

**VALORACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL ARBOLADO DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE- SEDE MELÉNDEZ RELACIONADOS CON LA
CAPTURA DE CARBONO**



Lizeth Dahiana Suárez Trejos-1843316

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL MEDIO
AMBIENTE
INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
SEPTIEMBRE 2025

**VALORACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL ARBOLADO DE
LA UNIVERSIDAD DEL VALLE- SEDE MELÉNDEZ RELACIONADOS CON LA
CAPTURA DE CARBONO**



Lizeth Dahiana Suárez Trejos-1843316

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por
el título en Ingeniería Sanitaria y Ambiental**

Director

PhD Juan Pablo Silva Vinasco

Codirector

PhD Johnny Harold Rojas Padilla

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL MEDIO
AMBIENTE
INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
SEPTIEMBRE 2025

Dedicatoria

A mi padre que desde el cielo siempre me ha cuidado y acompañado en cada paso, a mi tía Rocio y Julián que con su apoyo y su firme convicción de que debía ser profesional, moldearon la persona que soy hoy, a mi tía Sorlenny y Rubiano Betancur, que fueron un apoyo muy grande y me recordaron siempre que yo podía, incluso cuando yo misma dejaba de creerlo.

A mis amigos y todas las personas que me apoyaron durante todo este proceso para hacer realidad este logro.

A mí, esa Dahiana que soñaba con ayudar a las personas y al medio ambiente, que quería trabajar en algo que la apasionara, la que lloró toda la carrera, pero nunca se dio por vencida. A la profesional que eligió este camino no por obligación, sino por pasión.

Agradecimientos

A la Universidad del Valle, por la formación profesional recibida, y a los profesores que compartieron su conocimiento y nos dejaron grandes enseñanzas.

Al profesor Juan Pablo Silva por su paciencia, dedicación y constante disposición para seguir apoyándome en mi trabajo de grado.

Tabla de contenido

Dedicatoria	7
Resumen	1
1. Introducción	2
2. Planteamiento del problema	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	6
4.1. Objetivo general	6
4.2. Objetivos específicos	6
5. Marco teórico	7
5.1. Servicios ecosistémicos	7
5.2. Valoración de servicios ecosistémicos	13
5.3. Biomasa aérea	14
5.4. Captura de carbono	15
5.5. Bosque seco	16
6. Metodología	16
6.1. Delimitación de la zona de estudio	16
6.2. Identificación de especies arbóreas	18
6.3. Cálculos de captura de carbono por especie	18
6.4. Ingreso a SIG	20
6.5. Realización de Dashboard	21
6.5.1. Instrucciones de uso de Dashboard	21
6.6. Realización de plan de gestión ambiental del arbolado urbano	25
7. Análisis de resultados	25
8. Discusión	43
9. Plan de gestión ambiental del arbolado de la universidad	48
9.1. Programas y plan de acciones	48
9.1.1. Conservación y protección	48
9.1.2. Informe de recuperación del bosque seco	51
9.1.3. Reforestación y diversificación de especies	52

9.1.4. Monitoreo y tecnología.....	53
9.1.5. Participación comunitaria.....	54
9.2. Cronograma.....	56
9.3. Seguimiento.....	57
10. Conclusiones	58
11. Recomendaciones.....	59
12. Bibliografía.....	61

Tablas y figuras

Figura 1. Relación entre los servicios intermedios, finales y los beneficios	10
Figura 2. Representación de la biomasa aérea total.....	15
Figura 3. Delimitación zona de estudio.....	17
Figura 4. Pasos empleados en el método directo para la determinación de la biomasa aérea.....	18
Figura 5. Medición de variables en campo.....	19
Figura 6. Representación de organización de simbología de árboles.....	21
Figura 7. Representación visualización Dashboard.....	22
Figura 8. Representación de atributos de individuo arbóreo	22
Figura 9. Visualización de zoom interactivo	23
Figura 10. Representación de filtro por familia.....	23
Figura 11. Representación de filtros.....	24
Figura 12. Representación geográfica de los árboles	26
Figura 13. Cantidad de individuos arbóreos por especie.....	27
Figura 14. Ubicación de Mangifera Indica.....	28
Figura 15. Distribución espacial Pithecellobium dulce	28
Figura 16. Distribución espacial Swinglea Glutinosa	28
Figura 17. Ubicación de Samanea saman.....	29
Figura 18. Distribución espacial Jacaranda caucana	29
Figura 19. Distribución espacial Tabebuia rosea.....	29
Figura 20. Distribución espacial de Ficus benjamina.....	30
Figura 21. Distribución espacial de Ceiba pentandra.....	30
Figura 22. Visualización de especies vetadas	31
Figura 23. Vitalidad de los individuos arbóreos.....	31
Figura 24. Representación en Dashboard de las especies de vitalidad “Muerto”	32
Figura 25. Representación en Dashboard de las especies de vitalidad “Malo”	32
Figura 26. Representación en Dashboard de las especies de vitalidad “Regular”	33
Figura 27. Representación en Dashboard de las especies de vitalidad “Bueno”	34
Figura 28. Captura de CO2 por familia	34

Figura 29. Captura de CO ₂ por especie arbórea	35
Figura 30. Especies pertenecientes a la familia Fabaceae	36
Figura 31. Especies pertenecientes a la familia Anacardiaceae	37
Figura 32. Especies pertenecientes a la familia Bignoniaceae	38
Figura 33. Especies pertenecientes a la familia Malvaceae	38
Figura 34. Ubicación de árboles notables y polígono de restauración	55
Tabla 1. Definiciones de servicios ecosistémicos	7
Tabla 2. Prácticas de manejo arbóreo realizadas por otras instituciones	25
Tabla 3. Captura de CO ₂ por especie según vitalidad	36
Tabla 4. Comparación especies de las familias con mayor captura de carbono	39
Tabla 5. Carbono promedio de árbol por especie	40
Tabla 6. Carbono promedio por especie con mayor cantidad de CO ₂	41
Tabla 7. Características morfológicas de las especies más representativas	42
Tabla 9. Cronograma actividades para el desarrollo del plan de gestión ambiental	56
Tabla 10. Indicadores de seguimiento PGA	57

Valoración de los servicios ecosistémicos del arbolado de la Universidad del Valle- sede Meléndez relacionados con la captura de carbono

Resumen

En el presente trabajo de grado se cuantificó la captura de CO₂ en la Universidad del Valle, sede Meléndez, ubicada en Cali, Colombia, un área con alta diversidad arbórea, pero con limitada cuantificación de estos servicios. Mediante el uso de ecuaciones alométricas y sistemas de información geográfica (SIG), se cuantificó el carbono almacenado en 5236 árboles pertenecientes a 192 especies.

Los resultados mostraron que el campus tiene almacenado un total de 88,58 toneladas de CO₂ por hectárea, destacándose especies como *Pithecellobium dulce*, *Samanea saman* y *Ceiba pentandra* por su alta eficiencia en captura de carbono, a pesar de no ser las más abundantes, mientras que especies como *Mangifera indica*, a pesar de su abundancia, presentó un rendimiento moderado. Las familias *Fabaceae*, *Anarcadiaceae*, *Bignoniaceae* y *Malvaceae*, propias del bosque seco tropical, fueron las que más contribuyeron a este servicio. Se identificó una correlación positiva entre el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la capacidad de almacenamiento de CO₂, evidenciando que árboles con mayor DAP, o maduros, tienen un impacto significativo incluso con baja densidad poblacional.

Se evidenció desafíos en la gestión del arbolado como la presencia de especies invasoras como *Swinglea glutinosa*, aunque abundantes, presentan una baja contribución a la captura de carbono, lo que refuerza la necesidad de priorizar especies nativas en planes de reforestación y manejo urbano. El estudio también destacó la importancia de preservar árboles maduros y promover la diversificación de especies para optimizar los servicios ecosistémicos.

La integración de herramientas SIG permitió visualizar la distribución espacial y las características del arbolado, facilitando la toma de decisiones para la gestión ambiental. Se recomienda implementar estrategias de reemplazo selectivo de especies invasoras, priorizar la siembra de especies nativas eficientes y mantener un monitoreo continuo del arbolado para maximizar sus beneficios ambientales y sociales.

1. Introducción

Los ecosistemas son sistemas complejos que albergan una gran diversidad de especies, tanto animales como vegetales, y están compuestos por diversos elementos abióticos tales como la luz solar, el agua, entre otros (National Geography, 2022). Estos sistemas son esenciales para cubrir tanto las necesidades humanas como del resto de la naturaleza y mejoran la calidad de vida gracias a los servicios ecosistémicos que ofrecen.

Uno de los componentes clave en la provisión de servicios ecosistémicos en las ciudades es el arbolado urbano, ya que ofrecen servicios como la provisión de frutos y alimento, hábitat de especies, apreciación estética y paisajística, además también desempeña un papel fundamental en la mitigación de problemas ambientales, como la erosión del suelo y las inundaciones, así como la captura de carbono, (MEA, 2005; Retamal, 2015). Sin embargo, debido a las dinámicas de urbanización en las ciudades no todas las zonas urbanas cuentan con una cobertura arbórea apropiada lo que genera pérdidas de servicios ecosistémicos.

La ciudad de Cali cuenta con un total de árboles de 291,871 árboles distribuidos en sus 22 comunas (Cali Cómo Vamos, 2023). Una de las zonas que cuenta con mayor cobertura arbórea es la zona del sur de Cali, especialmente el campus de la Universidad del Valle sede Meléndez. Dada la presencia de gran cobertura arbórea se espera que en este campus se produzca una mayor captura de carbono. Sin embargo, no se ha hecho una cuantificación precisa de este servicio, por lo cual se requiere desarrollar una propuesta de investigación que cuantifique la captura de CO₂ del arbolado de la Universidad del Valle sede Meléndez.

En este marco, el presente trabajo tuvo como objetivo cuantificar la captura de CO₂ atribuida al arbolado presente en la Universidad del Valle, sede Meléndez, utilizando ecuaciones alométricas adaptadas al bosque seco tropical y representarla mediante un Dashboard en ArcGIS para su visualización espacial. Los resultados aportarán herramientas para una mejor planificación y gestión de estos servicios ecosistémicos en la ciudad de Cali.

2. Planteamiento del problema

El arbolado urbano desempeña un papel fundamental en la provisión de servicios ecosistémicos tales como la mitigación de problemas ambientales como la erosión del suelo, las escorrentías y las inundaciones; la reducción del efecto de isla de calor: al proporcionar sombra y refrescar el ambiente, la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad: al proporcionar hábitats para la fauna y microflora (MEA, 2005). Asimismo, el arbolado urbano ofrece beneficios culturales como espacios para la recreación y esparcimiento, favoreciendo la salud mental y el bienestar, también tiene un valor estético, ya que embellece y organiza el espacio urbano (Suchocka et al., 2023). Sin embargo, el acceso a estos beneficios presenta marcadas desigualdades a nivel global, regional y local, lo que limita su potencial como estrategia de mitigación climática y bienestar social.

Mientras ciudades como Vancouver o Portland superan ampliamente los estándares internacionales, con un promedio de 30 m² de áreas verdes por habitante, en Colombia, para el año 2017 esta cifra era de 4.9m² por persona (Sierra et al., 2017), valor por debajo de lo recomendado por la OMS (9 m²) (Ismat, 2024; Ramachandra et al., 2017). Esta brecha tiene consecuencias concretas en la calidad de vida urbana y la capacidad de mitigación climática, evidenciándose en mayores índices de enfermedades respiratorias y estrés térmico en zonas con déficit arbóreo (Namin et al., 2020; Nowak et al., 2022).

Para profundizar acerca de la presencia de arbolado urbano en el contexto colombiano, se debe partir de la significativa transformación que ha presentado el territorio desde el siglo XX. Según el censo de 1938, menos de la mitad de la población del país vivía en áreas rurales, sin embargo, esto cambió rápidamente en la década de 1960, cuando el ritmo de la población urbana comenzó a crecer de forma acelerada (Murad Rivera, 2003). En el año 2020, el 80,1% de la población colombiana vivía en áreas urbanas, lo que representa un aumento significativo del 50,8% registrado en 1964 (DANE, 2020). Este crecimiento poblacional ha generado una mayor demanda de infraestructura urbana y ha ejercido una importante presión sobre los servicios ecosistémicos.

En Colombia, las disparidades en la cobertura arbórea urbana resultan particularmente alarmantes.

