNTA CIENTÍFICA	18
9	METODOLOGÍA	18
9.1	Área de Estudio	18
9.2	Delimitación del área de estudio	18
9.3	Ubicación	19
		Geográfica
9.4	Tipos de investigación	19
9.4.1	Investigación bibliográfica	19
9.4.2	Investigación de campo	20
9.4.3	Investigación descriptiva	20
9.4.4	Investigación cuantitativa	21
9.5	Métodos	21
9.5.1	Método inductivo	21
9.5.2	Método descriptivo	22
9.5.3	Método Analítico	22
9.6	Línea Base	23

Metodología para el desarrollo del proyecto	23
Primera Etapa: Evaluación el estado actual de las especies arbóreas	23
9.6.1 Descripción de factores ambientales	23
9.6.2 Descripción del uso y manejo forestal	24
9.6.3 Inventario forestal	24
9.6.4 Clasificación de árboles por su etapa de desarrollo	25
9.6.5 Etapa juvenil	26
9.6.6 Etapa submadura	26
9.6.7 Etapa madura	26
9.6.8 Etapa sobremadura	26
9.6.9 Criterios de selección de especies	26
9.6.10 Estimación del Índice de Valor de Importancia (IVI).....	26
9.6.11 Dominancia relativa	27
9.6.12 Cálculo de la densidad absoluta (D)	27
9.6.13 Cálculo de la densidad relativa (Dr)	27
9.6.14 Cálculo de la dominancia relativa (DmR)	27
9.6.15 Frecuencia relativa	28
9.6.16 Cálculo de la Frecuencia absoluta (fa)	28
9.6.17 Cálculo de la Frecuencia relativa (fr)	28

9.6.18	Cálculo del Índice de Valor de Importancia (IVI)	28
9.6.19	Caracterización de especies dominantes	29
Segunda Etapa: Medición de los parámetros dendrométricos de los árboles seleccionados 29		
9.6.20	Diámetro a la altura del pecho (DAP)	29
9.6.21	Medición de la circunferencia a la altura del pecho (CAP)	29
9.6.22	Cálculo del diámetro a altura del pecho (DAP)	30
9.6.23	Cálculo del DAP en árboles bifurcados	30
9.6.24	Altura total	31
9.6.25	Método de los triángulos semejantes	31
9.6.26	Medición en campo de la altura total	32
9.6.27	Cálculo de la altura total	33
9.6.28	Área Basal	33
9.6.29	Cálculo del área basal	33
9.6.30	Volumen del árbol en pie	34
9.6.31	Cálculo del volumen del árbol en pie	34
Tercera etapa: Cálculo de la cantidad de carbono secuestrado por las especies arbóreas		
9.6.32	Modelos empleados en la estimación de secuestro de carbono	35
9.6.33	Modelos de ecuaciones alométricas	36

9.6.34	Modelos generales	36
9.6.35	Modelo de la técnica del árbol promedio	36
9.6.36	Estimación del carbono secuestrado por árbol	37
9.6.37	Técnica del árbol promedio	37
9.6.38	Método indirecto o no destructivo	37
9.6.39	Ecuaciones alométricas aplicadas	38
9.6.40	Cálculo de la biomasa Aérea	38
9.6.41	Cálculo de la biomasa radicular	39
9.6.42	Cálculo de la biomasa verde total.....	39
9.6.43	Cálculo de la biomasa seca.....	39
9.6.44	Cálculo del secuestro de carbono	40
9.6.45	Cálculo del carbono aéreo total	40
9.6.46	Cálculo del carbono radicular	40
9.6.47	Cálculo del carbono total secuestrado por árbol	41
9.6.48	Estimación del carbono secuestrado por especie	41
9.6.49	Cálculo del carbono secuestrado por especie arbórea	41
9.6.50	Estimación del carbono secuestrado en el área de estudio	42
9.6.51	Cálculo de conversión a toneladas equivalentes de CO ₂	42
9.6.52	Estimación del potencial de secuestro de carbono	42
Técnicas.....		43
9.6.53	Observación directa	43
9.6.54	Guía de observación y diario de campo	43
9.6.55	Recolección de datos en campo	43

Instrumentos	44
10 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	44
10.1 Zonificación del área de estudio	44
10.1.1 Zona A: Parte alta	44
10.1.2 Zona B: Parte media	45
10.1.3 Zona C: Parte baja	46
10.2 Primera Etapa: Estado actual de las especies arbóreas	47
Factores ambientales	47
10.2.1 Clima	47
10.2.2 Temperatura	47
10.2.3 Precipitación	48
10.2.4 Humedad	49
10.2.5 Cobertura vegetal	49
10.2.6 Uso y Manejo de las especies arbóreas en el campus Salache	50
10.2.7 Zona Alta (2,734 – 2,887 m.s.n.m.)	51
10.2.8 Zona Media (2,709 – 2,734 m.s.n.m.)	51
10.2.9 Zona Baja (2,705 – 2,709 m.s.n.m.)	52
10.2.10 Inventario Forestal	53
10.2.11 Especies arbóreas presentes en la Zona A: Parte Alta	53

10.2.12	Especies arbóreas presentes en la Zona B: Parte Media	55
10.2.13	Especies arbóreas presentes en la Zona C: Parte Baja	56
10.2.14	Especies arbóreas del campus Salache	58
10.2.15	Índice de valor de Importancia (IVI)	60
10.2.16	Área Basal de las especies arbóreas	60
10.2.17	Dominancia de las especies arbóreas	62
10.2.18	Especies arbóreas dominantes del campus Salache.....	65
10.2.19	Pino (<i>Pinus radiata</i>)	65
10.2.20	Ciprés (<i>Cupressus sempervirens</i>)	67
10.2.21	Molle (<i>Schinus molle</i>)	69
10.2.22	Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>)	71
10.2.23	Acacia negra (<i>Acacia melanoxylon</i>)	73
10.2.24	Aliso andino (<i>Alnus acuminata</i>)	75
10.2.25	Tilo (<i>Sambucus mexicana</i>)	77
10.2.26	Guaba (<i>Inga edulis</i>)	79
10.2.27	Acacia común (<i>Acacia dealbata</i>)	81
10.2.28	Fresno (<i>Fraxinus uhdei</i>)	83
10.2.29	Especies nativas e introducidas	85
10.2.30	Mapa de distribución de especies arbóreas dominantes	86
10.3	Segunda Etapa: Parámetros dendrométricos de los árboles seleccionados	87

10.3.1	Altura Total	87
10.3.2	Altura Total de las especies dominantes en la Zona A: Parte Alta	87
10.3.3	Altura Total de las especies dominantes en la Zona B: Parte Media	89
10.3.4	Altura Total de las especies dominantes en la Zona C: Parte Baja	90
10.3.5	Diámetro a la altura del pecho (DAP)	91
10.3.6	DAP promedio de las especies dominantes en la Zona A: Parte Alta.....	91
10.3.7	DAP promedio de las especies dominantes en la Zona B: Parte Media	93
10.3.8	DAP promedio de las especies dominantes en la Zona C: Parte Baja	94
10.3.9	Volumen de las especies arbóreas dominantes	95
10.4	Tercera etapa: Carbono secuestrado por las especies arbóreas	97
10.4.1	Carbono secuestrado por las especies arbóreas dominantes	97
10.4.2	Proporción de CO ₂ secuestrado por especies arbóreas en el campus Salache	98
10.4.3	Mapa de carbono secuestrado por las especies arbóreas en el campus Salache	99
10.4.4	Carbono secuestrado por zona de estudio	100
11	IMPACTOS (SOCIAL, AMBIENTAL Y ECONÓMICO)	102
11.1	Impacto ambiental	102
11.2	Impacto social	102

11.3	Impacto económico	103
12	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
12.1	Conclusiones	103
12.2	Recomendaciones	104
13	BIBLIOGRAFÍA	104
14	ANEXOS	111
Anexo No. 1.	Aval del Traductor	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Beneficiarios del proyecto	3
Tabla 2. Actividades y sistema de tareas en relación a los objetivos planteados	4
Tabla 3. Especies arbóreas en la Zona A: Parte Alta	52
Tabla 4. Especies arbóreas en la Zona B: Parte Media	54
Tabla 5. Especies arbóreas en la Zona C: Parte Baja	55
Tabla 6. Especies arbóreas del campus Salache	57
Tabla 7. Área Basal de las especies.....	59
Tabla 8. Índice de Valor de Importancia (IVI).....	61
Tabla 9. Especies dominantes nativas e introducidas del campus Salache,.....	84
Tabla 10. Altura promedio de las especies dominantes en la Zona A: Parte Alta.....	86
Tabla 11. Altura promedio de las especies dominantes en la Zona B: Parte Media.....	88
Tabla 12. Altura promedio de las especies dominantes en la Zona C: Parte Baja	89
Tabla 13. DAP promedio de las especies dominantes en la Zona A: Parte Alta.....	90
Tabla 14. DAP promedio de las especies dominantes en la Zona B: Parte Media.....	91
Tabla 15. DAP promedio de las especies dominantes en la Zona C: Parte Baja.....	93
Tabla 16. Volumen de las especies arbóreas dominantes.....	94
Tabla 17. Toneladas de CO2 secuestrado por las especies arbóreas dominantes.....	96
Tabla 18. Ton de CO2 secuestrado por zona de estudio	99

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Densidad absoluta (D)	27
Ecuación 2. Densidad relativa (Dr).....	27
Ecuación 3. Dominancia relativa (DmR)	27
Ecuación 4. Frecuencia absoluta (fa)	28
Ecuación 5. Frecuencia relativa (fr)	28
Ecuación 6. Índice de Valor de Importancia (IVI)	28
Ecuación 7. Diámetro a la Altura del Pecho (DAP).	30
Ecuación 8. Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) en árboles bifurcados.	30

Ecuación 9. Altura Total	33
Ecuación 10. Área basal	33
Ecuación 11. Volumen del árbol en pie	34
Ecuación 12. Biomasa aérea (Kg)	38
Ecuación 13. Biomasa verde total.....	39
Ecuación 14. Biomasa seca (Kg)	39
Ecuación 15. Carbono aéreo total	40
Ecuación 16. Carbono radicular (Kg)	40
Ecuación 17. Carbono total secuestrado por árbol	41
Ecuación 18. Carbono secuestrado por especie arbórea	41
Ecuación 19. Carbono secuestrado en el área de estudio	42
Ecuación 20. Toneladas equivalentes de CO ₂	42

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Pino (<i>Pinus radiata</i>)	66
Ilustración 2. Ciprés (<i>Cupressus sempervirens</i>).	67
Ilustración 3. Molle (<i>Schinus molle</i>).	69
Ilustración 4. Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>).	72
Ilustración 5. Acacia negra (<i>Acacia melanoxylon</i>).	74
Ilustración 6. Aliso andino (<i>Alnus acuminata</i>).	76
Ilustración 7. Tilo (<i>Sambucus mexicana</i>).	78
Ilustración 8. Guaba (<i>Inga edulis</i>).	80
Ilustración 9. Acacia común (<i>Acacia dealbata</i>).	82
Ilustración 10. Fresno (<i>Fraxinus uhdei</i>).....	84

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. Especies arbóreas en la Zona A: Parte Alta	54
Gráfica 2. Especies arbóreas en la Zona B: Parte Media	55

Gráfica 3. Especies arbóreas en la Zona C: Parte Baja	57
Gráfica 4. Especies arbóreas del campus Salache	59
Gráfica 5. Área Basal de las especies	61
Gráfica 6. Índice de Valor de Importancia (IVI)	64
Gráfica 7. Proporción de especies arbóreas dominantes nativas e introducidas	86
Gráfica 8. Altura total promedio por etapa en la Zona A: Parte Alta (m)	88
Gráfica 9. Altura total promedio por etapa en la Zona B: Parte Media (m)	89
Gráfica 10. Altura total promedio por etapa en la Zona C: Parte Baja (m)	91
Gráfica 11. DAP promedio por etapa en la Zona A: Parte Alta (cm)	92
Gráfica 12. DAP promedio por etapa en la Zona A: Parte Alta (cm).	94
Gráfica 13. DAP promedio por etapa en la Zona C: Parte Baja	95
Gráfica 14. Volumen de las especies arbóreas dominantes (m ³)	96
Gráfica 15. Toneladas de CO ₂ secuestrado por la vegetación arbórea dominante	98
Gráfica 16. Proporción de CO ₂ secuestrado por especies arbóreas (%)	99
Gráfica 17. Ton de CO ₂ secuestrado por zona de estudio	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de secuestro de carbono en árboles	15
Figura 2. El ciclo del carbono	16
Figura 3. Ubicación geográfica del área de estudio	19
Figura 4. Medición del CAP en árboles en pie	30
Figura 5. Medición de la altura total del árbol	32
Figura 6. Visual del observador entre la copa y el pie del árbol	33
Figura 7. Factor forma de acuerdo con el tipo de tronco de un árbol	34
Figura 8. Zona A: Parte alta	45
Figura 9. Zona B: Parte media	46
Figura 10. Zona C: Parte baja	46
Figura 11. Temperatura del cantón Latacunga del Año 2024.	47
Figura 12. Precipitación del cantón Latacunga del Año 2025.	48
Figura 13. Humedad del cantón Latacunga del Año 2024.....	49
Figura 14. Cobertura vegetal del área de estudio.....	50
Figura 15. Distribución de las especies en el área de estudio	87
Figura 16. Mapa de Ton. de CO ₂ secuestrado en el campus Salache	100

1 INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:

“Estimación del potencial de secuestro de carbono en las especies arbóreas presentes en el campus Salache mediante el método no destructivo”

Fecha de inicio: 14-10-2024

Fecha de finalización: 17-02-2025

Lugar de ejecución:

Parroquia Eloy Alfaro, Cantón Latacunga, Provincia Cotopaxi, Zona 3, Universidad Técnica de Cotopaxi.

Facultad que auspicia

Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales **Carrera**

que auspicia:

Ingeniería Ambiental

Equipo de Trabajo:

Coordinador del Proyecto: Tutor de Titulación: Mg. Oscar Daza G

Datos del Investigador:

Nombres y Apellidos: Ibarra Soto Adalyd Nahomi

Teléfono: 0986012416

Correo electrónico: adalyd.ibarra3028@utc.edu.ec

Área de Conocimiento:

Ciencias ambientales y forestales, Cambio Climático, Biometría Forestal **Línea**

de investigación:

Análisis, conservación y aprovechamiento racional de la biodiversidad fauna y recursos naturales el desarrollo sustentable y la prevención de desastres naturales.

Sublínea de investigación de la carrera:

Manejo y conservación de la biodiversidad

Línea de vinculación de la carrera:

Caracterización, conservación y aprovechamiento de la diversidad local.

2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

En la actualidad, la mitigación del cambio climático se ha convertido en una prioridad global, debido a la intensificación de los efectos adversos causados por las emisiones de gases de efecto invernadero afectando tanto a los ecosistemas como a la calidad de vida de las personas, siendo el dióxido de carbono el gas principal contribuyente al calentamiento global se han implementado una serie de estrategias para reducir y evitar sus emisiones, donde el aprovechamiento de la capacidad de los ecosistemas forestales para capturar carbono es una de las principales estrategias en la mitigación de este problema gracias a sus múltiples funciones ambientales de los árboles, puesto que actúan como sumideros naturales de carbono al absorber dióxido de carbono (CO₂) a través de la fotosíntesis y almacenarlo en su biomasa, contribuyendo así a reducir las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

En este contexto, los ecosistemas forestales como los sistemas agroforestales o plantaciones forestales se destacan como sumideros de carbono en los que se han realizado diversos estudios que evalúan su potencial de captura de carbono en varias regiones a nivel nacional e internacional sin embargo, existen pocos estudios sobre el secuestro de carbono por especies arbóreas en la ciudad de Latacunga específicamente en el sector Salache Bajo, por esto el presente proyecto tiene como objetivo estimar el potencial de secuestro de carbono en las especies arbóreas del campus Salache, lo cual resulta fundamental frente a la intensificación del aumento de temperatura de hoy en día que afecta a la disponibilidad de recursos naturales en todos los sectores comerciales del país, entre ellos, la agricultura, la ganadería, la silvicultura, entre otros.

La importancia del presente estudio radica en la incentivación del aprovechamiento ambiental de los árboles en la resiliencia frente al calentamiento global a través de prácticas sostenibles de reforestación y forestación en zonas urbanas y rurales en el que las plantaciones forestales no se limiten al secuestro y almacenamiento de carbono sino también a la regulación del clima local, que a su vez fomente la presencia de lluvias mitigando las olas de calor y sequías.

El campus Salache se encuentra ubicado en un sector destacado por su actividad económica basada en sistemas agroforestales en el que evaluar la capacidad de secuestro de carbono de las especies presentes permite establecer prioridades de manejo forestal y de conservación que optimice el uso de los recursos naturales y promueva el desarrollo sostenible, así pues, los resultados de este proyecto no solo serán un aporte para la comunidad universitaria, en términos de investigación académica, sino también será de utilidad para comunidades locales,

responsables de políticas públicas o gestores de recursos naturales, interesados en implementar estrategias para la conservación y restauración de ecosistemas forestales.

3 BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

En el presente proyecto los beneficiarios directos son los estudiantes y docentes de la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales (CAREN) de la Universidad Técnica de Cotopaxi. La facultad alberga un total de 2,440 estudiantes y 86 docentes, distribuidos en las carreras de Ingeniería Agroindustrial, Ingeniería en Agronomía, Ingeniería Ambiental, Turismo, Medicina Veterinaria, entre otras; en cuanto a los beneficiarios indirectos, se incluyen a los habitantes de la comunidad del sector Salache Bajo, ubicado en la parroquia de Eloy Alfaro, así como a los 77,267 residentes de la ciudad de Latacunga y a los 470,210 habitantes de la provincia de Cotopaxi como se representa en la Tabla 1.

Tabla 1. Beneficiarios del proyecto.

Beneficiarios	Grupo	Cantidad
Directos	Estudiantes de la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales (CAREN)	2,440
Indirectos	Residentes de la ciudad de Latacunga	77,267
	Habitantes de la provincia de Cotopaxi	470,210

4 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La creciente preocupación sobre los efectos potencialmente desastrosos del cambio climático en varias regiones del mundo, se está enfrentando con la incapacidad de muchos países de reducir localmente sus emisiones netas de gases de efecto invernadero conforme a lo establecido por el Acuerdo de París, en el que la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) ha propuesto la adaptación y mitigación como estrategias para luchar contra este problema medioambiental: reducción de las fuentes de emisiones de GEI y/o conservar, proteger y aumentar los sumideros de carbono (Hernández- Restrepo, 2023).

Hoy en día, actividades antropogénicas como la quema de combustibles fósiles y la deforestación, hace que se libere más carbono a la atmósfera de lo que pueden absorber los

sumideros de carbono naturales de la Tierra, empeorando el calentamiento global, así como, la actividad humana y el cambio climático también causan la degradación de los sumideros de carbono, lo que supone el riesgo de que el carbono que almacenan se libere en la atmósfera, por lo cual, proteger los sumideros de carbono y expandir su capacidad de absorber carbono y almacenarlo a largo plazo es una estrategia fundamental para enfrentar el cambio climático y estabilizar el clima (PNUD, 2023).

Los sumideros de carbono tales como como las plantaciones agroforestales se reconoce como una alternativa para mitigar el calentamiento global, mediante la captura del dióxido de carbono de la atmósfera a través de la fotosíntesis (Somarriba et al., 2013).

El secuestro de carbono varía entre las especies arbóreas, debido a las diferentes edades, tasas de crecimiento, alturas, diámetros, así como el clima, ubicación y características topográficas del sitio donde se desarrollan, por ello, la estimación de la biomasa aérea se ha convertido en un procedimiento clave para evaluar el potencial de las especies forestales para almacenar carbono (Reyes et al., 2021).

5 OBJETIVOS

5.1 General

Estimar el potencial de secuestro de carbono en las especies arbóreas presentes en el campus Salache de la Universidad Técnica de Cotopaxi mediante el método no destructivo.

5.2 Específicos

- Evaluar el estado actual de la vegetación forestal presente en el área de estudio mediante las características fenotípicas de las especies arbóreas.
- Medir los parámetros dendrométricos de los árboles seleccionados mediante el método de los triángulos semejantes.
- Calcular la cantidad de carbono secuestrado por las especies arbóreas mediante la aplicación de ecuaciones alométricas.

6

ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Tabla 2. Actividades y sistema de tareas en relación a los objetivos planteados

OBJETIVOS	ACTIVIDADES	METODOLOGÍA	RESULTADOS
Evaluar el estado actual de la	Salidas de campo	Investigación bibliográfica,	El campus Salache alberga un total de

vegetación forestal presente en el área de estudio mediante la elaboración de un inventario forestal.	Zonificación del área de estudio Observación directa y registro de datos en campo.	de campo, descriptiva y cuantitativa. Método descriptivo	1,547 individuos arbóreos, distribuidos en 24 especies diferentes.
Medir los parámetros dendrométricos de los árboles seleccionados mediante el método de los triángulos semejantes.	Observación de características fenotípicas Medición de parámetros dendrométricos	Investigación cuantitativa y de campo Método de Triángulos Semejantes	Base de datos dendrométricos
Calcular la cantidad de carbono secuestrado por las especies arbóreas mediante la aplicación de ecuaciones alométricas.	Organización de datos Aplicación del método no destructivo	Método indirecto o no destructivo por ecuaciones alométricas	El campus Salache posee un secuestro total de 1,825,897 toneladas de CO ₂ . La zona con mayor almacenamiento de CO ₂ es la Zona C (Parte Baja), con 736,605 toneladas (40.35 % del total).

7 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

7.1 Marco Teórico

Cambio Climático

El cambio climático global, también conocido como calentamiento global, es el aumento de la temperatura del planeta debido al incremento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, entre estos gases, los principales son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O); cuya emisión es causada debido a actividades antropogénicas como la quema de combustibles fósiles, la ganadería intensiva y la deforestación, afectando la estabilidad de los ecosistemas, la biodiversidad y la salud humana,

a partir de la intensificación de eventos meteorológicos como el aumento de la frecuencia y severidad de huracanes, inundaciones, olas de calor y sequías, causando el aumento del nivel del mar, la erosión costera a causa del derretimiento de glaciares y la reducción de casquetes polares, así pues, el calentamiento global representa una grave amenaza tanto para la humanidad como para la biodiversidad del planeta (Organización de las Naciones Unidas, 2024).

Causas del cambio climático

Las causas del cambio climático se originan a partir de la emisión y acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, el cual, desencadena respuestas climáticas que afectan tanto los ecosistemas como a la salud humana, a partir de efectos climáticos que pueden amplificar o mitigar estos cambios; dependiendo de factores como el desarrollo socioeconómico, los patrones de producción o consumo, la evolución demográfica y los avances tecnológicos, siendo estos los principales impulsores de las emisiones de GEI (Useros, 2013).

Los informes del IPCC resaltan que las causas del cambio climático son de origen natural y antropogénicas, siendo estas últimas las principales responsables del aumento de las concentraciones de GEI, en el que, entre 1970 y 2004, crecieron significativamente debido a los sectores de energía, transporte e industria, así como por el impacto de la deforestación y la agricultura, donde los principales GEI de larga permanencia generados por actividades humanas son el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y los halocarbonos, de los cuales el CO₂ representa el 56.5 % de las emisiones totales, lo que lo convierte en el principal contribuyente al forzamiento radiactivo y al calentamiento global (Common & Stagl, 2012).

7.1.1 La generación de energía

La generación de energía a partir de la combustión de combustibles fósiles como el gas natural libera grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera; un GEI con alta capacidad de retención de calor, en el que, a pesar del avance en tecnologías renovables, la generación de electricidad aún depende en gran medida de estos combustibles, lo que aumenta su impacto ambiental y climático (Organización de las Naciones Unidas, 2024).

7.1.2 Productos de fabricación

El sector industrial y manufacturero son unos de las principales fuentes de emisiones de GEI a nivel global; debido a su alta dependencia de la combustión de combustibles fósiles para la generación de energía en procesos como la producción de cemento, hierro, acero y componentes electrónicos; actividades en la minería, la construcción y la manufactura de bienes de consumo, requieren un uso intensivo de maquinaria y tecnologías que emiten grandes cantidades de

dióxido de carbono (CO₂) y otros GEI, emisiones contribuyentes al cambio climático, causando el calentamiento global y su impacto ambiental (Organización de las Naciones Unidas, 2024).

7.1.3 La tala de los bosques

La tala de bosques para la expansión agrícola, ganadera u otros fines aumentan las emisiones de GEI debido a que los árboles almacenan carbono, en el que al ser talados se libera su almacenamiento de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera, por el cual, anualmente, se pierden aproximadamente 12 millones de hectáreas de bosques; lo que reduce la capacidad de absorción de CO₂ y favorece al cambio climático, por otro lado, la deforestación, junto con actividades agrícolas; cambios en el uso del suelo, es responsable de cerca del 25 % de las emisiones globales de GEI, lo que la convierte en una de las principales causas del calentamiento global (Organización de las Naciones Unidas, 2024).

7.1.4 El uso del transporte

El sector del transporte es uno de los principales emisores de GEI debido a su alta dependencia de combustibles fósiles como el diésel, la gasolina y el queroseno, debido a que medios de transporte como los vehículos terrestres, barcos y aeronaves generan grandes emisiones de dióxido de carbono, en el que, actualmente, este sector es responsable de aproximadamente una cuarta parte de las emisiones globales de CO₂ derivadas del uso de energía, además, se proyecta que el consumo energético en el transporte seguirá en aumento en los próximos años, intensificando su impacto ambiental y climático (Organización de las Naciones Unidas, 2024).

7.1.5 La producción de alimentos

La producción de alimentos es una de las principales fuentes de emisiones de GEI debido a múltiples factores como la deforestación y la roturación de tierras para la agricultura, la ganadería; la alimentación del ganado bovino u ovino, el uso de fertilizantes y abonos sintéticos, así como el consumo de energía fósil en maquinaria agrícola o barcos pesqueros, además, el procesamiento, envasado y distribución de los alimentos generan emisiones adicionales; convirtiendo a la producción de alimentos en un sector considerable de contribución al cambio climático (Organización de las Naciones Unidas, 2024).

7.1.6 La energía en los edificios

Los edificios, tanto residenciales como comerciales, representan una de las mayores demandas de electricidad consumiendo más de la mitad de la energía global; la dependencia de carbón, hidrocarburos y gas natural para la calefacción y climatización genera altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente de dióxido de carbono (CO₂), además, el crecimiento en la adquisición de aires acondicionados, sistemas de calefacción, iluminación y

dispositivos electrónicos ha incrementado el consumo energético, intensificando las emisiones derivadas de la generación de electricidad en edificaciones, reforzando la necesidad de soluciones energéticas sostenibles en su construcción y operación (Organización de las Naciones Unidas, 2024).

7.1.7 Consumo excesivo

El consumo excesivo de recursos y energía en los hogares; el transporte, la alimentación y la compra de bienes manufacturados produce una gran cantidad de emisiones de GEI, en el que, ciertos productos como la ropa, los dispositivos electrónicos y los plásticos generan emisiones a lo largo de su ciclo de vida, desde la producción hasta su disposición final, un alto porcentaje de estas emisiones proviene del consumo individual, con un impacto desproporcionado por parte de los sectores más ricos de la población donde se estima que el 1 % más rico de la población mundial emite más GEI en conjunto que el 50 % de la población más pobre, lo que evidencia la desigual distribución de la responsabilidad en el cambio climático (Organización de las Naciones Unidas, 2024).

Consecuencias del cambio climático

El cambio climático acelera la pérdida de biodiversidad, el deterioro de los ecosistemas y la reducción de los bienes y servicios que ofrecen tanto para el medio ambiente como para la salud humana; a medida que los ecosistemas son impactados por actividades antrópicas, estos se vuelven aún más vulnerables a estos efectos favoreciendo a su degradación, por lo que la conservación de la biodiversidad es primordial ya que los ecosistemas saludables proporcionan servicios ambientales de importancia económica y social como la regulación climática, la provisión de agua y la seguridad alimentaria (IPCC, 2007).

7.1.8 Pérdida de biodiversidad y ecosistemas

El cambio climático impacta negativamente la biodiversidad, aumentando la frecuencia e intensidad de fenómenos como incendios forestales, sequías y la proliferación de especies invasoras, lo que altera el equilibrio ecológico, además, la deforestación reduce la capacidad de los ecosistemas para regular el ciclo hidrológico, afectando los patrones de precipitación a nivel regional y local; en la cuenca del Amazonas, por ejemplo, aproximadamente el 50 % de las lluvias proviene de la evaporación y transpiración de la vegetación, donde la reducción de la cobertura boscosa en esta región podría disminuir hasta un 20 % de la precipitación, incrementando la temperatura de la superficie y agravando los efectos del cambio climático (Uribe Botero, 2015).

7.1.9 Elevación de las temperaturas

El aumento en la concentración de GEI ha provocado un incremento sostenido en la temperatura superficial global, registrándose en la última década (2011-2020) los niveles de calentamiento más altos hasta la fecha, desde los años 80, cada década ha sido más cálida que la anterior; intensificando la frecuencia e intensidad de olas de calor y días extremadamente cálidos, este fenómeno aumenta el riesgo de enfermedades relacionadas con el calor, dificulta las condiciones laborales en exteriores y favorece la propagación de incendios forestales, además, el Ártico experimenta un calentamiento acelerado, al menos el doble de rápido que la media global, lo que contribuye al derretimiento del hielo polar y cambios en el clima a nivel global (Organización de las Naciones Unidas, 2024).

7.1.10 Tormentas más potentes

El cambio climático ha intensificado la frecuencia y severidad de tormentas extremas, debido a la evaporación de humedad en la atmósfera, lo que genera precipitaciones intensas e inundaciones; este fenómeno provoca daños significativos en infraestructuras, comunidades y ecosistemas, además de generar pérdidas económicas considerables y un aumento en la mortalidad relacionada con eventos climáticos extremos, por lo cual, la creciente energía térmica en la atmósfera provoca la formación de ciclones, huracanes y tormentas severas, amplificando su impacto a nivel global (Organización de las Naciones Unidas, 2024).

7.1.11 Aumento de las sequías

El cambio climático está alterando la disponibilidad de agua; intensificando la escasez hídrica en múltiples regiones, especialmente en zonas áridas y semiáridas donde el calentamiento global incrementa la frecuencia e intensidad de las sequías agrícolas y ecológicas, afectando la producción de cultivos, debilitando los ecosistemas y reduciendo su resiliencia, además, las sequías prolongadas pueden generar tormentas de arena y polvo de gran magnitud, contribuyendo a la desertificación y la disminución de tierras fértiles, provocando graves impactos en la seguridad alimentaria (Organización de las Naciones Unidas, 2024).

7.1.12 Aumento del nivel del océano y calentamiento del agua

El océano absorbe la mayor parte del calor generado por el calentamiento global, lo que provoca el constante aumento del nivel del mar; poniendo en riesgo a comunidades costeras e insulares, además, el océano actúa como sumidero de carbono, en el que absorbe el dióxido de carbono y reduce su concentración en la atmósfera, sin embargo, el exceso de CO₂ en el agua acelera el proceso de acidificación oceánica, amenazando a la biodiversidad marina a los cambios del pH en el agua (Organización de las Naciones Unidas, 2024).

7.1.13 Desaparición de especies

El cambio climático está acelerando la tasa de extinción de especies terrestres y marinas, con una velocidad estimada 1,000 veces mayor que en cualquier otro período registrado en la historia humana, este fenómeno es impulsado por el aumento de temperaturas, la intensificación de incendios forestales, las condiciones climáticas extremas y la proliferación de plagas y enfermedades que afectan la biodiversidad, donde se estima que un millón de especies podrían extinguirse en las próximas décadas, por otro lado, mientras algunas especies logran adaptarse desplazándose a nuevos hábitats, muchas otras carecen de la capacidad de adaptación necesaria, lo que compromete la estabilidad de los ecosistemas y la seguridad biológica (Organización de las Naciones Unidas, 2024).

7.1.14 Escasez de alimentos

El cambio climático y el aumento de fenómenos meteorológicos extremos están comprometiendo a la seguridad alimentaria global, afectando de manera crítica a las poblaciones más vulnerables, por otro lado, la acidificación oceánica pone en riesgo los recursos pesqueros, mientras que los cambios en los casquetes polares y la reducción de agua y pastizales; impactan negativamente la producción agrícola y ganadera, las altas temperaturas y la alteración de los ecosistemas reducen la disponibilidad de alimentos, provocando un aumento en la desnutrición y afectando la estabilidad de los sistemas productivos a nivel mundial (Organización de las Naciones Unidas, 2024).

7.1.15 Riesgos para la salud

Principalmente en comunidades vulnerables, los efectos del cambio climático favorecen a la expansión de enfermedades infecciosas ejerciendo presión sobre los sistemas de salud y reduciendo su capacidad de respuesta, en el que alrededor de 13 millones de muertes al año son causadas por la propagación de enfermedades, la contaminación ambiental y el aumento de fenómenos climáticos extremos del cambio climático, además, de contribuir a la inseguridad alimentaria, provocando hambre y desnutrición, intensificando las crisis de salud pública a nivel mundial (Organización de las Naciones Unidas, 2024).

7.1.16 Pobreza y desplazamiento

El cambio climático aumenta los factores que llevan y mantienen a la gente en la pobreza, donde las inundaciones arrasan con barrios marginales; destruyendo hogares y comunidades, el calor dificulta la ejecución de trabajos en el exterior y la escasez de agua afecta a los cultivos, situaciones que provocaron el desplazamiento de un total aproximado de 23,1 millones promedio de personas al año durante la última década (2010-2019), aumentando la pobreza,

donde países que son más vulnerables y menos preparados para adaptarse a los efectos del cambio climático reciben las peores consecuencias de la problemática ambiental (Organización de las Naciones Unidas, 2024)

Emisiones de CO₂ en Ecuador

Ecuador, pese a su contribución marginal al total global de emisiones de CO₂ (aproximadamente 0,1%), ha experimentado un incremento en sus emisiones, alcanzando 45,328 megatoneladas en 2023, con un crecimiento del 7,26% respecto al año anterior y una emisión de 2,51 toneladas; este aumento se asocia al crecimiento del sector industrial y la demanda energética, en donde el país busca mitigar su impacto implementando estrategias de transición energética, priorizando fuentes renovables como la hidroeléctrica, solar y eólica, desarrollando programas de adaptación sectorial gestionados por el MAATE en áreas como el agroecosistema, los recursos hídricos y la biodiversidad, además, el país se encuentra explorando mecanismos de mercado de carbono para incentivar la reducción de emisiones y la conservación de sumideros naturales, en cumplimiento a sus compromisos en el Acuerdo de París (Cruzatty Vera et al., 2023).