Bogotá, Medellín y Cali presentan índices bajos de 0,16, 0,14 y 0,12 árboles por habitante respectivamente, cifras que no alcanzan el estándar recomendado por la OMS (0,33 árboles por persona). Esta carencia se refleja claramente en Cali, donde según el informe realizado por “Cali cómo vamos” (2023) apenas un 46% de los ciudadanos encuestados manifiesta satisfacción con la cantidad de árboles en la ciudad, percepción que coincide con los datos del censo arbóreo de la ciudad de Cali, que muestran un estancamiento en el número de árboles entre 2021 y 2022 (291.871 individuos). Las consecuencias de esta inequidad son tangibles mientras las comunas 20, 14 y 13 tienen un promedio de 0,02 árboles áreas como la comuna 17 donde se ubica la Universidad del Valle, presentan mejores condiciones ambientales gracias a su mayor densidad de árboles, esta última no sólo cumple con lo recomendado por la OMS de 0,33 árboles/habitante (Cali Cómo Vamos, 2023), sino que también satisface la regla de 3-30-300 (Browning et al, 2024), la cual promueve ciudades más verdes y saludables al establecer que las personas deben: ver por lo menos 3 árboles desde su hogar, trabajo o universidad, contar con al menos 30% de cobertura arbórea en su barrio o vecindario, residir a un máximo de 300 metros de un espacio verde público de alta calidad.

La Universidad del Valle sede Meléndez es una zona representativa del sur de la ciudad ya que cuenta con alta riqueza arbórea y vegetal por lo que en el año 2010 fue declarada jardín botánico universitario, lo que la convierte en una localización idónea para la valoración de servicios ecosistémicos como la captura de CO₂. Además, los 5.236 árboles del campus representan alrededor del 10% del total de la comuna, lo que destaca su importancia como reservorio de biodiversidad y servicios ecosistémicos en la zona.

En el inventario arbóreo realizado en el año 2022 por el área de Gestión Ambiental y Servicios Varios de la Universidad del Valle sede Meléndez, se obtuvo que este campus cuenta con 5236 individuos, 186 especies arbóreas. El mayor número de individuos se registró para especies como *Mangifera indica* (665 individuos) y *Pithecellobium dulce* (514 individuos). El arbolado de la Universidad del Valle, sede Meléndez, constituye un patrimonio ecológico clave para la provisión de servicios ecosistémicos en la ciudad. Sin embargo, el inventario arbóreo evidencia desafíos críticos: 38.22% de los individuos presentan vitalidad “Regular”, y especies invasoras como *Swinglea glutinosa* vetadas por el DAGMA (2022) ocupan espacios que podrían ser destinados a especies nativas con mayor eficiencia en captura de CO₂. A esto se suma la presión por expansión

de infraestructura universitaria, que podría reducir la cobertura arbórea si no se implementan medidas de gestión ambiental para el arbolado.

De esta manera el presente trabajo cuantificó la captura de CO₂ por parte de los árboles en el campus de la Universidad del Valle sede Melendez con el fin de hacer una valoración y realizar un plan de gestión ambiental para el manejo del arbolado de la Universidad del Valle.

3. Justificación

La cuantificación de la captura de CO₂, en la Universidad del Valle, puede proveer información para la toma de decisiones en la conservación y expansión del arbolado y fomentar su incorporación en planes de desarrollo, tanto de la universidad como de la ciudad. Por lo tanto, el presente trabajo de grado permitirá obtener los siguientes impactos:

En lo social

Fortalecer la conexión entre la comunidad y la naturaleza, ya que la falta de datos concretos sobre sus beneficios limita la toma de decisiones informadas. El presente estudio proporcionará evidencia cuantificable sobre el aporte del arbolado incentivando su valoración y conservación por parte de la comunidad.

Ecológico

Cuantificar captura de carbono permite que se adquiera una relevancia significativa en este contexto, contribuyendo a una mejor planificación y gestión sostenible del arbolado de la Universidad del Valle. La cuantificación de captura de CO₂ permitirá identificar las especies con mayor capacidad de captura, optimizando estrategias de siembra y manejo forestal.

Institucional

Se proporcionará información que puede ser utilizada para la toma de decisiones internas y para la mejora de la gestión del campus universitario, como la planificación de áreas verdes, la selección de especies arbóreas adecuadas, la implementación de prácticas de conservación y la promoción de la educación ambiental dentro de la comunidad universitaria.

Investigativo

Abordar un vacío de conocimiento en el contexto caleño, aunque existen estudios sobre arbolado urbano en otras ciudades, en Cali hay pocas investigaciones que cuantifiquen de manera integral la captura de CO₂. Este trabajo fortalecerá la discusión sobre el papel de las universidades como espacios para la conservación y protección del arbolado urbano.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Evaluar la oferta de los servicios ecosistémicos relacionados con la captura de carbono de la Universidad del Valle sede Meléndez.

4.2. Objetivos específicos

- Identificar la relación entre las especies de árboles, sus características biofísicas y el potencial de provisión de los servicios ecosistémicos de captura de carbono.
- Cuantificar la captura de Carbono del arbolado urbano de la Universidad del Valle utilizando ecuaciones alométricas.
- Realizar un plan de gestión ambiental del arbolado de la Universidad del Valle.

5. Marco teórico

5.1. Servicios ecosistémicos

El término de servicios ecosistémicos emergió como respuesta a la creciente conciencia ambiental de los años 60, cuando se evidenció la crisis ecológica global y sus efectos en la capacidad del planeta para sustentar a la humanidad (Mooney y Ehrlich, 1987). Este concepto buscaba visibilizar la relación crítica entre el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano, enumerando por primera vez los beneficios concretos que la naturaleza provee a las sociedades (Mooney y Ehrlich, 1987).

La evolución conceptual de los servicios ecosistémicos ha generado diversas definiciones fundamentales, tal como se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1. Definiciones de servicios ecosistémicos

Definición	Autores
Los servicios ecosistémicos son las condiciones y los procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies que los componen sustentan y satisfacen la vida humana.	Daily (1997)
Los bienes (como alimentos) y servicios (como asimilación de residuos) de los ecosistemas, que representan los beneficios que la población humana obtiene, directa o indirectamente, de las funciones de los ecosistemas	Constanza et al., (1997)
Funciones del ecosistema: capacidad de los procesos y componentes naturales para proporcionar bienes y servicios que satisfacen las necesidades humanas, directa o indirectamente	De Groot et al., (2002)
Aquellas funciones o procesos ecológicos que directa o indirectamente contribuyen al bienestar humano o tienen	U.S. EPA, (2004)

un potencial para hacerlo en el futuro.	
Los servicios ecosistémicos son los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas	MEA, (2005)
Son componentes de la naturaleza, disfrutados, consumidos o directamente usados para producir bienestar humano.	Boyd y Banzhaf, (2007)
Son los aspectos de los ecosistemas utilizados activa o pasivamente para producir bienestar humano.	Fisher et al., (2009)

Según MEA (2005), estos servicios se dividen en cuatro categorías:

Servicios de soporte: son la base esencial para el desarrollo de los demás servicios ecosistémicos. Su impacto en las poblaciones es indirecto y se manifiesta a lo largo de un período prolongado de tiempo. Estos servicios son vitales para el funcionamiento de los ecosistemas y sustentan la vida en la tierra (MEA, 2005).

Entre los servicios de soporte destacan la formación de suelo, esencial para servicios de aprovisionamiento que dependen de su fertilidad; la fotosíntesis, que genera oxígeno indispensable para la supervivencia de la mayoría de los organismos vivos; la producción primaria, proceso mediante el cual los organismos capturan energía y nutrientes; así como los ciclos biogeoquímicos (MEA, 2005).

Servicios de aprovisionamiento: son los productos obtenidos directamente de los ecosistemas que son vitales para el bienestar humano tales como; alimentos, agua dulce, fibras, combustibles, recursos genéticos, productos químicos, recursos ornamentales (MEA, 2005).

Servicios de regulación: los ecosistemas regulan procesos ecológicos esenciales mediante ciclos biogeoquímicos y dinámicas biológicas, generando beneficios tanto directos como indirectos para el bienestar humano (Camacho & Ruiz, 2012). Estos servicios son esenciales para mantener un equilibrio ambiental, entre estos se encuentran:

la regulación de la calidad de aire, tanto a través de la emisión como de la adsorción de productos

químicos atmosféricos; la regulación del clima a nivel local y global, influenciando la temperatura, la precipitación y la emisión de gases de efecto invernadero; la regulación del agua, controlando la escorrentía, las inundaciones y la recarga de acuíferos; la regulación de la erosión mediante la retención del suelo y la prevención de deslizamientos de tierra; la depuración de aguas y tratamiento de residuos, filtrando y descomponiendo sustancias indeseables; la regulación de enfermedades, afectando la abundancia de patógenos y vectores de enfermedades; la regulación de plagas; la polinización, la regulación de riesgos naturales, un ejemplo de ello es la presencia de ecosistemas costeros como manglares y arrecifes de coral, que pueden reducir el daño ocasionado por huracanes o grandes olas (MEA, 2005).

Servicios culturales: estos son los beneficios intangibles que enriquecen la vida de las personas de diversas maneras. A través de ellos, la naturaleza no solo sustenta la existencia material, sino que también nutre la mente, espíritu y cultura. Estos servicios incluyen valores espirituales y religiosos, inspiración artística y cultural, desarrollo cognitivo y educativo, bienestar psicológico, recreación, diversidad cultural (MEA, 2005).

En esencia, estos servicios revelan que los ecosistemas no solo sustentan la vida biológica, sino también la esencia de la humanidad como la capacidad de asombro, creación, espiritualidad y pertenencia (MEA, 2005).

Por otro lado, Wallace (2007) señala que los sistemas de clasificación tradicionales de servicios ecosistémicos presentan deficiencias porque mezclan en una misma categoría tanto los procesos ecológicos (medios) con los servicios resultantes (fines), lo que genera ambigüedades en la toma de decisiones. Para superar esto, propone un marco innovador que distingue claramente entre las estructuras ecológicas (bienes naturales) y estos a su vez son clasificados de acuerdo con los valores humanos que ellos sostienen (bienestar humano) (Wallace, 2007).

Otra clasificación es la de Turner et al., (2008), quienes proponen un esquema de clasificación que divide a los servicios ecosistémicos en “servicios intermedios” y “servicios finales”. Según esta clasificación, los procesos y la estructura del ecosistema pueden considerarse servicios, pero su categorización como intermedios o finales depende de su relación directa con el bienestar humano.

Un mismo componente ecológico puede funcionar como servicio intermedio si contribuye a la generación de otros servicios, o como servicio final si proporciona un beneficio directamente reconocible para las personas. En esta misma línea, los autores destacan la importancia de establecer un vínculo claro entre los procesos ecológicos y los servicios ecosistémicos, ya que esto facilita identificar los beneficios relevantes para los usuarios. A partir de esta identificación, se puede determinar cuáles beneficios son adecuados y significativos para ser considerados en estudios de valoración económica (Turner et al., 2008). En Figura 1 se observa la relación entre los servicios intermedio, finales y los beneficios.

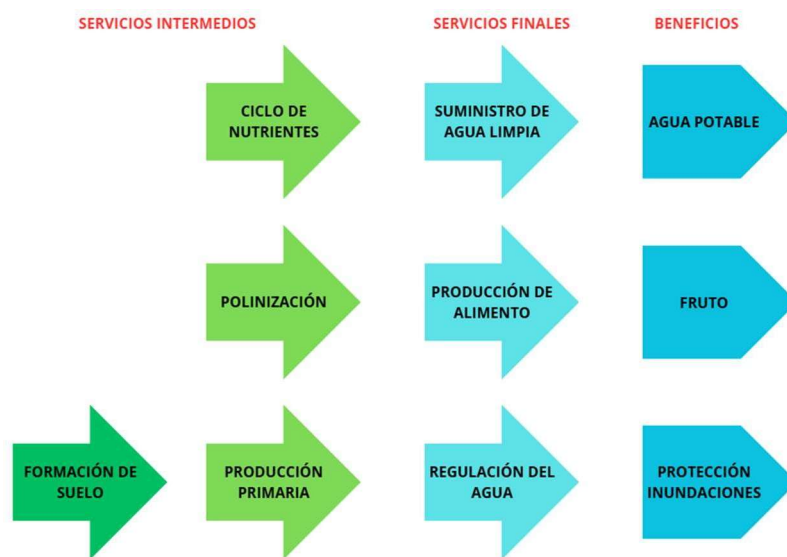


Figura 1. Relación entre los servicios intermedios, finales y los beneficios

Fuente: Turner et al., (2008)

Servicios ecosistémicos de los árboles

El arbolado urbano es el conjunto de plantas de las especies correspondientes a los biotipos de árbol, arbusto, palma o helecho arborescente, ubicados en suelo urbano (Corzo, 2007). Este brinda servicios ecosistémicos como:

- Reducción de la temperatura: Ballester Olmos (1991) afirma que la vegetación desempeña un papel crucial en la regulación de la temperatura de las ciudades, debido a que la sombra

que proyecta reduce la incidencia de radiación solar sobre superficies pavimentadas, disminuyendo la absorción y posterior liberación de calor; además el proceso de evapotranspiración enfría el aire al convertir el agua líquida en vapor.

La Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Entre Ríos (Argentina) reveló diferencias térmicas significativas entre zonas urbanas con distinta cobertura arbórea. Los resultados mostraron que las áreas con mayor densidad arbórea registraron temperaturas hasta 4°C más bajas y un 11% más de humedad relativa en comparación con sectores con escasa vegetación. La vegetación arbórea absorbe la energía reflejada por las edificaciones y la utilizan para su subsistencia y creación de biomasa (Priego, 2002).

- Disminución de contaminantes atmosféricos: Según Smith (1990), los árboles actúan como filtros naturales de contaminantes gaseosos. Este proceso ocurre cuando las hojas absorben los gases a través de sus estomas, permitiendo que las sustancias se difundan hacia los espacios intracelulares. Posteriormente, los contaminantes pueden disolverse en las películas de agua presentes o reaccionar químicamente con las superficies foliares internas, transformándose en compuestos menos nocivos (Priego, 2002).
- Captura de carbono: a través del proceso fotosintético los árboles absorben dióxido de carbono atmosférico y lo transforman en compuestos orgánicos que utilizan para su crecimiento. Datos del Servicio Forestal de USA revelan que los bosques estadounidenses capturan anualmente 866 millones de toneladas de carbono, cantidad que compensa cerca del 16% de las emisiones anuales de CO₂, demostrando su capacidad como sumideros naturales de carbono (Norman y Kreye, 2023).
- Efectos energéticos en las construcciones: los árboles brindan beneficios energéticos significativos en las edificaciones al funcionar como reguladores térmicos naturales. Durante el invierno, su follaje actúa como barrera contra los vientos fríos, disminuyendo la demanda de calefacción. En verano, la sombra proyectada por su copa puede reducir la temperatura interior de las construcciones, generando ahorros en el consumo de sistemas de refrigeración (Norman y Kreye, 2023).

- Conservación del agua y reducción de la erosión del suelo: cubiertas foliares como las zonas con vegetación, reducen el impacto de las gotas de lluvia, mientras que las raíces y suelos permeables facilitan la infiltración hídrica, devolviendo nuevamente al ciclo hidrológico previniendo escorrentía superficial. siendo. Los árboles funcionan como estructuras de retención para reducir la escorrentía, reduciendo los costos de tratamiento de agua (Priego, 2002).
- Reducción de la contaminación acústica: las áreas verdes estratégicamente diseñadas con árboles y arbustos funcionan como barreras acústicas naturales, mitigando significativamente la contaminación sonora. Las hojas y ramas reducen el sonido dispersándolo, mientras que el suelo lo absorbe (Priego, 2002).
- Aumento de la biodiversidad: muchas especies animales y vegetales, dependen de los árboles para sobrevivir, utilizan los árboles como refugio, protección y alimento (Priego, 2002).

El arbolado urbano también tiene beneficios culturales como:

- Efectos psicológicos en el ser humano: En estudios realizados por Ulrich (1984), se comprobó que los entornos con abundante vegetación arbórea generan respuestas fisiológicas de relajación en las personas, a diferencia de los espacios sin cobertura vegetal. Se demostró que los pacientes de un hospital con vistas de árboles por las ventanas se recuperan más rápido y con menos complicaciones que los pacientes sin estas (Priego, 2002).
- Bienestar humano: estos proporcionan lugares de recreación y reunión, para diferentes actividades, ayudan a relajarse y pasar tiempo al aire libre. También juegan un papel importante en cuanto a la educación ambiental ya que en muchos parques se ofrecen puntos de observación de flora y fauna, sensibilizando la importancia de la conservación (Stand for trees, 2022).

5.2. Valoración de servicios ecosistémicos

Puede definirse como el proceso de sintetizar, interpretar y comunicar conocimientos y datos sobre las formas en que las personas conceptualizan, comprenden y valoran los servicios ecosistémicos para facilitar la deliberación y el acuerdo, en la toma de decisiones y la planificación informada (Gómez & Martín, 2015).

En el libro *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems* (Daily, 1997), se propone una valoración integral de los servicios ecosistémicos, destacando su papel crítico para el bienestar humano y la sostenibilidad. Este libro también subraya que, aunque estos servicios son esenciales su valor suele ser ignorado en decisiones económicas y políticas por la falta de mercados que los cuantifiquen.

La valoración de servicios ecosistémicos implica analizar las compensaciones necesarias para alcanzar objetivos de bienestar humano y sostenibilidad (Farber et al., 2002; Constanza et al., 2011). Los servicios ecosistémicos no pueden valorarse únicamente desde percepciones individuales, ya que estas suelen ser limitadas o sesgadas (Kahneman, 2011). Por ello, se requieren métodos que integren tanto beneficios directos como contribuciones menos tangibles, como la resiliencia ecológica o los impactos comunitarios (Constanza, 2000).

- **Valoración económica**

Se centra en evaluar las compensaciones que la sociedad está dispuesta a asumir por conservar los recursos naturales, ya sea mediante pagos directos o intercambios alternativos. Este enfoque busca visibilizar la escasez de estos servicios y los costos asociados a su degradación, proporcionando información crítica para orientar las decisiones de consumidores, proveedores y políticas públicas (INECC, 2020).

Para cuantificar estos valores, se emplean diversas metodologías. Daily (1997) propone, la realización de encuestas de valoración contingente, que permiten estimar la disposición a pagar de las personas por conservar un servicio ecosistémico específico. Asimismo, se utiliza el costo de reemplazo, que calcula lo que implicaría replicar artificialmente un servicio natural (por ejemplo

construir plantas de tratamiento de agua en lugar de depender de la filtración natural de los humedales). También se analizan los impactos económicos indirectos de su pérdida, como la disminución de la productividad agrícola debido a la degradación de los suelos (Daily, 1997).

Entre las soluciones prácticas para integrar esta valoración en la gestión ambiental, destacan los pagos por servicios ambientales, (PSA), mecanismos que compensan económicamente a las comunidades por conservar ecosistemas críticos, como bosques o cuencas hidrográficas. Otra propuesta clave es la implementación de impuestos a la degradación, que internalizan los costos ambientales en los precios de mercado, tal como ocurre con los impuestos al carbono (Daily, 1997).

- **Valoración ética**

El libro Daily (1997) dice que reducir la naturaleza a servicios monetizables es insuficiente y peligroso. Propone incorporar:

- Derechos intrínsecos: los ecosistemas tienen valor por sí mismos, independientemente de su utilidad humana.
- Justicia intergeneracional: las decisiones actuales deben preservar servicios para futuras generaciones, incluso si no son rentables a corto plazo.
- Equidad distributiva: muchos servicios benefician desproporcionadamente a comunidades vulnerables; haciendo que la pérdida de estos servicios profundice desigualdades.

Johnson. et al (2024), postulan que la justicia interespecies reconoce el valor intrínseco de todos los seres vivos y ecosistemas, más allá de su utilidad como “recursos”. Además, enfatizan su naturaleza interdependiente, señalando que la salud humana depende del bienestar del conjunto de la red de la vida.

5.3. Biomasa aérea

La biomasa aérea total (Bt) corresponde al peso seco acumulado de la materia vegetal de árboles cuyo diámetro a la altura del pecho (DAP) supera los 10cm. Esta biomasa abarca todas las partes del árbol, incluyendo el tronco, la corteza, las ramas y las hojas, se mide considerando la altura

completa del árbol, desde la base en el suelo hasta la punta de la copa (Dauber et al., 2021).

Fuste, corteza, ramas y hojas

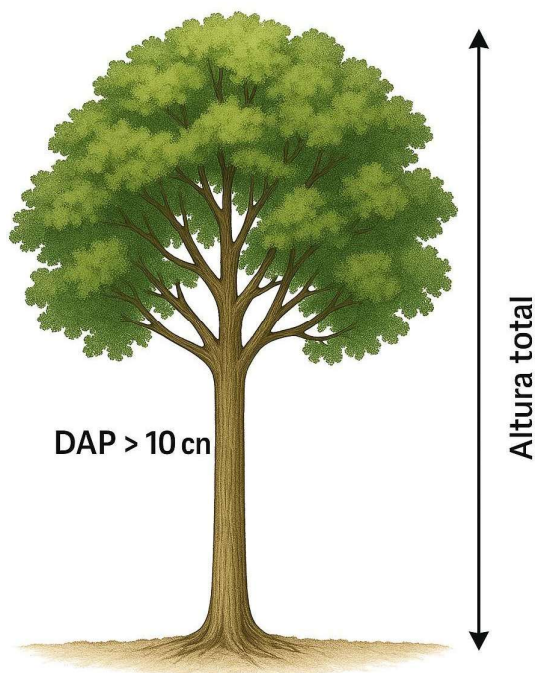


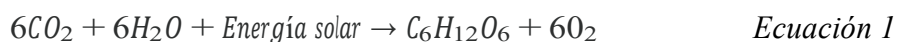
Figura 2. Representación de la biomasa aérea total

Imagen generada con IA

5.4. Captura de carbono

Las plantas a través de sus procesos metabólicos mantienen un equilibrio entre la fotosíntesis y la respiración. Este balance les permite interactuar con su entorno, absorbiendo dióxido de carbono (CO₂) para la fotosíntesis y oxígeno (O₂) para la respiración, procesos esenciales para obtener la energía necesaria para sus procesos vitales (Sedjo & Sohngen, 2012).

Durante la fotosíntesis, las hojas de los árboles absorben CO₂ del aire a través de los estomas, con la energía solar y agua (H₂O), lo transforman en glucosa. Esta glucosa producida se utiliza para construir biomasa, que incluye troncos, ramas, hojas y raíces, almacenándose el carbono en estas estructuras. Este proceso se representa en la siguiente ecuación:



Ecuación 1

La captura de carbono ocurre principalmente durante la etapa de crecimiento de los árboles. A medida que se desarrollan, los árboles absorben grandes cantidades de CO₂ de la atmósfera, el cual utilizan para producir biomasa a través de la fotosíntesis. Sin embargo, cuando los árboles han llegado a su madurez total, la cantidad de CO₂ que capturan disminuye, ya que solo requieren lo necesario para mantener sus procesos vitales, como la respiración (Autónoma et al., 2009).

5.5. Bosque seco

El bosque seco tropical (bs-T) es una formación vegetal que se desarrolla entre los 0 y los 1 000 m de altitud, en zonas con temperaturas superiores a los 24°C y con uno o dos periodos de sequía al año (Londoño & Torres, 2015).

En Colombia el bs-T se encuentra reducido y altamente fragmentado. Si bien su cobertura original era de 800.000 km², para el año 2000 quedaba cerca del 1,5% (Márquez, 2000), para el 2010 un 3% (Barraza et al., 2010) y para el 2014, un 8% (García et al., 2014). Lo más crítico es que únicamente el 5% cuenta con algún tipo de protección dentro del sistema de reservas públicas o privadas (DAGMA, 2022). Este proceso de degradación se ha visto impulsado principalmente por la expansión urbana de las principales ciudades del país, junto con el avance de actividades productivas como la ganadería extensiva, la explotación forestal y la agricultura, el clima favorable del bs-T para estas actividades ha acelerado su fragmentación y reducción progresiva (Solano & Ospina, 2017).

El Valle Geográfico del río Cauca (VGRC) alberga un área de distribución potencial clave para este bioma (Reina-Rodríguez et al. 2010). En esta región, la transformación más drástica de las coberturas boscosas asociadas al bioma BsT ocurrió entre la década de los 50's y mediados de la década de los años 80's del siglo XX, impulsada principalmente por la intensificación de la actividad agrícola (Armbrecht y Ulloa-Chacón 1999). En el departamento del Valle del Cauca se ubica la distribución potencial del bosque seco tropical, específicamente en el Valle Geográfico del río Cauca, esta área comprende la zona plana y parte del piedemonte de la vertiente oriental de la cordillera occidental y la vertiente occidental de la cordillera central (Solano & Ospina, 2017).

Estos ecosistemas tienen gran importancia debido a su diversidad, que refleja una gran variedad de adaptaciones e interacciones de las plantas para afrontar el déficit hídrico y las altas temperaturas (Londoño & Torres, 2015).

6. Metodología

6.1. Delimitación de la zona de estudio

La ciudad de Cali presenta un clima tropical con una temperatura media de 25 C, humedad relativa del 73% y una precipitación anual de 908 mm, distribuida en dos temporadas lluviosas: una que comprende los meses de marzo, abril y mayo, y otro al final del año en los meses de octubre y noviembre, siguiendo un patrón bimodal (Frieri et al., 2020).

En este contexto la presente investigación, se realizó en la ciudad de Cali, específicamente en la Universidad del Valle, sede Meléndez, ubicada en las coordenadas 3°27'02"N 76°32'0"O. Esta sede es considerada como Jardín Botánico Universitario (Acuerdo 004 de 2010) y cuenta con una notable cantidad de especies arbóreas, lo que lo convierte en un sitio de gran importancia para su estudio tal como se ilustra en la Figura 3.

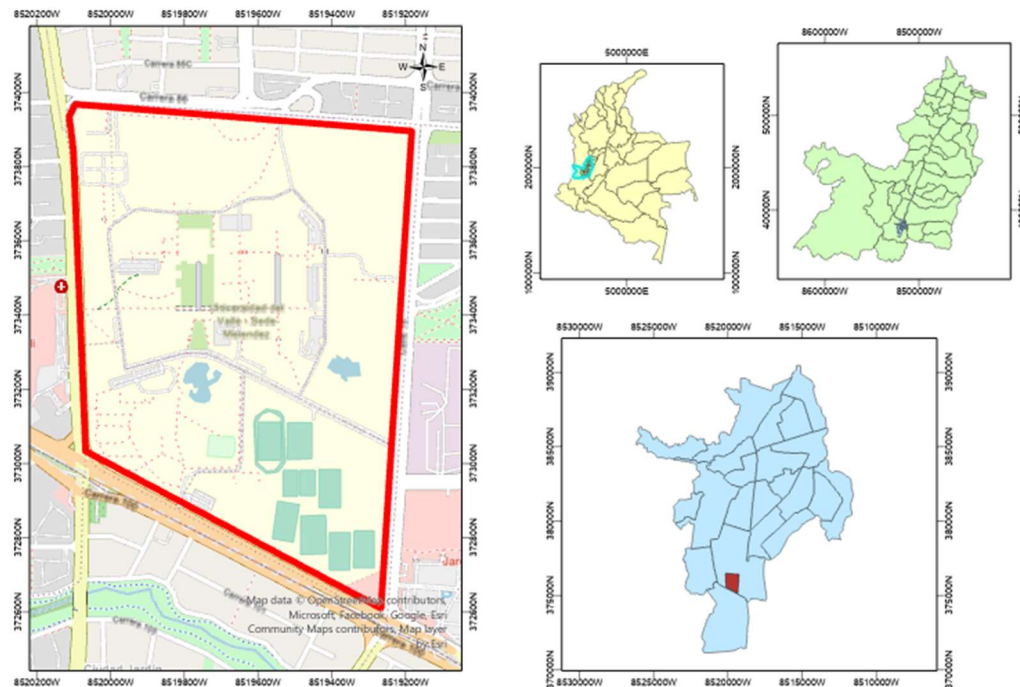


Figura 3. Delimitación zona de estudio

6.2. Identificación de especies arbóreas

Se utilizaron los datos de Gestión Ambiental y Servicios Varios de la Universidad, que contiene el inventario del 2022 de los árboles presentes en la Universidad del Valle, clasificados por nombres científicos y familias, en este inventario se proporcionan características físicas de cada árbol tales como altura y diámetro del tronco a la altura de pecho (DAP).

Para el procesamiento inicial de los datos, se emplearon filtros en Excel con el fin de organizar los datos por especie y familia. En esta etapa, se depuró la base de datos eliminando registros inexistentes y completando aquellos con información faltante. Dada la magnitud del conjunto de datos, se utilizó Rstudio para optimizar el análisis de datos, lo cual permitió una organización más eficiente y precisa.

6.3. Cálculos de captura de carbono por especie

Existen dos métodos principales para medir y estimar la biomasa arbórea sobre el suelo: el método directo y el indirecto.

- **Método directo:** se emplea principalmente para desarrollar ecuaciones alométricas y determinar factores de expansión de la biomasa. Este proceso implica la recolección de la biomasa presente en los árboles de un área específica. Una vez cosechada, la biomasa se seca y se pesa para obtener su biomasa seca. Posteriormente, este valor se convierte en una estimación de carbono aplicando un factor de conversión de 0,5. Este factor se basa en que aproximadamente el 50% de la biomasa seca está compuesta por carbono (Yepes et al., 2011). A continuación, se detallan los pasos.

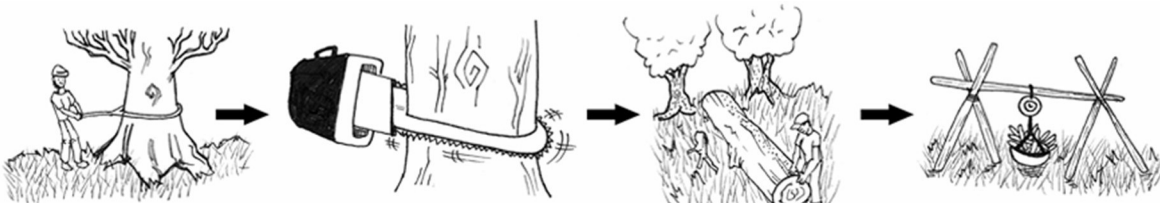


Figura 4. Pasos empleados en el método directo para la determinación de la biomasa aérea

Tomado de: Yepes et al., (2011)

- **Método indirecto:** este método se basa en la aplicación de ecuaciones alométricas o factores de expansión disponibles en la literatura científica, los cuales han sido desarrollados previamente a partir del método directo. Para su uso, solo es necesario medir variables clave, como diámetro y altura, tal como se ilustra en la Figura 5; luego introducir estos datos en la ecuación seleccionada (Yepes et al., 2011). De esta manera, se obtiene una estimación de biomasa sin necesidad de realizar procesos destructivos.

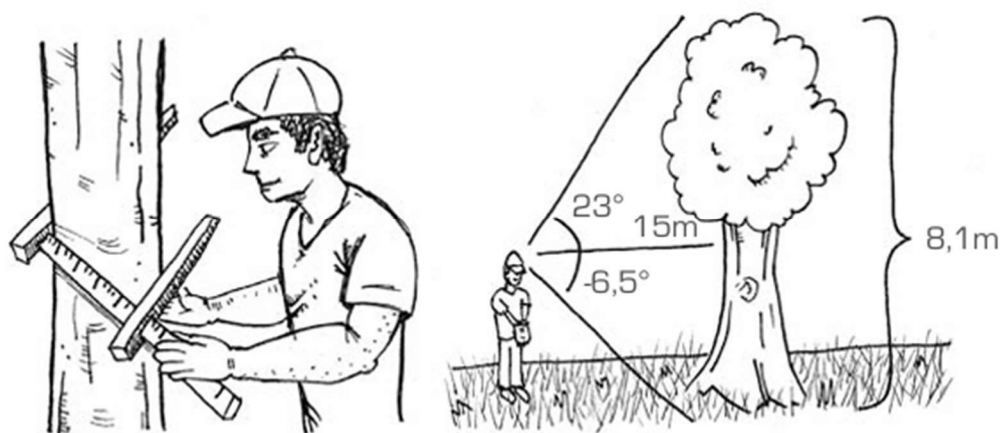


Figura 5. Medición de variables en campo

Fuente: Yepes et al., (2011)

- Para este estudio se utilizó el método indirecto del Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa-carbono en Colombia sugerido por el IDEAM (Yepes et al., 2011) el cual utiliza modelos científicos basados en investigaciones y estudios para estimar la cantidad de carbono almacenado por especie y por tipo de bosque. En este se ingresaron datos como nombre científico, diámetro a la altura de pecho, altura, densidad de madera. Los datos como nombre científico, DAP y altura fueron tomados del inventario compartido por el Área de Gestión Ambiental y Servicios Varios de la Universidad del Valle, la información sobre la densidad de madera de las especies fue recopilada de varias fuentes, incluyendo las bases de datos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), el Centro de Investigación Tropical Smithsoniano (STRI), así como los estudios de Zanne et al. (2009) y Chave et al. (2006). Los valores de las constantes del modelo a y $B1$, se seleccionan en función del tipo de bosque; en este caso se consideró el bosque seco, ya que en estudios como los de Forero-Chavez et al, (2024), se estudió la ciudad de Cali como

representativa del bosque seco del Valle del Cauca por su ubicación y altura sobre el nivel del mar, también en este se puso la sede Meléndez como uno de los parches de bosque seco. Los valores utilizados fueron:

- $a = -2,29$
- $B1 = 0,932$

Para cada individuo, se asignó el valor de densidad específico de la especie a la que pertenecía. En casos donde no se disponía de datos específicos para la especie, se utilizó la densidad promedio del género o la familia.

Las ecuaciones que incluyen tanto como diámetro y altura para estimar la biomasa aérea presentan un menor error de muestreo en comparación con otras ecuaciones alométricas (Yepes et al., 2015). Por esta razón, se ha optado por utilizar la siguiente ecuación para el cálculo de biomasa aérea.

$$\ln(BA) = a + B1 \ln(DH\rho) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

BA = biomasa aérea (kg)

a = constante del modelo

$B1$ = constante del modelo

D = diámetro a la altura del pecho (cm)

H = altura total del árbol (m)

ρ = densidad de madera (g cm^3)

En numerosos estudios, se ha establecido que la biomasa de los árboles vivos contiene aproximadamente 50% de carbono (Acuña-Simbaqueva et al., 2021) por lo tanto, se usó el factor de 0,5 para transformar la biomasa a carbono. Una vez obtenido el carbono contenido en la biomasa, es necesario realizar una conversión adicional para expresar este valor en términos de dióxido de carbono (CO_2), con el fin de facilitar la comparación de las emisiones de diferentes gases de efecto invernadero. Para ello, se utilizó un factor de conversión basado en la relación entre el peso molecular del dióxido de carbono y el atómico del carbono. Dado que el peso molecular del CO_2 es 44 g/mol (12 g/mol correspondientes al carbono y 32 g/mol al oxígeno), y

el peso atómico del carbono es 12g/mol, el factor de conversión es $44/12 \approx 3,67$ (Acuña-Simbaqueva et al., 2021).

6.4. Ingreso a SIG

Una vez organizados los datos de captura de carbono por especie, se exportaron a formato CSV para su integración en un sistema de información geográfica (SIG). El archivo CSV fue cargado en ArcGIS pro como capa de entidades alojada, mediante el módulo “Contenido”, se configuró el sistema de coordenadas apropiado, los puntos se ubicaron automáticamente usando los campos de coordenadas X (longitud) y Y (latitud).

Posteriormente se importó una plantilla de mapa base de la Universidad del Valle. Sobre el mapa base, se superpuso la capa de puntos correspondiente a los individuos arbóreos. Para facilitar la consulta se habilitó las ventanas emergentes para mostrar atributos clave como su especie, familia, carbono capturado y otros, esta funcionalidad permite visualizar la información detallada de cada árbol mediante un clic en un punto del mapa.

Seguidamente, se clasificaron los puntos correspondientes a los árboles mediante el método de rupturas naturales, asignando un tamaño mayor a aquellos individuos con mayor captura de CO₂. Esto permite visualizar gráficamente que, a mayor punto, mayor es la capacidad de captura de CO₂ (Figura 6).

CANTIDAD CO2

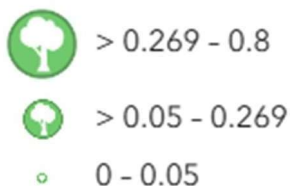


Figura 6. Representación de organización de simbología de árboles

6.5. Realización de Dashboard

Para el análisis y visualización de los datos arbóreos, se desarrolló un Dashboard interactivo mediante ArcGIS Online que integra componentes dinámicos interconectados. Se incorporaron filtros de selección por especie y familia, los cuales se encuentran vinculados en el mapa, como en las gráficas. Estas últimas incluyen visualizaciones de barras para la distribución de especies e indicadores cuantitativos.

6.5.1. Instrucciones de uso de Dashboard

Mediante el siguiente enlace, se accede a un Dashboard interactivo que muestra la captura de CO₂ <https://uvgeomatrica.maps.arcgis.com/apps/dashboards/d3705b1d82224778b17912a9489d5503>.