Huella de carbono

La huella de carbono es un indicador ambiental que cuantifica la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos de manera directa e indirecta por una persona, organización, evento o producto, expresados en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_{2e}), su cálculo se basa en un análisis del ciclo de vida que incluye fuentes de emisión asociadas al consumo energético; procesos industriales, transporte, actividades agrícolas y gestión de residuos, este indicador es fundamental para evaluar el impacto ambiental de diversas actividades humanas y forma parte de las estrategias de mitigación del cambio climático, alineadas con los compromisos internacionales de reducción de emisiones (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023).

7.1.17 Huella de carbono en el Ecuador

En Ecuador, la huella de carbono nacional actualmente es atribuida principalmente a la expansión del sector energético, de transporte e industrial, en el que las emisiones totales de GEI alcanzaron aproximadamente 43.207 kilotoneladas de CO₂ equivalente en 2023, lo que representa un incremento del 3,5% respecto al año anterior según el Balance Energético Nacional (2023), en el cual se especifica el consumo energético per cápita se situó en 5,75 barriles equivalentes de petróleo (BEP) por habitante en 2023, sin embargo, a pesar de su contribución relativamente baja al total global de emisiones (0,1%), Ecuador ha implementado

estrategias de mitigación, como la transición hacia energías renovables y la conservación de sumideros de carbono (Ministerio de Energías y Minas, 2024).

Métodos de secuestro de carbono

El secuestro de carbono es la captura y almacenamiento del dióxido de carbono (CO₂) emitido por actividades antropogénicas; antes de que ingrese a la atmósfera, este CO₂ es transportado y acumulado en depósitos naturales o tecnológicos, con el objetivo de reducir su impacto en el efecto invernadero, como una de las principales estrategias de mitigación del cambio climático, diseñadas para minimizar el carbono en sectores con altas emisiones (PNUD, 2023).

Algunos métodos de secuestro de carbono son los siguientes:

7.1.18 Sumidero de carbono

Un sumidero de carbono es cualquier sistema natural o artificial que captura o secuestra y almacena dióxido de carbono de la atmósfera, ecosistemas como los bosques, los océanos y el suelo son los principales sumideros naturales que absorben grandes cantidades de CO₂ a través de procesos como la fotosíntesis y la disolución en el agua oceánica, los cuales contribuyen a la regulación del ciclo del carbono, ayudan a equilibrar las emisiones antropogénicas y a estabilizar el clima del planeta (PNUD, 2023).

7.1.19 Secuestro de carbono biológico

El secuestro de carbono biológico se basa en la capacidad de los ecosistemas terrestres o acuáticos para absorber y almacenar carbono a través de la fotosíntesis, este proceso ocurre en bosques, praderas, humedales, manglares y océanos, donde la biomasa vegetal y los suelos funcionan como sumideros naturales a partir de la aplicación de estrategias de conservación y mitigación como la reforestación, el manejo sostenible de suelos agrícolas y la conservación de ecosistemas costeros aumentando la capacidad de fijación de carbono, donde se da uso al biochar, un carbón vegetal derivado de biomasa, permite mejorar la retención de carbono en los suelos al reducir su descomposición y liberación a la atmósfera (Pérez Iglesias et al., 2021)

7.1.20 Secuestro de carbono geológico

El secuestro de carbono geológico implica la captura y almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas subterráneas, como acuíferos salinos profundos, yacimientos agotados de petróleo o gas, y rocas basálticas, en este proceso, el CO₂ es inyectado a grandes profundidades, donde queda atrapado por mecanismos físicos y químicos, incluyendo la disolución en fluidos geológicos y la mineralización en carbonatos estables; una técnica especialmente utilizada en combinación con la captura de carbono en procesos industriales (Holloway et al., 2006).

7.1.21 Secuestro de carbono oceánico

El secuestro de carbono oceánico se basa en la capacidad de los océanos para absorber CO₂ mediante procesos físicos y biológicos mediante métodos como la fertilización oceánica, que promueve el crecimiento de fitoplancton a través de la adición de nutrientes como hierro, en el que pueden aumentar la absorción de CO₂ en la superficie oceánica y su posterior almacenamiento en las profundidades marinas, así como la alcalinización oceánica, que implica la adición de compuestos alcalinos para aumentar la capacidad de los océanos de capturar CO₂ y reducir su acidificación (Holloway et al., 2006).

7.1.22 Captura y Almacenamiento de carbono (CAC)

En el ámbito tecnológico, la captura y almacenamiento de carbono (CAC) se aplica en instalaciones industriales y termoeléctricas para evitar la liberación de CO₂ a la atmósfera, este proceso puede realizarse mediante captura postcombustión, precombustión u oxidación, seguido del transporte del CO₂ capturado y su almacenamiento en formaciones geológicas, además, las tecnologías de emisiones negativas (NETs), como la captura directa del aire (DAC) y la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS), representan soluciones avanzadas para la eliminación de CO₂ de la atmósfera, permitiendo incluso generar emisiones netas negativas (Reitze, 2013).

Proceso de secuestro de carbono en especies arbóreas

Conforme a Ledesma et al. (2021), el secuestro de carbono en especies arbóreas es un proceso biogeoquímico mediante el cual, los árboles absorben dióxido de carbono (CO₂) atmosférico a través de la fotosíntesis y lo almacenan en su biomasa aérea (tronco, ramas, hojas) y subterránea (raíces), contribuyendo a la reducción de las concentraciones de gases de efecto invernadero y consiste en tres fases:

7.1.23 Primera fase

La fase de fijación, en la cual los árboles capturan CO₂ mediante la acción de la enzima ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa-oxigenasa (RuBisCO), facilitando la conversión de carbono inorgánico en compuestos orgánicos dentro del ciclo de Calvin; este carbono se incorpora a los tejidos vegetales, como troncos, ramas, hojas y raíces, generando un almacenamiento temporal que varía en función de la especie, la edad, la densidad de la madera y las condiciones edafoclimáticas (Ledesma et al., 2021).

7.1.24 Segunda fase

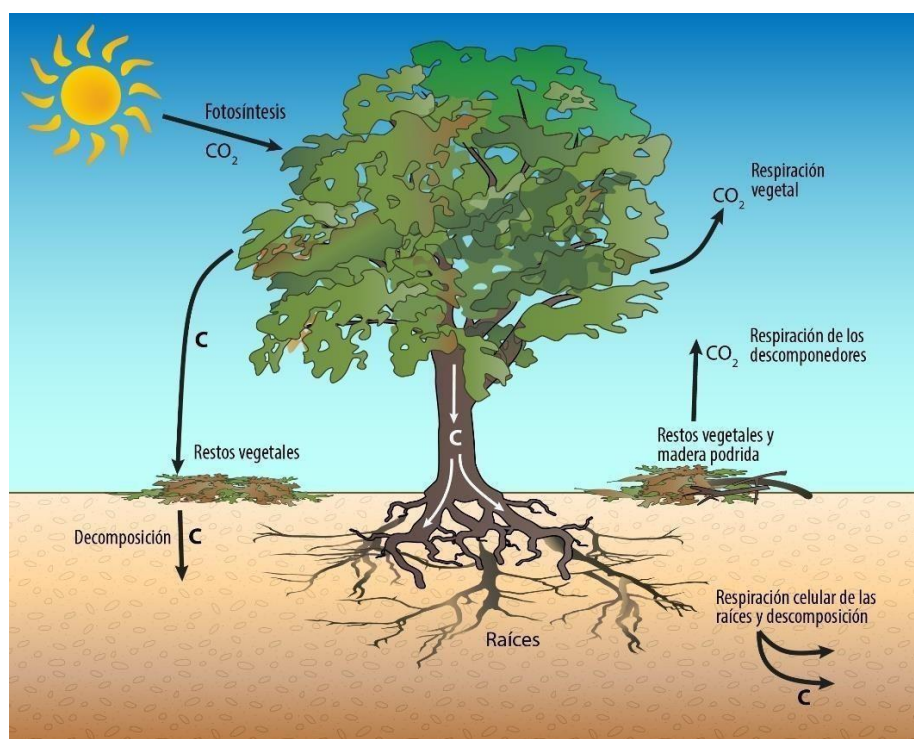
El carbono fijado es transferido al suelo forestal mediante la degradación de hojarasca, raíces y descomposición de la biomasa muerta, donde interactúa con microorganismos y minerales del

suelo, favoreciendo la formación de compuestos orgánicos estables, como la fracción húmica del suelo, en la cual, la eficiencia del secuestro de carbono varía según la tasa de crecimiento y la longevidad de la especie arbórea (Ledesma et al., 2021).

7.1.25 Tercera fase

El almacenamiento a largo plazo del carbono depende de una gestión forestal sostenible, que incluye prácticas como la regeneración natural asistida, el manejo de la densidad poblacional y la selección de especies con alta eficiencia fotosintética y resistencia a factores de estrés climático, en este contexto, los bosques y plantaciones forestales juegan un papel fundamental en la mitigación del cambio climático, al funcionar como sumideros dinámicos de carbono y contribuir a la estabilidad del balance global de CO_2 (Ledesma et al., 2021).

Figura 1. Proceso de secuestro de carbono en árboles.



Fuente: (Educational Foundation, 2021)

Especies arbóreas que secuestran carbono

Los ecosistemas o árboles que representan sumideros de carbono altamente eficientes, debido a su capacidad para absorber y almacenar grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) en su biomasa a lo largo de su ciclo de vida son especies como los manglares (*Rhizophora spp.*, *Avicennia spp.*), los cuales destacan por su capacidad de retención de carbono en suelos anegados, donde las condiciones anaeróbicas minimizan la descomposición de la materia

orgánica y favorecen el almacenamiento de carbono a largo plazo (Hernández-Nava et al., 2022).

Por otro lado, especies de alto valor comercial y ecológico, como la caoba (*Swietenia macrophylla*), aunque de crecimiento lento, presentan una alta densidad de biomasa, contribuyendo significativamente al secuestro de carbono, el eucalipto (*Eucalyptus spp.*), por su rápido crecimiento y elevada densidad maderable, es ampliamente utilizado en programas de reforestación y captura de carbono, así como, el cedro (*Cedrela odorata*) que actúa como reserorio de carbono en bosques tropicales, entre otras especies está el roble (*Quercus spp.*) que almacena carbono durante largos períodos, consolidándose como sumideros eficientes en ecosistemas templados y tropicales (Gómez-godínez et al. (2024) & Jiménez (2012)).

Métodos de cuantificación del secuestro de carbono

7.1.26 Métodos directos o destructivos

El método directo para cuantificar el secuestro de carbono consiste en medir físicamente la biomasa de los árboles a través de técnicas destructivas, este proceso implica la tala de árboles seleccionados y la separación de sus componentes: fuste, ramas, hojas y raíces, para determinar su peso en fresco, en el cual se toman muestras de cada uno de estos componentes, que se secan en el laboratorio hasta alcanzar un peso constante, esto permite calcular con precisión el contenido de carbono en la biomasa; aunque proporciona estimaciones muy exactas del carbono almacenado, resulta costoso y laborioso, lo que lo hace poco práctico para estudios a gran escala, además de ser invasivo (Rügnitz et al., 2008).

7.1.27 Métodos indirectos o no destructivos

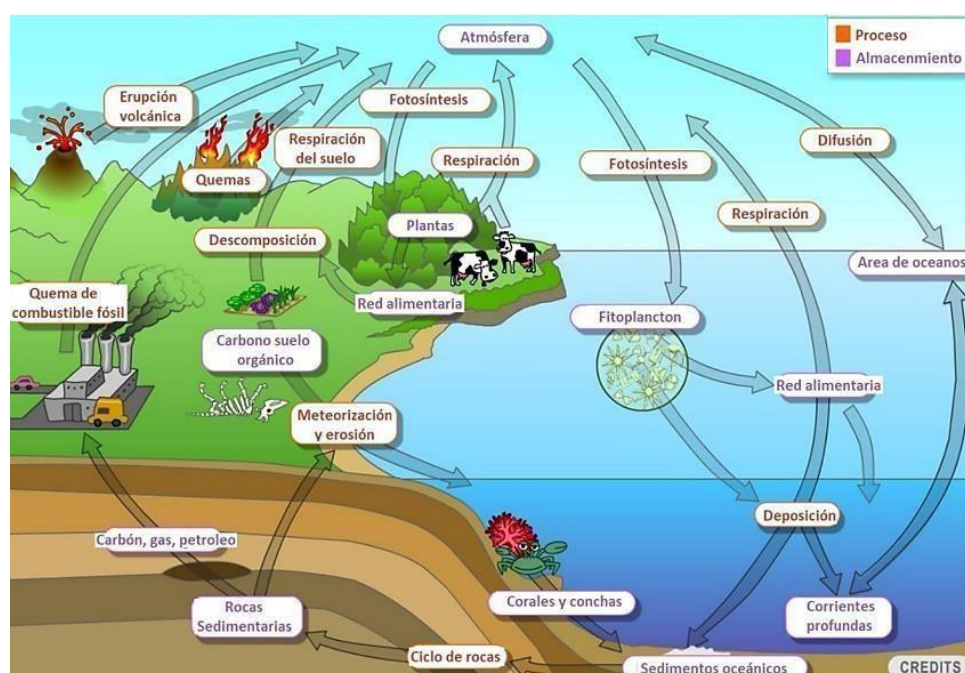
El método indirecto para cuantificar el secuestro de carbono consiste en la aplicación de ecuaciones alométricas, que vinculan variables de fácil medición, como el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura del árbol, con la biomasa total, en el que, gracias a estas ecuaciones, es posible estimar la biomasa sin recurrir a métodos destructivos, lo que simplifica la evaluación del carbono almacenado en diversos ecosistemas forestales, siendo un enfoque que se ha vuelto muy popular por su eficiencia y su menor impacto ambiental en comparación con los métodos directos (Fonseca, 2017).

Ciclo del carbono

El ciclo del carbono es un proceso biogeoquímico que regula la distribución de este elemento en la atmósfera, océanos, suelos y seres vivos (Figura 1), en el cual el carbono atmosférico es fijado en las moléculas orgánicas formando parte de los tejidos de los organismos, durante su

ciclo puede almacenarse en sumideros naturales como suelos y océanos, en períodos que pueden durar hasta millones de años, sin embargo, las actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles y la deforestación; han alterado este equilibrio al liberar carbono a la atmósfera a un ritmo mayor del que es absorbido, intensificando el efecto invernadero y el cambio climático, en el que la cuantificación del almacenamiento y flujo de carbono entre estos reservorios es de suma importancia para mitigar los impactos ambientales (Agencia Espacial Europea (AEE), 2020).

Figura 2. El ciclo del carbono.



Fuente: (Agencia Espacial Europea (AEE), 2020)

Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC)

La CMNUCC ha sido la base de acuerdos internacionales como el Protocolo de Kioto en 1997 y el Acuerdo de París en 2015, que buscan compromisos concretos para limitar el calentamiento global y sus impactos, es un tratado internacional adoptado en 1992, cuyo objetivo es mitigar la interferencia antropogénica en el sistema climático global, en el que establece un marco de cooperación entre los países para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), promover la adaptación al cambio climático y fortalecer la resiliencia ambiental (PNUD, 2023).

Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC)

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) fue creado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), es un organismo científico independiente encargado de evaluar la literatura científica y los últimos hallazgos sobre el cambio climático; proporcionando información basada en evidencia para orientar la formulación de políticas públicas y la toma de decisiones a nivel global, a través de sus informes, en los que el IPCC suministra análisis rigurosos sobre las causas, impactos y posibles estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, un organismo (PNUD, 2023).

8 VALIDACIÓN DE LA PREGUNTA CIENTÍFICA

¿La estimación del potencial de secuestro de carbono en las especies arbóreas del campus Salache permitirá obtener una visión más clara sobre el valor ambiental de los árboles en la mitigación del cambio climático?

El cambio climático es considerado el principal desafío ambiental del siglo XXI; en el que se ha generado un creciente interés en el secuestro de carbono como una de las principales estrategias de mitigación, en cuanto a la reducción de huellas de carbono en sectores con altas emisiones, en este contexto, los árboles actúan como sumideros naturales de carbono, contribuyendo de manera significativa a la reducción de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, sin embargo, a pesar de los numerosos estudios realizados a nivel global sobre el secuestro de carbono, existe una escasez de investigaciones específicas que cuantifiquen esta capacidad en las especies arbóreas presentes en el campus Salache, limitando la comprensión de su contribución ambiental a nivel local y regional.

La estimación del potencial de secuestro de carbono no solo contribuirá al conocimiento académico, sino que también servirá como base para la implementación de prácticas sostenibles dentro del campus Salache; donde se fomente su valor como un espacio ecoeducativo, así pues, la presente investigación se orienta hacia un análisis integral que incluye la identificación de especies representativas, la evaluación de sus características fenotípicas y la capacidad de secuestro de carbono; permitiendo generar un panorama claro del rol ambiental de estas especies al proporcionar datos específicos sobre el secuestro de carbono en el campus Salache y a su vez, promover prácticas sostenibles tanto en universidades como en comunidades; facilitando un modelo de estudio para evaluar y replicar estrategias similares en otros ecosistemas forestales locales en contribución a los esfuerzos tanto a nivel global como nacional en la mitigación del cambio climático.

9 METODOLOGÍA

9.1 Área de Estudio

La zona de investigación del presente estudio se encuentra ubicado en el sector Salache Bajo de la parroquia de Eloy Alfaro en el cantón Latacunga, Provincia de Cotopaxi.

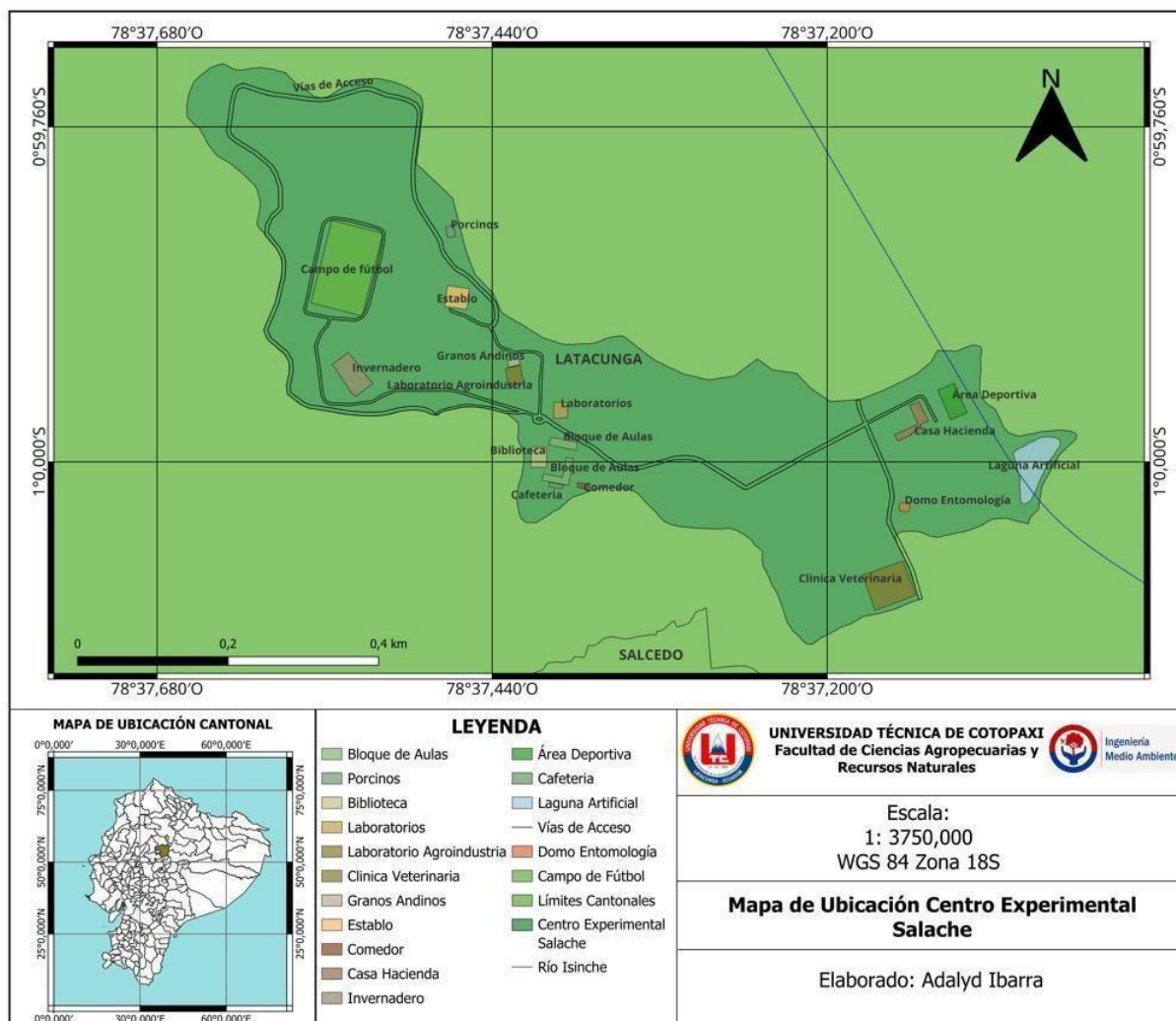
9.2 Delimitación del área de estudio

El campus Salache pertenece a la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales (CAREN) de la Universidad Técnica de Cotopaxi; donde el 19 de diciembre de 1997 la universidad adquirió el campus CEYPSA por un valor de 1.596'123.593,00 sucres con una extensión de 81,19 hectáreas, según lo establecido en la escritura de la Notaría Segunda, firmada por la notaría Dra. Mariana Durán Salgado.

9.3 Ubicación Geográfica

El campus Salache está ubicado al Suroeste de la provincia de Cotopaxi, en la parroquia Eloy Alfaro a 6 km en el sector Salache Bajo, al sur de la ciudad de Latacunga (Figura 2).

Figura 3. Ubicación geográfica del área de estudio.



Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

9.4 Tipos de investigación

9.4.1 Investigación bibliográfica

Conforme a Navas-Fernández et al. (2018), la investigación bibliográfica consiste en la revisión de fuentes bibliográficas existentes sobre el tema en estudio, en el cual implica la observación, la reflexión de la información, la comprensión y el análisis para obtener las bases de información requeridas para el desarrollo de cualquier investigación.

La aplicación de esta investigación permitió obtener conocimientos fundamentales sobre el secuestro de carbono en especies arbóreas mediante la revisión de fuentes, como estudios científicos similares, libros, artículos científicos e informes técnicos de temas relacionados como la dasometría, botánica general, silvicultura, ecología o biología forestal, así como el impacto del cambio climático, estrategias de mitigación, sostenibilidad, manejo forestal, entre otras, las cuales proporcionaron la fundamentación tanto teórica como metodológica,

procedimientos, herramientas de análisis e interpretación de resultados, que permitieron la planificación, ejecución y sustentación del presente proyecto con una base científica sólida y validada.

9.4.2 Investigación de campo

Según Ruiz Huaraz & Valenzuela Ramos (2022), la investigación de campo es un método de recolección de datos que consiste en la observación, medición y registro de información directamente en el lugar donde ocurre la problemática de estudio, con el objetivo de obtener datos originales para analizar las condiciones reales del área de estudio.

En este caso, la investigación de campo permitió recopilar información específica sobre el estado actual de la vegetación arbórea como la cantidad, clasificación de los individuos y la distribución de las especies presentes en el área; lo cual, facilitó la identificación de factores o condiciones del entorno incidentes en el secuestro de carbono, así como, la evaluación de la adaptación de los árboles a las condiciones ambientales y la obtención de datos primarios necesarios para calcular la biomasa aérea, radicular en la estimación el carbono almacenado, esta investigación se aplicó en diferentes actividades como la realización del inventario forestal, la caracterización de la vegetación arbórea, la selección de árboles representativos por fase de crecimiento en cada especie y la medición de parámetros dendrométricos; donde se utilizaron métodos específicos, transectos y características fenotípicas.

9.4.3 Investigación descriptiva

De acuerdo con Ruiz Huaraz & Valenzuela Ramos (2022), la investigación descriptiva es un tipo de investigación no experimental; la cual, consiste en la observación y recopilación de información de manera sistemática para ofrecer una descripción clara del comportamiento de un fenómeno de manera detallada.

La investigación descriptiva en el presente estudio permitió recolectar información proveniente tanto de fuentes bibliográficas como de datos obtenidos en campo para la descripción de las características del área de estudio, el análisis de los factores influyentes en el crecimiento arbóreo, las características de las especies dominantes, los métodos y técnicas seleccionados para cada objetivo establecido, y principalmente, la estimación de las especies con mayor capacidad de secuestro y almacenamiento de carbono en su biomasa aérea.

9.4.4 Investigación cuantitativa

La investigación cuantitativa permitió recopilar datos numéricos relacionados con el potencial de secuestro de carbono de las especies arbóreas, tales como las mediciones de parámetros

dendrométricos (diámetro a la altura del pecho, altura total, entre otros), la cuantificación de la cantidad de árboles por especie y su clasificación por etapa de crecimiento, así como, la determinación de las especies dominantes utilizando el Índice de Valor de Importancia (IVI) y la aplicación de ecuaciones alométricas; a partir de modelos matemáticos, para estimar la biomasa aérea y el carbono secuestrado, datos que permitieron identificar patrones, promedios y tendencias en la cantidad de carbono almacenado mediante el uso del software QGIS; donde esta investigación permitió determinar las especies arbóreas que contribuyen de manera significativa al almacenamiento de carbono en el campus e identificar las áreas o especies con mayor relevancia para maximizar los beneficios del secuestro de carbono en proyectos futuros.

9.5 Métodos

9.5.1 Método inductivo

Según Ruiz Huaraz & Valenzuela Ramos (2022), el método inductivo va de lo particular a lo general y se basa tanto en la observación como en la experimentación de un acontecimiento o caso específico para llegar a conclusiones o teorías generales.

En este estudio, este método permitió desarrollar conclusiones generales sobre el carbono secuestrado por las especies arbóreas y su posible contribución a proyectos futuros; a partir de la observación de características fenotípicas, mediciones dendrométricas y la evaluación de aspectos botánicos, ecológicos y fisiológicos de los árboles, los cuales se realizaron a través de un inventario forestal y la aplicación de ecuaciones alométricas con un enfoque no destructivo.

9.5.2 Método descriptivo

Conforme a Valle (2022), el método descriptivo es una técnica utilizada dentro de la investigación para describir el comportamiento de un fenómeno o acontecimiento específico tal como se presenta en la realidad.

En este estudio, este método permitió describir a las especies tomando en cuenta aspectos como su etapa de desarrollo, la biomasa, los factores ambientales del lugar (temperatura, humedad, precipitación, altitud), el manejo forestal y su aprovechamiento ambiental, además, facilitó la realización de un inventario forestal detallado, la caracterización de las especies arbóreas presentes y la clasificación de los árboles de acuerdo con patrones de crecimiento similares; donde también permitió especificar los modelos matemáticos utilizados y desarrollar una descripción completa de la interacción de las especies con el área de estudio mediante el registro de datos en campo, características fenotípicas, la identificación botánica de las especies, entre otros.

9.5.3 Método Analítico

Según Rodríguez Jiménez & Pérez Jacinto (2017), el método analítico es un enfoque de investigación utilizado para descomponer un fenómeno o problema en partes constitutivas con el propósito de estudiarlas de manera detallada, identificar sus características y entender las relaciones que existen entre ellas; permitiendo comprender el todo a partir del análisis de sus componentes individuales.

En este estudio, el método analítico permitió dividir el análisis en varios componentes clave: la caracterización de factores ambientales y antrópicos, la evaluación de parámetros dendrométricos, el uso de ecuaciones alométricas y la estimación del carbono secuestrado por las especies arbóreas, en el que, cada uno de estos elementos fue analizado de forma independiente para identificar e interpretar relaciones entre las variables, como tendencias, frecuencias, porcentajes, patrones, valores máximos y mínimos; facilitando la comprensión de los factores que influyen tanto en el desarrollo de la biomasa de los individuos como en la capacidad de secuestro de carbono de las especies arbóreas representativas, además, permitió evaluar las condiciones del entorno natural y el aprovechamiento ambiental de la vegetación arbórea, proporcionando una base sólida para comprender la dinámica del ecosistema en el área de estudio.

9.6 Línea Base

Metodología para el desarrollo del proyecto

El presente estudio está dividido en tres etapas de acuerdo a los objetivos específicos para su elaboración:

- Evaluación del estado actual de la vegetación forestal presente en el área de estudio.
- Medición de los parámetros dendrométricos de los árboles seleccionados.
- Cálculo de la cantidad de carbono secuestrado por las especies arbóreas.

Primera Etapa: Evaluación el estado actual de las especies arbóreas

Esta primera etapa consiste en describir la vegetación arbórea del campus Salache, abordando su distribución, dominancia y las condiciones ambientales que influyen en el proceso de secuestro de carbono por las especies, para ello, se realizó un inventario forestal que incluye la clasificación y conteo de individuos, así como la identificación y caracterización de las especies arbóreas dominantes; proceso en el que se recopilan aspectos fundamentales del área de estudio, como factores ambientales (clima, temperatura y precipitación), el manejo forestal, las prácticas de conservación y el aprovechamiento de los recursos arbóreos.

9.6.1 Descripción de factores ambientales

Conforme a MINEC (2023), los factores ambientales influyen directamente en los procesos de crecimiento, desarrollo y acumulación de biomasa de las especies arbóreas y a su vez, al secuestro de carbono debido a que la capacidad de secuestro de carbono en los árboles depende de la fotosíntesis; un proceso biológico que cumplen durante el día necesario para su crecimiento y requiere recursos naturales para su ejecución como la luz solar, dióxido de carbono (CO₂) y agua, la disponibilidad de estos recursos depende de los factores ambientales de la zona en donde se encuentre la especie arbórea.

A través de la fotosíntesis los árboles desarrollan su biomasa tanto aérea como subterránea; donde almacenan el carbono capturado, así pues, entre más biomasa desarrolle el árbol, su capacidad de secuestro de carbono es mayor.

De acuerdo con Placeres et al. (2007), los factores ambientales son los factores físicos, químicos y biológicos presentes en un entorno determinado que influyen en los procesos naturales, el desarrollo de los organismos y el equilibrio de los ecosistemas, los cuales pueden ser tanto naturales como resultado de actividades humanas; establecen las características y el funcionamiento del medio ambiente en una zona específica.

Por lo tanto, en este estudio se describen los factores ambientales influyentes en el desarrollo de la biomasa de los árboles como el clima (temperatura, precipitación, humedad) y altitud del área de estudio, con el uso del registro de datos meteorológicos anuales del año 2024 del cantón Latacunga basado en el Informe Meteorológico Aeronáutico de Rutina (METAR) del Aeropuerto de Cotopaxi.

9.6.2 Descripción del uso y manejo forestal

Según Ruiz-Benito et al. (2012), el uso y manejo forestal se refiere al conjunto de estrategias, prácticas y técnicas aplicadas en ecosistemas forestales para garantizar su conservación, aprovechamiento sostenible y regeneración, este concepto abarca tanto la utilización de los recursos forestales por parte de las comunidades, como las medidas adoptadas para su protección y recuperación; pueden generar impactos positivos o negativos en los ecosistemas y abarcan una amplia gama de actividades, desde el uso y manejo de recursos naturales hasta el desarrollo urbano e industrial.

En este estudio, la descripción del uso y manejo forestal de las especies permitió identificar y detallar las prácticas de conservación, aprovechamiento de recursos y actividades agrícolas mediante la observación de la dinámica de manejo de las especies arbóreas en el área y el

análisis de sus características fenotípicas en relación con su capacidad de adaptación a las condiciones del entorno.

Este proceso incluyó una revisión documental exhaustiva y la verificación en campo del último inventario de especies arbóreas realizado en el campus Salache que fue elaborado por Chamorro Espinoza (2015), este estudio proporcionó información de interés en el proyecto principalmente del manejo forestal aplicada en la vegetación arbórea, los datos obtenidos fueron comparados con las condiciones actuales del área; facilitando la evaluación, identificación y descripción de los aspectos influyentes en el cumplimiento de funciones ambientales del ecosistema.

9.6.3 Inventario forestal

De acuerdo con López Andrade (2024), el inventario forestal en trabajos de investigación de secuestro de carbono proporciona la base de datos necesaria para realizar estimaciones precisas sobre la cantidad de carbono que la comunidad forestal puede almacenar y cómo estos valores pueden cambiar a lo largo del tiempo, lo que es esencial para cualquier estudio sobre el cambio climático y la mitigación de sus efectos.

En este caso, la realización de un inventario forestal permitió evaluar la presencia de la vegetación arbórea en el área y determinar las especies representativas a estudiar; implicó la identificación, cuantificación y clasificación de los individuos por especie de acuerdo a sus características fenotípicas observadas en campo.

Para ello, se recolectaron datos in situ dividiendo el área de estudio en tres zonas: parte alta, parte media y parte baja, para facilitar la cobertura total del área, en las cuales se delimitaron estratégicamente transectos en zigzag; donde se realizó el conteo y categorización de los individuos a partir de su identificación botánica, por otro lado, en base a observaciones fenotípicas in situ los árboles se clasificaron según su etapa de crecimiento, estableciendo cuatro categorías: juvenil, submadura, madura y sobremadura, esta información permitió identificar por especie árboles representativos para el cálculo del secuestro de carbono mediante la técnica del árbol promedio detallada en la tercera fase del estudio.

9.6.4 Clasificación de árboles por su etapa de desarrollo

Para llevar a cabo la técnica del árbol promedio es necesario realizar por especie una clasificación de los individuos de acuerdo a su etapa de desarrollo, las cuales se determinaron las etapas: juvenil, submadura, madura y sobremadura debido a que son las fases en las que un árbol posee mayor potencial de secuestro de carbono y se ajustan a los aspectos fenotípicos característicos de la comunidad arbórea del campus, este proceso consiste en realizar un conteo

del total de árboles juveniles, submaduros, maduros y sobremaduros por cada especie arbórea presente en las diferentes zonas de estudio.

Este conteo se realizó a través de la identificación y clasificación de cada árbol, considerando sus características fenotípicas como la altura, diámetro, forma del fuste, distribución de ramas y adaptación a factores ambientales (zona geográfica, manejo forestal, entre otros), sus características botánicas como la textura, color del tronco, así como la forma, color y tamaño de las hojas y frutos, con el uso de fichas técnicas de especies arbóreas publicadas por Morales (2023) y el Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá, desarrollado por Grupo de Investigación Sostenibilidad, Infraestructura y Territorio (SITE) (2014), asimismo, en base a observaciones fenotípicas in situ; se establecieron las siguientes consideraciones para cada etapa de desarrollo:

9.6.5 Etapa juvenil

Un árbol se clasifica en etapa juvenil cuando está en un crecimiento activo inicial; sin haber alcanzado la madurez reproductiva, durante esta etapa, la estructura de ramas y copa se encuentra en formación, y no se observan estructuras reproductivas como flores, frutos o semillas.

9.6.6 Etapa submadura

En este estudio, un árbol se clasifica como submaduro cuando presenta un crecimiento avanzado; es decir, no ha alcanzado la capacidad de producir frutos o semillas de manera consistente, en esta etapa, el desarrollo morfológico y estructural del árbol aún no se encuentra completamente finalizado.

9.6.7 Etapa madura

Un árbol se considera en etapa madura; cuando alcanza su tamaño máximo o cercano al máximo esperado para su especie; presenta una producción regular y consistente de flores, frutos y semillas con un desarrollo completo de características morfológicas como altura, diámetro del tronco, biomasa acumulada y frondosidad.

9.6.8 Etapa sobremadura

Un árbol es considerado en etapa sobremadura; cuando ha superado el tamaño y desarrollo típicos de su especie; aún no presenta signos avanzados de senescencia, pero exhibe características de crecimiento avanzado que indican una mayor edad en comparación con otros individuos del área, incluyendo un desarrollo máximo en biomasa y estructura.

9.6.9 Criterios de selección de especies

Se consideraron únicamente aquellas especies con una altura superior a 1.5 metros, con el propósito de excluir arbustos, árboles en etapa de regeneración natural y aquellos que podrían ser removidos durante las actividades de mantenimiento de la zona.

9.6.10 Estimación del Índice de Valor de Importancia (IVI)

Conforme a López Andrade (2024), el Índice de Valor de Importancia (IVI) es una métrica utilizada en ecología para determinar las especies dominantes, en otras palabras, es un conjunto de medidas utilizado para cuantificar o evaluar la presencia de una especie dentro de la comunidad vegetal.

En el presente estudio se estima el IVI a partir del cálculo de la densidad relativa, dominancia relativa y frecuencia relativa, cada componente tiene un peso igual (se mide en porcentajes), y el IVI puede variar entre 0 y 300; el cálculo del IVI se estimó mediante ecuaciones basadas en los estudios de Manzanilla et al. (2020) y Saavedra-Romero et al. (2019), para el cálculo de la dominancia relativa y la frecuencia relativa.

9.6.11 Dominancia relativa

Conforme a Mosquera et al. (2019), la dominancia permite identificar las especies que tienen mayor influencia ecológica o mayor presencia en un área específica, el cual, facilita establecer prioridades de manejo forestal.

En el presente estudio, determinar las especies dominantes permitió identificar las especies que aportan mayor biomasa al ecosistema y poseen una influencia significativa tanto en la biodiversidad como en las interacciones entre especies siendo las que mayormente inciden en el potencial de secuestro de carbono de la zona.

La dominancia relativa se calcula a partir de los valores de densidad absoluta y densidad relativa, empleando las siguientes ecuaciones:

9.6.12 Cálculo de la densidad absoluta (D)

De acuerdo con Manzanilla et al. (2020), la densidad absoluta es el número de individuos de una especie por unidad de área:

$$D(\text{individuos}/m^2) = \frac{\text{Número de individuos de la especie}}{\text{Área total muestreada (en } m^2)} \quad (1)$$

9.6.13 Cálculo de la densidad relativa (**Dr**)

Conforme a Manzanilla et al. (2020), la densidad relativa representa la proporción de la cantidad de árboles de una especie con respecto al total de árboles de todas las especies muestreadas, expresada como porcentaje:

$$Dr(\%) = \left(\frac{\text{Número de individuos de la especie}}{\text{Total de individuos}} \right) \times 100 \quad (2)$$

9.6.14 Cálculo de la dominancia relativa (**DmR**)

Según Saavedra-Romero et al. (2019), la dominancia relativa es una medida de la dominancia de una especie en términos de la cobertura o área basal que ocupa, en relación con la dominancia total de todas las especies, expresada como porcentaje:

$$DmR(\%) = \left(\frac{\text{Área basal total de la especie}}{\text{Área basal total de todas las especies}} \right) \times 100 \quad (3)$$

9.6.15 Frecuencia relativa

De acuerdo con Saavedra-Romero et al. (2019), la frecuencia relativa permite evaluar la distribución de las especies en un ecosistema, ayudando a determinar qué tan común o rara es una especie en relación con otras y se calcula a partir de la frecuencia absoluta, empleando las siguientes ecuaciones:

9.6.16 Cálculo de la Frecuencia absoluta (**fa**)

Conforme a Saavedra-Romero et al. (2019), la frecuencia absoluta es la relación entre la cantidad de parcelas o zonas en las que aparece una especie y el total de parcelas o zonas muestreadas, expresada como porcentaje:

$$fa(\%) = \left(\frac{\text{Número de zonas con la especie}}{\text{Número total de zonas}} \right) \times 100 \quad (4)$$

9.6.17 Cálculo de la Frecuencia relativa (**fr**)

De acuerdo con Saavedra-Romero et al. (2019), la frecuencia relativa determina la proporción de parcelas o áreas de muestreo donde está presente una especie respecto al total de parcelas evaluadas, mediante la siguiente ecuación:

$$fr(\%) = \left(\frac{\text{Frecuencia absoluta de la especie}}{\text{Frecuencia absoluta total de todas las especies}} \right) \times 100 \quad (5)$$

9.6.18 Cálculo del Índice de Valor de Importancia (IVI)

Una vez calculados los valores relativos, se integra el Índice de Valor de Importancia (IVI), que combina los valores anteriores para determinar las especies más dominantes al considerar su área, número y distribución, mediante la siguiente fórmula:

$$IVI = \frac{Dr + DmR + fr}{3} \quad (6)$$

Donde:

IVI: Índice de Valor de Importancia (%)

Dr: densidad relativa (%)

DmR: dominancia relativa

(%) fr: frecuencia relativa (%)

9.6.19 Caracterización de especies dominantes

En el presente estudio, la caracterización de especies dominantes resultantes del inventario forestal permitió identificar, describir y evaluar características botánicas, ecológicas y fisiológicas de las especies dominantes, las cuales, contribuyen significativamente al secuestro de carbono en el área de estudio, para ello, se consideraron sus aspectos fenotípicos; donde se utilizaron fichas técnicas de especies arbóreas publicadas por Morales (2023) y el *Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá*; desarrollado por Grupo de Investigación Sostenibilidad, Infraestructura y Territorio (SITE) (2014), recursos que proporcionaron la información específica requerida sobre las características de los árboles que inciden en su capacidad de secuestro de carbono; como la tasa de crecimiento, el tipo de especie, la forma de la copa, la altura total promedio, la adaptación a factores climáticos, entre otras.

Segunda Etapa: Medición de los parámetros dendrométricos de los árboles seleccionados

Esta segunda etapa consiste en la recolección de los valores requeridos para el cálculo del carbono secuestrado tales como el diámetro a la altura del pecho, la altura total, volumen y área basal de los árboles seleccionados por especie a través de mediciones en campo y uso de ecuaciones alométricas.

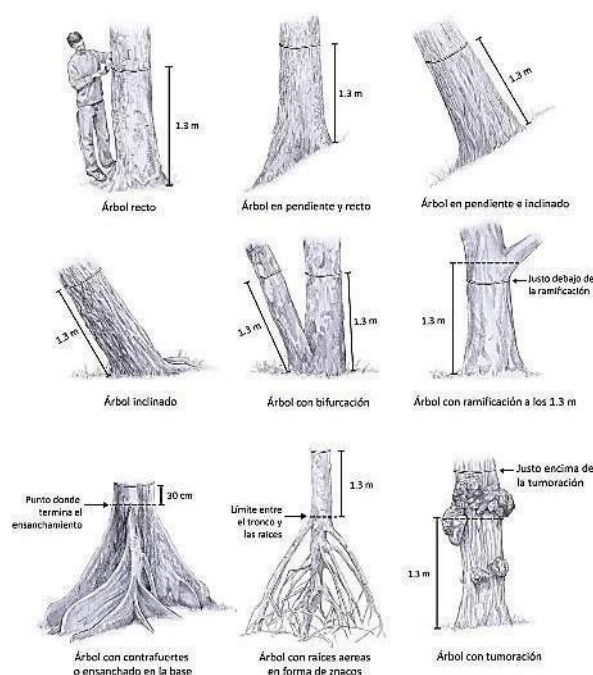
9.6.20 Diámetro a la altura del pecho (DAP)

Conforme a Gutiérrez et al. (2005), la medición del altura del tronco de un árbol se denomina diámetro a la altura del pecho (DAP), el cual se calcula a partir de la medición directa en el árbol de la circunferencia a la altura del pecho (CAP).

9.6.21 Medición de la circunferencia a la altura del pecho (CAP)

La altura comúnmente utilizada en técnicas forestales para medir la CAP, en árboles en pie, se considera a 1.30 m desde el nivel del suelo sobre la pendiente, no obstante, esto puede variar dependiendo del tipo del terreno y la forma del tronco, por ello, la medición se realiza en un punto específico donde el tronco presente un diámetro uniforme y regular, evitando protuberancias o irregularidades que puedan afectar la precisión de la medida, así pues, en la Figura 4 se presentan ciertos aspectos tomados en cuenta para la medición de la CAP. La Circunferencia a la Altura del Pecho (CAP) se midió con un flexómetro.

Figura 4. Medición del CAP en árboles en pie.



Fuente: (Paz Rico, 2023)

9.6.22 Cálculo del diámetro a altura del pecho (DAP)

Se usó la ecuación propuesta por Gutiérrez et al. (2005), para el cálculo del DAP utilizando la Circunferencia a la Altura del Pecho (CAP), aplicando la siguiente ecuación:

$$DAP = \frac{CAP}{\pi} \quad (7)$$

Donde:

DAP: Diámetro a la altura del pecho (cm).

CAP: Circunferencia a la altura del pecho (cm).

9.6.23 Cálculo del DAP en árboles bifurcados

En el presente estudio, se utilizó el método de medición de muestreo dirigido (TSM, por sus siglas en inglés) propuesto por Bilous et al. (2024), con el fin de obtener un único valor representativo del Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) en árboles bifurcados, trifurcados o multicaules; necesario para el cálculo posterior de la biomasa aérea.

Esta metodología fue seleccionada debido a que proporciona un balance adecuado en términos de precisión de estimación y costos de tiempo, el cual, consiste en identificar, mediante mediciones directas en el árbol, el tronco más grueso (DAP máximo), el tronco más delgado (DAP mínimo) y, cuando corresponda, el tronco promedio (DAP promedio) en el caso de árboles con tres o más bifurcaciones, en el que, a partir de estos valores, se aplican las siguientes ecuaciones para obtener el DAP medio en árboles bifurcados o multicaules:

$$D_b = \frac{d_{min} + d_{max}}{2}$$

$$D_m = \frac{d_{min} + d_{prom} + d_{max}}{3}$$

Donde:

D_b : DAP medio en árboles con dos troncos (cm).

D_m : DAP medio en árboles con tres o más troncos (cm).

d_{min} : DAP del tronco más delgado (cm).

d_{max} : DAP del tronco más grueso (cm).

d_{prom} : DAP del tronco promedio (cm).

9.6.24 Altura total

La altura total es un dato necesario para el cálculo de la biomasa aérea en la siguiente etapa del trabajo y a su vez, para los cálculos posteriores de la estimación del carbono capturado, este valor se obtiene a partir de la medición directa en los ejemplares en el cual, se utilizó el método de los triángulos semejantes propuesto por Higuita Graciano (2018); fue seleccionada debido a que permite realizar fácilmente la medición de la altura total en árboles de grandes alturas de manera simple, accesible, en menor tiempo y a bajo costo sin el uso de equipos electrónicos especializados.

9.6.25 Método de los triángulos semejantes

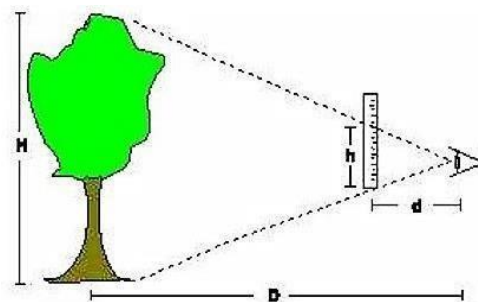
El método de los triángulos semejantes fue aplicado para las mediciones en campo de la altura total de los árboles seleccionados; donde las mediciones se llevaron a cabo con instrumentos de medición, como cinta métrica, regla de 30 cm, guía de observación y diario de campo, garantizando que el proceso no afecte el crecimiento ni la salud de los árboles, por lo cual, el uso de este método es fundamental en estudios de captura de carbono, ya que asegura la conservación de los recursos naturales durante el proceso de análisis y evita alteraciones en las especies o en el ecosistema.

Conforme a Higuita Graciano (2018), el método de los triángulos semejantes permite determinar la altura del árbol utilizando principios de geometría, este método consiste en medir la distancia horizontal desde el observador al pie del árbol y el ángulo de elevación hacia la punta del árbol, utilizando una regla de 30 cm; un instrumento de medición lineal que mide longitudes y distancias de manera precisa, su uso se debe a su utilidad para medir fácilmente árboles de grandes alturas sin la necesidad de equipos especializados.

9.6.26 Medición en campo de la altura total

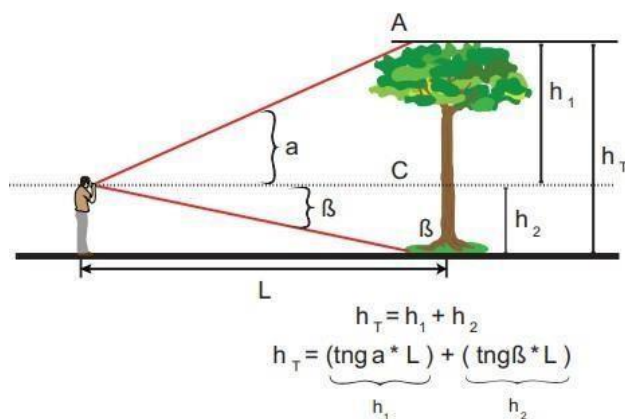
De acuerdo con Higuita Graciano (2018), para la medición en campo de la altura total de los árboles primero el observador debe colocarse a una distancia suficiente para que el árbol sea completamente visible, con el brazo extendido, sostiene la regla verticalmente a la altura de los ojos y cerrando uno de los ojos determina los centímetros de la regla correspondientes a la altura del árbol (Figura 4 y Figura 5); en el diario de campo, se registran los datos de la distancia entre el observador y el árbol medida con un flexómetro, la distancia entre la mano y el ojo y la altura del árbol medida con la regla.

Figura 5. Medición de la altura total del árbol.



Fuente: (Higuita Graciano, 2018)

Figura 6. Visual del observador entre la copa y el pie del árbol.



Fuente: (Gutiérrez et al., 2005)

9.6.27 Cálculo de la altura total

Para el cálculo de la altura total se realizaron las conversiones de centímetros a metros de los datos obtenidos a través de la medición en campo y se empleó la siguiente ecuación para la determinación de la altura total:

$$H = h \times \left(\frac{D}{d} \right) \quad (9)$$

Donde:

H: Altura total del árbol (m).

D: Distancia entre el observador y el árbol (m) d:

Distancia entre la mano y el ojo (m)

h: Altura medida en la regla (m)

9.6.28 Área Basal

De acuerdo con Cancino (2012), el área basal representa a la superficie transversal del tronco de un árbol en la altura a la que se mide el diámetro a la altura del pecho (DAP), es decir, a 1.30 metros sobre el nivel del suelo, expresada en metros cuadrados.

9.6.29 Cálculo del área basal

Conforme a Cancino (2012), el área basal no puede obtenerse por la medición directa en el árbol debido a la forma irregular del fuste, por lo que se calcula a partir de la medición del DAP, aplicando la siguiente ecuación:

$$AB = \frac{\pi \times DAP^2}{4} \quad (10)$$

Donde:

AB: Área basal (cm²)

DAP: Diámetro a altura del pecho (cm)

9.6.30 Volumen del árbol en pie

Según Gutiérrez et al. (2005), el volumen del árbol es el espacio que ocupa la madera de un árbol dentro de un ecosistema determinado, este volumen es un indicador importante para estimar la biomasa arbórea y, a su vez, la cantidad de carbono que puede ser capturado y almacenado en el árbol; se estima a partir de la base del árbol hasta la copa del mismo dependiendo de la forma del fuste, en la Figura 6 se detalla los factores forma para cada tipo de tronco, datos que serán utilizados para calcular el volumen de cada árbol, este cálculo considera tanto el tronco como las ramas principales del árbol, ya que ambas partes contribuyen al volumen total de la madera.

Figura 7. Factor forma de acuerdo con el tipo de tronco de un árbol.

TIPO DENDROMÉTRICO DEL FUSTE	FACTOR DE FORMA
Cilíndrico 	$f \geq 0,75$
Paraboloide 	$0,74 \geq f \geq 0,4$
Cono 	$0,39 \geq f \geq 0,27$
Neiloide 	$f < 0,38$

Fuente: (Gutiérrez et al., 2005)

9.6.31 Cálculo del volumen del árbol en pie

Para determinar el volumen de árboles en pie se empleó la ecuación propuesta por Jumbo et al. (2017):

$$V = AB \times H \times f \quad (11)$$

Donde:

V: Volumen del árbol (m³)

AB: Área basal (m²)

H: Altura total del árbol (m).

F: Factor de forma (Figura 9)

Tercera etapa: Cálculo de la cantidad de carbono secuestrado por las especies arbóreas

Esta tercera etapa consiste en la aplicación de ecuaciones alométricas viables para la estimación del potencial de secuestro de carbono por las especies arbóreas del área, donde se implementa la siguiente metodología en base a numerosos estudios científicos descritos y clasificados por Fonseca (2017); permitiendo estimar el carbono secuestrado a partir de mediciones simples, el autor recopila estudios enfocados en el secuestro de carbono en varios ecosistemas forestales y clasifica las diferentes metodologías en modelos basados en su similitud, de los cuales se seleccionaron y emplearon aquellos que se ajustan con los objetivos del presente estudio y proporcionan aspectos relevantes a considerar en la estimación de carbono secuestrado por las especies.

9.6.32 Modelos empleados en la estimación de secuestro de carbono

Según los modelos descritos por Fonseca (2017); existen dos técnicas principales para monitorear y estimar el carbono almacenado en proyectos forestales: el método indirecto o no destructivo, y el método directo o destructivo, el método indirecto o también denominado como método no destructivo, se basa en calcular la biomasa del árbol mediante ecuaciones o modelos matemáticos desarrollados a partir de análisis de regresión entre variables dendrométricas, como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura comercial (HC), la altura total (HT), el crecimiento diamétrico, el área basal y la densidad específica de la madera, además, la biomasa también puede estimarse utilizando el volumen del fuste, al cual se le aplica la densidad básica de la madera para determinar el peso seco, y un factor de expansión para calcular el peso total del árbol, por otro lado, el método directo o destructivo, consiste en cortar el árbol y pesar su biomasa para obtener directamente su peso seco, sin embargo, en el presente proyecto, se emplearon los siguientes modelos donde los tres primeros corresponden a métodos indirectos y el cuarto a un método directo.

9.6.33 Modelos de ecuaciones alométricas

Estos modelos aplican una ecuación o modelos de regresión específica (ecuaciones alométricas) o tablas específicas de biomasa para cada especie a partir de mediciones simples de árboles individuales como el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura principalmente; relacionan la biomasa con variables de árboles en pie (DAP, altura comercial y total, crecimiento diamétrico, etc.) y pueden ser construidos usando un mínimo de 30 árboles bien seleccionados, en forma general, se prefieren los modelos que tienen como variable regresora o variable independiente al diámetro para predecir el valor de otras variables como la altura, la biomasa, el volumen, el área basal o la frondosidad del árbol, debido a que pueden requerir equipos avanzados o cálculos complejos; se convierten en variables esenciales en estudios forestales y ambientales con una ventaja adicional, ya que permite estimar el carbono capturado a partir de una sola variable.

9.6.34 Modelos generales

Estos modelos consisten en la aplicación de ecuaciones de regresión genéricas al diámetro o a otras mediciones de los árboles, su uso es común en estudios forestales para estimar el contenido de biomasa aérea, especialmente cuando no existen modelos específicos para una región o condiciones particulares; son útiles siempre que estos sean consistentes con las condiciones del área de estudio, como las especies presentes, el clima y el manejo del suelo.

9.6.35 Modelo de la técnica del árbol promedio

El modelo trata acerca de la técnica del árbol promedio propuesta por MacDicken (1997), un estudio que parte de la hipótesis de que un árbol representativo de tamaño promedio refleja las características promedio de un conjunto de árboles, específicamente de la biomasa total en un rodal.

El autor una vez que conoce la biomasa de un árbol promedio (determinada mediante el muestreo destructivo), es multiplicada por el número total de árboles en el rodal, obteniendo un estimado de la biomasa total del rodal, sin tener que medir directamente cada árbol, sin embargo, dado que el modelo mencionado se basa en un estudio en el que el autor utilizó un método destructivo, el presente trabajo optó por adoptar un enfoque similar, pero adaptando su estructura al método no destructivo para obtener el carbono secuestrado total por cada especie y no solamente de la biomasa total.

9.6.36 Estimación del carbono secuestrado por árbol

9.6.37 Técnica del árbol promedio

La aplicación de esta técnica permitió estimar el carbono secuestrado por las especies a partir de un árbol promedio representativo de cada especie arbórea sin la necesidad de medir todos los árboles presentes en el área, para esto es fundamental que la selección del árbol representativo en cada especie tenga características morfológicas similares a los demás ejemplares, por lo tanto, a partir de las características fenotípicas observadas, los individuos de cada especie arbórea en el campus Salache comparten patrones morfológicos de crecimiento similares en su altura, frondosidad o diámetro cuando se encuentran en la misma etapa de desarrollo, bajo las mismas condiciones ambientales y de manejo.

Así pues, basándose en la técnica del árbol promedio propuesta por MacDicken (1997), se consideró que por cada especie arbórea un árbol representativo refleja, la cantidad promedio de carbono que secuestran los demás árboles si estos son clasificados por su etapa de desarrollo, permitiendo estimar el carbono total secuestrado por la especie, por lo tanto, para llevar a cabo esta técnica, por cada especie identificada en las diferentes zonas de estudio (parte alta, parte media y parte baja), se seleccionó un árbol promedio representativo de cada etapa de crecimiento determinada (juvenil, submadura, madura y sobremadura), a partir de estos ejemplares, se estimó el carbono secuestrado multiplicando el valor obtenido por el total de árboles conforme a la misma especie y etapa de desarrollo; estas cifras son sumadas para obtener el carbono secuestrado total por la especie arbórea y a su vez el carbono total secuestrado por la vegetación arbórea del área de estudio en su totalidad.

9.6.38 Método indirecto o no destructivo

En el presente estudio, la aplicación del método indirecto o no destructivo permitió estimar el carbono secuestrado en la biomasa aérea de las especies arbóreas sin causar daño alguno a los ejemplares, esto se debe a que la investigación tiene como objetivo evaluar el potencial de secuestro de carbono de la vegetación arbórea en el área de estudio, y no determinar su valor comercial o económico, este método consiste en la estimación del carbono capturado por los árboles mediante ecuaciones alométricas, en las cuales se utilizan mediciones de campo simples de parámetros dendrométricos, como el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total principalmente, para ello, primero es fundamental determinar la biomasa aérea de los árboles seleccionados por especie y etapa de desarrollo.

9.6.39 Ecuaciones alométricas aplicadas

Para estimar el carbono almacenado por la vegetación arbórea del campus Salache o por parte de él, se seleccionó el método indirecto o no destructivo propuesto por Russo (2009), en la Guía Práctica para la Medición de la Captura de Carbono en la Biomasa Forestal; publicado por la Universidad Earth de Costa Rica, esta metodología fue seleccionada debido a que proporciona ecuaciones alométricas precisas y ha sido utilizada en investigaciones científicas similares realizadas en el país como son los estudios elaborados por Espinoza & López (2023), Cajilema & Fernández (2023), entre otros.

9.6.40 Cálculo de la biomasa Aérea

La biomasa representa el peso de la materia orgánica aérea y subterránea que existe en un ecosistema forestal, sin embargo, debido a fines prácticos, se estudia únicamente la biomasa aérea de los árboles seleccionados.

Según Hernández-Ramos et al. (2017), la biomasa aérea es el peso seco total de la materia orgánica viva presente en las partes del árbol situadas por encima del suelo como troncos, ramas y hojas; donde las ecuaciones alométricas consideran la variabilidad de los árboles en función de su edad y las condiciones de competencia facilitando una estimación factible y directa de la biomasa; reflejando la productividad del lugar donde se encuentran.

A través del cálculo de la biomasa aérea se deriva la biomasa radicular, la biomasa seca, la biomasa aérea y la biomasa total; donde se emplean las constantes definidas en el modelo matemático de Higuchi & Carvalho JR. (1994), tomando como base los datos previamente recopilados, como el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total de los árboles.

$$Ba = a \times DAP^b \times H^c \quad (12)$$

Donde:

Ba: Biomasa aérea (Kg)

DAP: Diámetro a la altura del pecho (cm) H:

Altura total (m)

a = 0,026 (constante adimensional)

b = 1,529 (constante adimensional)

c = 1,747 (constante adimensional)

Este modelo se fundamenta en una ecuación alométrica que ha sido validada por numerosos estudios científicos y ha encontrado aplicación en diversas investigaciones académicas; entre las cuales destacan las realizadas por Espinoza & López (2023), Muñoz & Vasquez (2020), Pintado & Astudillo (2021), M. Morales & Vásquez (2019), entre otros.

9.6.41 Cálculo de la biomasa radicular

De acuerdo con Quiceno-Urbina et al. (2016), la biomasa radicular corresponde a la biomasa viva presente en las raíces de un árbol, su cálculo se realiza considerando el 20% del peso de la biomasa aérea (Ba).

9.6.42 Cálculo de la biomasa verde total

Conforme a Muñoz & Vasquez (2020), la biomasa verde total es el peso total de toda la materia orgánica viva de un árbol o planta en su estado fresco; es decir, incluyendo el contenido de agua tanto de la biomasa aérea (troncos, ramas, hojas y otros tejidos sobre el suelo) como de la biomasa radicular (raíces); expresado de la siguiente forma:

$$Bv = Ba + Br \quad (13)$$

Donde:

Bv: Biomasa verde total (Kg)

Ba: Biomasa aérea (Kg)

Br: Biomasa radicular (Kg)

9.6.43 Cálculo de la biomasa seca

Según Toscano Morales & Barriga (2009), la biomasa seca se refiere a la materia orgánica viva de plantas o árboles que tiene un contenido de humedad inferior al 60%; es decir, que ya ha

perdido gran parte de su agua de forma natural, se mide únicamente la parte sólida de la biomasa; excluyendo la mayor parte del agua presente en los tejidos, a partir de este concepto, la fórmula para calcular su valor es la siguiente:

$$Bs = Bv - \frac{Ba \times 40}{100} \quad (14)$$

Donde:

Bs: Biomasa seca (Kg)

Bv: Biomasa verde total (Kg)

Ba: Biomasa aérea (Kg)

9.6.44 Cálculo del secuestro de carbono

El carbono total secuestrado por un ejemplar se calcula sumando el carbono aéreo y el carbono radicular, estos cálculos se basan en datos de biomasa previamente obtenidos y se realizaron utilizando ecuaciones que emplean coeficientes definidos en investigaciones previas por diversos autores.

9.6.45 Cálculo del carbono aéreo total

De acuerdo con el IPCC (2003), el carbono aéreo total se calcula multiplicando la biomasa seca por 0,5 debido a que este factor es una generalización basada en estudios globales sobre la proporción de carbono en la materia seca de los árboles; donde aproximadamente el 50% de la biomasa seca corresponde al carbono almacenado en los componentes del árbol, como ramas, tronco, hojas y raíces; considerándose un valor promedio aceptado para la mayoría de las especies arbóreas:

$$CAT = Bs \times 0.5 \quad (15)$$

Donde:

CAT: Carbono aéreo total (Kg)

Bs: Biomasa seca (Kg)

9.6.46 Cálculo del carbono radicular

De acuerdo con los lineamientos establecidos por el IPCC (2003), el carbono radicular se calcula multiplicando el carbono aéreo total (CAT) por un factor de 0,24, este valor representa

la proporción promedio entre el carbono almacenado en las raíces y el carbono presente en la biomasa aérea de un árbol, lo que indica que el carbono radicular promedio corresponde al 24% del carbono aéreo; una estimación ampliamente utilizada en estudios forestales, especialmente en métodos indirectos; para simplificar los cálculos cuando no se tienen datos específicos del área de estudio:

$$CR = CAT \times 0,24 \quad (16)$$

Donde:

CR: Carbono radicular (Kg)

CAT: Carbono aéreo total (Kg)

9.6.47 Cálculo del carbono total secuestrado por árbol

El carbono total secuestrado por un árbol se calcula sumando el carbono radicular y el carbono aéreo total, utilizando la siguiente fórmula:

$$CA = CAT + CR \quad (17)$$

Donde:

CA: Carbono total secuestrado por árbol (Kg)

CAT: Carbono aéreo total (Kg)

CR: Carbono radicular (Kg)

9.6.48 Estimación del carbono secuestrado por especie

Para estimar el carbono secuestrado por cada especie arbórea, se clasificaron los árboles según su etapa de crecimiento en cuatro categorías: juvenil, submadura, madura y sobremadura, en cada etapa, se seleccionó un árbol promedio representativo; es decir, un individuo que refleje las características promedio de los árboles en esa fase, como la altura total, el diámetro del tronco, entre otros parámetros fenotípicos; se calcula el carbono secuestrado por cada etapa utilizando este árbol promedio como base para multiplicarse por el total de individuos similares en la zona y los valores de carbono secuestrado en las cuatro etapas se sumaron para determinar el carbono total secuestrado por la especie arbórea.

9.6.49 Cálculo del carbono secuestrado por especie arbórea

Con base en lo expuesto anteriormente, se utilizan las siguientes fórmulas para calcular el carbono almacenado por cada especie arbórea identificadas en las distintas zonas de estudio:

$$C_i = CAP_i \times N_i \quad (18)$$

$$CE = C_J + C_{SM} + C_M + C_S$$

Donde:

CE: Carbono total secuestrado por la especie arbórea (Kg)

C_i : Carbono total secuestrado en la etapa i (Kg)

N_i : Número total de árboles en la etapa i

CAP_i : Carbono promedio secuestrado en la etapa i (Kg)

i : Representa la etapa de crecimiento: juvenil (J), submadura (SM), madura (M) y sobremadura (S).

9.6.50 Estimación del carbono secuestrado en el área de estudio

Para estimar el carbono secuestrado en el área de estudio en su totalidad, se calcula la suma del carbono capturado por todas las especies dominantes presentes en el campus, utilizando la siguiente ecuación:

$$CT = \sum CE \quad (19)$$

Donde:

CT: Carbono total del área de estudio (Kg)

$\sum CE$: Sumatoria del carbono secuestrado por todas las especies arbóreas (Kg)

9.6.51 Cálculo de conversión a toneladas equivalentes de CO₂

Según el IPCC (2003), la conversión del carbono almacenado en biomasa a su equivalente en dióxido de carbono (CO₂) se realiza utilizando un factor de 3,6663, este factor se calcula dividiendo el peso molecular del CO₂ (43,99915 g/mol) entre el peso atómico del carbono (12,001115 g/mol); representando cuántas veces el carbono contribuye al peso del CO₂, esta fórmula estándar es fundamental para traducir el carbono secuestrado a una métrica relevante en términos de gases de efecto invernadero, lo que resulta primordial para los informes y análisis relacionados con el cambio climático y las estrategias de mitigación de emisiones:

$$Ton\ de\ CO_2 = \frac{CT \times 3,6663}{1000} \quad (20)$$

Donde:

Ton de CO₂: Equivalencia del carbono secuestrado en toneladas de CO₂ (Ton)

CT: Carbono total (Kg)

9.6.52 Estimación del potencial de secuestro de carbono

Se identificaron como las especies con mayor potencial de secuestro de carbono en el área de estudio aquellas que presentaron los valores más altos de carbono secuestrado tomando en cuenta la caracterización de las especies arbóreas dominantes y los factores ambientales, biológicos y antrópicos, tales como el clima, zona geográfica, la altitud, la distribución, la dinámica de manejo de la vegetación arbórea, entre otros.

Técnicas

9.6.53 Observación directa

Según Ruiz Huaraz & Valenzuela Ramos (2022), la observación directa es la habilidad para reconocer y obtener datos del objeto de estudio; mirando detalladamente lo que interesa al investigador en un espacio y tiempo delimitado y en situaciones particulares.

La observación directa se utilizó durante las salidas de campo para registrar de forma detallada las características fenotípicas de las especies arbóreas seleccionadas y su entorno; técnica que permitió identificar aspectos como el estado general de los árboles (etapas de desarrollo, aprovechamiento ambiental, etc.), su ubicación específica dentro del área de estudio, factores ambientales y antrópicos, así como, la identificación de patrones visibles en la distribución de las especies y su interacción con las condiciones ambientales; proporcionando un contexto integral para la caracterización y análisis de su capacidad potencial de secuestro de carbono.

9.6.54 Guía de observación y diario de campo

Conforme a Ruiz Huaraz & Valenzuela Ramos (2022), la guía de observación se diseña con indicadores específicos que delimitan los aspectos a observar, manteniendo flexibilidad para adaptarse a distintas situaciones; su principal función es servir como una herramienta de control que orienta el proceso de observación, por otro lado, el diario de campo, complementa esta guía al actuar como el instrumento para registrar de forma detallada las observaciones realizadas siguiendo las pautas establecidas, este registro debe incluir información como la fecha, el lugar, nombre del proyecto, los datos requeridos, las situaciones observadas, así como los equipos e instrumentos utilizados.

9.6.55 Recolección de datos en campo

La recolección de datos en campo se realizó en base a la metodología de la primera, segunda y tercera etapa como guía de observación para la realización del inventario forestal, el conteo y clasificación de los árboles por fase de desarrollo, la selección del árbol promedio representativo por etapa en cada especie arbórea y sus mediciones dendrometrías, para ello, el área de estudio se dividió en tres zonas (parte alta, parte media y parte baja) para facilitar su cobertura total; donde se utilizaron transectos en zigzag en lugares estratégicos, en los cuales, de cada especie arbórea encontrada se registró la cantidad total de árboles juveniles, submaduros, maduros y sobremaduros de acuerdo a sus características fenotípicas observadas; donde se registró el nombre común, las coordenadas UTM y las mediciones in situ de los parámetros dendrométricos del árbol promedio seleccionado por etapa, tales como la circunferencia a la altura del pecho (CAP) y la altura total, siendo medidas necesarias para el cálculo del carbono secuestrado por las especies, los datos recopilados se ingresaron en una base de datos estructurada en Excel, lo que facilitó los cálculos y su análisis posterior, garantizando la integridad de la información.