En la Figura 7, se observa la representación de la visualización al acceder al Dashboard.



Figura 7. Representación visualización Dashboard

El sistema permite consultar de manera interactiva los atributos de cada árbol mediante la selección directa en el mapa. Al hacer clic sobre cualquier punto, se despliega una ventana con las características del individuo arbóreo correspondiente, tal como se ilustra en la siguiente figura.

Melendez Oficial (prueba CSV)	
Altura	35.30
Biomasa aérea (Kg)	44,727.71
CANTIDAD CO2	0.82
CANTIDAD CO2 (ton)	82.10
Carbono (ton)	22.36
dap	222.92
Densidad madera	0.65
FAMILIA	Moraceae
Nombre cientifico	Ficus benjamina
Nombre común	Laurel benjamina
observacion	Notable
VITALIDAD	BUENO

Figura 8. Representación de atributos de individuo arbóreo

El Dashboard cuenta con un sistema de zoom interactivo en cada gráfica, que permite explorar las diferentes opciones de visualización ya que se cuentan con muchos datos.

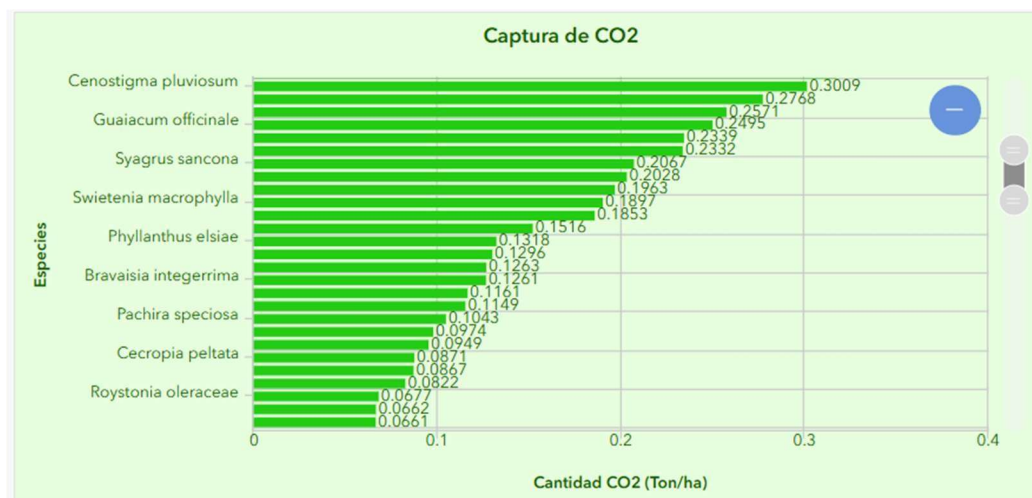


Figura 9. Visualización de zoom interactivo

Al hacer clic sobre una barra de los gráficos, se aplica un filtro que sincroniza todas las visualizaciones (mapa y demás gráficos), mostrando únicamente los datos asociados a la categoría seleccionada.

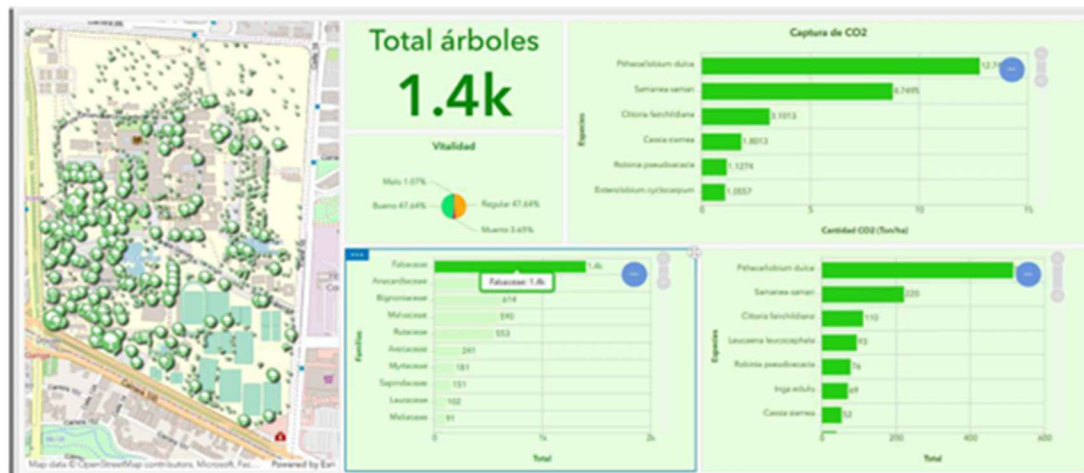


Figura 10. Representación de filtro por familia

También se puede combinar múltiples filtros. Por ejemplo, de la familia Fabaceae, se puede seleccionar la especie *Pithecellobium dulce* dentro de esa familia, y finalmente seleccionar sólo los individuos de vitalidad buena, tal como se presenta a continuación.

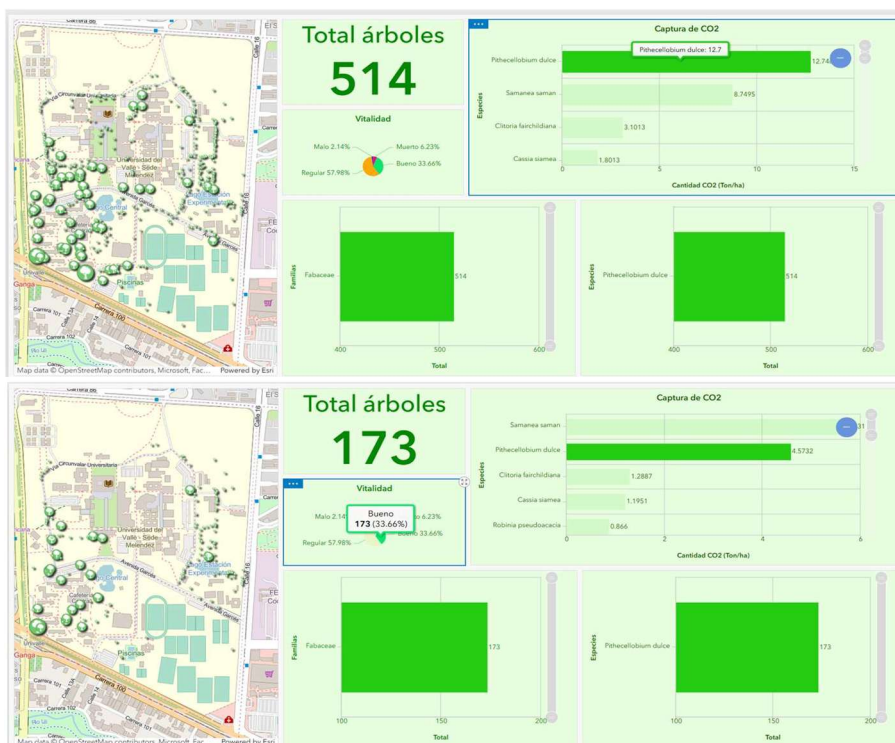


Figura 11. Representación de filtros

El Dashboard incluye una función de expandir vista para cada gráfico, para facilitar la visualización de cada componente de manera individual.

6.6. Realización de plan de gestión ambiental del arbolado urbano.

Para la elaboración del plan de gestión ambiental del arbolado de la universidad, se integraron tres componentes: El plan de silvicultura urbana del DAGMA, que establece los lineamientos técnicos legales; la política ambiental de la Universidad del Valle y algunas prácticas implementadas por otras universidades, cuyos resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Prácticas de manejo arbóreo realizadas por otras instituciones

Práctica de manejo arbóreo	Instituciones que la realizan
Manejo fitosanitario (podas y fertilización)	Universidad Javeriana de Cali Universidad Icesi Universidad del Cauca Universidad de San Buenaventura de Cali
Desarrollo de inventario arbóreo	Universidad Javeriana de Cali
Gestión de predios para siembra	Universidad del Quindío
Siembra de árboles	Universidad del Cauca Universidad del Quindío
Tala de árboles caídos o en mal estado	Universidad del Quindío
Participación comunitaria (charlas, talleres ambientales)	Universidad del Quindío Universidad Javeriana
Realización de diagnóstico del arbolado	Universidad de San Buenaventura de Cali

7. Análisis de resultados

El campus Meléndez de la Universidad del Valle, declarado Jardín Botánico Universitario en 2010, alberga una notable diversidad arbórea con un total de 5236 árboles pertenecientes a 192 especies diferentes. En la Figura 12 se observa la distribución geográfica de los árboles.



Figura 12. Representación geográfica de los árboles

En la se destacan las especies con más de 25 individuos arbóreos. La especie más abundante es *Mangifera indica* (mango), con 665 individuos, lo que representa aproximadamente el 13% del total, seguida por *Pithecellobium dulce* con 514 individuos (9.78%), y *Swinglea glutinosa* con 468 individuos (8.91%), Esta última es considerada una especie invasora, lo que ha llevado a que su siembra esté prohibida y se busca su reemplazo por especies nativas (DAGMA, 2022).

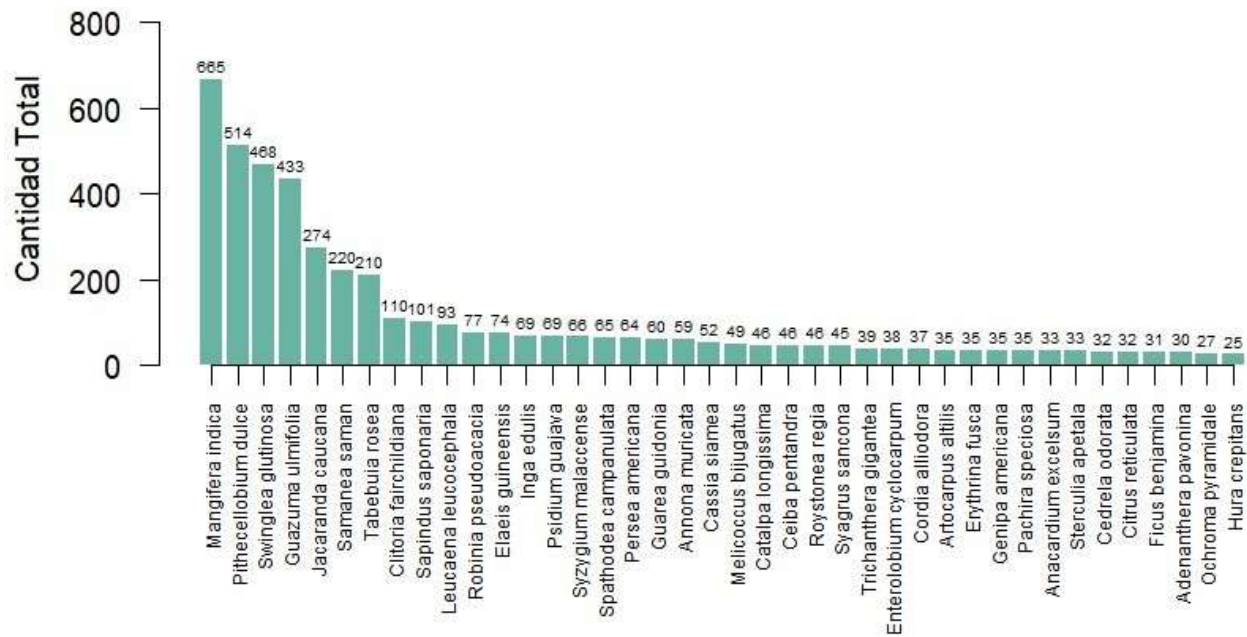


Figura 13. Cantidad de individuos arbóreos por especie

En las siguientes figuras se observa la distribución espacial de las especies con mayor cantidad de individuos arbóreos. Mientras que *Mangifera Indica* (Figura 14) y *Pithecellobium Dulce* (Figura 15) presentan una distribución dispersa por toda la universidad, *Swinglea Glutinosa* (Figura 16) se concentra únicamente en zonas específicas. Esto puede deberse a que esta especie suele utilizarse como cerco vivo, lo que explica su mayor presencia sobre la calle 16.

También se observa en el caso de *Mangifera indica* y *Pithecellobium dulce* que los individuos arbóreos con mayor captura de CO₂ se encuentran principalmente por la facultad de Humanidades y la facultad de Ciencias Sociales y Económicas.