Instrumentos

Para realizar el trabajo de investigación, se utilizó el siguiente equipo necesario para la recopilación de datos:

- 1 GPS
- 1 regla de 30 cm
- 1 cinta métrica de carrete
- 1 cámara fotográfica
- Guía de campo y diario de campo

10 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

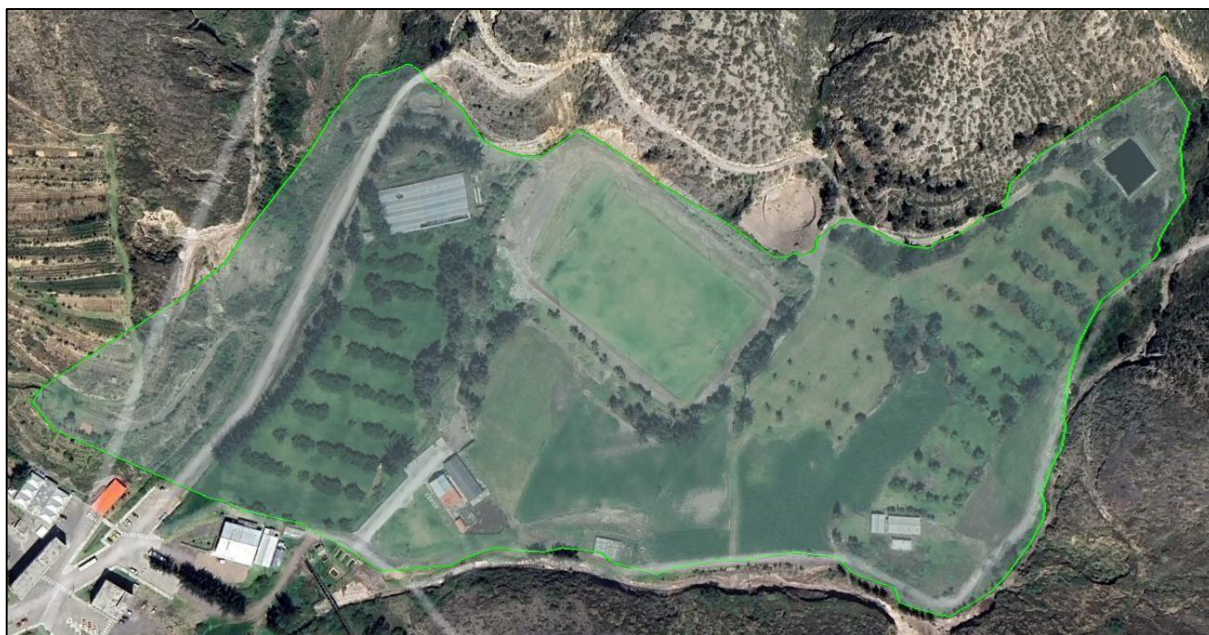
10.1 Zonificación del área de estudio

El área de estudio se dividió en tres zonas: la parte alta, identificada como Zona A; la parte media, denominada Zona B; y la parte baja, designada como Zona C, cada una de estas zonas se detalla a continuación:

10.1.1 Zona A: Parte alta

La zona A corresponde a la parte alta del campus Salache y se encuentra a una altura de 2,734 a 2,887 m.s.n.m., está ubicada en la parte superior de las aulas donde se encuentra el campo de futbol, el galpón, el establo, invernaderos, áreas de pastos, y las oficinas del Centro Experimental y de Producción Salache (CEYPSA) (Figura 7).

Figura 8. Zona A: Parte alta.



Fuente: Google Earth 2024

10.1.2 Zona B: Parte media

La Zona B corresponde a la parte media del campus, se encuentra a una altura de 2,709 a 2,734 m.s.n.m. y está ubicada en la parte central, donde se encuentran las oficinas del proyecto de Granos Andinos, la planta agroindustrial, la bomba de agua, el área piscícola, los laboratorios, el herbario, la secretaria, las aulas, la biblioteca, las salas de docentes, el bar principal, las áreas de pastos, y la clínica veterinaria (Figura 8).

Figura 9. Zona B: Parte media.



Fuente: Google Earth 2024

10.1.3 Zona C: Parte baja

La Zona C corresponde a la parte baja del campus, se encuentra a una altura de 2,734 a 2,887 m.s.n.m., está ubicada en la parte inferior, donde se encuentra la casa de hacienda, las aulas del centro de idiomas, las bodegas, invernaderos, el vivero forestal, el área deportiva, la laguna, entomología y la planta de tratamiento de aguas residuales (Figura 9).

Figura 10. Zona C: Parte baja.



Fuente: Google Earth 2024

10.2 Primera Etapa: Estado actual de las especies arbóreas

En la presente sección se detalla la distribución, presencia y dominancia de las especies arbóreas en el campus, así como las condiciones actuales en las que las especies ejecutan el proceso de secuestro de carbono como factores ambientales, uso y manejo forestal en base al inventario forestal realizado en el área a partir de la clasificación y conteo de individuos por especie, identificación de las especies arbóreas dominantes y su caracterización.

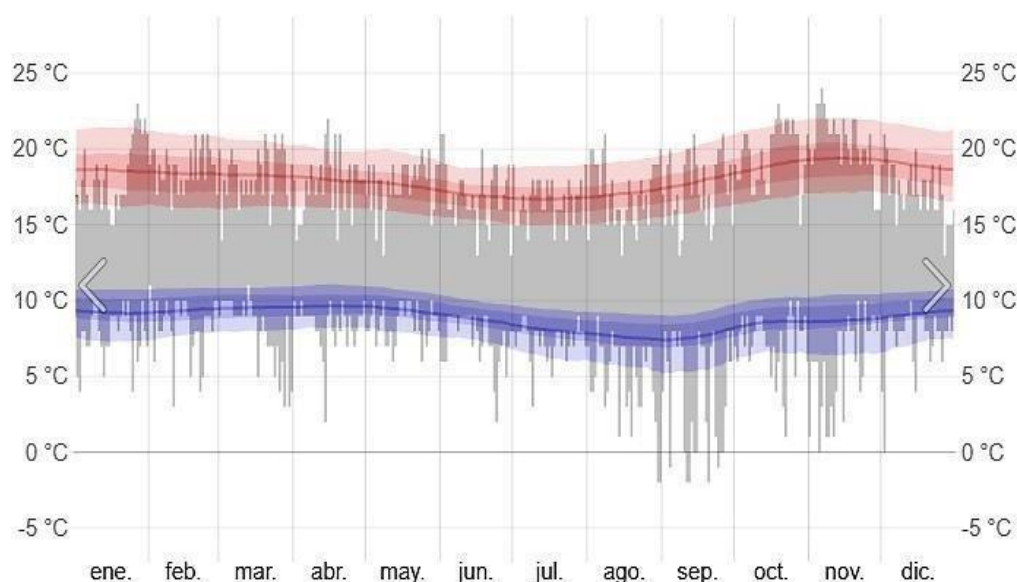
Factores ambientales

10.2.1 Clima

El clima se detalló en base al registro de datos meteorológicos anuales del año 2024 del cantón Latacunga como temperatura, precipitación y humedad, información recopilada del Informe Meteorológico Aeronáutico de Rutina (METAR) del Aeropuerto de Cotopaxi.

10.2.2 Temperatura

Figura 11. Temperatura del cantón Latacunga del Año 2024.



Fuente: Informe Meteorológico Aeronáutico de Rutina (METAR) (2024).

La Figura 10 representa la variación de las temperaturas a lo largo del año, las barras en color gris reflejan el rango diario de temperaturas, mostrando valores mínimos que habitualmente oscilan entre 5 °C y 10 °C, y máximos que oscilan entre 15 °C y 20 °C; sin embargo, en ciertos días, pueden sobrepasar los 20 °C o descender de 5 °C, los marcadores en rojo y azul indican las temperaturas más altas y más bajas registradas en cada jornada, mientras que las líneas en rojo y azul claro representan los promedios máximos y mínimos, respectivamente, se puede notar que los meses más fríos abarcan de junio a agosto; período en el cual las temperaturas

mínimas pueden llegar casi a 0 °C, mientras que de octubre a diciembre se presentan los meses más cálidos, con cifras máximas que a menudo superan los 20 °C, además, los primeros y últimos meses del año muestran cambios más pronunciados entre las temperaturas.

10.2.3 Precipitación

Figura 12. Precipitación del cantón Latacunga del Año 2025.

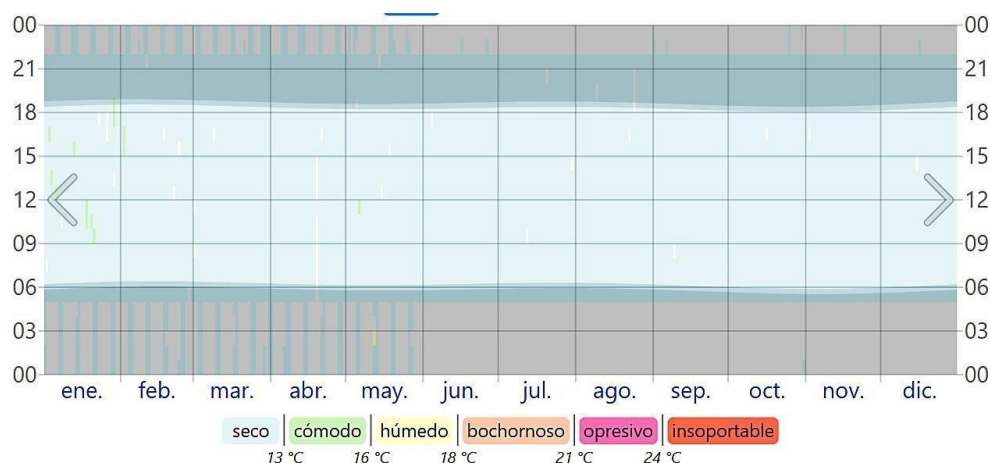


Fuente: Informe Meteorológico Aeronáutico de Rutina (METAR) (2024).

La Figura 11 presenta los valores de probabilidad de días con precipitación a lo largo del año, evidenciando períodos bien diferenciados de alta y baja precipitación, lo cual es característico de climas con estaciones húmedas y secas, se observa que el periodo húmedo alcanza su punto máximo el 10 de abril con una probabilidad del 75 %, indicando una alta frecuencia de precipitación, en el que, posteriormente, se registra una disminución continua hasta alcanzar un mínimo el 7 de agosto con un 22 %, lo que caracteriza la fase seca del año, a continuación, el porcentaje de días con lluvia comienza a aumentar nuevamente hacia el final del año, cerrando con un 52 % el 1 de enero; la distribución de los días de lluvia mensuales refuerza este patrón, destacando marzo como el mes con mayor cantidad de días de lluvia (22 días) y agosto como el más seco (7,2 días).

10.2.4 Humedad

Figura 13. Humedad del cantón Latacunga del Año 2024.



Fuente: Informe Meteorológico Aeronáutico de Rutina (METAR) (2024).

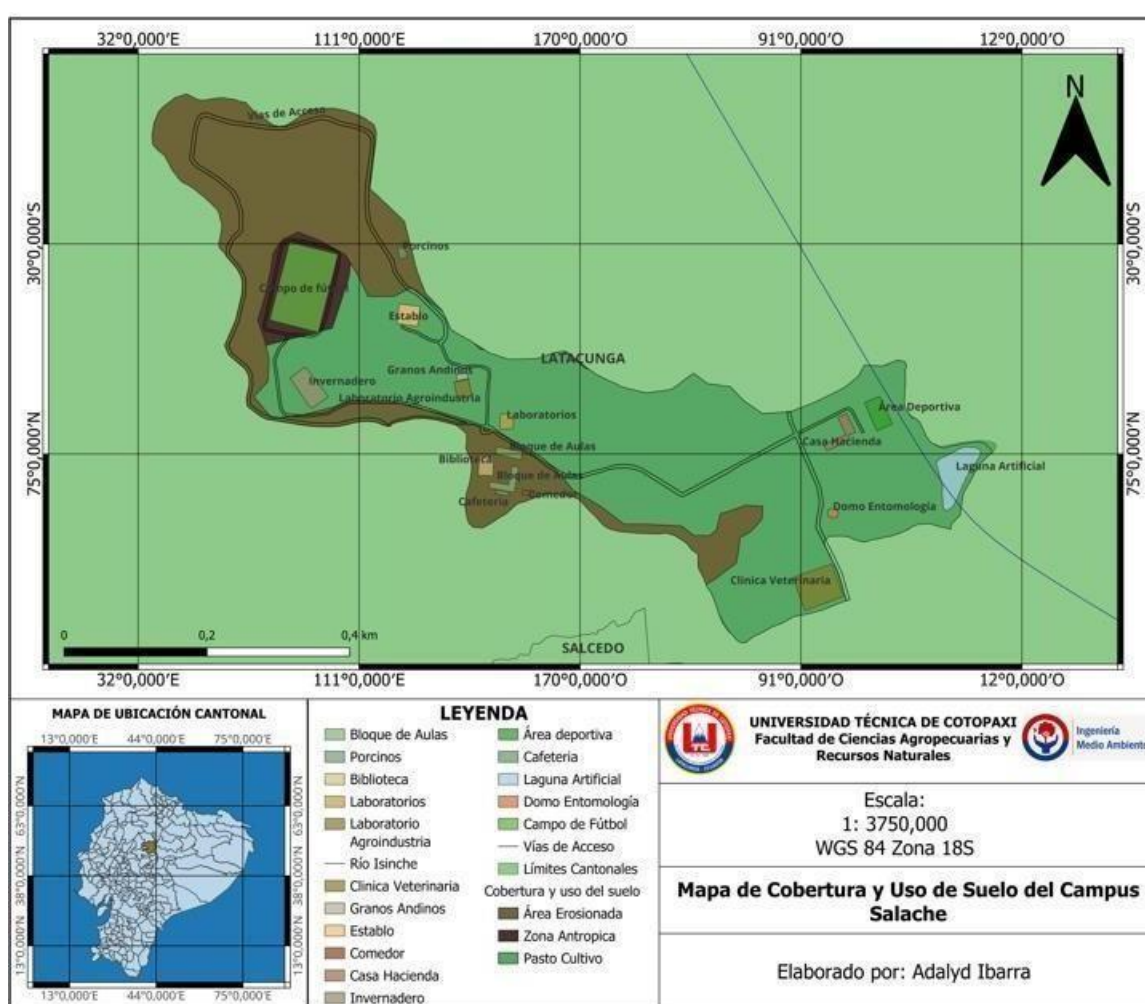
La Figura 12 muestra que, durante el transcurso del año, el nivel de humedad permanece generalmente en un estado seco y placentero, con temperaturas que infrecuentemente causan una sensación de incomodidad o calidez excesiva; la mayor parte del tiempo, el entorno se siente árido, especialmente cuando las temperaturas caen por debajo de 13 °C, lo que indica una baja humedad relativa, entre los meses de abril y septiembre, hay algunos lapsos de tiempo con una humedad ligeramente elevada, en un rango cómodo (entre 13 °C y 16 °C), pero sin alcanzar niveles que causen incomodidad, no se muestra episodios de calor sofocante, opresión o temperaturas intolerables, lo que demuestra que la sensación térmica en este lugar se mantiene constante y placentera a lo largo del año, asimismo, la humedad suele ser más elevada en las primeras horas del día y en la mañana, disminuyendo hacia el mediodía y la tarde; en términos generales, el clima en esta región es seco y constante, con escasas variaciones drásticas en la humedad.

10.2.5 Cobertura vegetal

El mapa de cobertura y uso de suelo del Campus Salache (Figura 13), evidencia una matriz de cobertura vegetal dominada por áreas de pasto cultivado, intercaladas con sectores de zona antrópica y áreas erosionadas, lo que indica una combinación de ecosistemas intervenidos y fragmentados, la cobertura de pasto cultivado, representada en tonos verdes claros, sugiere una vegetación predominantemente herbácea utilizada para ganadería o conservación de suelos; en contraste, las áreas erosionadas, identificadas en tonos marrón oscuro, se localizan en sectores con mayor susceptibilidad a procesos degradativos, posiblemente asociados a la actividad agropecuaria y condiciones edáficas desfavorables, la zona antrópica, distribuida en marrón

claro, está asociada con infraestructuras académicas y productivas, incluyendo aulas, laboratorios, establos y zonas deportivas, lo que evidencia la interacción entre la actividad humana y la dinámica ecológica del campus; complementariamente, elementos como lagunas artificiales, el domo entomológico y campos experimentales contribuyen a la diversidad de la cobertura vegetal; destacando la coexistencia de usos académicos, agropecuarios y ambientales dentro del área de estudio.

Figura 14. Cobertura vegetal del área de estudio.



Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

10.2.6 Uso y Manejo de las especies arbóreas en el campus Salache

El manejo forestal en las tres zonas de estudio está determinado por sus características ecológicas y funcionales, influenciadas por la altitud y las condiciones del suelo:

10.2.7 Zona Alta (2,734 – 2,887 m.s.n.m.)

El manejo de las especies arbóreas en la zona alta del campus (2,734 – 2,887 m.s.n.m.) está orientado a la recuperación y conservación del suelo específicamente en las terrazas, dado que

esta área presenta una cobertura vegetal limitada, por otro lado, se implementan sistemas agroforestales con el fin de reducir la erosión, mejorar la fertilidad del suelo y promover el crecimiento de especies arbóreas que contribuyan a la estabilización del ecosistema.

Terrazas de Conservación

Se han implementado terrazas con especies nativas y exóticas para evitar la erosión hídrica y eólica, estas estructuras han permitido la infiltración del agua y la regeneración del suelo, aunque presentan signos de deterioro, lo que sugiere la necesidad de su reestructuración para garantizar su funcionalidad a largo plazo.

Sistemas Silvopastoriles

En esta zona se han empleado cultivos forrajeros como alfalfa, trébol y raigrás con árboles como la guaba, la acacia común, la acacia negra y el aliso andino, proporcionando alimento para el ganado y mejorando la cobertura del suelo, este sistema ayuda a la retención de humedad, pero requiere un mejor control del pastoreo para evitar la compactación del suelo y la sobreexplotación de los recursos vegetales.

Cortinas Rompevientos

Se han establecido cortinas rompevientos de pino principalmente para reducir la velocidad del viento y minimizar la pérdida de humedad en los suelos, estas barreras vegetales contribuyen a la regulación del microclima y favorecen la estabilidad de los cultivos.

10.2.8 Zona Media (2,709 – 2,734 m.s.n.m.)

La zona media del campus, ubicada entre los 2,709 y 2,734 m.s.n.m., está centrado en la producción agrícola y pecuaria, con el uso de sistemas agroforestales y silvopastoriles que buscan maximizar la productividad del suelo, reducir los efectos de la erosión y mejorar la fertilidad edáfica a través del aporte de materia orgánica y la regulación del microclima.

Sistemas Silvopastoriles

Se implementan la rotación de cultivos forrajeros como alfalfa, raigrás, trébol y pasto azul, combinados con la cría de vacunos y ovinos, este sistema garantiza suministro de alimento para el ganado, además de favorecer la recuperación del suelo y la retención de humedad, sin embargo, la escasez de árboles en algunas áreas limita la provisión de sombra y la capacidad de protección contra la erosión eólica e hídrica.

Sistemas Agroforestales con Rotación de Cultivos

La zona media presenta cultivos de papa y otros productos agrícolas de ciclo corto en asociación con especies arbóreas, esta rotación permite mejorar la estructura del suelo y minimizar la

pérdida de nutrientes, se ha identificado la necesidad de incrementar la densidad de árboles en estas áreas para reforzar la protección del suelo y la regulación hídrica.

Cortinas Rompevientos

Se han establecido líneas de pinos principalmente y arbustos de sauce con el fin de reducir la velocidad del viento y minimizar la pérdida de humedad en los cultivos, favoreciendo la conservación del suelo.

10.2.9 Zona Baja (2,705 – 2,709 m.s.n.m.)

La zona baja del campus, situada entre 2,705 y 2,709 m.s.n.m., se caracteriza por un manejo agroforestal orientado a la delimitación de espacios, la producción agrícola, y la conservación del suelo; las especies arbóreas en esta zona cumplen funciones tanto ecológicas como estructurales, sirviendo como cercas vivas, linderos y elementos de embellecimiento paisajístico.

Linderos y Cortinas Rompevientos

Se han establecido líneas de árboles y arbustos como ciprés, aliso, tilo, retama y palmeras, que cumplen la función de delimitar los lotes y proteger los cultivos contra el viento, estos linderos también impiden el ingreso de animales a las parcelas agrícolas, reduciendo la compactación del suelo y mejorando la estabilidad del ecosistema.

Jardines y Áreas Ornamentales

Se han implementado espacios con árboles frutales y especies ornamentales que contribuyen a la estética del campus y la retención de humedad en el suelo; la presencia de maleza y la falta de poda en algunos sectores han afectado el estado de estas áreas, lo que sugiere la necesidad de un mantenimiento más constante.

Huertos Orgánicos y Producción Agroforestal

En esta zona se desarrollan cultivos mixtos como tomate de árbol, lechuga, acelga y col, integrados con árboles fijadores de nitrógeno como el aliso y arbustos nativos, este sistema favorece la fertilidad del suelo, la protección contra la erosión eólica e hídrica, y el aporte de materia orgánica a través de la caída de hojas y restos vegetales.

Cercas Vivas y Separación con el Río Salache

Se han implementado cercas vivas de árboles como el tilo o el pino y arbustos nativos, lo que contribuye a la protección de las fuentes hídricas y la conservación de la biodiversidad en la zona, sin embargo, la falta de poda y el crecimiento descontrolado de la vegetación en ciertos sectores pueden afectar la funcionalidad de estas barreras naturales.

Vivero Forestal

Además de los sistemas agroforestales y las cercas vivas, se han implementado viveros forestales con el objetivo de producir plántulas para la reforestación y restauración ecológica en distintas áreas del campus, en los viveros se cultivan especies como aliso (*Alnus acuminata*), yagual (*Polylepis besseri.*), ciprés (*Cupressus sempervirens*) y pino (*Pinus radiata*), mismas que son utilizadas en la reforestación y en la restauración del suelo, también se producen especies frutales y ornamentales que son utilizadas en los jardines y huertos agroforestales dentro del campus; donde se promueve la producción de plántulas para actividades educativas, proyectos de investigación y extensión comunitaria.

La gestión de los viveros involucra prácticas de selección de semillas de calidad, control fitosanitario y monitoreo del crecimiento de las plántulas, se han identificado desafíos como la necesidad de mayor infraestructura para optimizar la producción y mejorar la eficiencia del manejo de los recursos hídricos.

10.2.10 Inventario Forestal

El presente inventario forestal se llevó a cabo en cada una de las zonas de estudio delimitadas, en el cual se registraron la cantidad de árboles por especie de acuerdo a su etapa de desarrollo, nombre común y nombre científico, a continuación, se presentan los resultados obtenidos, incluyendo el análisis del área basal y la distribución de las especies en el área de estudio.

10.2.11 Especies arbóreas presentes en la Zona A: Parte Alta

En la parte alta del área de estudio se encontraron 9 especies diferentes con un total de 606 individuos en total, distribuidos en 113 árboles en etapa juvenil, 196 árboles en etapa submadura, 295 árboles en etapa madura y 2 árboles en etapa sobremadura (Tabla 3).

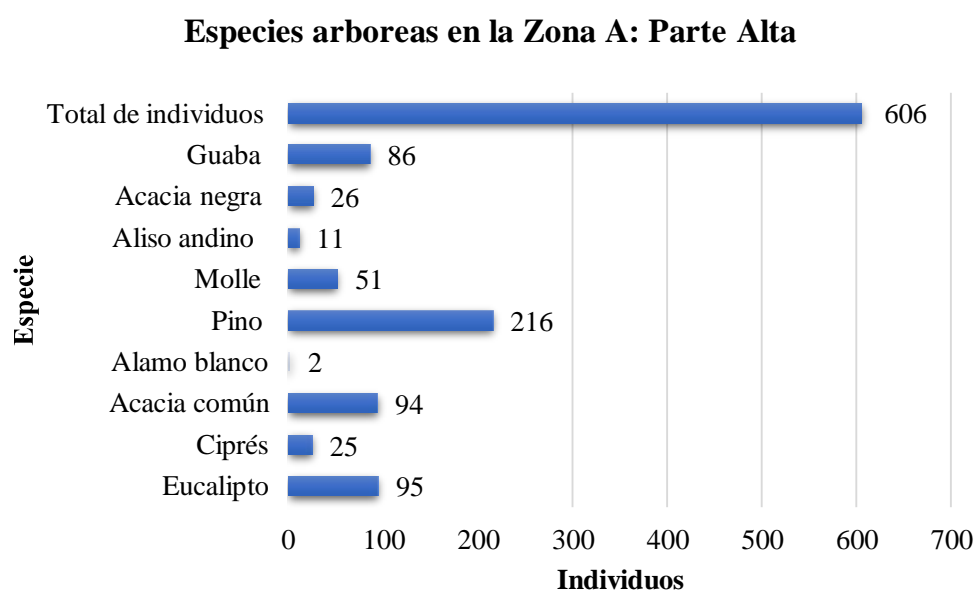
Tabla 3. Especies arbóreas en la Zona A: Parte Alta.

Nombre común	Nombre científico	Etapas de crecimiento				Total de árboles por especie
		Juvenil	Submadura	Madura	Sobremadura	
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	17	35	42	1	95
Ciprés	<i>Cupressus sempervirens</i>	13	-	12	-	25
Acacia común	<i>Acacia dealbata</i>	7	37	50	-	94
Álamo blanco	<i>Populus alba</i>	-	2	-	-	2

Pino	<i>Pinus radiata</i>	51	79	85	1	216
Molle	<i>Schinus molle</i>	16	12	23		51
Aliso andino	<i>Alnus acuminata</i>	-	11	-	-	11
Acacia negra	<i>Acacia melanoxylon</i>	4	10	12	-	26
Guaba	<i>Inga edulis</i>	5	10	71	-	86
Total de individuos		113	196	295	2	606

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024).

Gráfica 1. Especies arbóreas en la Zona A: Parte Alta



Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024).

En la Gráfica 1, se evidencia una vegetación arbórea dominada por especies introducidas, destacándose *Pinus radiata* (216 individuos) como la más representativa, seguido por *Eucalyptus globulus* (95 individuos) y *Acacia dealbata* (94 individuos), lo cual sugiere un manejo forestal orientado a la reforestación con especies de rápido crecimiento y alto rendimiento maderable, por otro lado, especies nativas como *Schinus molle* (51 individuos) y *Inga edulis* (86 individuos) muestran una presencia moderada, mientras que *Alnus acuminata* (11 individuos) y *Populus alba* (2 individuos) presentan una cantidad baja de individuos, lo que podría indicar limitaciones en las condiciones climáticas en la zona.

10.2.12 Especies arbóreas presentes en la Zona B: Parte Media

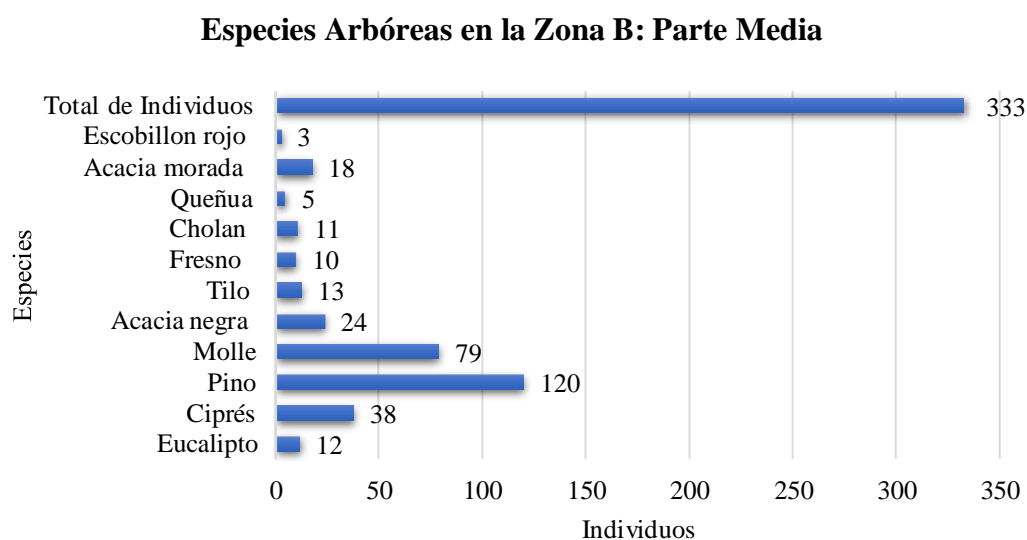
En la parte media del área de estudio se encontraron 11 especies diferentes con un total de 333 individuos en total, distribuidos en 84 árboles en etapa juvenil, 81 árboles en etapa submadura, 158 árboles en etapa madura y 10 árboles en etapa sobremadura (Tabla 4).

Tabla 4. Especies arbóreas en la Zona B: Parte Media

Nombre común	Nombre científico	Etapas de crecimiento				Total de árboles por especie
		Juvenil	Submadura	Madura	Sobremadura	
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	-	2	7	3	12
Ciprés	<i>Cupressus sempervirens</i>	20	6	12	-	38
Pino	<i>Pinus radiata</i>	3	42	75	-	120
Molle	<i>Schinus molle</i>	16	23	33	7	79
Acacia negra	<i>Acacia melanoxylon</i>	10	-	14	-	24
Tilo	<i>Sambucus mexicana</i>	4	5	4	-	13
Fresno	<i>Fraxinus uhdei</i>	10	-	-	-	10
Cholan	<i>Tecoma stans</i>	-	-	11	-	11
Yagual	<i>Polylepis besseri</i>	-	3	2	-	5
Acacia morada	<i>Acacia baileyana</i>	18	-	-	-	18
Escobillon rojo	<i>Callistemon citrinus</i>	3	-	-	-	3
Total de Individuos		84	81	158	10	333

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024).

Gráfica 2. Especies arbóreas en la Zona B: Parte Media



Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024).

En la Gráfica 2, la vegetación arbórea de la parte media muestra un total de 333 individuos, donde destaca el Pino (*Pinus radiata*) con 120 individuos, lo que presenta su uso prioritario en la reforestación y manejo forestal, debido a su rápido crecimiento y adaptabilidad; entre las

especies introducidas como el Ciprés (*Cupressus sempervirens*) con 38 individuos y el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) con 12 individuos tienen una representación significativa, en cambio, entre las especies nativas, sobresalen el Molle (*Schinus molle*) con 79 individuos y la Acacia negra (*Acacia melanoxylon*) con 24 individuos, estas últimas presentan cantidades menores en comparación con las especies introducidas, por otro lado, especies como el Yagual, Acacia morada, Tilo, Cholan y el Fresno tienen una representación mucho más limitada, con menos de 20 individuos cada una, lo que podría indicar restricciones en las condiciones ecológicas o una menor priorización.

10.2.13 Especies arbóreas presentes en la Zona C: Parte Baja

En la parte media del área de estudio se encontraron 22 especies diferentes con un total de 608 individuos en total, distribuidos en 206 árboles en etapa juvenil, 192 árboles en etapa submadura, 208 árboles en etapa madura y 2 árboles en etapa sobremadura (Tabla 5).

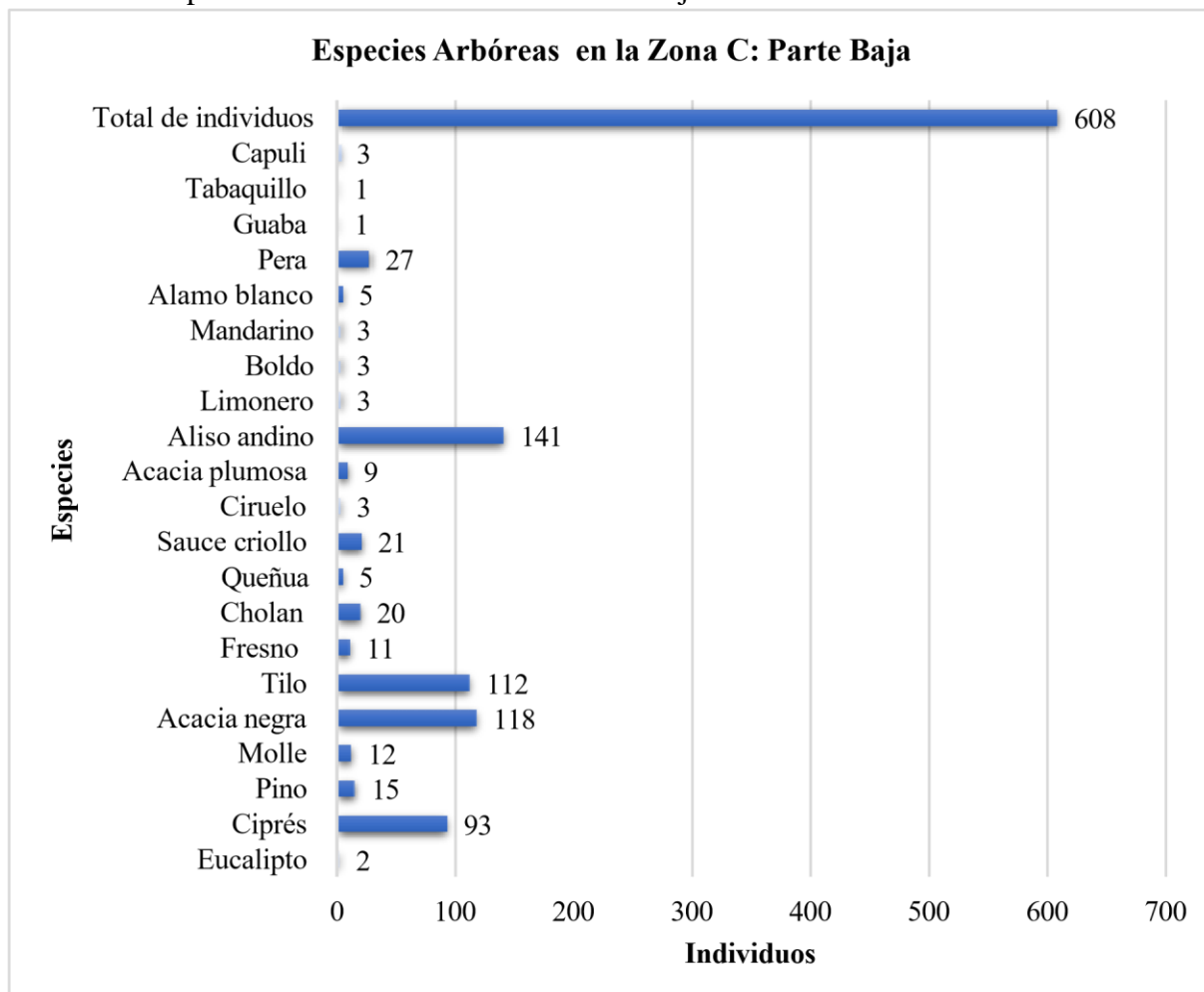
Tabla 5. Especies arbóreas en la Zona C: Parte Baja.