Figura 14. Distribución espacial *Mangifera Indica*



Figura 15. Distribución espacial *Pithecellobium dulce*



Figura 16. Distribución espacial *Swinglea Glutinosa*

Se observa que la especie *Samanea saman* (Figura 17) presenta una distribución dispersa por todo el campus. En contraste, las especies *Jacaranda caucana* (Figura 18) y *Tabebuia rosea* (Figura 33) muestran un patrón lineal en ciertas zonas, lo que puede demarcar senderos o áreas de circulación ya que estas especies cuentan con un color llamativo en sus flores, que aportan un valor estético al paisaje universitario. Cabe resaltar que la zona del centro deportivo universitario no se registra la presencia de *Tabebuia rosea* y hay muy poca presencia de *Jacaranda caucana*, lo que sugiere un criterio de selección diferente en su diseño paisajístico.

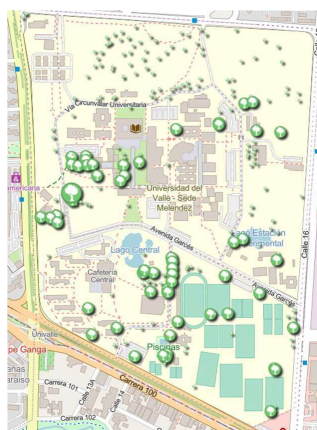


Figura 17. Ubicación de *Samanea saman*



Figura 18. Distribución espacial *Jacaranda caucana*



Figura 19. Distribución espacial *Tabebuia rosea*

En la Figura 20 se observa la distribución de la especie *Ficus benjamina*, se observa que esta especie está representada únicamente por dos individuos arbóreos detrás de la biblioteca, los cuales presentan una baja captura de CO₂. Un comportamiento similar se registra en el ejemplar localizado en la zona experimental de biología. Además, se observa que no hay presencia de esta especie en las facultades de Ingeniería, y de Ciencias, lo anterior posiblemente asociada a la influencia de las edificaciones en la zona.

En la Figura 21 se observa la distribución de la especie *Ceiba pentandra*. Aunque esta especie se encuentra un poco más dispersa por el área de estudio, su presencia es escasa. Además, parte significativa de los ejemplares presentan baja captura de CO₂, lo cual podría atribuirse a su estado juvenil, dado que su DAP es aún reducido.

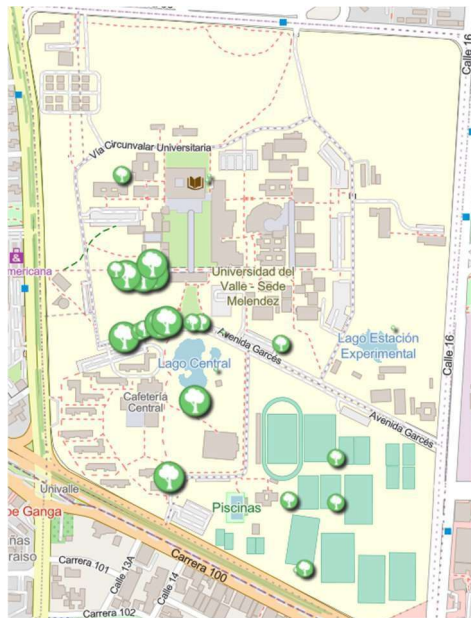


Figura 20. Distribución espacial de *Ficus Benjamina*

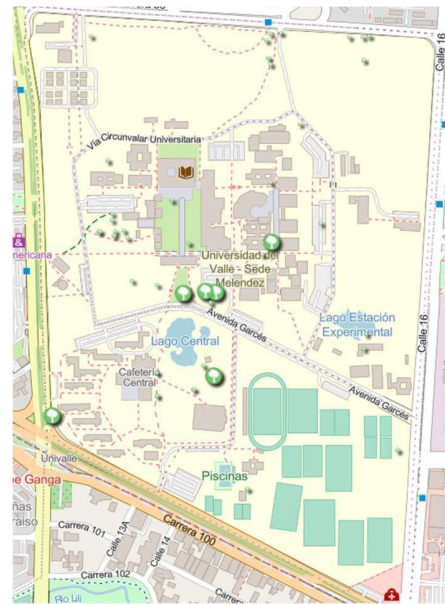


Figura 21. Distribución espacial de *Ceiba Pentandra*

Del total de 5236 árboles inventariados, se identificaron 667 individuos arbóreos (12.9%) correspondientes a especies vetadas por el DAGMA (2022) para su siembra, estas especies representan una proporción significativa de la cobertura arbórea actual del campus y su restricción se debe a los impactos que pueden generar como el desplazamiento de especies nativas, levantamiento de pavimentos y afectaciones a cimientos y redes de alcantarillado. Entre estas, *Swinglea glutinosa* destaca como la

especie más frecuente (69.1%), seguida por *Leucaena Leucocephala* (13.7%). En contraste, *Caesalpinia ebano* y *Cupressus lusitanica* presentan la menor representación (1.3%).

Además, se observa que la mayoría de los individuos arbóreos presentan diámetros menores a 45cm, con la notable excepción de *Ficus benjamina*, especie que se encuentra entre los más altos DAP. También se observa un alto porcentaje de buen estado de vitalidad de estas especies (69.6%).

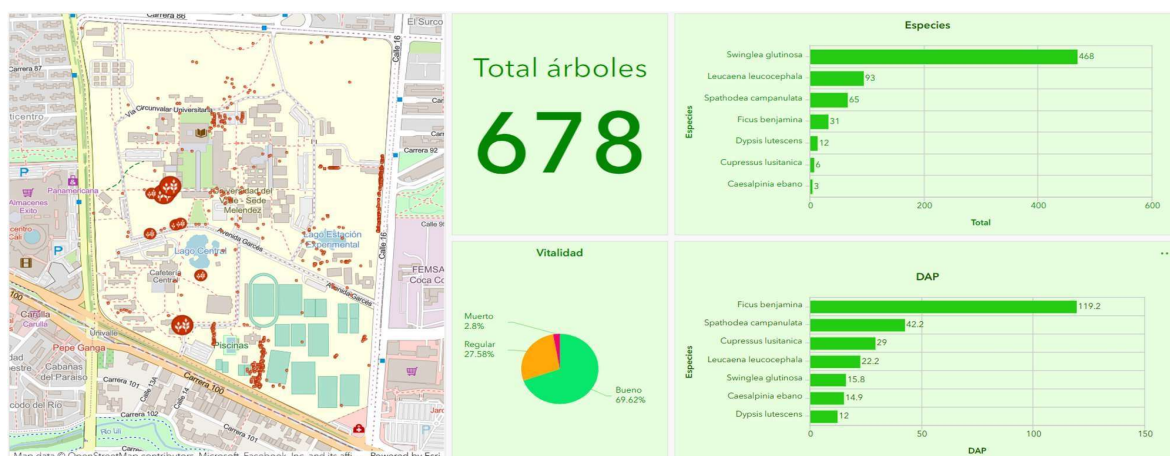


Figura 22. Visualización de especies vetadas

<https://uvgeomatrica.maps.arcgis.com/apps/dashboards/d83629a0bc784ba79d37d99847bc559e>

En la Figura 23 se observa el estado de vitalidad de las especies, donde una parte significativa presenta condiciones desfavorables. Según los datos, el 2.2 % de individuos arbóreos se encuentran prácticamente muertos, el 0.8% en estado de vitalidad malo, el 38.2% de individuos arbóreos se encuentra en vitalidad regular. Por otro lado, el 58.7% de individuos arbóreos se encuentran en vitalidad buena.

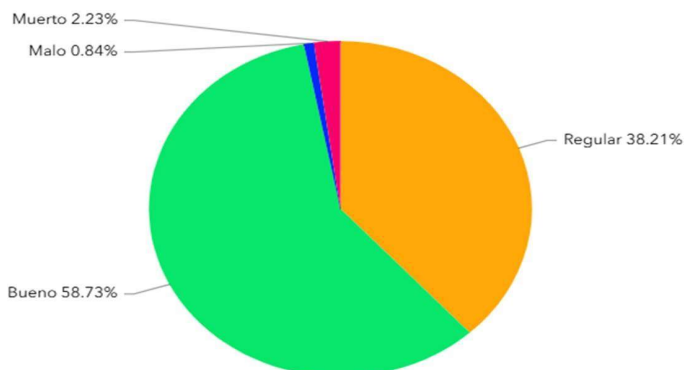


Figura 23. Vitalidad de los individuos arbóreos

En el Dashboard se observa que 117 árboles presentan un estado de vitalidad “muerto”. La especie con mayor representación en esta categoría es *Pithecellobium dulce* con 32 individuos, se observa la especie *Swinglea glutinosa* con 7 individuos. Además, se destaca que gran densidad de árboles en esta condición se concentran en la zona experimental de Biología y en zonas donde hay poca presencia de comunidad universitaria.



Figura 24. Representación en Dashboard de las especies de vitalidad “Muerto”

En la Figura 25 se observa los individuos arbóreos con vitalidad “mala”, observamos que especies que tienen gran densidad arbórea como *Pithecellobium dulce* presenta la mayor representación con 11 individuos arbóreos, también se observa la especie *Mangifera indica* con 5 individuos arbóreos. Además, se registran otras especies representativas del bosque seco, como *Tabebuia rosea*, *Guazuma ulmifolia* y *Jacaranda caucana*.

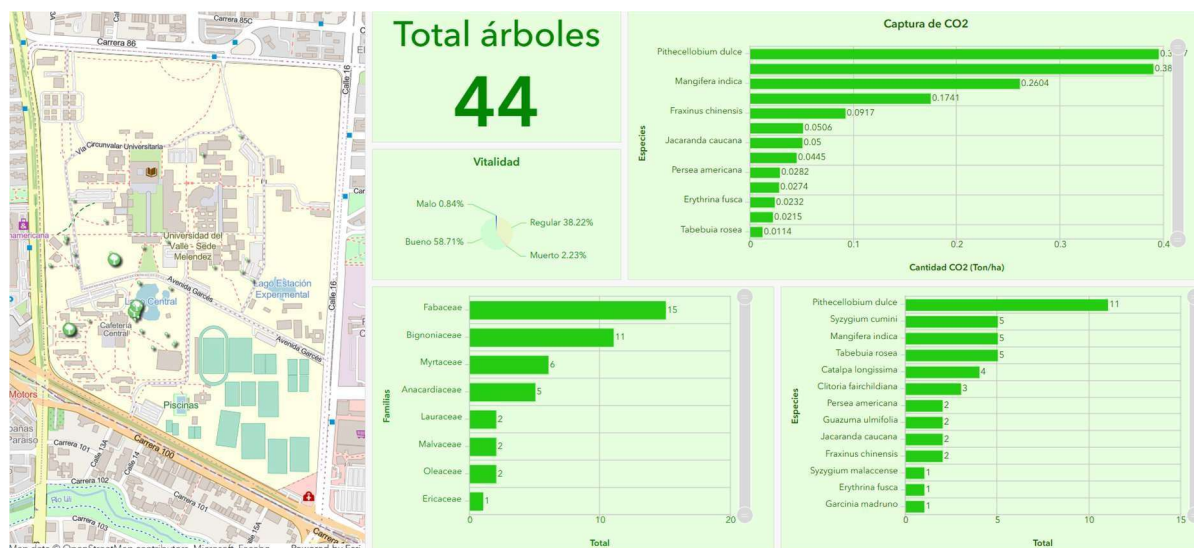


Figura 25. Representación en Dashboard de las especies de vitalidad ‘Malo’

En la Figura 26 se observan los individuos arbóreos con vitalidad ‘Regular’ se observó que gran cantidad de individuos arbóreos corresponden a especies eficientes en captura de CO₂, destacando *Pithecellobium dulce* con 298 individuos y se observa que estos árboles tienen una captura de CO₂ significativa, en el caso de *Pithecellobium dulce* se observa una captura de 7.7 Ton/ha CO₂, seguido por *Mangifera indica* (250 individuos) con captura de 4.2 Ton/ha CO₂, *Jacaranda caucana* (127 individuos) con captura de 0.97 Ton/ha CO₂, *Guazuma ulmifolia* (110 individuos) con 1.7 Ton/ha CO₂ *Samanea saman* (58 individuos) con 3.1 Ton/ha CO₂.