Nombre común	Nombre científico	Etapas de crecimiento				Total de árboles especie ^{por}
		Juvenil	Submadura	Madura	Sobremadura	
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	-	-	-	2	2
Ciprés	<i>Cupressus sempervirens</i>	-	5	88	-	93
Pino	<i>Pinus radiata</i>	-	-	15	-	15
Molle	<i>Schinus molle</i>	-	3	9	-	12
Acacia negra	<i>Acacia melanoxylon</i>	55	56	7	-	118
Tilo	<i>Sambucus mexicana</i>	57	25	30	-	112
Fresno	<i>Fraxinus uhdei</i>	-	10	1	-	11
Cholan	<i>Tecoma stans</i>	16	4	-	-	20
Yagual	<i>Polylepis besseri</i>	5	-	-	-	5
Sauce criollo	<i>Salix humboldtiana</i>	11	6	4	-	21
Ciruelo	<i>Prunus domestica</i>	-	3	-	-	3
Acacia plumosa	<i>Paraserianthes lophantha</i>	-	9	-	-	9
Aliso andino	<i>Alnus acuminata</i>	60	60	21	-	141
Limonero	<i>Citrus limon</i>	-	3	-	-	3
Boldo	<i>Peumus boldus</i>	-	2	1	-	3
Mandarino	<i>Citrus reticulata</i>	-	3	-	-	3
Alamo blanco	<i>Populus alba</i>	-	1	4	-	5
Pera	<i>Pyrus communis</i>	-	2	25	-	27
Guaba	<i>Inga edulis</i>	-	-	1	-	1
Tabaquillo	<i>Solanum mauritianum</i>	1	-	-	-	1

Capuli	<i>Prunus serótina</i>	1	-	2	-	3
Total de individuos		206	192	208	2	608

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024).

Gráfica 3. Especies arbóreas en la Zona C: Parte Baja



Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024).

En la Gráfica 3, la vegetación arbórea en la parte baja del área de estudio muestra una cantidad total de 608 individuos, con una distribución dominada por el Aliso andino (*Alnus acuminata*), especie nativa, que alcanza los 141 individuos, representando la especie más numerosa en esta zona, le siguen Acacia negra (*Acacia melanoxylon*) y Tilo (*Sambucus mexicana*), ambas especies introducidas, con 118 y 112 individuos respectivamente, mostrando una notable presencia, el Ciprés (*Cupressus sempervirens*), también una especie introducida, tiene una representación significativa con 93 individuos, a diferencia de especies como el Capulí (*Prunus serotina*) y el Guaba (*Inga edulis*), ambas nativas, junto con el Tabaquillo, especie introducida, presentan menos de 5 individuos cada una, lo que indica una muy baja presencia, posiblemente atribuible a restricciones ecológicas o agroforestales, otras especies de interés, como el Sauce

criollo (*Salix humboldtiana*), nativa, con 21 individuos, y el Cholan (*Tecoma stans*), también nativa, muestran una representación moderada.

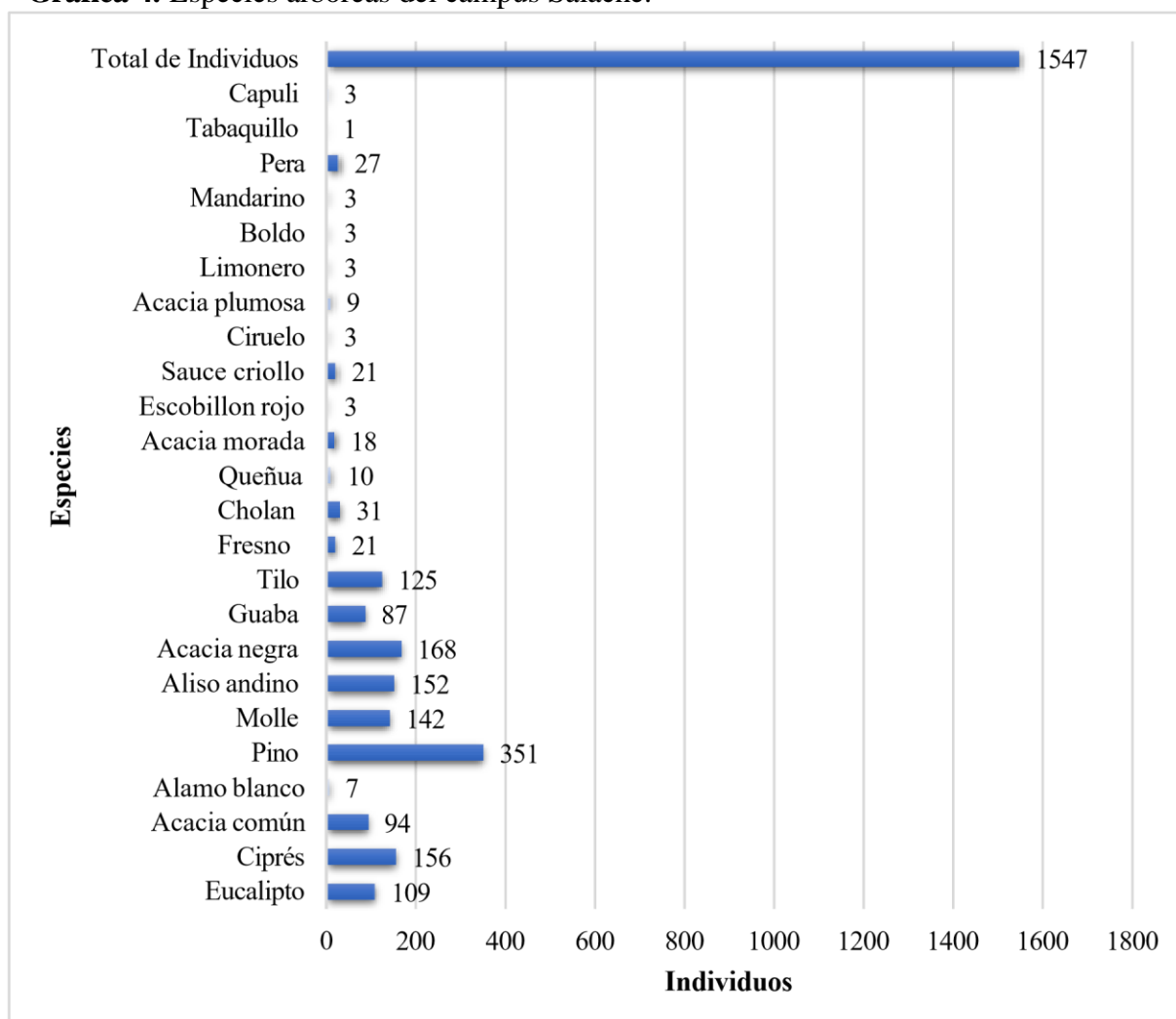
10.2.14 Especies arbóreas del campus Salache

En el área de estudio del presente proyecto se encontraron 24 especies diferentes con un total de 1547 individuos en total, distribuidos en 403 árboles en etapa juvenil, 469 árboles en etapa submadura, 661 árboles en etapa madura y 14 árboles en etapa sobremadura, lo que refleja que en el campus Salache la vegetación arbórea se encuentra dominada por árboles en etapa submadura y madura (Tabla 6).

Tabla 6. Especies arbóreas del campus Salache.

N.	Nombre común	Nombre científico	Etapas de crecimiento				Total de árboles por especie
			Juvenil	Submadura	Madura	Sobremadura	
1	Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	17	37	49	6	109
2	Ciprés	<i>Cupressus sempervirens</i>	33	11	112	-	156
3	Acacia común	<i>Acacia dealbata</i>	7	37	50	-	94
4	Alamo blanco	<i>Populus alba</i>	-	3	4	-	7
5	Pino	<i>Pinus radiata</i>	54	121	175	1	351
6	Molle	<i>Schinus molle</i>	32	38	65	7	142
7	Aliso andino	<i>Alnus acuminata</i>	60	71	21	-	152
8	Acacia negra	<i>Acacia melanoxylon</i>	69	66	33	-	168
9	Guaba	<i>Inga edulis</i>	5	10	72	-	87
10	Tilo	<i>Sambucus mexicana</i>	61	30	34	-	125
11	Fresno	<i>Fraxinus uhdei</i>	10	10	1	-	21
12	Cholan	<i>Tecoma stans</i>	16	4	11	-	31
13	Yagual	<i>Polylepis besseri</i>	5	3	2	-	10
14	Acacia morada	<i>Acacia baileyana</i>	18	-	-	-	18
15	Escobillon rojo	<i>Callistemon citrinus</i>	3	-	-	-	3
16	Sauce criollo	<i>Salix humboldtiana</i>	11	6	4	-	21
17	Ciruelo	<i>Prunus domestica</i>	-	3	-	-	3
18	Acacia plumosa	<i>Paraserianthes lophantha</i>	-	9	-	-	9
19	Limonero	<i>Citrus limon</i>	-	3	-	-	3
20	Boldo	<i>Peumus boldus</i>	-	2	1	-	3
21	Mandarino	<i>Citrus reticulata</i>	-	3	-	-	3
22	Pera	<i>Pyrus communis</i>	-	2	25	-	27
23	Tabaquillo	<i>Solanum mauritianum</i>	1	-	-	-	1
24	Capuli	<i>Prunus serótina</i>	1	-	2	-	3
Total de Individuos			403	469	661	14	1,547

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024).

Gráfica 4. Especies arbóreas del campus Salache.

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

El Gráfico 4 representa la composición arbórea del campus Salache, el cual, muestra un total de 1547 individuos distribuidos entre 24 especies; donde predominan especies introducidas como el Pino (*Pinus radiata*), con 351 individuos, lo que representa la especie más abundante, probablemente debido a su uso en reforestaciones por su rápido crecimiento y adaptabilidad, le siguen la Acacia negra (*Acacia melanoxylon*) con 168 individuos y el Ciprés (*Cupressus sempervirens*) con 156 individuos, ambas especies introducidas y utilizadas comúnmente en programas de manejo forestal.

Entre las especies nativas, destaca el Aliso andino (*Alnus acuminata*) con 152 individuos, reflejando su importancia en la restauración y conservación de suelos, por otro lado, entre las especies introducidas como el Molle (*Schinus molle*), con 142 individuos y el Tilo (*Sambucus mexicana*), con 125 individuos, ambos muestran una adaptación notable en el área, asimismo, especies como el Capulí, el Tabaquillo, el Boldo, el Limonero, el Mandarino y el Ciruelo, muestran una significativa baja presencia, con menos de 10 individuos cada una lo que refleja

sus limitaciones ecológicas en su aprovechamiento ambiental especialmente en actividades agroforestales; la predominancia de especies introducidas resalta la necesidad de implementar estrategias que promuevan la restauración ecológica mediante el incremento de la reforestación con especies nativas para mejorar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos del área y, por ende, su capacidad de secuestro de carbono.

10.2.15 Índice de valor de Importancia (IVI)

El Índice de Valor de Importancia se realizó a partir del cálculo del área basal de las especies en base al Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) medido en los individuos, por lo cual, se obtuvieron los siguientes resultados:

10.2.16 Área Basal de las especies arbóreas

La vegetación arbórea presentó un área basal total de 117,623 m², distribuida entre las 24 especies, dentro de 81,19 hectáreas, equivalente a 811.900 m², correspondientes al área total del campus (Tabla 7).

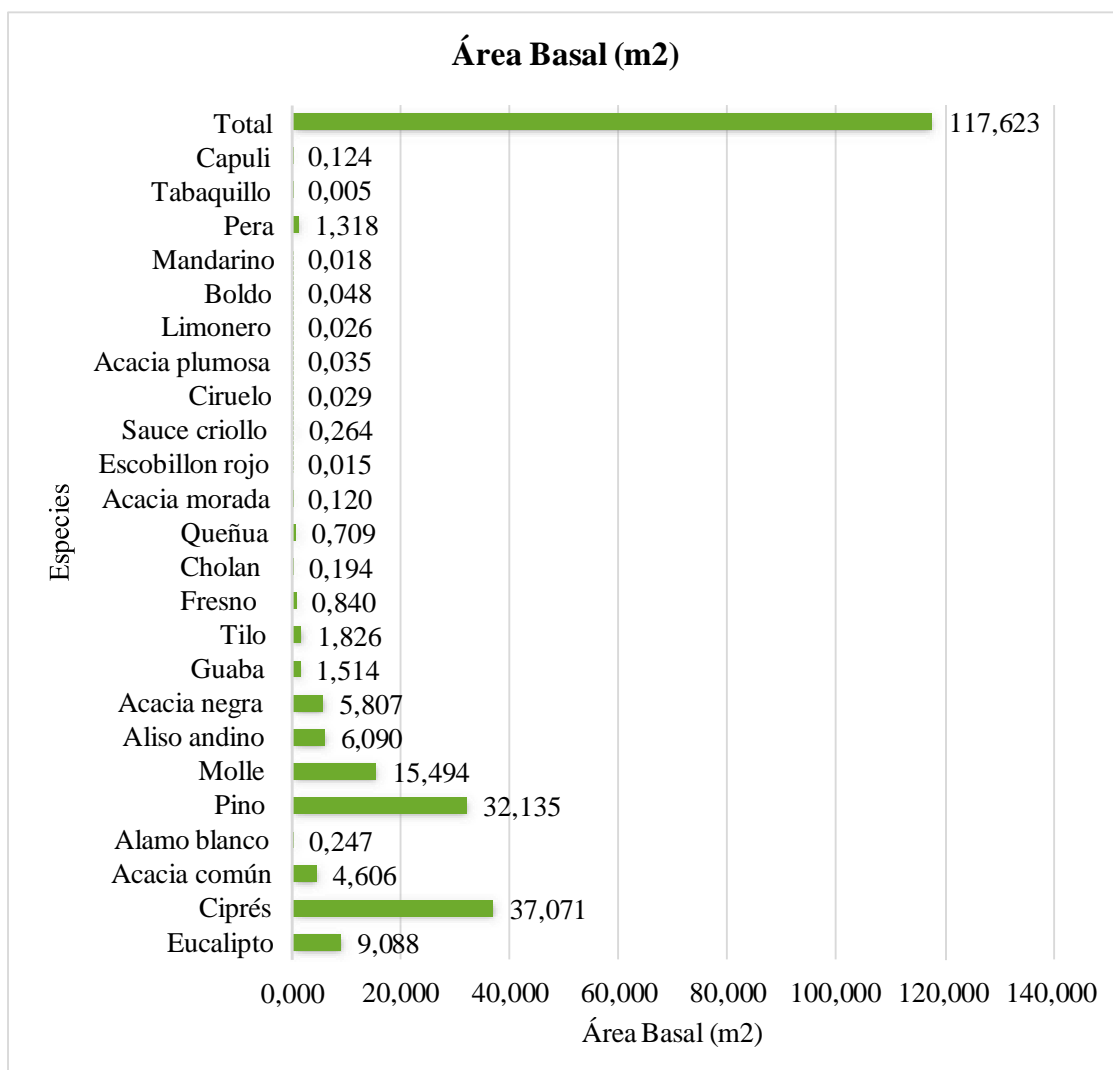
Tabla 7. Área Basal de las especies.

Nombre común	Nombre científico	Individuos	Área Basal (m ²)	Área Basal (%)
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	109	9,088	7.726
Ciprés	<i>Cupressus sempervirens</i>	156	37,071	31.517
Acacia común	<i>Acacia dealbata</i>	94	4,606	3.916
Álamo blanco	<i>Populus alba</i>	7	0,247	0.210
Pino	<i>Pinus radiata</i>	351	32,135	27.320
Molle	<i>Schinus molle</i>	142	15,494	13.172
Aliso andino	<i>Alnus acuminata</i>	152	6,090	5.178
Acacia negra	<i>Acacia melanoxylon</i>	168	5,807	4.937
Guaba	<i>Inga edulis</i>	87	1,514	1.287
Tilo	<i>Sambucus mexicana</i>	125	1,826	1.553
Fresno	<i>Fraxinus uhdei</i>	21	0,840	0.714
Cholan	<i>Tecoma stans</i>	31	0,194	0.165
Yagual	<i>Polylepis besseri</i>	10	0,709	0.603
Acacia morada	<i>Acacia baileyana</i>	18	0,120	0.102
Escobillón rojo	<i>Callistemon citrinus</i>	3	0,015	0.013
Sauce criollo	<i>Salix humboldtiana</i>	21	0,264	0.225
Ciruelo	<i>Prunus domestica</i>	3	0,029	0.025
Acacia plumosa	<i>Paraserianthes lophantha</i>	9	0,035	0.029
Limonero	<i>Citrus limon</i>	3	0,026	0.022
Boldo	<i>Peumus boldus</i>	3	0,048	0.041
Mandarino	<i>Citrus reticulata</i>	3	0,018	0.015

Pera	<i>Pyrus communis</i>	27	1,318	1.120
Tabaquillo	<i>Solanum mauritianum</i>	1	0,005	0.004
Capuli	<i>Prunus serotina</i>	3	0,124	0.105
Total		1,547	117,623	100.000

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

Gráfica 5. Área Basal de las especies.



Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

La gráfica 5 del área basal refleja una distribución total de 117,623 m² entre las especies arbóreas presentes en el campus; donde predominan el Ciprés (*Cupressus sempervirens*) y el Pino (*Pinus radiata*), con áreas basales de 37,071 m² (31,5%) y 32,135 m² (27,3%) respectivamente, lo que evidencia su contribución significativa a la estructura forestal, otras especies destacadas incluyen el Molle (*Schinus molle*), con 15,494 m² (13,2%), y el Aliso andino (*Alnus acuminata*), con 6,090 m² (5,2%), que representa una de las especies nativas con mayor presencia en términos de área basal.

A diferencia de especies como el Tabaquillo (*Solanum mammosum*), el Escobillón rojo (*Callistemon citrinus*) y el Boldo (*Peumus boldus*) presentan áreas basales menores a 0,05 m², lo que indica una representación mínima en la composición estructural arbórea, por lo tanto, la dominancia de especies en el pino y el ciprés, representan juntas más del 50% del área basal total, destacando la influencia de estas especies en la estructura forestal del campus, reflejando su capacidad de adaptación a las condiciones climáticas y de manejo forestal.

10.2.17 Dominancia de las especies arbóreas

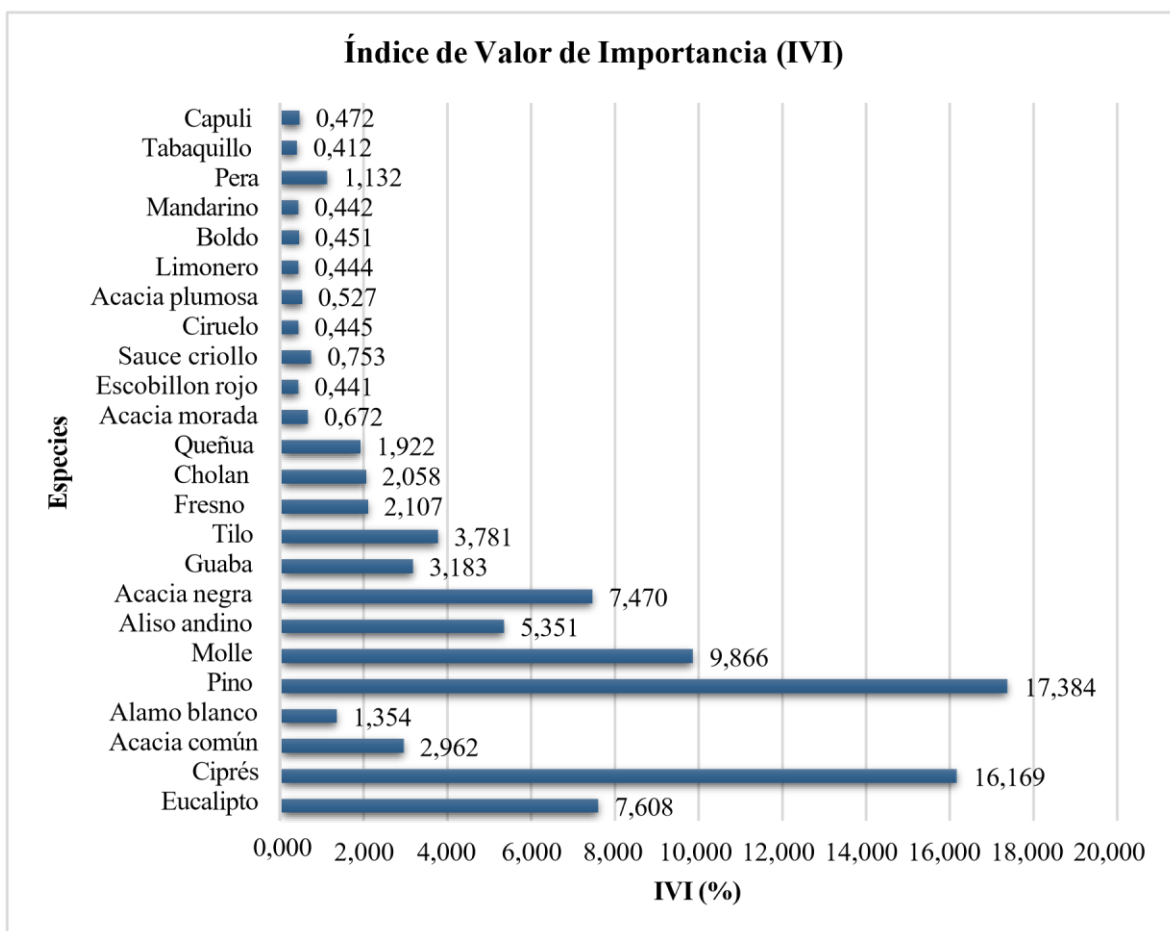
En la Tabla 8 se observa que las cifras de IVI más elevadas corresponden a especies que presentan mayor relevancia ecológica dentro de la comunidad, en este caso, el Pino (*Pinus radiata*) alcanza el IVI más alto (17,384), seguido por el Ciprés (*Cupressus sempervirens*) con 16,169, indican que ambas especies, además de estar presentes de forma significativa en el área, contribuyen notablemente a la cobertura arbórea y mantienen una abundancia relevante en comparación con las demás, otras especies con valores de IVI destacadas son el Molle (*Schinus molle*) con 9,866, la Acacia negra (*Acacia melanoxylon*) con 10,79 y el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) con 7,608; sus IVI intermedios sugieren que, si bien no son tan dominantes como el Pino o el Ciprés, su presencia es considerable en la estructura del ecosistema, por el contrario, la mayoría de las demás especies presentan valores de IVI por debajo de 5, lo que indica una presencia menor en la composición arbórea, ya sea por su baja abundancia, distribución o menor área ocupada dentro de la comunidad forestal.

Tabla 8. Índice de Valor de Importancia (IVI).

<i>Especie</i>	<i>Densidad absoluta (D) (individuos/m²)</i>	<i>Densidad relativa (Dr) (%)</i>	<i>Dominancia relativa (DmR) (%)</i>	<i>Frecuencia absoluta (fa) (%)</i>	<i>Frecuencia relativa (fr) (%)</i>	<i>IVI (%)</i>
Eucalipto <i>Eucalyptus globulus</i>	0,0001343	4.385	7.726	300.000	10.714	7.608
Ciprés <i>Cupressus sempervirens</i>	0,0001921	6.275	31.517	300.000	10.714	16.169
Acacia común <i>Acacia dealbata</i>	0,0001158	3.781	3.916	33.333	1.190	2.962
Alamo blanco <i>Populus alba</i>	0,0000086	0.282	0.210	100.000	3.571	1.354
Pino <i>Pinus radiata</i>	0,0004323	14.119	27.320	300.000	10.714	17.384

Molle <i>Schinus molle</i>	0,0001749	5.712	13.172	300.000	10.714	9.866
Aliso andino <i>Alnus acuminata</i>	0,0001872	6.114	5.178	133.333	4.762	5.351
Acacia negra <i>Acacia melanoxylon</i>	0,0002069	6.758	4.937	300.000	10.714	7.470
Guaba <i>Inga edulis</i>	0,0001072	3.500	1.287	133.333	4.762	3.183
Tilo <i>Sambucus mexicana</i>	0,0001540	5.028	1.553	133.333	4.762	3.781
Fresno <i>Fraxinus uhdei</i>	0,0000259	0.845	0.714	133.333	4.762	2.107
Cholan <i>Tecoma stans</i>	0,0000382	1.247	0.165	133.333	4.762	2.058
Yagual <i>Polylepis besseri</i>	0,0000123	0.402	0.603	133.333	4.762	1.922
Acacia morada <i>Acacia baileyana</i>	0,0000222	0.724	0.102	33.333	1.190	0.672
Escobillón rojo <i>Callistemon citrinus</i>	0,0000037	0.121	0.013	33.333	1.190	0.441
Sauce criollo <i>Salix humboldtiana</i>	0,0000259	0.845	0.225	33.333	1.190	0.753
Ciruelo <i>Prunus domestica</i>	0,0000037	0.121	0.025	33.333	1.190	0.445
Acacia plumosa <i>Paraserianthes lophantha</i>	0,0000111	0.362	0.029	33.333	1.190	0.527
Limonero <i>Citrus limon</i>	0,0000037	0.121	0.022	33.333	1.190	0.444
Boldo <i>Peumus boldus</i>	0,0000037	0.121	0.041	33.333	1.190	0.451
Mandarino <i>Citrus reticulata</i>	0,0000037	0.121	0.015	33.333	1.190	0.442
Pera <i>Pyrus communis</i>	0,0000333	1.086	1.120	33.333	1.190	1.132
Tabaquillo <i>Solanum mauritianum</i>	0,0000012	0.040	0.004	33.333	1.190	0.412
Capulí	0,0000037	0.121	0.105	33.333	1.190	0.472

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

Gráfica 6. Índice de Valor de Importancia (IVI).

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

La gráfica 6 del Índice de Valor de Importancia (IVI) refleja la dominancia relativa de las especies arbóreas en el campus Salache, destacando al Pino (*Pinus radiata*) con el IVI más alto (17.384%), seguido por el Ciprés (*Cupressus sempervirens*) (16.169%) y el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) (7.608%), estas tres especies, contribuyen significativamente a la estructura y composición del bosque, representando un alto porcentaje de biomasa, frecuencia, y cobertura.

Entre las especies nativas, el Molle (*Schinus molle*) (9.866%) y el Aliso andino (*Alnus acuminata*) (5.351%) tienen valores destacados, lo que refleja su relevancia en el ecosistema local, tanto en términos de cobertura como de densidad, en cambio, especies como el Capulí (*Prunus serotina*), el Tabaquillo (*Solanum mammosum*), y el Escobillón rojo (*Callistemon citrinus*) presentan IVI inferiores al 1%, lo que indica una baja representatividad en la composición forestal.

10.2.18 Especies arbóreas dominantes del campus Salache

Para la evaluación del potencial de secuestro de carbono en el campus, se consideraron las 10 especies dominantes conforme a su abundancia y porcentajes altos del IVI, las cuales son: Pino (*Pinus radiata*), Ciprés (*Cupressus sempervirens*), Molle (*Schinus molle*), Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), Acacia negra (*Acacia melanoxylon*), Aliso andino (*Alnus acuminata*), Tilo (*Sambucus mexicana*), Guaba (*Inga edulis*), Acacia común (*Acacia dealbata*) y Fresno (*Fraxinus uhdei*), estas especies, al destacar en biomasa y cobertura, representan un aporte significativo en la capacidad del ecosistema para capturar carbono, lo que las posiciona como fundamentales en las estrategias de reforestación en términos de mitigación al cambio climático.

10.2.19 Pino (*Pinus radiata*)


Pino	
	
Nombre Científico:	<i>Pinus radiata</i>
Género:	<i>Pinus</i>
Familia:	Pinaceae
Orden:	Pinales
Tipo de especie:	Introducida- Originario de Europa y Asia
Número de individuos:	351

Ilustración 1. Pino (*Pinus radiata*)

El Pino (*Pinus radiata*) es una conífera de la familia Pinaceae, originaria de la costa central de California en EE.UU., sin embargo, gracias a su notable capacidad de adaptación y rápido crecimiento, ha sido introducida en numerosos países como Chile, Nueva Zelanda, Australia y España; donde se cultiva ampliamente en plantaciones comerciales, puede alcanzar una altura de entre 30 y 40 metros en condiciones óptimas, con un diámetro a la altura del pecho (DAP) de hasta 1 metro en ejemplares maduros, su corteza es gruesa y de color café oscuro, presenta profundos surcos que le aportan cierta resistencia a incendios moderados (Morales, 2023).

Las hojas son aciculares y están dispuestas en grupos de tres por una vaina basal, diferenciándose de otras especies de pinos donde las acículas se agrupan en pares o en fascículos de cinco, estas agujas miden entre 8 y 15 cm de longitud, exhiben un color verde brillante y poseen una capa cerosa que ayuda a reducir la pérdida de agua por evapotranspiración, la reproducción se produce a través de piñas o conos, los conos masculinos son pequeños, cilíndricos y de color amarillento, ubicados en las partes bajas de los brotes jóvenes; mientras que los conos femeninos son más grandes, ovoides y de color verde cuando están inmaduros, volviéndose de tono marrón leñoso al madurar, estos conos permanecen en el árbol por largos períodos y pueden abrirse de forma tardía o tras la exposición a altas temperaturas, dispersando semillas que favorecen su propagación (Cajilema & Fernández, 2023).

El Pino (*Pinus radiata*) se adapta mejor a climas templados con inviernos suaves y veranos moderadamente secos, tolerando una amplia gama de suelos siempre que cuenten con un buen drenaje, prefiere suelos ligeramente ácidos, pero puede crecer en sustratos de distinta textura y fertilidad, mostrando gran versatilidad en plantaciones forestales, sus raíces corresponden a un sistema radicular que combina raíces pivotantes con un importante desarrollo en los extremos, lo que le permite obtener agua y nutrientes tanto de capas profundas como superficiales, contribuyendo a su resistencia frente a sequías moderadas (Arroyave Maya et al., 2014).

Desde el punto de vista económico y silvícola, *Pinus radiata* es una de las especies más utilizadas en plantaciones comerciales debido a su rápido crecimiento y a la buena calidad de su madera para la industria maderera, la elaboración de celulosa y la fabricación de tableros, en el ámbito ecológico, puede conformar bosques monoespecíficos, aquellos en los que predomina una única especie de árbol o planta, que compiten con la flora nativa en zonas donde ha sido introducido, motivo por el cual se le considera, en algunos casos, una especie invasora, aun así, en plantaciones gestionadas responsablemente, se destaca en la producción sostenible de madera y en la reforestación de áreas degradadas, colaborando al secuestro de carbono y a la

conservación de suelos en pendiente cuando se maneja de manera adecuada (Arroyave Maya et al., 2014).

10.2.20 Ciprés (*Cupressus sempervirens*)


Ciprés	
	
Nombre Científico:	<i>Cupressus sempervirens</i>
Género:	<i>Cupressus</i>
Familia:	Cupressaceae
Orden:	Cupressales
Tipo de especie:	Introducida- Originario del Mediterráneo
Número de individuos:	156

Ilustración 2. Ciprés (*Cupressus sempervirens*).

El Ciprés (*Cupressus sempervirens*) es una conífera perenne perteneciente a la familia Cupressaceae, ampliamente distribuida en la región mediterránea, ampliamente utilizada en paisajismo y silvicultura, es una especie de crecimiento moderado a rápido, alcanzando alturas de 25 a 35 metros y puede superar los 500 años en condiciones óptimas, su morfología se caracteriza por un porte columnar o piramidal, con ramas densas y ascendentes que le confieren su forma típica, el tronco es recto y cilíndrico, con una corteza delgada de color marrón grisáceo, que con la edad desarrolla fisuras longitudinales (Espinoza & López, 2023).

Las hojas son escuamiformes, de color verde oscuro y dispuestas de manera opuesta en las ramillas, con una longitud aproximada de 1 a 2 mm, estas hojas poseen un olor característico con una cutícula gruesa y cerosa, que actúa como barrera contra la desecación en climas áridos y semiáridos; la densidad del follaje crea un microclima interno, disminuyendo la evaporación y conservando la humedad en la planta; su sistema radicular es profundo y extendido, lo que le permite resistir sequías prolongadas y anclar fuertemente el árbol en suelos susceptibles a la erosión, deslizamientos y pérdida de nutrientes (Arroyave Maya et al., 2014).

La reproducción del *Cupressus sempervirens* se lleva a cabo a través de estróbilos leñosos o conos, de forma globosa a ovalada, con un tamaño de 2 a 4 cm de diámetro, estos conos son monoicos, es decir, presentan estructuras reproductivas masculinas y femeninas en un mismo individuo, los conos masculinos son pequeños y cilíndricos; liberando grandes cantidades de polen anemófilo durante la primavera, mientras que los conos femeninos maduran en uno o dos años; adquiriendo una tonalidad marrón oscura antes de liberar sus semillas, las cuales son dispersadas principalmente por el viento (dispersión anemócora) (Morales, 2023),,

En términos ecológicos, el *Cupressus sempervirens* es una especie altamente adaptable, tolerando suelos pobres, pedregosos y calcáreos, siempre que disponga de un drenaje adecuado, su distribución natural abarca regiones de clima mediterráneo, con inviernos suaves y veranos secos, aunque puede resistir temperaturas extremas de hasta -20°C , es una especie resistente a la sequía, gracias a su bajo índice de transpiración y a la disposición compacta de su follaje, lo que minimiza la pérdida de agua, sin embargo, es sensible a la humedad excesiva, lo que puede contraer infecciones fúngicas como el cancro del ciprés (*Seiridium cardinale*), una de las principales amenazas sanitarias que afectan su cultivo (Arroyave Maya et al., 2014).

Desde el punto de vista silvicultural y ornamental, el *Cupressus sempervirens* es ampliamente utilizado en alineaciones de caminos, parques, cementerios y jardines, debido a su porte elegante, su madera es densa, durable y resistente a la humedad y los insectos, por lo que es usado en ebanistería, construcción y fabricación de mobiliario, su alto contenido de resinas le confiere propiedades antifúngicas y repelentes, aumentando su durabilidad (Morales, 2023).

El *Cupressus sempervirens* también cumple un rol importante en la protección contra la erosión y la conservación de suelos, formando barreras naturales contra el viento y mejorando la estabilidad del terreno, su capacidad para fijar carbono atmosférico y su resistencia a condiciones adversas lo convierten en una especie de interés en programas de reforestación y mitigación del cambio climático, especialmente en regiones áridas y semiáridas (Arroyave Maya et al., 2014).

10.2.21 Molle (*Schinus molle*)


Molle	
	
Nombre Científico:	<i>Schinus molle</i>
Género:	<i>Schinus</i>
Familia:	Anacardiaceae
Orden:	Sapindales
Tipo de especie:	Nativa
Número de individuos:	142

Ilustración 3. Molle (Schinus molle).

El Molle (*Schinus molle*), también conocido como falso pimentero o árbol de la pimienta, es una especie arbórea perenne perteneciente a la familia *Anacardiaceae* es originario de Sudamérica, específicamente de las regiones andinas de Ecuador, Perú, Bolivia, Chile y Argentina; donde prospera en altitudes que van desde los 500 hasta los 3.500 msnm y se adapta con facilidad a climas áridos o semiáridos (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2012).