Figura 26. Representación en Dashboard de las especies de vitalidad ‘Regular’

En la Figura 27 se observa que los individuos con vitalidad “Bueno”, presentan una alta densidad de árboles que destacan por su eficiencia en captura de CO₂, tales como *Mangifera indica*, *Pithecellobium dulce*, *Samanea saman* y *Jacaranda caucana*. Un gran porcentaje de la captura de CO₂ por parte de los individuos arbóreos corresponde a esta categoría, siendo *Mangifera indica* la especie con mayor contribución (8.1 Ton/ha CO₂), de manera similar se observa el mismo comportamiento de *Samanea saman*, *Jacaranda caucana*, *Tabebuia rosea*. Estos resultados son favorables, ya que garantizan un óptimo desempeño ambiental.



Figura 27. Representación en Dashboard de las especies de vitalidad “Bueno”

El total de carbono capturado en la universidad es de 88.58 Ton/ha, en la Figura 28 se observa la relación entre la familia y su capacidad de captura de CO₂. Se observa que las familias con mayor capacidad de almacenamiento de carbono pertenecen a las familias *Fabaceae*, *Anarcadiaceae*, *Bignoniaceae* y *Malvaceae*. Entre estas se destacan especies representativas del bosque seco tropical como *Pithecellobium dulce*, *Guazuma ulmifolia*, *Albizia Saman*, *Jacaranda Caucana*, *Ceiba pentandra*.

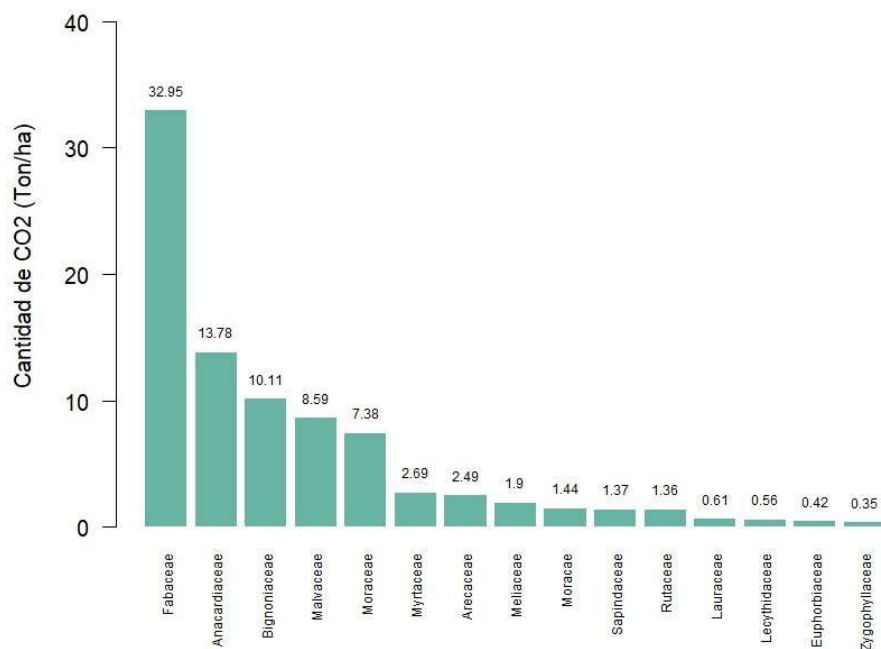


Figura 28. Captura de CO₂ por familia

En la Figura 29 se presentan las especies arbóreas con mayor captura de CO₂. Las especies que más CO₂ capturan son *Pithecellobium dulce* (12.75 Ton/ha), *Mangifera indica* (12.58 Ton/ha) y *Samanea Saman* (8.75 Ton/ha).

A pesar de que *Swinglea glutinosa* tiene una gran densidad arbórea, no se posiciona entre las especies que más capturan carbono. Por ejemplo, la especie *Tabebuia Rosea* con 210 individuos, casi la mitad que la mencionada anteriormente, se encuentra que tiene mayor captura de CO₂. De manera similar, *Ceiba pentandra*, con sólo 46 individuos arbóreos, captura 1.28 Ton/ha de CO₂, valor muy cercano a *Swinglea Glutinosa* a pesar de la notable diferencia en cuanto a individuos arbóreos. Este comportamiento puede atribuirse a diferencias en la biomasa y características fisiológicas específicas de cada especie.

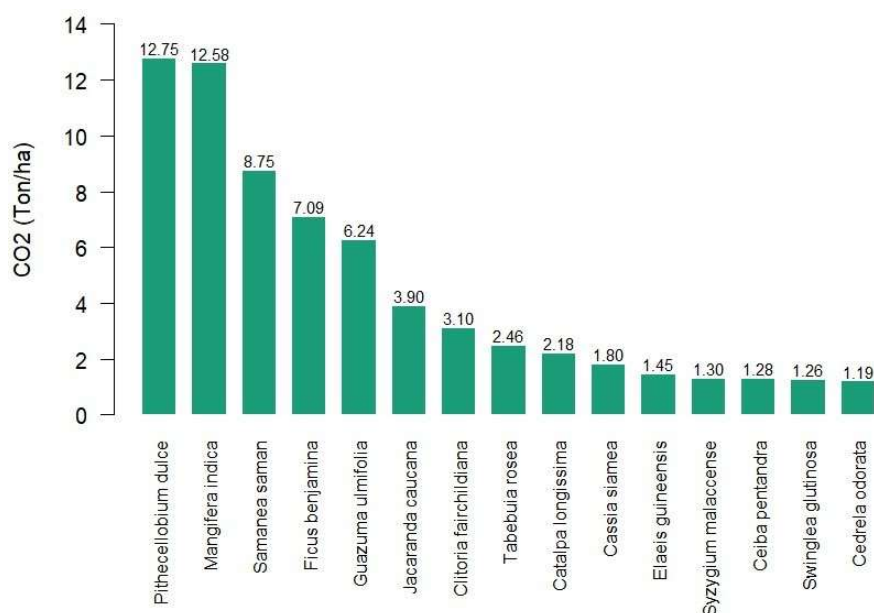


Figura 29. Captura de CO₂ por especie arbórea

En la Tabla 3 se observa un resumen de la vitalidad de los árboles por especie, mostrando que una parte significativa de la captura de CO₂ de *Pithecellobium dulce* corresponde a individuos con vitalidad “Regular”. En las demás especies, también se registran aportes relevantes de árboles en estado “Regular”, mientras que una porción menor proviene de aquellos con vitalidad “Malo”. Si bien la mayor eficiencia se concentra en árboles con vitalidad “Bueno”, es destacable que una proporción importante de los individuos clave no alcanza este estado óptimo, lo que podría indicar oportunidades para mejorar su manejo y conservación.

Tabla 3. Captura de CO₂ por especie según vitalidad

Especie	Malo		Regular		Bueno	
	Cantidad	CO ₂ (Ton/ha)	Cantidad	CO ₂ (Ton/ha)	Cantidad	CO ₂ (Ton/ha)
Pithecellobium dulce	11	0.4	298	7.7	173	4.6
Mangifera indica	5	0.3	250	4.2	409	8.1
Samanea saman	0	0.0	58	3.1	161	5.6
Jacaranda caucana	2	0.1	127	0.9	143	2.7

Tabebuia rosea	5	0.01	92	0.8	111	1.6
-------------------	---	------	----	-----	-----	-----

Tras identificar las familias con mayor captura de CO₂ (Figura 28), se procedió a analizar las especies dominantes dentro de cada grupo tal como se observa a continuación.

En la Figura 30 se observan las especies arbóreas que hacen parte de la familia *Fabaceae*, se observa que *Pithecellobium Dulce* tiene una representación del 81.1%, seguido de *Samanea Saman* (8.2%) y *Clitoria Fairchildiana* (2.9%).

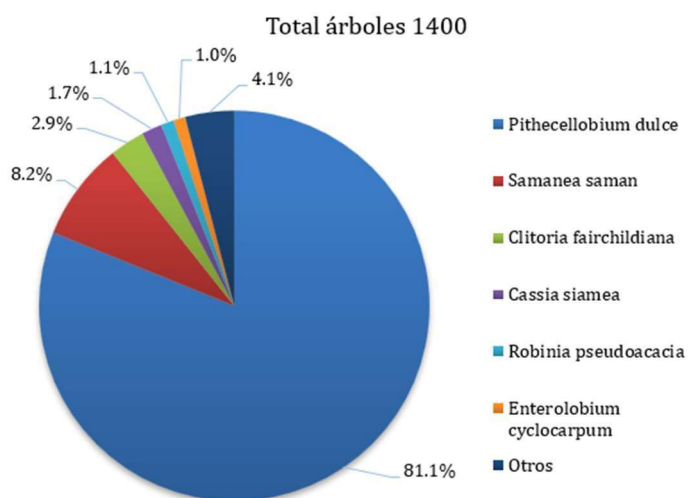


Figura 30. Especies pertenecientes a la familia *Fabaceae*

En la Figura 31 se observan las especies pertenecientes a la familia *Anarcardiaceae*, se observa una marcada predominancia de la especie *Mangifera indica* (94.86%), especie con alta eficiencia de captura de CO₂, lo cual contribuye significativamente a que esta familia se encuentre entre las que tienen mayor captura de carbono. Sin embargo, se observa una baja diversidad de especies en esta familia, lo que refleja una distribución desigual en la composición arbórea.

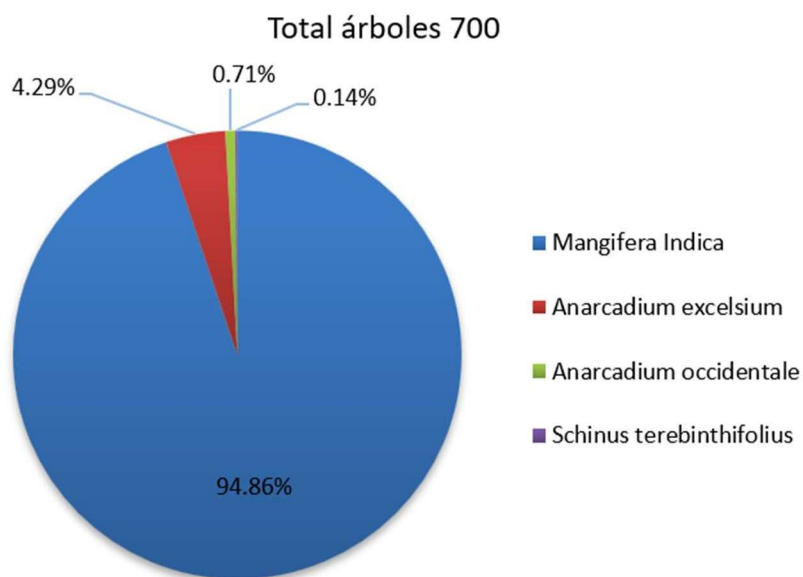


Figura 31. Especies pertenecientes a la familia Anarcadiaceae

En la Figura 32 se observan las especies pertenecientes a la familia *Bignoniaceae*, el mayor porcentaje equivale a la especie *Jacaranda caucana* y *Tabebuia rosea* especies que tienen buena eficiencia en captura de CO₂ representando su adaptabilidad y resistencia característica de las especies del bosque seco tropical.

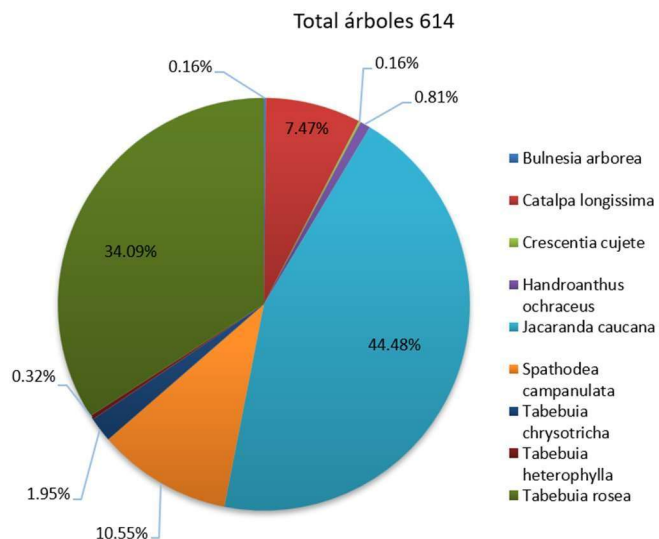


Figura 32. Especies pertenecientes a la familia Bignoniaceae

En la Figura 33 se observa las especies pertenecientes a la familia *Malvaceae* se observa que la especie *Guazuma ulmifolia* con un porcentaje de 73% es la que tiene mayor proporción, le sigue la especie *Ceiba pentandra* 7,8%.