El *Schinus molle* puede alcanzar una altura de entre 10 y 15 metros, aunque en condiciones favorables puede superar los 20 metros, presenta un tronco recto o poco curvado, con una corteza rugosa y fisurada de color gris oscuro a marrón, su copa es ancha y extendida, con ramas

colgantes que le confieren un aspecto elegante y proporciona abundante sombra, las hojas son compuestas imparipinnadas, de 20 a 40 cm de longitud, con folíolos lanceolados y de borde entero o ligeramente aserrado, estas hojas despiden un aroma característico al ser frotadas, debido a la presencia de aceites esenciales con propiedades repelentes y medicinales (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2012).

Las flores del molle son pequeñas, de color blanco a amarillo verdoso, y se agrupan en panículas colgantes de 10 a 15 cm de largo, esta especie es dioica, por lo que las flores masculinas y femeninas se encuentran en árboles separados, los frutos son drupas globosas, un fruto carnoso que contiene una semilla dura en su interior (endocarpo leñoso), y la palabra globosa describe su forma, que es redondeada o casi esférica, de 5 a 7 mm de diámetro, que al madurar adquieren un color rojo rosado brillante, estos frutos, comúnmente conocidos como pimienta rosada, contienen una semilla dura en su interior y son dispersados principalmente por aves (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2012).

El molle es altamente adaptable a suelos pobres, arenosos o pedregosos, y presenta una gran resistencia a la sequía prolongada y a temperaturas moderadamente bajas, de hasta -5°C , su sistema radicular profundo le permite extraer agua de las capas más profundas del suelo, lo que contribuye a su capacidad para estabilizar terrenos y prevenir la erosión (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2012).

Desde un punto de vista ecológico, el molle es una especie de gran importancia en la conservación de suelos y la protección de cuencas hidrográficas proporciona sombra y refugio para la fauna silvestre, incluyendo aves, insectos polinizadores y mamíferos, su denso follaje contribuye a la formación de materia orgánica en el suelo, mejorando su estructura y fertilidad con el tiempo (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2012).

En cuanto a sus usos, el molle tiene aplicaciones ornamentales, medicinales y maderables, es frecuentemente cultivado en jardines y parques debido a su belleza y resistencia, su madera es utilizada en la fabricación de herramientas, postes y leña, debido a su dureza y durabilidad, los aceites esenciales extraídos de sus hojas y frutos tienen propiedades antibacterianas, antifúngicas y antiinflamatorias, mientras que los frutos secos son utilizados como especia en la gastronomía, aunque en grandes cantidades pueden resultar tóxicos (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2012).

El *Schinus molle* es una especie de gran relevancia para la restauración ecológica, especialmente en regiones áridas, debido a su resistencia a condiciones adversas y su amplia distribución lo

convierten en un recurso invaluable para el manejo sostenible de ecosistemas y la mitigación de los efectos del cambio climático (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2012).

10.2.22 Eucalipto (*Eucalyptus globulus*)

Eucalipto	
	
Nombre Científico:	<i>Eucalyptus globulus</i>
Género:	<i>Eucalyptus</i>
Familia:	Myrtaceae
Orden:	Myrtales
Tipo de especie:	Introducida - Originario de Australia.
Número de individuos:	109

Ilustración 4. Eucalipto (*Eucalyptus globulus*).

El Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), conocido también como eucalipto azul o eucalipto común, es un árbol perenne perteneciente a la familia Myrtaceae, originario de Australia y Tasmania, pero ampliamente cultivado a nivel mundial debido a su rápido crecimiento, adaptabilidad y múltiples usos, es una especie de gran porte, capaz de alcanzar alturas de 30 a 55 metros en

condiciones óptimas, con un tronco recto y cilíndrico de diámetro significativo, llegando hasta 2 metros a la altura del pecho (DAP), su corteza es lisa y de tonos grisáceos o blanquecinos, desprendiéndose en largas tiras que dejan al descubierto una capa subyacente de tonalidades verdes o amarillentas (Arroyave Maya et al., 2014).

El follaje del *Eucalyptus globulus* varía según la etapa de desarrollo del árbol, las hojas juveniles son anchas, ovaladas y de color verde azulado, mientras que las hojas adultas son lanceoladas, alternas y de color verde oscuro brillante, con bordes enteros, estas hojas contienen glándulas ricas en aceites esenciales, especialmente cineol, que le otorgan propiedades medicinales y un característico aroma, las flores, son axilares y solitarias, presentan un opérculo leñoso que cubre numerosos estambres de color blanco o amarillo pálido, los frutos son cápsulas leñosas de forma cónica o hemisférica, de 1 a 2 cm de diámetro, que liberan pequeñas semillas dispersadas por el viento (Morales, 2023).

Esta especie es extremadamente adaptable a una amplia variedad de climas y suelos, se desarrolla bien en regiones de clima templado y subtropical, tolerando temperaturas extremas y sequías moderadas, prefiere suelos profundos y bien drenados, aunque también puede prosperar en terrenos pobres y pedregosos, sus raíces corresponden a un sistema radicular profundo y extensivo, lo que le permite absorber agua de capas profundas del suelo, aunque esta característica puede reducir la disponibilidad hídrica para otras especies vegetales (Cajilema & Fernández, 2023).

El *Eucalyptus globulus* tiene una relevancia destacada en la industria forestal, su madera, de textura dura y alta densidad, es utilizada para la fabricación de papel y celulosa, así como en la construcción, carpintería y producción de carbón vegetal, las hojas son una fuente importante de aceites esenciales, ampliamente utilizados en la industria farmacéutica y cosmética por sus propiedades antibacterianas, antiinflamatorias y expectorantes (Arroyave Maya et al., 2014).

Desde un punto de vista ecológico, el *Eucalyptus globulus*, por un lado, es una herramienta útil en la restauración de suelos degradados y como especie pionera en áreas erosionadas, por otro lado, su alta demanda hídrica, su capacidad alelopática (liberación de compuestos químicos que inhiben el crecimiento de otras especies) y su inflamabilidad representan desafíos significativos en ecosistemas donde ha sido introducido, su presencia puede llevar a una reducción de la biodiversidad y cambios en la dinámica del ecosistema, especialmente en áreas donde reemplaza especies nativas (Morales, 2023).

El Eucalipto es una especie de gran valor económico y ecológico cuando se maneja adecuadamente, sin embargo, debido a sus potenciales impactos negativos en los ecosistemas locales, su cultivo debe ser cuidadosamente planificado y monitoreado, especialmente en proyectos de reforestación fuera de su rango de distribución natural para garantizar un balance adecuado entre productividad y conservación ecológica (Arroyave Maya et al., 2014).

10.2.23 Acacia negra (*Acacia melanoxylon*)


Acacia negra	
	
Nombre Científico:	<i>Acacia melanoxylon</i>
Género:	<i>Acacia</i>
Familia:	Fabaceae
Orden:	Fabales
Tipo de especie:	Introducida - Originaria de Australia
Número de individuos:	168

Ilustración 5. *Acacia negra (Acacia melanoxylon)*.

La *Acacia negra (Acacia melanoxylon)* es un árbol perenne perteneciente a la familia Fabaceae, nativo del sureste de Australia y Tasmania, pero ampliamente introducido en diversas regiones del mundo debido a su rápido crecimiento y versatilidad, en condiciones óptimas, esta especie puede alcanzar alturas de 15 a 30 metros, con un tronco recto y cilíndrico que puede llegar a un

diámetro a la altura del pecho (DAP) de 1 metro en ejemplares maduros, su corteza es oscura, rugosa y profundamente fisurada, lo que le confiere su nombre común de "acacia negra", en su hábitat natural, presenta un buen porte y una copa densa que le permite ofrecer sombra en entornos abiertos (Cajilema & Fernández, 2023).

En lugar de hojas verdaderas, *Acacia melanoxylon* desarrolla filodios, estructuras aplanadas que reemplazan a las hojas tradicionales, estos filodios son lanceolados, miden entre 6 y 15 cm de longitud, y presentan un color verde oscuro con nervaduras prominentes, características adaptadas para reducir la transpiración en climas secos; las flores son pequeñas, de color amarillo pálido o crema, y se agrupan en inflorescencias globulares ubicadas en las axilas de los filodios, su floración ocurre a fines del invierno o principios de la primavera, atrayendo insectos polinizadores, los frutos son vainas aplanadas y lineales, de 6 a 15 cm de longitud, que al madurar adquieren un color marrón oscuro, estas vainas contienen semillas elípticas rodeadas por un arilo carnoso de color rojizo o naranja, que facilita su dispersión por aves y otros animales (Morales, 2023).

La Acacia negra es una especie muy adaptable, que prospera en una amplia gama de condiciones ambientales, prefiere climas templados y húmedos, aunque tolera sequías moderadas y suelos pobres, puede crecer desde el nivel del mar hasta altitudes de 1,200 metros, desarrollándose en suelos arenosos, arcillosos o ligeramente ácidos, siempre que tengan un buen drenaje, su sistema radicular profundo no solo le permite acceder a recursos hídricos en capas inferiores del suelo, sino que también contribuye a la estabilización del terreno y la prevención de la erosión (Arroyave Maya et al., 2014).

Desde el punto de vista ecológico, *Acacia melanoxylon* es una especie destacada en la restauración de suelos degradados, como miembro de la familia Fabaceae, tiene la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico con bacterias del género *Rhizobium*, mejorando la fertilidad del suelo y facilitando el establecimiento de otras especies vegetales, sin embargo, en regiones donde ha sido introducida, puede comportarse como una especie invasora, compitiendo con la vegetación nativa y alterando la dinámica de los ecosistemas locales (Morales, 2023).

En la industria maderera, la *Acacia melanoxylon* es altamente valorada por su madera densa, de grano fino y alta durabilidad, que presenta tonalidades que varían entre marrón claro y marrón oscuro, con vetas decorativas rojizas o negras, además, su corteza es rica en taninos, utilizados en la industria del curtido de pieles, es una especie de gran importancia económica y ecológica, gracias a su adaptabilidad que la convierte en un recurso valioso, en el que su manejo sostenible

es fundamental en regiones donde puede volverse invasora, garantizando así un equilibrio entre los beneficios económicos y la conservación de la biodiversidad (Arroyave Maya et al., 2014).

10.2.24 Aliso andino (*Alnus acuminata*)

Aliso andino	
	
Nombre Científico:	<i>Alnus acuminata</i>
Género:	<i>Alnus</i>
Familia:	Betulaceae
Orden:	Fagales
Tipo de especie:	Nativa
Número de individuos:	152

Ilustración 6. Aliso andino (*Alnus acuminata*).

El Aliso andino (*Alnus acuminata*) es una especie arbórea perteneciente a la familia Betulaceae, ampliamente distribuida en las regiones montañosas de América del Sur, desde México hasta Argentina, es una especie de crecimiento rápido y con una longevidad promedio entre 50 y 70 años, adaptada a climas templados y húmedos de alta montaña, en condiciones óptimas, puede alcanzar alturas de 20 a 30 metros, con un tronco recto y cilíndrico de hasta 1 metro de diámetro a la altura del pecho (DAP), su corteza es de color gris oscuro, con fisuras longitudinales

marcadas, lo que le confiere un aspecto rugoso distintivo en ejemplares maduros (Cajilema & Fernández, 2023).

Las hojas del *Alnus acuminata* son simples, alternas y caducas, con forma ovada o elíptica, de bordes aserrados y una longitud de 5 a 12 cm, su color varía de verde brillante en el haz a un tono más pálido en el envés, donde se observan nervaduras prominentes, estas hojas son una fuente importante de materia orgánica para el suelo, ya que se descomponen rápidamente, enriqueciendo el entorno con nitrógeno y otros nutrientes la reproducción se realiza a través de amentos, son estructuras florales con forma cilíndrica, alargada, y delgada, los amentos masculinos son cilíndricos, colgantes y de color amarillento, mientras que los femeninos son más cortos y agrupados, desarrollándose en pequeños conos leñosos de 1 a 2 cm de longitud, estos conos contienen semillas aladas que se dispersan principalmente por el viento, permitiendo la colonización eficiente de nuevos terrenos, especialmente en suelos degradados (Morales, 2023).

El Aliso andino prospera en altitudes que van desde los 1,500 hasta los 3,500 metros sobre el nivel del mar, en climas con temperaturas moderadas y precipitaciones anuales superiores a los 800 mm., prefiere suelos profundos, bien drenados y ricos en materia orgánica, aunque también es capaz de crecer en terrenos erosionados o de baja fertilidad, su sistema radicular es robusto y se asocia con bacterias fijadoras de nitrógeno del género *Frankia*, lo que le permite enriquecer el suelo con este nutriente esencial y mejorar las condiciones para otras especies vegetales (Arroyave Maya et al., 2014).

Desde el punto de vista ecológico, el *Alnus acuminata* es destacada en la conservación de cuencas hidrográficas y la estabilización de suelos en pendientes, previniendo la erosión y mejorando la infiltración del agua, además, su rápido crecimiento y su capacidad para fijar nitrógeno lo convierten en una especie clave en proyectos de reforestación y restauración ecológica, especialmente en zonas de montaña afectadas por actividades humanas o desastres naturales (Morales, 2023).

La madera del Aliso andino es de color claro, liviana y fácil de trabajar, utilizada en la fabricación de muebles, paneles y productos artesanales, sin embargo, debido a su relativa debilidad estructural, tiene aplicaciones limitadas en construcción pesada, además, su corteza y hojas tienen usos medicinales tradicionales en comunidades locales, donde se emplean para tratar infecciones y heridas debido a sus propiedades antiinflamatorias y cicatrizantes, es una especie estratégica en la restauración de ecosistemas montañosos, gracias a su rápido crecimiento, capacidad para enriquecer suelos y resistencia a condiciones adversas, su valor

ecológico y funcional lo convierte en un recurso primordial para la conservación ambiental y el manejo sostenible de los paisajes andinos (Arroyave Maya et al., 2014).

10.2.25 Tilo (*Sambucus mexicana*)


Tilo	
	
Nombre Científico:	<i>Sambucus mexicana</i>
Género:	<i>Sambucus</i>
Familia:	Adoxaceae
Orden:	Dipsacales
Tipo de especie:	Introducida - Originario de América del Norte y Centroamérica
Número de individuos:	125

Ilustración 7. Tilo (Sambucus mexicana).

El Tilo (*Sambucus mexicana*), conocido también como saúco mexicano, es un árbol caducifolio perteneciente a la familia Adoxaceae, ampliamente distribuido en las regiones montañosas de América Central y del Norte, desde México hasta el norte de Sudamérica, es una especie de rápido crecimiento y en condiciones normales, se estima que puede vivir entre 30 y 60 años, puede alcanzar alturas de 6 a 15 metros, con un tronco recto o algo ramificado de hasta 40 cm de diámetro a la altura del pecho (DAP), en el que, su corteza es rugosa y de color gris pardo, con fisuras longitudinales que se hacen más pronunciadas con la edad (Espinoza & López, 2023).

Las hojas del *Sambucus mexicana* son compuestas, imparipinnadas, con un tamaño total que varía entre 15 y 30 cm de longitud, los foliolos son de forma lanceolada, de bordes aserrados, con un color verde intenso en el haz y más claro en el envés, estas hojas desprenden un aroma característico cuando se trituran, en otoño, antes de caer, las hojas adquieren tonalidades amarillas que aportan un atractivo visual al paisaje (Morales, 2023).

Las flores, pequeñas y de color blanco cremoso, forman grandes espigas corimbosas, que pueden medir hasta 25 cm de diámetro, estas flores son hermafroditas, ricas en néctar y altamente atractivas para insectos polinizadores, especialmente abejas, la floración ocurre principalmente en primavera y verano, dependiendo de las condiciones locales, los frutos son bayas globosas, de color negro azulado o púrpura oscuro cuando están maduras, con un diámetro de 3 a 6 mm. Estas bayas contienen semillas pequeñas y duras que son dispersadas por aves y otros animales que consumen el fruto (Arroyave Maya et al., 2014).

El *Sambucus mexicana* se encuentra en altitudes entre los 1,000 y 3,000 metros sobre el nivel del mar, prosperando en climas templados y subtropicales con precipitaciones moderadas, prefiere suelos profundos, bien drenados y ricos en materia orgánica, aunque también puede crecer en terrenos degradados o poco fértiles, sus raíces corresponden a un sistema radicular extenso y contribuye significativamente a la estabilización del suelo, lo que lo hace ideal para su uso en proyectos de reforestación y restauración ecológica en regiones montañosas y subtropicales (Arroyave Maya et al., 2014).

Desde el punto de vista ecológico, el Tilo desempeña se destaca en la conservación de la biodiversidad, proporcionando alimento y refugio para una amplia variedad de aves, insectos y pequeños mamíferos, las flores y frutos son especialmente valiosos como fuente de néctar y alimento en los ecosistemas donde habita, además, esta especie es utilizada en sistemas agroforestales como sombra para cultivos y en la regeneración de áreas degradadas debido a su capacidad de mejorar las condiciones del suelo y promover la retención hídrica (Morales, 2023).

El *Sambucus mexicana* también es apreciado por sus múltiples usos tradicionales, las flores son utilizadas en infusiones y remedios caseros por sus propiedades antiinflamatorias y antisépticas, mientras que las bayas, ricas en antioxidantes, se emplean para la elaboración de mermeladas, jugos y vinos, la madera, aunque liviana, es utilizada localmente para herramientas y artesanías (Arroyave Maya et al., 2014).

10.2.26 Guaba (*Inga edulis*)

Guaba



Nombre Científico:	<i>Inga edulis</i>
Género:	<i>Inga</i>
Familia:	Fabaceae
Orden:	Fabales
Tipo de especie:	Nativa
Número de individuos:	87

Ilustración 8. Guaba (*Inga edulis*).

La Guaba (*Inga edulis*), también conocida como guama o pacay, es un árbol perenne perteneciente a la familia Fabaceae, ampliamente distribuido en las regiones tropicales de América del Sur y América Central, es una especie de rápido crecimiento, alcanzando alturas de 6 a 20 metros, con un tronco recto o ligeramente ramificado que puede medir hasta 50 cm de diámetro a la altura del pecho (DAP) en individuos maduros, su corteza es de color gris a marrón claro, con textura lisa en árboles jóvenes y fisurada en ejemplares más viejos, se destaca por su capacidad para fijar nitrógeno, estabilizar suelos y aportar alimento a la fauna local convirtiéndose en un recurso fundamental en proyectos de agroforestería y restauración ambiental especialmente en las regiones tropicales de América Latina (Morales, 2023).

Las hojas de la guaba son compuestas pinnadas, alternas y colocadas en forma simétrica a lo largo de un raquis central, cada hoja está formada por 4 a 6 pares de folíolos elípticos o lanceolados, de color verde brillante en el haz y más opaco en el envés, estos folíolos miden entre 5 y 15 cm de largo, con nervaduras prominentes que facilitan la identificación de la especie, la floración ocurre de manera continua o estacional, dependiendo de las condiciones ambientales, son pequeñas, de color blanco o crema, y están acomodadas en espigas en forma de racimos; ricas en néctar y altamente atractivas para polinizadores como abejas, mariposas y murciélagos, sus frutos son vainas alargadas y ligeramente curvadas, que pueden alcanzar longitudes de 20 a 50 cm, dependiendo del ambiente y la edad del árbol, estas vainas contienen semillas grandes y negras rodeadas por un arilo blanco, dulce y esponjoso, que es consumido tanto por humanos como por animales, favoreciendo la dispersión natural (Arroyave Maya et al., 2014).

La guaba prospera en regiones tropicales con altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 2,000 metros sobre el nivel del mar, prefiere climas cálidos y húmedos, con precipitaciones anuales superiores a 1,000 mm, aunque puede tolerar períodos cortos de sequía, se adapta a una amplia gama de suelos, desde suelos aluviales ricos en nutrientes hasta terrenos ácidos y erosionados, sus raíces corresponden a un sistema radicular profundo y extensivo, lo que le permite estabilizar suelos en laderas y mejorar su estructura al fijar nitrógeno atmosférico mediante simbiosis con bacterias del género *Rhizobium* (Arroyave Maya et al., 2014).

Desde el punto de vista ecológico, la guaba es una especie clave en los sistemas agroforestales debido a su capacidad para proporcionar sombra, fijar nitrógeno y enriquecer los suelos con materia orgánica, además, su arilo dulce sirve como fuente de alimento para una variedad de animales, incluidos monos, aves y roedores, lo que la convierte en una especie importante para la biodiversidad en las selvas tropicales, también es utilizada en cercas vivas, barreras contra el viento y como árbol de sombra en cultivos como el cacao y el café, en cuanto a su uso económico, la madera de la guaba es de grano fino y color marrón claro, utilizada en la fabricación de herramientas, postes y artesanías, los frutos son altamente valorados en mercados locales debido a su sabor dulce y propiedades nutritivas, ya que contienen fibra, carbohidratos y pequeñas cantidades de vitaminas, en la medicina tradicional, las hojas y corteza se utilizan en infusiones para tratar infecciones y dolores inflamatorios (Morales, 2023).

10.2.27 Acacia común (*Acacia dealbata*)

Acacia común


	
Nombre Científico:	<i>Acacia dealbata</i>
Género:	<i>Acacia</i>
Familia:	Fabaceae
Orden:	Fabales
Tipo de especie:	Introducida - Originaria de Australia
Número de individuos:	94

Ilustración 9. Acacia común (Acacia dealbata).

La Acacia común (*Acacia dealbata*), también conocida como mimosa plateada, es un árbol perenne perteneciente a la familia Fabaceae, originaria del sudeste de Australia y Tasmania, es ampliamente cultivada e introducida en regiones de climas templados y subtropicales debido a su rápido crecimiento, adaptabilidad y valor ornamental, en condiciones óptimas, esta especie puede alcanzar alturas de 10 a 25 metros, con un tronco recto y cilíndrico que puede tener un diámetro a la altura del pecho (DAP) de hasta 60 cm, su corteza es de color marrón grisáceo, ligeramente rugosa en ejemplares jóvenes y con fisuras más pronunciadas en individuos maduros (Cajilema & Fernández, 2023).

Las hojas de la *Acacia dealbata* son compuestas bipinnadas, una característica distintiva dentro del género, estas hojas están formadas por numerosos folíolos pequeños de forma lanceolada, de 1 a 2 mm de longitud, con un color verde grisáceo o plateado que les da su nombre común,

estas hojas presentan una textura delicada y son muy densas con los foliolos que permiten reducir la transpiración, una adaptación a climas más secos (Morales, 2023).

La floración ocurre a finales del invierno o principios de la primavera, cuando la especie produce numerosas estructuras florales de color amarillo brillante, agrupadas en racimos, su forma redondeada las protege de la exposición directa a la lluvia o al viento, favoreciendo la producción de néctar y polen, estas flores son pequeñas, de menos de 1 cm de diámetro, y están compuestas por numerosos estambres que les dan un aspecto esponjoso, son muy fragantes y altamente atractivas para polinizadores como abejas e insectos, los frutos son vainas lineales y planas, de 5 a 10 cm de largo, de color marrón oscuro al madurar, y contienen semillas duras de forma ovalada, que son dispersadas por el viento y animales (Arroyave Maya et al., 2014).

La *Acacia dealbata* es una especie adaptada a climas templados con precipitaciones anuales moderadas, prosperando en altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 1,000 metros, prefiere suelos bien drenados, arenosos o franco-arcillosos, y tiene una tolerancia moderada a la salinidad, sus raíces corresponden a un sistema radicular profundo y extendido, lo que le permite extraer agua de capas profundas del suelo, además de fijar nitrógeno atmosférico con bacterias del género *Rhizobium*, esta capacidad de fijación de nitrógeno mejora significativamente la fertilidad del suelo y favorece la regeneración en áreas degradadas (Morales, 2023).

Desde el punto de vista ecológico, la *Acacia* común desempeña un papel importante en proyectos de reforestación y control de erosión, especialmente en terrenos empobrecidos o de difícil recuperación, sin embargo, en regiones donde ha sido introducida, puede comportarse como una especie invasora, desplazando a la vegetación nativa y alterando los ecosistemas locales debido a su rápido crecimiento y alta capacidad de reproducción (Espinoza & López, 2023).

En cuanto a su valor económico, la madera de la *Acacia dealbata* es ligera y de textura uniforme, utilizada en la fabricación de muebles, artesanías y postes, las flores son valoradas por su uso en la producción de perfumes, aceites esenciales y como ornamento en arreglos florales, además, tiene aplicaciones en la medicina tradicional, donde las hojas y corteza se utilizan en infusiones por sus propiedades astringentes y antisépticas (Arroyave Maya et al., 2014).

10.2.28 Fresno (*Fraxinus uhdei*)

Fresno


	
Nombre Científico:	<i>Fraxinus uhdei</i>
Género:	<i>Fraxinus</i>
Familia:	Oleaceae
Orden:	Lamiales
Tipo de especie:	Introducida - Originario de América del Norte y Centroamérica
Número de individuos:	21

Ilustración 10. Fresno (*Fraxinus uhdei*).

El Fresno (*Fraxinus uhdei*), también conocido como fresno mexicano o fresno tropical, es un árbol caducifolio perteneciente a la familia Oleaceae, ampliamente distribuido en regiones montañosas de América Central y del Norte, particularmente desde México hasta Panamá, es una especie de crecimiento rápido y longevidad considerable, capaz de alcanzar edades superiores a los 100 años en condiciones favorables, su morfología destaca por un tronco recto y cilíndrico que puede alcanzar alturas de 20 a 30 metros, con un diámetro a la altura del pecho (DAP) de hasta 1 metro en individuos maduros, su corteza es de color grisácea y lisa en árboles jóvenes, tornándose fisurada y más rugosa con la edad, lo que facilita su identificación (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2012).

Las hojas de *Fraxinus uhdei* son compuestas imparipinnadas, de disposición opuesta y miden entre 15 y 30 cm de longitud, cada hoja está formada por 5 a 9 folíolos lanceolados, de bordes ligeramente aserrados, con un color verde brillante en el haz y un tono más pálido en el envés, estas hojas caen durante la estación seca, contribuyendo a la formación de hojarasca y al

enriquecimiento del suelo con materia orgánica, los foliolos tienen una nervadura prominente y una textura suave, lo que optimiza su función fotosintética, la reproducción se realiza a través de flores pequeñas y discretas, que son unisexuales o hermafroditas, dependiendo del ejemplar (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2012).

Estas flores se constituyen en una estructura floral compleja en la que las flores se agrupan en ramificaciones secundarias y terciarias dispuestas a lo largo de un eje principal con una forma general piramidal o alargada caracterizada por una disposición jerárquica de los ejes florales, esta estructura es de color verde pálido o amarillento, emergiendo antes del brote de las hojas durante el inicio de la primavera, los frutos son sámaras aladas, de forma oblonga, que miden entre 3 y 6 cm de longitud y son dispersadas por el viento, facilitando su reproducción (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2012).

El fresno prospera en altitudes que van desde los 1,200 hasta los 3,000 metros sobre el nivel del mar, en climas templados y subtropicales con precipitaciones anuales que oscilan entre 800 y 2,000 mm, prefiere suelos profundos, bien drenados y ricos en nutrientes, aunque también puede desarrollarse en terrenos pobres y erosionados, destacándose por su capacidad para estabilizar suelos y prevenir la erosión, sus raíces corresponden a un sistema radicular profundo y extendido, permitiéndole acceder a recursos hídricos en capas subterráneas y contribuir al mantenimiento de la estructura del suelo, desde el punto de vista ecológico, el Fresno destaca en la restauración de ecosistemas y la conservación de cuencas hidrográficas, sus raíces ayudan a estabilizar terrenos en pendientes, mientras que su dosel denso proporciona sombra y refugio para numerosas especies de aves, insectos y pequeños mamíferos, además, su capacidad de generar hojarasca y fijar carbono lo convierte en un actor importante en la regulación climática y el ciclo de nutrientes en los ecosistemas donde habita (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2012).

La madera del *Fraxinus uhdei* es altamente valorada por su calidad, siendo dura, resistente y fina, es utilizada en la fabricación de muebles, pisos y herramientas, así como en la producción de piezas deportivas como bates y mangos de herramientas agrícolas, en algunos casos, también se emplea en la fabricación de carbón vegetal debido a su alto poder calorífico que lo convierte en un recurso importante en el sector energético y en la producción de biocombustibles sostenibles (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2012).

10.2.29 Especies nativas e introducidas

Entre las especies dominantes encontradas en el área de estudio el Molle, el Aliso Andino y la Guaba son nativas con 381 individuos correspondientes al 27% del total, mientras que el

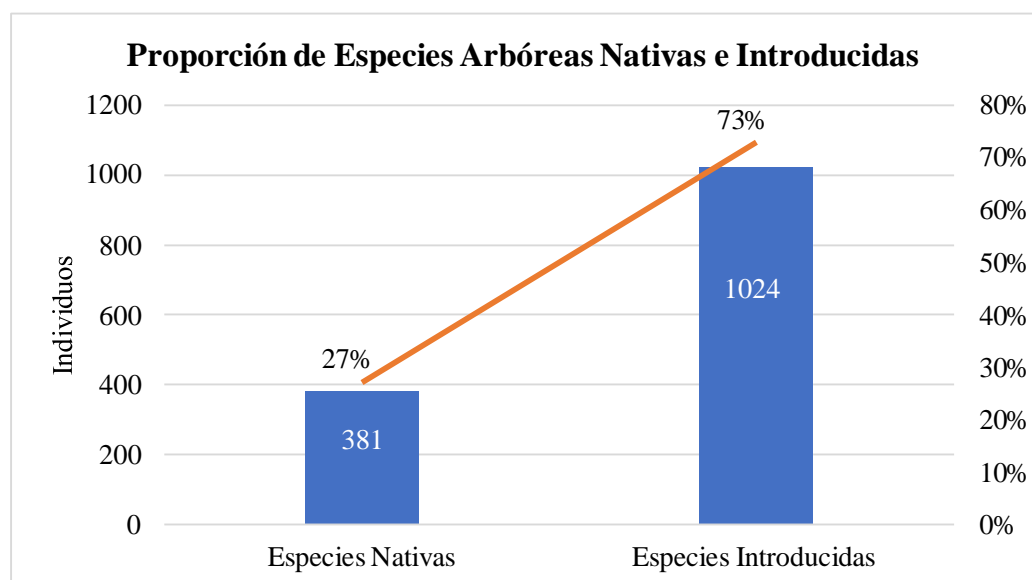
Eucalipto, el Ciprés, la Acacia común, el Pino, la Acacia negra, el Tilo y el Fresno son especies introducidas con 1,024 individuos correspondientes al 73% del total, lo que refleja que en el campus Salache la vegetación arbórea se encuentra dominada por especies introducidas (Tabla 9 y Gráfica 7).

Tabla 9. Especies dominantes nativas e introducidas del campus Salache,

Nombre común	Nombre científico	Tipo de Especie	Individuos	%
Molle	<i>Schinus molle</i>	Nativa	142	10
Aliso andino	<i>Alnus acuminata</i>	Nativa	152	11
Guaba	<i>Inga edulis</i>	Nativa	87	6
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	Introducida	109	8
Ciprés	<i>Cupressus sempervirens</i>	Introducida	156	11
Acacia común	<i>Acacia dealbata</i>	Introducida	94	7
Pino	<i>Pinus radiata</i>	Introducida	351	25
Acacia negra	<i>Acacia melanoxylon</i>	Introducida	168	12
Tilo	<i>Sambucus mexicana</i>	Introducida	125	9
Fresno	<i>Fraxinus uhdei</i>	Introducida	21	1
Total			1,405	100%

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

Gráfica 7. Proporción de especies arbóreas dominantes nativas e introducidas



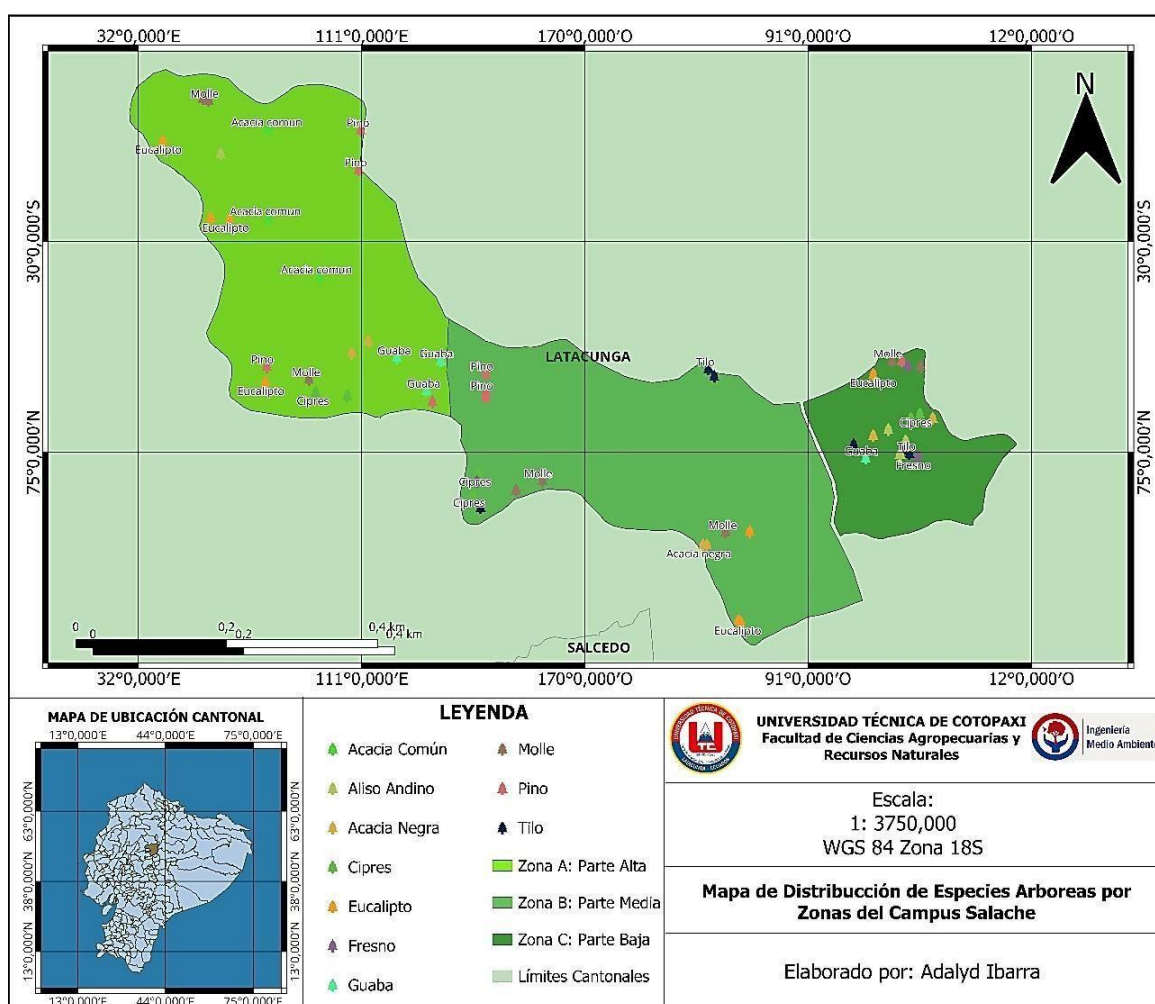
Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

10.2.30 Mapa de distribución de especies arbóreas dominantes

La Figura 14 representa el mapa de la distribución de especies arbóreas por zonas en el Campus Salache de la Universidad Técnica de Cotopaxi, categorizando el área en Zona A (Parte Alta), Zona B (Parte Media) y Zona C (Parte Baja), se identifican diferentes especies, como acacia

común, aliso andino, ciprés, eucalipto, fresno, guaba, molle, pino y tilo, con su ubicación específica dentro del campus conforme a su abundancia, la vegetación está distribuida de manera heterogénea, con una mayor presencia de acacia común, pino y eucalipto en las distintas zonas, además, el mapa incluye un recuadro de ubicación cantonal y una leyenda con la simbología utilizada, esta información es clave para el manejo forestal sostenible y la planificación de estrategias de conservación y reforestación en la zona.

Figura 15. Distribución de las especies en el área de estudio.



Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024).

10.3 Segunda Etapa: Parámetros dendrométricos de los árboles seleccionados

En esta segunda sección se presentan los valores dendrométricos obtenidos a partir de mediciones *in situ* de los árboles promedio representativos de cada una de las especies dominantes tales como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total y volumen.

10.3.1 Altura Total

La altura total fue calculada con datos obtenidos a partir del registro de mediciones directas en árboles representativos promedio por etapa de desarrollo y especie para cada una de las zonas de estudio consideradas, obteniendo los siguientes resultados:

10.3.2 Altura Total de las especies dominantes en la Zona A: Parte Alta

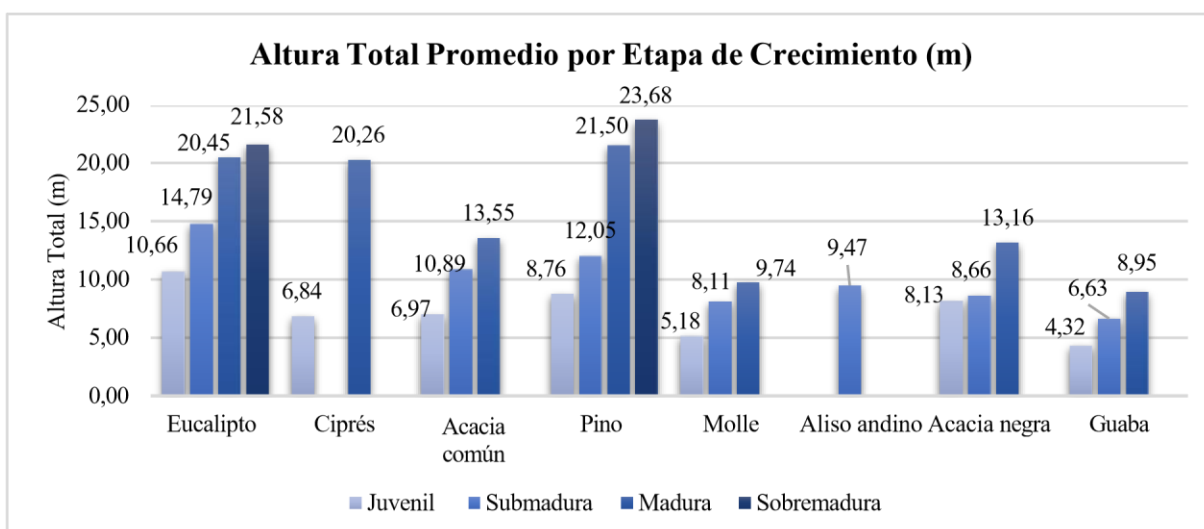
La Tabla 10 presenta la altura total promedio de especies dominantes en la Zona A: Parte Alta del área de estudio, donde se encontró que especies como el Pino (*Pinus radiata*), el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) y el Ciprés (*Cupressus sempervirens*), alcanzan las mayores alturas en su fase sobremadura y madura, con valores máximos de 23.68 m, 21.58 m y 20.26 m, respectivamente, en cambio, las especies como el Molle (*Schinus molle*) y el Aliso andino (*Alnus acuminata*) presentan un crecimiento más moderado, con alturas máximas de 9.74 m y 9.47 m, lo que sugiere diferencias en sus tasas de crecimiento y adaptabilidad al ecosistema local (Tabla 10).

Tabla 10. Altura promedio de las especies dominantes en la Zona A: Parte Alta

Nombre común	Nombre científico	Juvenil	Submadura	Madura	Sobremadura
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	10.66	14.79	20.45	21.58
Ciprés	<i>Cupressus sempervirens</i>	6.84	-	20.26	-
Acacia común	<i>Acacia dealbata</i>	6.97	10.89	13.55	-
Pino	<i>Pinus radiata</i>	8.76	12.05	21.50	23.68
Molle	<i>Schinus molle</i>	5.18	8.11	9,74	-
Aliso andino	<i>Alnus acuminata</i>	-	9.47	-	-
Acacia negra	<i>Acacia melanoxylon</i>	8.13	8.66	13.16	-
Guaba	<i>Inga edulis</i>	4.32	6.63	8.95	-

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

Gráfica 8. Altura total promedio por etapa en la Zona A: Parte Alta (m).



Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

En la gráfica 8 se puede observar que el Aliso andino (*Alnus acuminata*) alcanza un máximo de 9.47 m, mientras que la Acacia negra (*Acacia melanoxylon*) logra 13.16 m en su etapa madura, en cambio, especies como el Molle (*Schinus molle*) y el Guaba (*Inga edulis*) presentan alturas más limitadas, con valores máximos de 9.74 m y 8.95 m, respectivamente, reflejando su adaptación a condiciones ecológicas particulares y una menor tasa de crecimiento en comparación con las demás especies, la ausencia de datos para la etapa de sobremaduración en la mayoría de las especies sugiere que pocas alcanzan dicha fase en la zona de estudio, debido a intervenciones forestales y condiciones ambientales limitantes.

10.3.3 Altura Total de las especies dominantes en la Zona B: Parte Media

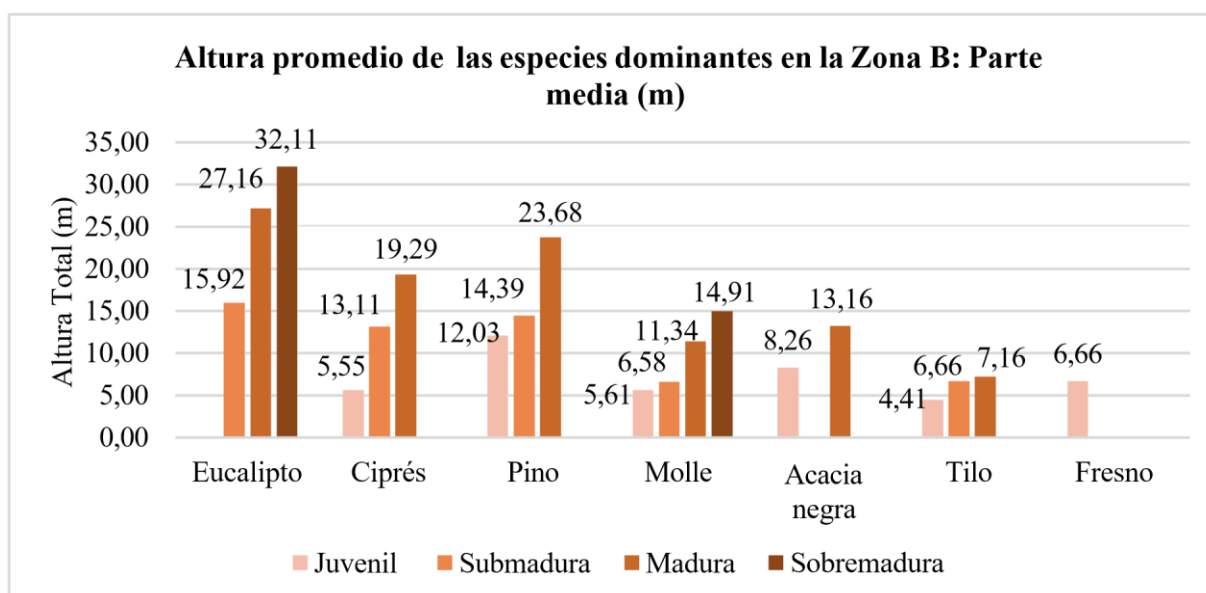
En la Tabla 11 y en la Gráfica 9 se presenta la altura total promedio de las especies arbóreas dominantes en la Zona B: Parte Media, clasificadas según su etapa de crecimiento, se puede observar que el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) alcanza la mayor altura en la etapa sobremadura con 32.11 m, seguido del Pino (*Pinus radiata*) en la etapa madura con 23.68 m, lo que confirma su alto potencial de crecimiento y dominancia dentro del ecosistema.

Por otro lado, el Ciprés (*Cupressus sempervirens*) y la Acacia negra (*Acacia melanoxylon*) presentan alturas intermedias máximas de 19.29 m y 13.16 m, respectivamente, en la etapa madura, a diferencia de especies como el Fresno (*Fraxinus uhdei*) y el Tilo (*Sambucus mexicana*) que muestran un menor crecimiento, con alturas máximas registradas de 10.00 m, 9.61 m y 7.16 m, respectivamente, la ausencia de datos en algunas categorías indica una menor representatividad de individuos en ciertas etapas de desarrollo.

Tabla 11. Altura promedio de las especies dominantes en la Zona B: Parte Media.

Nombre común	Nombre científico	Juvenil	Submadura	Madura	Sobremadura
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	-	15.92	27.16	32.11
Ciprés	<i>Cupressus sempervirens</i>	5.55	13.11	19.29	-
Pino	<i>Pinus radiata</i>	12.03	14.39	23.68	-
Molle	<i>Schinus molle</i>	5.61	6.58	11.34	14.91
Acacia negra	<i>Acacia melanoxyton</i>	8.26	-	13.16	-
Tilo	<i>Sambucus mexicana</i>	4.41	6.66	7.16	-
Fresno	<i>Fraxinus uhdei</i>	6.66	-	-	-

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

Gráfica 9. Altura total promedio por etapa en la Zona B: Parte Media (m).

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

10.3.4 Altura Total de las especies dominantes en la Zona C: Parte Baja

La Tabla 12 y la Gráfica 10 presenta la altura total promedio de las especies arbóreas dominantes por etapa de crecimiento en la Zona C: Parte Baja, se observa que el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) alcanza la mayor altura en la fase sobremadura con 28.37 m, evidenciando su rápido crecimiento y capacidad de dominancia en el área de estudio, el Pino (*Pinus radiata*) se posiciona como la segunda especie con mayor altura, registrando 31.58 m en la fase madura, en

la etapa submadura, el Ciprés (*Cupressus sempervirens*) y el Fresno (*Fraxinus uhdei*) presentan alturas moderadas de 12.82 m y 12.11 m, respectivamente.

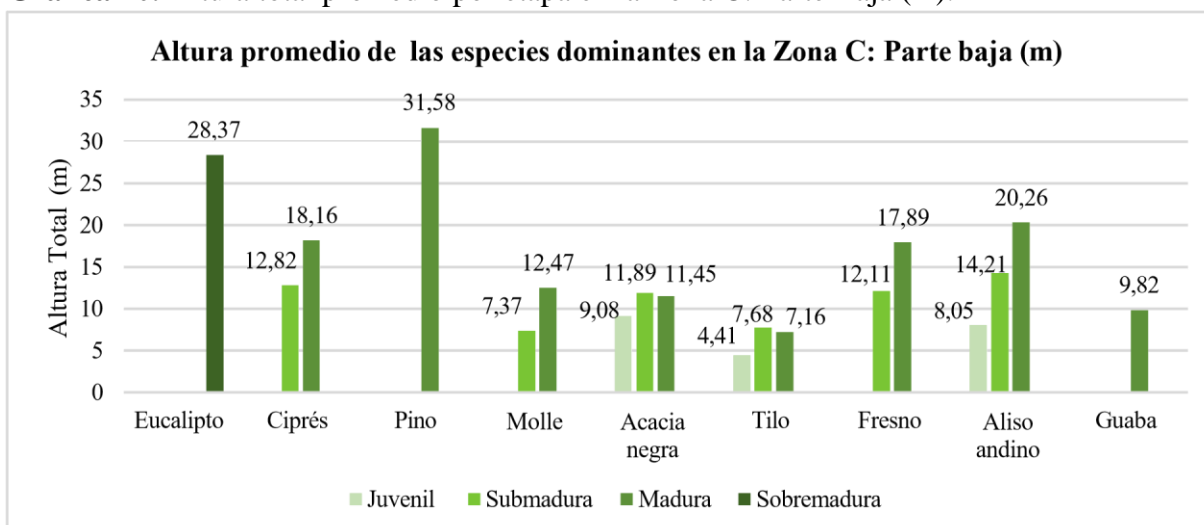
En cuanto a especies nativas, el Aliso andino (*Alnus acuminata*) muestra una altura de 14.21 m en la fase submadura y 20.26 m en la fase madura, lo que sugiere su adaptabilidad y potencial de desarrollo, la Acacia negra (*Acacia melanoxylon*) y el Molle (*Schinus molle*) presentan valores intermedios, con alturas máximas de 11.45 m y 12.47 m, respectivamente, la falta de datos en la categoría juvenil para la mayoría de las especies refleja la existencia de ejemplares en etapa de regeneración natural dentro del ecosistema, estos resultados resaltan la necesidad de estrategias de manejo forestal que equilibren la coexistencia de especies introducidas y nativas para evitar desplazamientos ecológicos y promover la estabilidad del ecosistema.

Tabla 12. Altura promedio de las especies dominantes en la Zona C: Parte Baja.

Nombre común	Nombre científico	Juvenil	Submadura	Madura	Sobremadura
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	-	-	-	28.37
Ciprés	<i>Cupressus sempervirens</i>	-	12.82	18.16	-
Pino	<i>Pinus radiata</i>	-	-	31.58	-
Molle	<i>Schinus molle</i>	-	7.37	1.47	-
Acacia negra	<i>Acacia melanoxylon</i>	9.08	11.89	11.45	-
Tilo	<i>Sambucus mexicana</i>	4.41	7.68	7.16	-
Fresno	<i>Fraxinus uhdei</i>	-	12.11	17.89	-
Aliso andino	<i>Alnus acuminata</i>	8.05	14.21	20.26	-
Guaba	<i>Inga edulis</i>	-	-	9.82	-

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

Gráfica 10. Altura total promedio por etapa en la Zona C: Parte Baja (m).



Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

10.3.5 Diámetro a la altura del pecho (DAP)

El diámetro a la altura del pecho (DAP) fue calculado a partir del registro en campo de mediciones de la circunferencia a altura del pecho (CAP) en árboles representativos promedio por etapa de desarrollo y especie para cada una de las zonas de estudio consideradas, obteniendo los siguientes resultados:

10.3.6 DAP promedio de las especies dominantes en la Zona A: Parte Alta

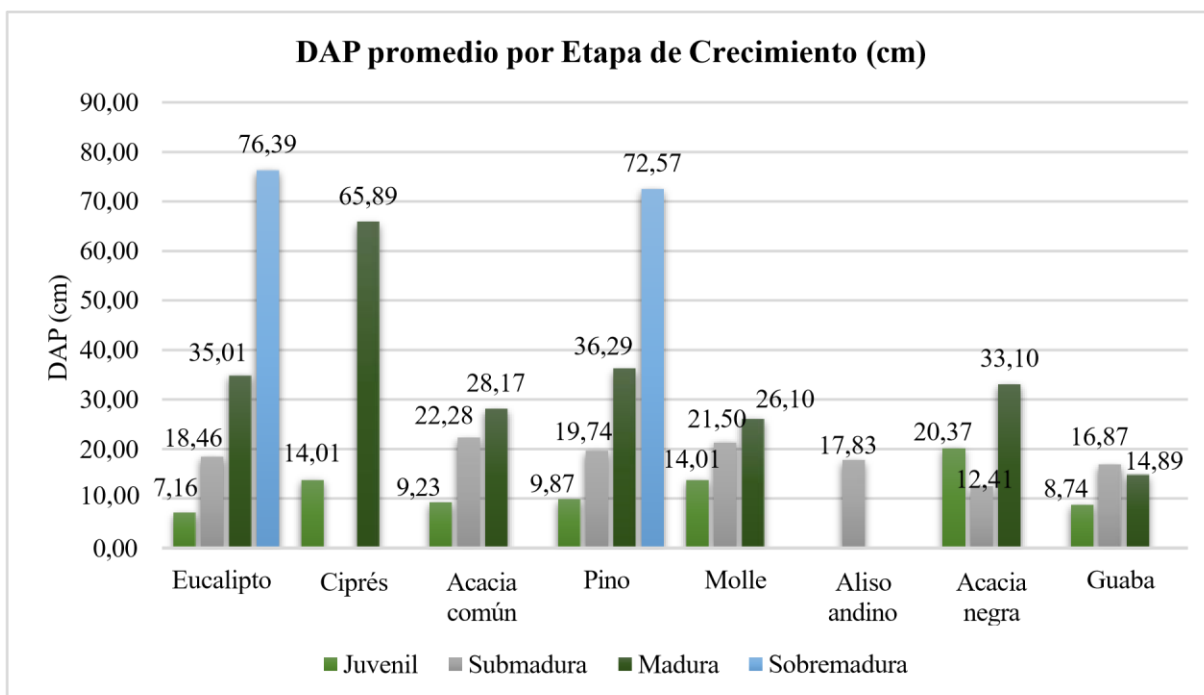
La Tabla 13 y la Gráfica 11 presentan el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) promedio de las especies arbóreas dominantes en la Zona A: Parte Alta, clasificadas según su etapa de crecimiento, se observa que el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) alcanza el mayor DAP en la fase sobremadura con 76.39 cm, seguido por el Pino (*Pinus radiata*) con 72.57 cm, lo que evidencia su dominancia, en la fase madura, el Ciprés (*Cupressus sempervirens*) y la Acacia negra (*Acacia melanoxylon*) presentan valores máximos de 65.89 cm y 33.10 cm, respectivamente, indicando su relevancia en el ecosistema, en cambio, especies nativas como el Aliso andino (*Alnus acuminata*) y el Guaba (*Inga edulis*) muestran valores de DAP más moderados en sus respectivas fases de desarrollo, con 17.83 cm y 16.87 cm en la etapa submadura, la ausencia de valores en algunas categorías es debido a la falta de individuos en ciertos estadios de crecimiento o limitaciones en su desarrollo, estos resultados reflejan la predominancia de especies introducidas de rápido crecimiento y mayor diámetro que las especies nativas.

Tabla 13. DAP promedio de las especies dominantes en la Zona A: Parte Alta.

Nombre común	Nombre científico	Juvenil	Submadura	Madura	Sobremadura
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	7.16	18.46	35.01	76.39
Ciprés	<i>Cupressus sempervirens</i>	14.01	-	65.89	-
Acacia común	<i>Acacia dealbata</i>	9.23	22.28	28.17	-
Pino	<i>Pinus radiata</i>	9.87	19.74	36.29	72.57
Molle	<i>Schinus molle</i>	14.01	21.50	26.10	-
Aliso andino	<i>Alnus acuminata</i>	-	17.83	-	-
Acacia negra	<i>Acacia melanoxylon</i>	20.37	12.41	33.10	-
Guaba	<i>Inga edulis</i>	8.74	16.87	14.89	-

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

Gráfica 11. DAP promedio por etapa en la Zona A: Parte Alta (cm).



Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

10.3.7 DAP promedio de las especies dominantes en la Zona B: Parte Media

La Tabla 14 y Gráfica 12 presentan el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) promedio de las especies arbóreas dominantes en la Zona B: Parte Media, clasificadas por su etapa de crecimiento, se evidencia que el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) alcanza el mayor DAP en la fase sobremadura con 99.95 cm, seguido por el Molle (*Schinus molle*) con 48.67 cm, lo que resalta su capacidad de crecimiento y adaptación en esta zona, en la etapa madura, el Pino (*Pinus radiata*) y la Acacia negra (*Acacia melanoxylon*) presentan valores significativos de 49.34 cm y 32.15 cm, respectivamente, indicando su presencia dominante en la estructura forestal, asimismo, el Ciprés (*Cupressus sempervirens*) exhibe un desarrollo considerable con 32.79 cm en esta fase, consolidándose como una de las especies de mayor diámetro en el área.

En cambio, especies como la Acacia negra (*Acacia melanoxylon*) y el Tilo (*Sambucus mexicana*) muestran un DAP inferior, con valores máximos de 32.15 cm y 20.73 cm, respectivamente, lo que sugiere una menor tasa de crecimiento o un establecimiento más reciente en la zona, el Fresno (*Fraxinus uhdei*) registra el menor DAP con 9.71 cm, reflejando su desarrollo más lento o la ausencia de individuos en estados avanzados, la ausencia de datos en ciertas categorías indica la escasez de individuos en algunas etapas de desarrollo debido a intervenciones antrópicas o la existencia de ejemplares en etapa de regeneración natural.

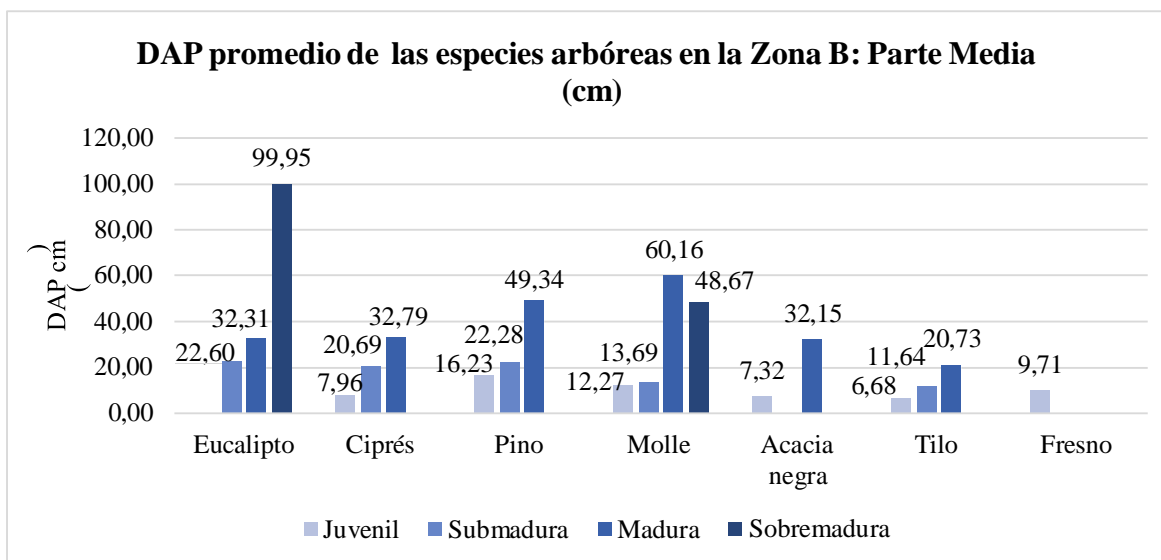
Tabla 14. DAP promedio de las especies dominantes en la Zona B: Parte Media.

Nombre común	Nombre científico	Juvenil	Submadura	Madura	Sobremadura
--------------	-------------------	---------	-----------	--------	-------------

Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	-	22.60	32.31	99.95
Ciprés	<i>Cupressus sempervirens</i>	7.96	20.69	32.79	-
Pino	<i>Pinus radiata</i>	16.23	22.28	49.34	-
Molle	<i>Schinus molle</i>	12.27	13.69	60.16	48.67
Acacia negra	<i>Acacia melanoxylon</i>	7.32	-	32.15	-
Tilo	<i>Sambucus mexicana</i>	6.68	11.64	20.73	-
Fresno	<i>Fraxinus uhdei</i>	9.71	-	-	-

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

Gráfica 12. DAP promedio por etapa en la Zona A: Parte Alta (cm).



Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

10.3.8 DAP promedio de las especies dominantes en la Zona C: Parte Baja

La Tabla 15 y la Gráfica 13 presentan el diámetro a la altura del pecho (DAP) promedio de las especies arbóreas dominantes en la zona c: parte baja, diferenciadas por su etapa de crecimiento, se observa que el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) alcanza el mayor DAP en la fase sobremadura con 60.33 cm, seguido por el Ciprés (*Cupressus sempervirens*) con 66.85 cm en la etapa madura, lo que evidencia su vigoroso desarrollo en la zona, el Pino (*Pinus radiata*) y el Molle (*Schinus molle*) también destacan con valores de 58.89cm y 53.16cm, respectivamente, en la fase madura, lo que sugiere una fuerte presencia de especies introducidas con alto crecimiento, por otro lado, entre las especies nativas, el Aliso Andino (*Alnus acuminata*) presenta un DAP máximo de 34.38 cm, mientras que el Fresno (*Fraxinus uhdei*) alcanza los 39.31 cm, lo que indica un desarrollo moderado en comparación con las especies introducidas, la Acacia negra (*Acacia melanoxylon*) y el Tilo (*Sambucus mexicana*) muestran valores inferiores, con DAP máximos de 35.33 cm y 20.73 cm, respectivamente; destaca la Guaba (*Inga edulis*) con un valor en etapa madura de 17.44 cm, lo que sugiere un crecimiento más restringido en la zona, por

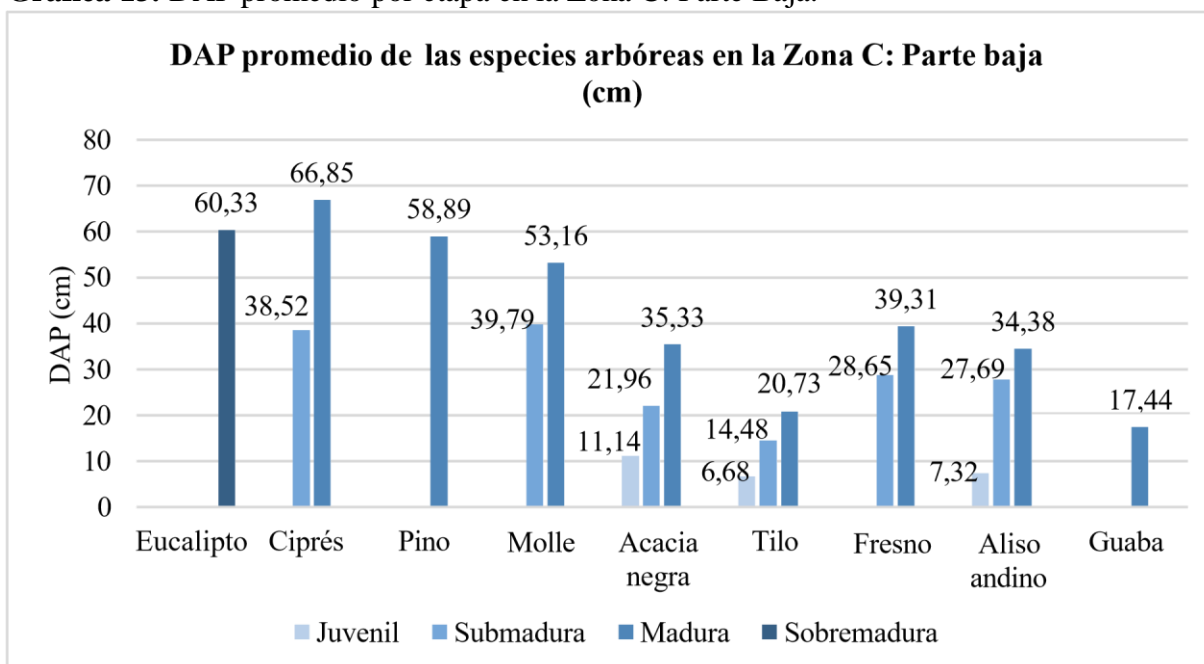
último, estos resultados reflejan una clara diferenciación en el desarrollo de especies nativas e introducidas, evidenciando la predominancia de especies introducidas con mayores diámetros.

Tabla 15. DAP promedio de las especies dominantes en la Zona C: Parte Baja

Nombre común	Nombre científico	Juvenil	Submadura	Madura	Sobremadura
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	-	-	-	60.33
Ciprés	<i>Cupressus sempervirens</i>	-	38.52	66.85	-
Pino	<i>Pinus radiata</i>	-	-	58.89	-
Molle	<i>Schinus molle</i>	-	39.79	53.16	-
Acacia negra	<i>Acacia melanoxylon</i>	11.14	21.96	35.33	-
Tilo	<i>Sambucus mexicana</i>	6.68	14.48	20.73	-
Fresno	<i>Fraxinus uhdei</i>	-	28.65	39.31	-
Aliso andino	<i>Alnus acuminata</i>	7.32	27.69	34.38	-
Guaba	<i>Inga edulis</i>	-	-	17.44	-

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

Gráfica 13. DAP promedio por etapa en la Zona C: Parte Baja.



Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

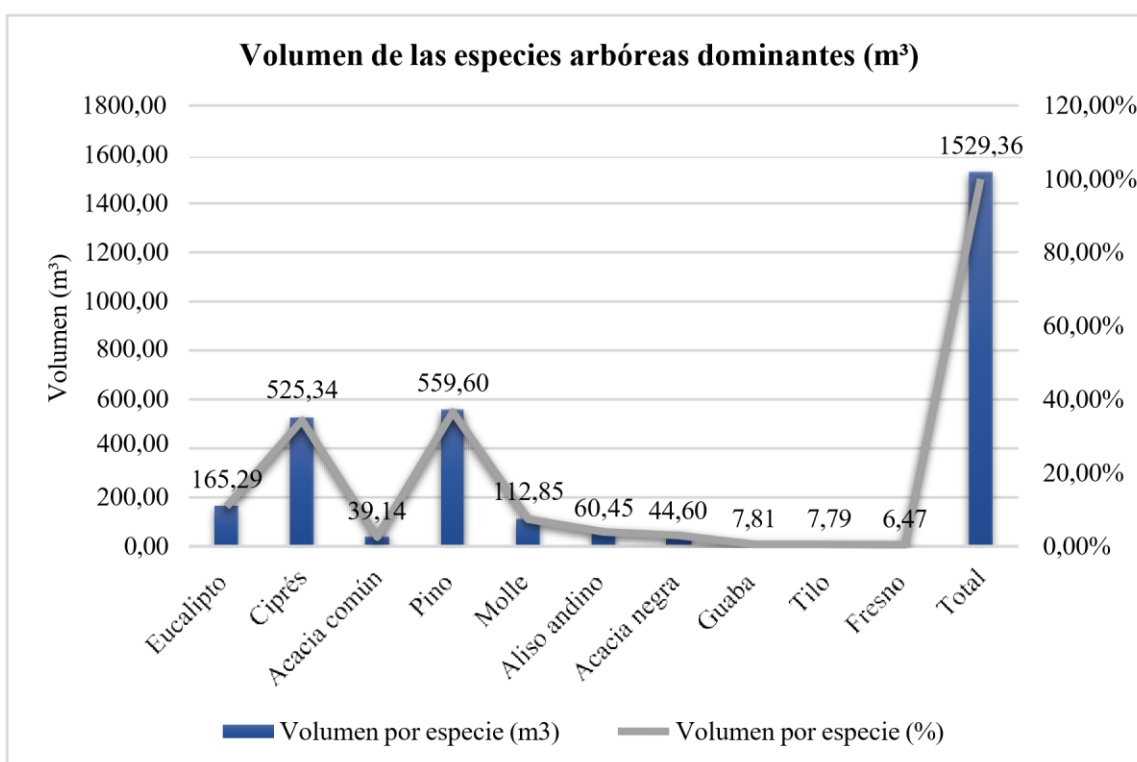
10.3.9 Volumen de las especies arbóreas dominantes

La vegetación arbórea dominante presentó un volumen total de 1,529.36 m³ distribuida entre las 10 especies más representativas del campus, dentro de 1,546.44 m³, correspondientes al volumen total de las especies arbóreas del inventario forestal (Tabla 16).

Tabla 16. Volumen de las especies arbóreas dominantes.

Nombre común	Nombre científico	Volumen por especie (m ³)	Volumen por especie (%)
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	165.29	10.81
Ciprés	<i>Cupressus sempervirens</i>	525.34	34.35
Acacia común	<i>Acacia dealbata</i>	39.14	2.56
Pino	<i>Pinus radiata</i>	559.60	36.5
Molle	<i>Schinus molle</i>	112.85	7.38
Aliso andino	<i>Alnus acuminata</i>	60.45	3.95
Acacia negra	<i>Acacia melanoxylon</i>	44.60	2.92
Guaba	<i>Inga edulis</i>	7.81	0.51
Tilo	<i>Sambucus mexicana</i>	7.79	0.51
Fresno	<i>Fraxinus uhdei</i>	6.47	0.42
Total		1,529.36	100%

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

Gráfica 14. Volumen de las especies arbóreas dominantes (m³).

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

La Gráfica 14 presenta el volumen total de las especies arbóreas dominantes en la zona de estudio, expresado en metros cúbicos y porcentaje de contribución al volumen total de 1,529.36

m³, se observa que el Pino (*Pinus radiata*) y el Ciprés (*Cupressus sempervirens*) son las especies con mayor volumen, representando el 36.5% (559.60 m³) y 34.35% (525.34 m³), respectivamente, lo que indica su predominancia y capacidad de almacenamiento de biomasa en la comunidad arbórea evaluada, en tercer lugar, el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) con 10.81% (165.29 m³), se destaca como otra especie de relevancia en términos de volumen; especies como el Molle (*Schinus molle*) y el Aliso andino (*Alnus acuminata*) muestran valores intermedios, con 7.38% (112.85 m³) y 3.95% (60.45 m³), respectivamente, reflejando su contribución moderada al total de biomasa forestal.

En cambio, especies como el Tilo (*Sambucus mexicana*), el Fresno (*Fraxinus uhdei*) y la Guaba (*Inga edulis*) presentan volúmenes significativamente menores, con valores inferiores al 1% del volumen total, lo que evidencia su menor densidad o menor desarrollo volumétrico en la zona, estos resultados sugieren que el ecosistema está dominado por especies introducidas de alto crecimiento, lo que puede influir en la estructura del bosque y en la dinámica de captura de carbono, resaltando la necesidad de evaluar estrategias de manejo forestal para el equilibrio entre especies exóticas y nativas.

10.4 Tercera etapa: Carbono secuestrado por las especies arbóreas

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la estimación de carbono secuestrado por las especies arbóreas dominantes del campus en etapas de desarrollo y zona.

10.4.1 Carbono secuestrado por las especies arbóreas dominantes

La Tabla 17 y la Gráfica 15 representan la cantidad de CO₂ secuestrado por las especies arbóreas dominantes en el área de estudio, desglosado por etapas de crecimiento, se evidencia que el Pino (*Pinus radiata*) es la especie con mayor contribución en el secuestro de carbono, con 768,515 toneladas de CO₂, seguido por el Ciprés (*Cupressus sempervirens*) con 502,637 toneladas y el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) con 222,907 toneladas, lo que reafirma su potencial como especies de alto rendimiento en la captura de carbono.

Entre las especies nativas, el Aliso andino (*Alnus acuminata*) y el Molle (*Schinus molle*) destacan con 93,939 y 101,633 toneladas de CO₂, respectivamente, reflejando su relevancia en la captura de carbono a nivel ecosistémico, la Guaba (*Inga edulis*), el Tilo (*Sambucus mexicana*) y el Fresno (*Fraxinus uhdei*) muestran las menores contribuciones, con valores inferiores a 10 toneladas de CO₂, lo que podría atribuirse a su menor biomasa o densidad en la zona de estudio, en total, se registra un almacenamiento de 1,825.897 toneladas de CO₂, destacando la capacidad de estas especies en el secuestro de emisiones de CO₂ en contribución con la mitigación del

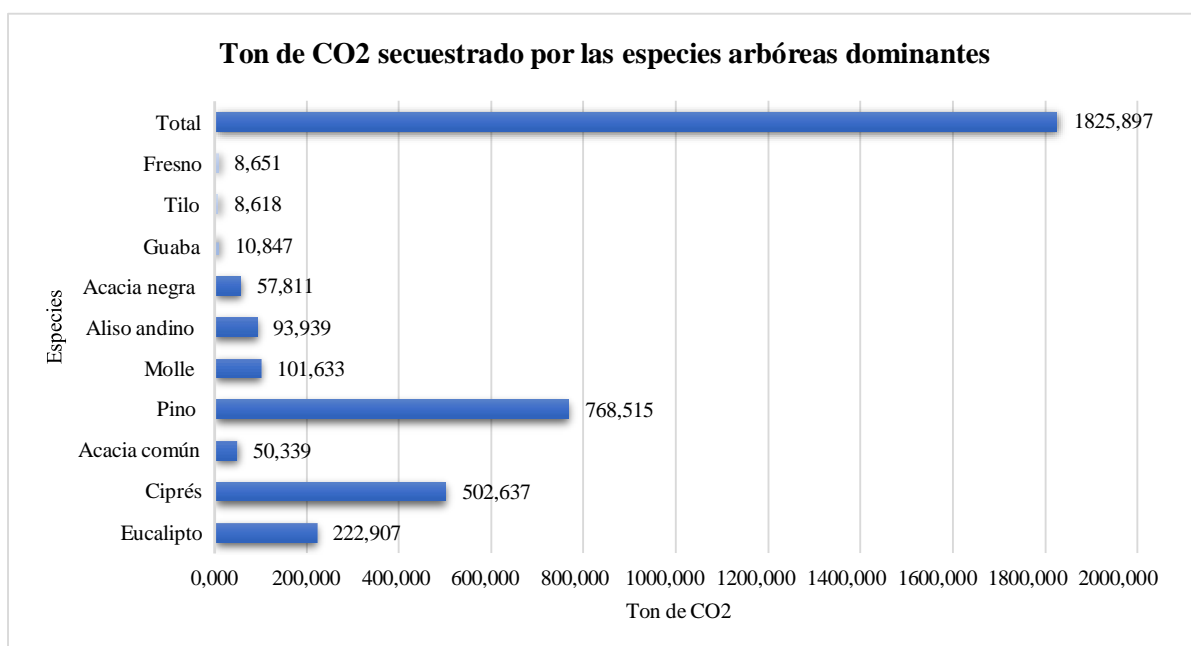
cambio climático y la necesidad de estrategias de conservación y manejo sostenible de sumideros de carbono forestales.

Tabla 17. Toneladas de CO₂ secuestrado por las especies arbóreas dominantes.

Especie	Juvenil	Submaduro	Maduro	Sobremaduro	Carbono secuestrado (Kg)	Ton de CO ₂
Eucalipto <i>Eucalyptus globulus</i>	277,710	4692,652	30105,762	25722,910	60799,034	222,907
Ciprés <i>Cupressus sempervirens</i>	395,872	2188,196	134512,532	-	137096,601	502,637
Acacia común <i>Acacia dealbata</i>	80,343	3561,945	10087,985	-	13730,272	50,339
Pino <i>Pinus radiata</i>	1177,553	14114,355	192050,043	2273,919	209615,870	768,515
Molle <i>Schinus molle</i>	400,731	1441,994	22027,862	3850,376	27720,963	101,633
Aliso andino <i>Alnus acuminata</i>	621,183	13401,215	11599,905	-	25622,303	93,939
Acacia negra <i>Acacia melanoxylon</i>	1643,992	6411,630	7712,598	-	15768,220	57,811
Guaba <i>Inga edulis</i>	22,810	264,299	2671,364	-	2958,473	10,847
Tilo <i>Sambucus mexicana</i>	191,573	752,347	1406,632	-	2350,552	8,618
Fresno <i>Fraxinus uhdei</i>	114,334	1699,439	545,736	-	2359,510	8,651
Total	4926,102	48528,072	412720,419	31847,205	498021,798	1825,897

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

Gráfica 15. Toneladas de CO₂ secuestrado por la vegetación arbórea dominante.



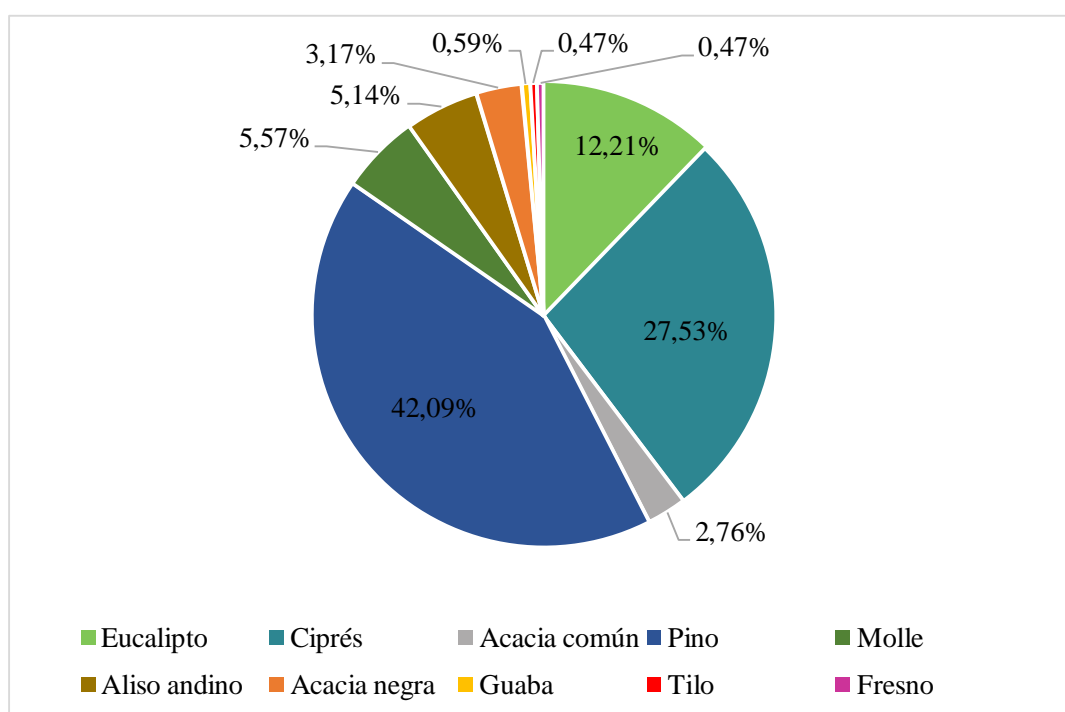
Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

10.4.2 Proporción de CO₂ secuestrado por especies arbóreas en el campus Salache

El Gráfico 16 muestra la distribución porcentual del CO₂ secuestrado por las especies arbóreas dominantes en el área de estudio, se observa que el Pino (*Pinus radiata*) representa la mayor proporción de carbono capturado, con 42.09% del total, lo que evidencia su significativo aporte en la fijación de carbono debido a su rápido crecimiento y alta biomasa, le sigue el Ciprés (*Cupressus sempervirens*) con 27.53%, consolidándose como otra especie fundamental en el almacenamiento de CO₂, el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) ocupa el tercer lugar con 12.21%, lo que refuerza su importancia en estrategias de reforestación orientadas a la mitigación del cambio climático.

En cuanto a las especies nativas, el Molle (*Schinus molle*) y el Aliso andino (*Alnus acuminata*) presentan contribuciones del 5.57% y 5.14%, respectivamente, reflejando su papel en el balance ecológico y la estabilidad del ecosistema, otras especies como la Acacia negra (*Acacia melanoxylon*) (3.17%) y la Acacia común (*Acacia dealbata*) (2.76%) tienen una menor participación relativa, pero siguen siendo relevantes en el proceso de captura de carbono, finalmente, especies como la Guaba (*Inga edulis*), el Tilo (*Sambucus mexicana*) y el Fresno (*Fraxinus uhdei*) presentan los valores más bajos, con aportes inferiores al 1%, lo que sugiere una menor capacidad de almacenamiento de CO₂, probablemente debido a su menor tamaño o densidad poblacional en la zona evaluada.

Gráfica 16. Proporción de CO₂ secuestrado por especies arbóreas (%).



Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

10.4.4 Carbono secuestrado por zona de estudio

La Tabla 18 y la Gráfica 17 presentan la distribución del CO₂ secuestrado por zona de estudio en función del número de individuos y su contribución al almacenamiento de carbono, se observa que la Zona C: Parte Baja es la que acumula la mayor cantidad de CO₂, con 736,605 toneladas, representando el 40.35 % del total, seguida por la Zona B: Parte Media con 574,854 toneladas (31.49 %) y la Zona A: Parte Alta con 514,236 toneladas (28.16 %), dentro de cada zona, las especies con mayor contribución son el Pino (*Pinus radiata*), el Ciprés (*Cupressus sempervirens*) y el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), evidenciando su dominancia en términos de biomasa y captación de carbono, en cambio, especies como el Fresno (*Fraxinus uhdei*), la Guaba (*Inga edulis*) y el Tilo (*Sambucus mexicana*) muestran menores valores de secuestro de CO₂, lo que sugiere una menor representación en términos de volumen y densidad poblacional, estos resultados reflejan la influencia de la composición forestal en la dinámica de captura de carbono y resaltan la importancia de la distribución espacial de las especies en el balance de carbono del ecosistema analizado.

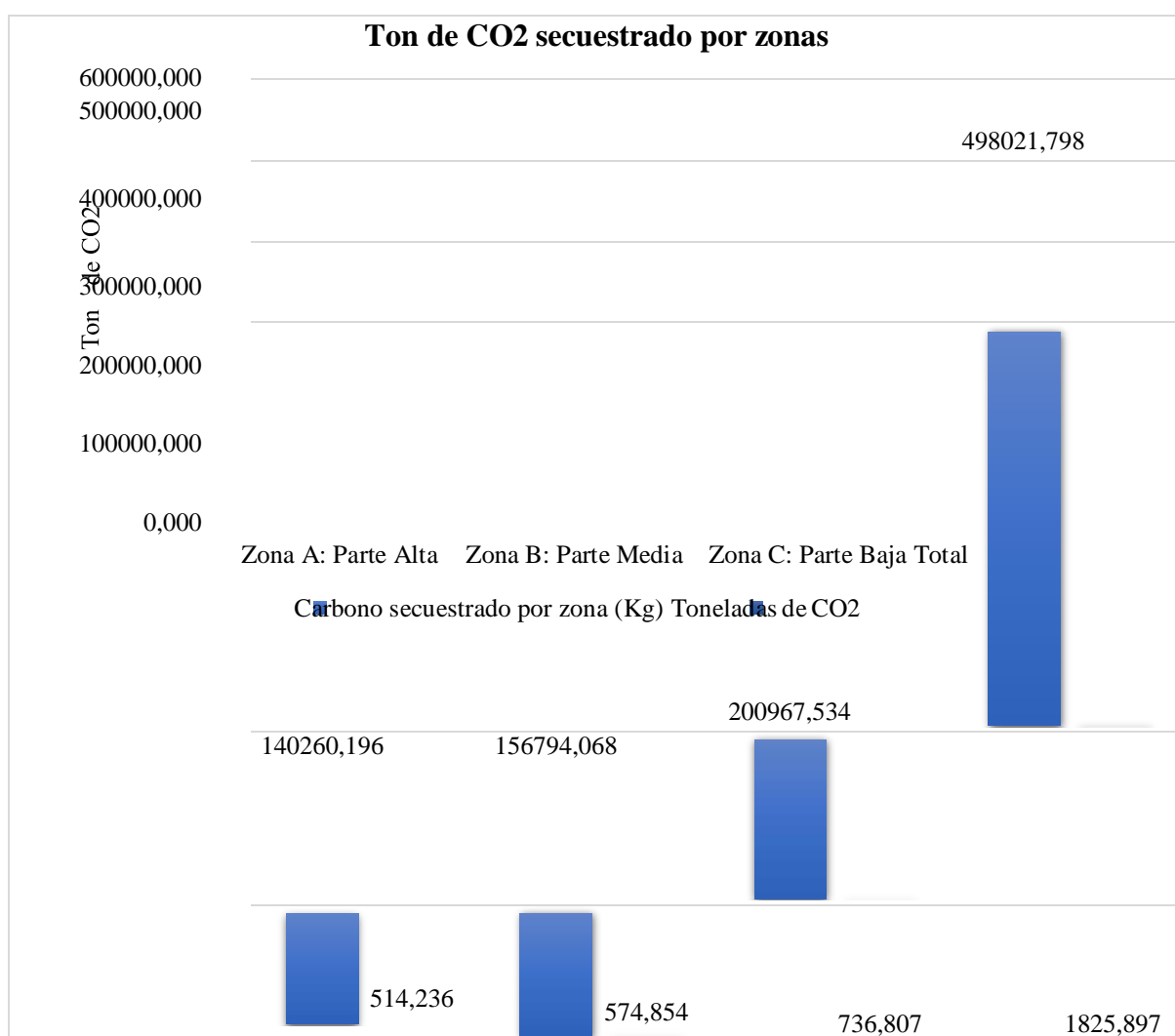
Tabla 18. Ton de CO₂ secuestrado por zona de estudio.

Zona	Especie	Individuos	Carbono secuestrado por zona (Kg)	Toneladas de CO ₂
Zona A: Parte Alta	Eucalipto <i>Eucalyptus globulus</i>	95	140,260.196	514,236
	Ciprés <i>Cupressus sempervirens</i>	25		
	Acacia común <i>Acacia dealbata</i>	94		
	Pino <i>Pinus radiata</i>	216		
	Molle <i>Schinus molle</i>	51		
	Aliso andino <i>Alnus acuminata</i>	11		
	Acacia negra <i>Acacia melanoxylon</i>	26		
	Guaba <i>Inga edulis</i>	86		
	Eucalipto <i>Eucalyptus globulus</i>	12		
	Ciprés <i>Cupressus sempervirens</i>	38		
	Pino <i>Pinus radiata</i>	120		
Zona B: Parte Media	Molle <i>Schinus molle</i>	79	156,794.068	574,854
	Acacia negra <i>Acacia melanoxylon</i>	24		
	Tilo <i>Sambucus mexicana</i>	13		
	Fresno <i>Fraxinus uhdei</i>	10		

	Eucalipto			
	<i>Eucalyptus globulus</i>	2		
	Ciprés			
	<i>Cupressus sempervirens</i>	93		
	Pino			
	<i>Pinus radiata</i>	15		
	Molle			
	<i>Schinus molle</i>	12		
Zona C:	Acacia negra		200,912.386	736,605
Parte	<i>Acacia melanoxylon</i>	118		
Baja	Tilo			
	<i>Sambucus mexicana</i>	112		
	Fresno			
	<i>Fraxinus uhdei</i>	11		
	Aliso andino			
	<i>Alnus acuminata</i>	141		
	Guaba			
	<i>Inga edulis</i>	1		
	Total	1,405	498,021.798	1,825,897

Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

Gráfica 17. Ton de CO2 secuestrado por zona de estudio.



Elaborado por: Adalyd Ibarra (2024)

11 IMPACTOS (SOCIAL, AMBIENTAL Y ECONÓMICO)

11.1 Impacto ambiental

Este estudio contribuye directamente a la mitigación del cambio climático al evaluar el potencial de captura de carbono de los árboles en un ecosistema local, en el que los resultados obtenidos permiten implementar estrategias de conservación y manejo forestal sostenible; optimizando el uso de recursos naturales y promoviendo la restauración ecológica, además, la investigación refuerza la importancia de los ecosistemas forestales como sumideros de carbono proporcionando información de la capacidad de algunas especies arbóreas en la reducción de gases de efecto invernadero y la estabilización del clima regional.

11.2 Impacto social

El proyecto beneficia a la comunidad académica y a los habitantes de la zona, ya que fomenta la educación ambiental y la conciencia sobre la importancia de la biodiversidad, la información sirve como herramienta educativa para estudiantes y docentes de la Universidad Técnica de Cotopaxi, así como para gestores de políticas ambientales; a nivel comunitario, la sensibilización sobre la reforestación y el secuestro de carbono puede motivar prácticas más sostenibles y fortalecer la participación en proyectos de conservación.

11.3 Impacto económico

Desde una perspectiva económica, el estudio respalda el desarrollo de estrategias de gestión sostenible de los bosques, lo que puede generar beneficios financieros a través de programas de compensación de carbono y proyectos de reforestación comercial, además, el fortalecimiento de la biodiversidad forestal favorece sectores como la agroforestería y la silvicultura; promoviendo oportunidades de empleo y desarrollo local, por lo tanto, este estudio contribuye a la elaboración de políticas ambientales que incentiven inversiones en conservación y mitigación del cambio climático.

12 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

12.1 Conclusiones

Conforme al inventario forestal realizado, el campus Salache alberga un total de 1,547 individuos arbóreos, distribuidos en 24 especies diferentes, las especies más representativas en términos de abundancia son el pino (*Pinus radiata*) con 42.09 %, el ciprés (*Cupressus sempervirens*) con 27.53 % y el eucalipto (*Eucalyptus globulus*) con 12.21 %, representando estas tres especies más del 80 % del total de individuos registrados.

La Zona C fue la que presentó la mayor cantidad de árboles, con 608 individuos, seguida por la Zona A con 606 individuos y la Zona B con 333 individuos, esta distribución sugiere diferencias en las condiciones ambientales y en las estrategias de manejo forestal implementadas en cada zona.

Los árboles se clasificaron en cuatro categorías: juvenil, submaduro, maduro y sobremaduro, se observó que la mayor proporción de individuos se encuentra en la fase madura (44.5 % del total), seguida por la fase submadura (34.7 %), juvenil (20.5 %) y sobremadura (0.3 %), esto indica que la población arbórea del campus está compuesta en su mayoría por árboles en etapas intermedias de desarrollo; es decir, en etapa submadura y madura, lo que puede influir en su capacidad de secuestro de carbono y en la dinámica del ecosistema.

De acuerdo con la estimación del secuestro de carbono realizada, el campus Salache alberga un total de 1.405 individuos arbóreos dominantes distribuidas en diferentes especies, con un secuestro total de 1,825,897 toneladas de CO₂, las especies dominantes en términos de captura de carbono fueron el pino (*Pinus radiata*) con 768,515 toneladas, el ciprés (*Cupressus sempervirens*) con 502,637 toneladas y el eucalipto (*Eucalyptus globulus*) con 222,907 toneladas, representando más del 80 % del secuestro total.

Se determinó que la zona con mayor almacenamiento de CO₂ es la Zona C (Parte Baja), con 736,605 toneladas (40.35 % del total), seguida por la Zona B (Parte Media) con 574,854 toneladas (31.49 %) y la Zona A (Parte Alta) con 514,236 toneladas (28.16 %); sugiriendo que la distribución del carbono secuestrado depende de la densidad y tipo de especies presentes en cada zona.

Las especies con menor captura de carbono fueron la guaba (*Inga edulis*) con 10,847 toneladas, el tilo (*Sambucus mexicana*) con 8,618 toneladas y el fresno (*Fraxinus uhdei*) con 8,651 toneladas, estas especies, aunque contribuyen a la biodiversidad, presentan un menor impacto en el secuestro de CO₂ en comparación con las especies dominantes.

12.2 Recomendaciones

Se identifican desafíos como la pérdida de estructura en las terrazas, la falta de mantenimiento en las cortinas rompevientos y la baja regeneración de especies nativas, para ello, se recomienda fortalecer las prácticas de reforestación con especies autóctonas, mejorar el mantenimiento de las terrazas y optimizar la rotación de cultivos en los sistemas silvopastoriles para garantizar un uso sostenible de los recursos forestales en esta zona.

Se recomienda fortalecer las prácticas de reforestación con especies autóctonas como el aliso

(*Alnus acuminata*) y el molle (*Schinus molle*), ya que actualmente representan solo el 5.14 % y 5.57 % del total de individuos, respectivamente, esto contribuiría a mejorar la biodiversidad del campus y su resiliencia ecológica.

Dado que la Zona C (Parte Baja) almacena la mayor cantidad de carbono (736,605 toneladas, equivalente al 40.35 % del total), se recomienda priorizar estrategias de conservación en esta área, asegurando la estabilidad de los árboles de mayor biomasa.

Se recomienda la implementación de programas educativos y de concienciación ambiental dirigidos a estudiantes, docentes y la comunidad local para promover la importancia del secuestro de carbono y el manejo sostenible de los ecosistemas forestales.

13 BIBLIOGRAFÍA

Agencia Espacial Europea (AEE). (2020). *Paquete de recursos educativos de la iniciativa sobre el cambio climático - El ciclo del carbono*.

https://climate.esa.int/media/documents/ESA_CCI_paquete_de_recursos_educativos_El_Ciclo_Del_Carbonio_11_14.pdf

Arroyave Maya, M. del P., Posada Posada, M. I., & Gutierrez Lagoueyte, M. E. (2014).

Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá.
<https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/common-name>

Bilous, A., Zadorozhniuk, R., Makarevych, A., Svychnuk, V., Lashko, A., Bilous, M.,

Myroniuk, V., & Matsala, M. (2024). Sampling Protocol for Measuring Mean Diameter at Breast Height of Forked Urban Trees. *Forests*, 15(3), 1–12.
<https://doi.org/10.3390/f15030458>

Cajilema, D., & Fernández, D. (2023). *Estimación de la capacidad de captura de carbono de cuatro especies arbóreas predominantes de las riberas del río Machángara, Cuenca-Ecuador*. 14–86.

Cancino, J. (2012). *Dendrometría Básica* (1ra ed.). Universidad de Concepción.

<https://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/407>

Chamorro Espinoza, C. H. (2015). “IDENTIFICACIÓN DE LA FLORA (ÁRBOLES Y ARBUSTOS), EXISTENTES EN EL CAMPUS CEYPSA, CANTÓN LATACUNGA, PROVINCIA DE COTOPAXI, PERIODO 2014.” In *Universidad Técnica de Cotopaxi*.

Common, M., & Stagl, S. (2012). Climate change. *Ecological Economics*, 482–520.
<https://doi.org/10.1017/cbo9780511805547.019>

- Cruzatty Vera, J. A., Bazurto Solórzano, Y. A., Rivadeneira Zambrano, R. A., & Carrillo Anchundía, B. J. (2023). Análisis de los factores determinantes de las emisiones de CO₂ en Ecuador. *Publicaciones En Ciencias y Tecnología.*, 17(1), 4–18.
- Educational Foundation. (2021). *Reducir la cantidad de CO₂ en la atmósfera*. Elegir El Futuro Climático de La Tierra.
- Espinoza, B., & López, S. (2023). *Estimación del carbono capturado por las especies vegetales presentes en las riberas del río Burgay dentro de la zona urbana de la ciudad de Azogues-Ecuador*.
- Fonseca, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 51(2), 91. <https://doi.org/10.15359/rca.51-2.5>
- Gómez-godínez, L. J., Cruz-cárdenas, C. I., Rojas-anaya, E., Aragón-magadan, M. A., & Guzmán, L. F. (2024). ENFOQUES GENÓMICOS Y TRANSCRIPTÓMICOS PARA ESTUDIAR ÁRBOLES MADERABLES: PERSPECTIVAS PARA EL ESTUDIO DE CEDRO ROJO (*Cedrela odorata* L.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 27(014).
- Gutiérrez, R. E., Moreno, O. R. D., & Villota, E. N. (2005). Guía De Cubicacion De Madera. In *Maderas comerciales en el Área Metropolitana del Valle*. (Vol. 1).
- Hernández-Nava, J., Pascual-Barrera, A. E., Zaldívar-Jiménez, A., & Pérez-Ceballos, R. (2022). Structure and carbon sequestration in urban mangroves, fundamentals for conservation in Isla del Carmen Campeche, Mexico. *Botanical Sciences*, 100(4), 899–911. <https://doi.org/10.17129/botsci.3048>
- Hernández-Ramos, J., De Los Santos-Posadas, H. M., René Valdez-Lazalde, J., Carlos Tamarit-Urias, J., Ángeles-Pérez, G., Hernández-Ramos, A., Peduzzi, A., Carrero, O., & Responsable, A. (2017). Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake aboveground biomass and expansion factors in commercial forest plantations of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Revista Agrociencia*, 51(8), 921–938.
- Hernández-Restrepo, R. J. (2023). La caficultura y el mercado del carbono, retos y oportunidades. *Memorias Seminario Científico Cenicafé*, 74(1), e740306. <https://doi.org/10.38141/10795/740306>

- Higueta Graciano, N. A. (2018). COMO MEDIR LA ALTURA DE UN ARBOL MÉTODO DE LOS TRIÁNGULOS SEMEJANTES. In *La Academia*.
- Holloway, S., Karimjee, A., Akai, M., Pipatti, R., & Rypdal, K. (2006). TRANSPORTE, INYECCIÓN Y ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE DIÓXIDO DE CARBONO. *Directrices Del IPCC de 2006 Para Los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero*, 2, 1–32.
- IPCC. (2007). Cambio climático 2007 : impacto, adaptación y vulnerabilidad. In *Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático*.
- Jiménez, N. (2012). Producción de madera y almacenamiento de carbono en cafetales con cedro (*Cedrela odorata*) y caoba (*Swietenia macrophylla*) en Honduras. In *CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA*. <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A9025e/A9025e.pdf>
- Jumbo, C. A., Arévalo, C. D., & Ramirez, L. (2017). Medición de carbono del estrato arbóreo del bosque natural Tinajillas-Limón Indanza, Ecuador. *La Granja*, 27(1), 51–63. <https://www.redalyc.org/journal/4760/476054842004/html/>
- Ledesma, S. G., Sione, S. M. J., Oszust, J. D., & Rosenberger, L. J. (2021). ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO Y CAPTURA ARBÓREA DE BOSQUES NATIVOS DEL ESPINAL. *Revista FAVE - Ciencias Agrarias*, 20(1), 331–345.
- López Andrade, P. D. (2024). Capítulo 5: Inventario Forestal. In *ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL Y PLAN DE MANEJO AMBIENTAL PARA LAS FASES DE EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN SIMULTÁNEA DE MINERALES METÁLICOS BAJO EL RÉGIMEN DE PEQUEÑA MINERÍA DE LA CONCESIÓN MINERA “LA MELINA”, CÓDIGO 401429.* (p. 80). <https://maatecalidadambiental.ambiente.gob.ec/index.php/2024/02/09/estudio-de-impacto-ambiental-y-plan-de-manejo-ambienta>
- MacDicken, K. (1997). A guide to monitoring carbon storage in forestry and agro-forestry projects. Arlington, USA: Winrock International. *Winrock International Institute for Agricultural Development*, January 1997.

https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=A+guide+to+monitoring+carbon+storage+in+forestry+and+agroforestry+projects&author=MacDicken%2C+K.G.&publication_year=1997

Manzanilla, G. E., Mata, J. M., Treviño, E. J., Aguirre, Ó. A., Rodríguez, E. A., & Yerena, J. I. Y. (2020). Diversidad , estructura y composición florística de bosques templados del sur de Nuevo León Diversity , structure and floristic composition of temperate forests of southern Nuevo León state. *Rev. Mex. Cien. For*, 11(July), 95–123.

MINEC. (2023). *Guía metodológica para la estimación de carbono en la reserva forestal imataca*. <https://web.bosquesdevenezuela.com/wp-content/uploads/2023/03/Guia-metodologica-para-la-estimacion-de-carbono-1.pdf>

Ministerio de Ambiente del Ecuador. (2012). Bosques Secos Ecuador. *Bosques Secos En Ecuador y Su Diversidad*, 162–187. <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/Bosques-Secos4.pdf>

Ministerio de Energías y Minas. (2024). *Balance Energético Nacional 2023*. www.recursosyenergia.gob.ec

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). *GUÍA PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO Y PARA LA ELABORACIÓN DE UN PLAN DE MEJORA DE UNA ORGANIZACIÓN*. <http://publicacionesoficiales.boe.es>

Morales, J. (2023). *Fichas de plantas*. Infojardín. <https://articulos.infojardin.com/plantas/plantas.htm>

Morales, M., & Vásquez, M. (2019). Valoración Económica De La Captura De Carbono En Las Especies Podocarpus Sprucei Y Oreocallis Grandiflora En El Bosque Protector Aguarongo. *Universidad Politecnica Salesiana-Sede Cuenca*, 150. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7986/1/UPS-CT004855.pdf>

Mosquera, H. Q., Hurtado, D., & Arboleda, J. (2019). Influencia de las condiciones edáficas sobre la dominancia y diversidad de árboles en bosques pluviales tropicales del Chocó biogeográfico. *Revista de Biología Tropical*, 67(6), 1278–1291. <https://doi.org/10.15517/rbt.v67i6.37517>

Muñoz, M., & Vasquez, E. (2020). “Estimación del Potencial de Captura de Carbono en los Parques Urbanos y Emisiones de Co2 Vehicular en Cuenca, Ecuador.” *Universidad Politecnica Salesiana-Sede Cuenca*, 1–148.

https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18390/1/UPS-CT008694.pdf?fbclid=IwAR26ee_K_VKxflPp7tzNwFmX2FZc9WLekWfseVuPk4FEWEjmki7jGQ4_qIA

Navas-Fernández, M., Abadal, E., & Rodrigues, R. S. (2018). Internationality of Spanish scholarly journals indexed in Web of Science and Scopus. *Revista Espanola de Documentacion Cientifica*, 41(3). <https://doi.org/10.3989/redc.2018.3.1498>

Organización de las Naciones Unidas. (2024). Causas y efectos del cambio climático | Organización de las Naciones Unidas. *Acción Por El Clima*. <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>

Paz Rico, A. (2023). *Alturas y formas recomendadas de medir el perímetro o circunferencia de un árbol*. AgroForestales C.A. <https://agroforestales.com/ingeniero-tecnico-forestal/>

Pérez Iglesias, I. H., Rodríguez Delgado, I., & García Batista, M. R. (2021). Secuestro de carbono por el suelo y sus fracciones en agroecosistemas tropicales de la región costa Ecuatoriana. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(2), 141–149. <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v13n2/2218-3620-rus-13-02-141.pdf>

Pintado, S., & Astudillo, D. (2021). *Inventario forestal y estimación de la captura del carbono en los cuatro parques urbanos y en las riberas de los ríos Santa Bárbara y San Francisco en la zona turística del cantón Gualaceo*. 281. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21116>

Placeres, M. R., Toste, M. Á., & Pérez, A. Á. (2007). Los factores ambientales como determinantes del estado de salud de la población. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiologia*, 45(2).

PNUD. (2023). *Diccionario Climático: Una guía práctica para el cambio climático*. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>

Quiceno-Urbina, N.-J., Tangarife-Marín, G.-M., & Álvarez-León, R. (2016). Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena Piapoco Chigüiro-chátare de Barrancominas, departamento del Guainía (Colombia). *Luna Azul*, 43(43), 171–202. <https://doi.org/10.17151/luaz.2016.43.9>

Reitze, A. (2013). Carbon Capture and Storage (Sequestration). *University of Utah College of Law Research Paper*, 58, 1–14.

- Reyes, J. T. S., Sánchez, A. R., de Dios Benavides Solorio, J., Flores, H. J. M., Quiroz, D. C., & Ceja, J. E. S. (2021). Allometric equations, biomass and carbon in tropical forest plantations in the coast of Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(65). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.856>
- Rodríguez Jiménez, A., & Pérez Jacinto, A. O. (2017). Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, 82, 175–195. <https://doi.org/10.21158/01208160.n82.2017.1647>
- Rügnitz, M. T., Chacón, M. L., & Porro, R. (2008). Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. In *Consorcio Iniciativa Amazónica (IA) y Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)*.
- Ruiz-Benito, P., Gómez-Aparicio, L., Benito-Garzón, M., & Zavala, M. Á. (2012). Factores determinantes del secuestro de carbono en los bosques españoles : Desarrollo de herramientas de análisis y prospectiva. *Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)*.
- Ruiz Huaraz, C. B., & Valenzuela Ramos, M. R. (2022). Metodología de la investigación. In *Metodología de la investigación*. <https://doi.org/10.56224/ediunat.4>
- Russo, R. (2009). *Guía Práctica de Medición de Carbono en la Biomasa Forestal*. 1–17.
- Saavedra-Romero, L. de., Hernández-de la Rosa, P., Alvarado-Rosales, D., Martínez-Trinidad, T., & Villa-Castillo, J. (2019). Diversidad, Estructura Arbórea E Índice De Valor De Importancia En Un Bosque Urbano De La Ciudad De México. *Polibotánica*, 0(46), 25–37. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.47.3>
- Somarriba, E., Cerda, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Dávila, H., Espin, T., Mavisoy, H., Ávila, G., Alvarado, E., Poveda, V., Astorga, C., Say, E., & Deheuvels, O. (2013). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 173, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.04.013>
- Toscano Morales, L. A., & Barriga, A. (2009). Análisis de los parámetros y Selección de hornos para la combustión de biomasa. (Aplicación a biomasas locales típicas). *Revista Tecnológica ESPOL*, xx, 1–9.
- Uribe Botero, E. (2015). Estudios del cambio climático en América Latina: El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. *Euroclima*, vol 51(3), 86. Cuba

Useros, J. (2013). El Cambio Climático: sus causas y efectos medioambientales. *Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid*, 50, 71–98.

Valle. (2022). La investigación descriptiva con enfoque cualitativo en educación. In *Pontificia Universidad Católica del Perú* (Vol. 1, Issue 1).

<https://files.pucp.education/facultad/educacion/wp-content/uploads/2022/04/28145648/GUIA-INVESTIGACION-DESCRIPTIVA-20221.pdf>