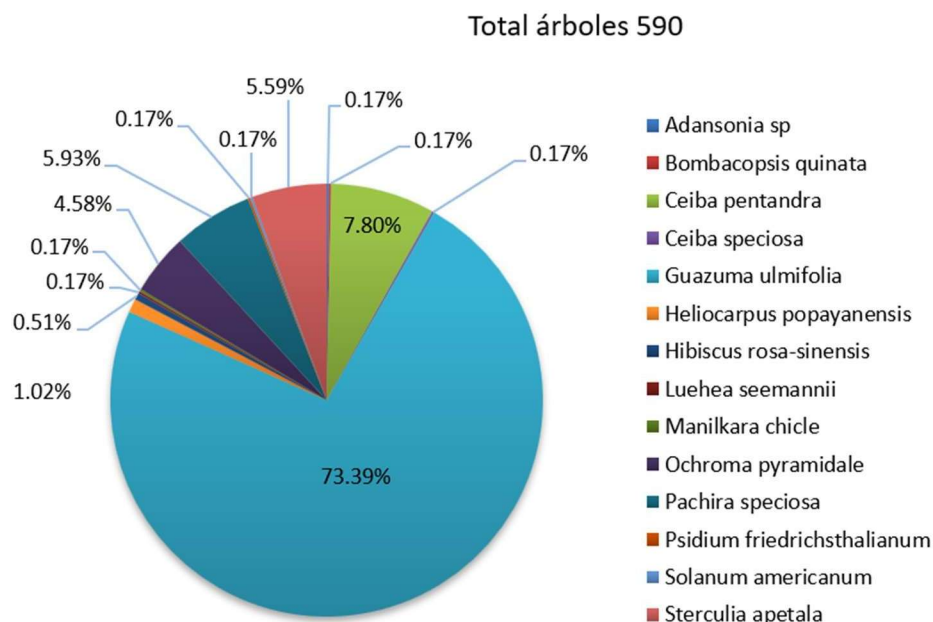


Figura 33. Especies pertenecientes a la familia *Malvaceae*

En la Tabla 4 se resumen las especies más representativas dentro de las familias con mayor captura de carbono en el área de estudio:

- En primer lugar, se destaca la familia *Fabaceae*, presenta la mayor captura de carbono. En segundo lugar, la familia *Anarcadiaceae* sobresale con *Mangifera indica* cuya captura de 12.5 Ton/ha valor muy cercano al valor de *Pithecellobium Dulce*.
- En tercer lugar, la familia *Bignoniaceae* destaca con *Jacaranda Caucana* y *Tabebuia rosea* cuya captura es de 3.9 y 2.4 Ton/ha CO₂
- Finalmente, la familia *Malvaceae* con un total de 590 de árboles, la especie *Ceiba Pentandra* representativa del bosque seco muestra buena eficiencia ya que con sólo 46 individuos tiene capturado 1.2 Ton/ha.

Tabla 4. Comparación especies de las familias con mayor captura de carbono

Familia	Especie	Cantidad	Captura CO₂ (Ton/ha)
Fabaceae	Pithecellobium Dulce	514	12.7
	Samanea Saman	220	8.7
	Clitoria Fairchildana	110	3.1
Anarcadiaceae	Mangifera indica	664	12.5
Bignoniaceae	Jacaranda Caucana	272	3.9
	Tabebuia Rosea	210	2.4
Malvaceae	Guazuma Ulmifolia	433	6.2
	Ceiba Pentandra	46	1.2

Fuente: Propia

Dividiendo el valor total de captura de CO₂ por el número de individuos de cada especie, se obtuvo el promedio de CO₂ por árbol. En la *Tabla 5* se observa que las especies más eficientes en cuanto a captura de CO₂ corresponden a *Samanea saman*, *Clitoria Fairchildana*, *Ceiba pentandra* y *Pithecellobium dulce*.

Tabla 5. Carbono promedio de árbol por especie

Familia	Especie	Captura CO₂ (Ton/ha)
Fabaceae	Pithecellobium Dulce	0.024
	Samanea Saman	0.039
	Clitoria Fairchildana	0.028
Anarcadiaceae	Mangifera indica	0.018
Bignoniaceae	Jacaranda Caucana	0.014
	Tabebuia Rosea	0.011
Malvaceae	Guazuma Ulmifolia	0.014
	Ceiba Pentandra	0.026

Fuente: Propia

En la *Tabla 6* se hace una comparación de almacenamiento de CO₂ para las especies más representativas, evaluando los dos escenarios de mayor densidad arbórea equivalentes a la densidad arbórea de *Mangifera Indica* y a la densidad arbórea de *Pithecellobium dulce* con 514 y 664 individuos arbóreos respectivamente. Los resultados mostraron diferencias notables en la eficiencia de captura entre las especies, donde *Samanea saman* destaca como la más eficiente con valores de 20.0 Ton/ha (514 ind.) y 25.8 Ton/ha (664 ind.), superando ampliamente a las demás. Incluso con menos individuos que otras especies como *Pithecellobium dulce*, su capacidad de captura resulta un 62% mayor que la de *Mangifera indica* en el mismo escenario, demostrando una notable superioridad en eficiencia.

Otras especies como *Clitoria fairchildana* y *Ceiba pentandra* también exhiben una alta capacidad de almacenamiento, alcanzando 18.5 Ton/ha y 17.2 Ton/ha respectivamente con 664 individuos, lo que las posiciona como opciones óptimas para proyectos de captura de CO₂. En contraste, *Mangifera indica*, a pesar de ser una de las más abundantes, muestra una eficiencia moderada con 12.9 Ton/ha en el escenario de mayor densidad, cifra inferior a las mencionadas anteriormente. Por otro lado, *Jacaranda caucana* y *Tabebuia rosea* presentan los valores más bajos, sin alcanzar las 10 Ton/ha incluso con un mayor número de individuos, lo que las sitúa como las menos eficientes en este análisis.

Al comparar el impacto del número de individuos en la captura de CO₂, se observa que todas las especies incrementan su capacidad al pasar de 514 a 664 individuos arbóreos. *Samanea saman* y *Clitoria fairchildana* registran los mayores saltos absolutos, con incrementos de 5.8 y 4.2 Ton/ha respectivamente, mientras que *Mangifera indica* y *Pithecellobium dulce* muestran aumentos proporcionales similares. Lo cual refuerza la idea de que su captura de CO₂ se debe a su abundancia y no a su eficiencia. Lo anterior demuestra que la eficiencia de CO₂ no depende únicamente de la cantidad de individuos, sino también otras características intrínsecas de cada especie.

Tabla 6. Carbono promedio por especie con mayor cantidad de CO₂

Especie	Cantidad de CO ₂ con 514 individuos (Ton/ha)	Cantidad de CO ₂ con 664 individuos (Ton/ha)
<i>Mangifera indica</i>	9.6	12.9
<i>Pithecellobium dulce</i>	12.7	15.9
<i>Samanea Saman</i>	20.0	25.8
<i>Clitoria Fairchildana</i>	14.3	18.5
<i>Jacaranda Caucana</i>	7.2	9.2
<i>Tabebuia Rosea</i>	5.6	7.3
<i>Guazuma Ulmofolia</i>	7.2	9.3
<i>Ceiba Pentandra</i>	13.3	17.2

Fuente: Propia

Para hacer un análisis más profundo, en la Tabla 7 se comparan las especies más representativas en cuanto a densidad arbórea y eficiencia de captura de CO₂. Se observó que *Pithecellobium dulce* presenta mayores valores de altura (13.5m) y densidad de madera (0.64g/cm³), mientras que *Mangifera indica* destaca por tener una mayor cantidad de individuos arbóreos (664) y DAP superior (51.8). A pesar de estas diferencias, ambas especies presentan valores de captura de CO₂ similares, aunque *Pithecellobium dulce*, presenta un ligero mayor potencial.

Por otro lado, *Samanea saman* y *Ficus benjamina* presentan características contrastantes en todos los aspectos evaluados. A pesar de estas diferencias, su capacidad de captura de CO₂ no varía significativamente. En detalle *Ficus benjamina* destaca por su DAP considerablemente superior (119.2), mientras que *Samanea saman* cuenta con mayor cantidad de individuos arbóreos (220). Estos resultados sugieren que *Ficus benjamina* podría ofrecer ventajas para iniciativas de mitigación climática, aunque su implementación debe tener en cuenta otros factores ecológicos y ambientales.

Entre las especies representativas del bosque seco, *Jacaranda caucana* y *Tabebuia Rosea* destacan por su alta eficiencia en la captura de CO₂. Se observó que *Jacaranda caucana* presenta valores

superiores en la mayoría de sus características lo cual se puede correlacionar con su mayor captura de CO₂. En contraste, *Tabebuia rosea* solo cuenta con mayor valor en su densidad de madera (0.5g/cm³). A pesar de que ambas especies son relevantes en el ecosistema, *Jacaranda caucana* tiene mayor contribución de captura de CO₂ en el área de estudio, atribuible principalmente a su mayor densidad arbórea (272) y DAP (42.5cm).

Swinglea glutinosa, a pesar de su alta densidad de madera (0.9g/cm³) y densidad arbórea (468), presenta una baja contribución en captura de CO₂ y un reducido DAP (15.8cm), este patrón difiere notablemente del observado en *Ceiba pentandra*, que alcanza valores equivalentes de captura de CO₂, pero con menor número de individuos (46) y mayor DAP. Estos resultados sugieren que *Ceiba pentandra* posee mayor eficiencia en la captura de CO₂ por individuo, además es una especie representativa del bosque seco.

Este análisis evidencia que las características como el DAP influyen significativamente en la capacidad de captura de CO₂. Asimismo, se resalta el papel ecológico que cumplen las especies endémicas en el bosque seco, tanto en la captura de carbono como en la conservación de la biodiversidad.

Tabla 7. Características morfológicas de las especies más representativas

Nombre científico	Total	DAP (cm)	h (m)	Densidad madera (g/cm³)	Familia	Cantidad de CO₂ (ton/ha)
Pithecellobium dulce	514	47.0	13.5	0.64	Fabaceae	12.7
Mangifera Indica	664	51.8	10.2	0.55	Anarcadiaceae	12.6
Guazuma ulmifolia	433	40.4	11.7	0.50	Malvaceae	6.2
Samanea saman	220	54.6	12.1	0.7	Fabaceae	8.7
Ficus benjamina	31	119.2	21.7	0.6	Moraceae	7.1
Jacaranda caucana	272	42.5	13.7	0.4	Bignoniaceae	3.7
Tabebuia rosea	210	32.1	13.3	0.5	Bignoniaceae	2.5
Ceiba pentandra	46	63.7	11.2	0.3	Malvaceae	1.3
Swinglea glutinosa	468	15.8	8	0.9	Rutaceae	1.3

8. Discusión

En el estudio de Andrade & Perafan (2021), llevado a cabo en los 5 campus de la universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales de Bogotá, se observó que la captura fue de 5,75 TonC/ha (21,10 TonCO₂/ha) valor mucho menor al encontrado en este estudio, lo cual puede ser debido a la diferencia del tipo de especies y al ecosistema, también se encontró que en este estudio se no había relación entre diversidad y densidad de individuos con la captura de CO₂ lo cual difiere a lo encontrado con el presente estudio el cual indica que aunque si existe una relación, esta no es la más significativa para la captura de CO₂.

El estudio de Zuluaga Zuluaga y Castro Escobar (2018) realizado en el municipio de El Carmen de Bolívar, reportó una captura promedio de 57,2 Ton/ ha de CO₂, en bosque seco tropical, un valor inferior al registrado en el presente estudio (88,58 Ton/ha CO₂). Esta diferencia podría deberse a factores como la composición y diversidad de especies, ya que en El Carmen de Bolívar habían 63 especies mientras que en el campus del presente estudio hay mayor diversidad arbórea (192 especies), con presencia de especies nativas eficientes como *Samanea saman* y *Pithecellobium dulce*; el estado de conservación, pues las áreas evaluadas en El Carmen de Bolívar presentaban alta perturbación urbana, en contraste con el campus de la Universidad del Valle, que implementa estrategias de conservación; la similitud con el área de Borrachera de El Carmen de Bolívar que mostró mayor captura de carbono, al igual que el campus de la Universidad del Valle, debido a su combinación eficiente de especies arbóreas y menor perturbación urbana.

Los resultados obtenidos del estudio de Luna Florín et al., (2021), realizado en la reserva ecológica de Arenillas (Ecuador), registró una captura significativamente mayor de 376,42 Ton CO₂/ha, esta notable diferencia se debe a el grado de conservación ya que la reserva ecológica de Arenillas es un área protegida, por lo cual presenta menor perturbación antropogénica y también mayor manejo y protección, asegurando la preservación de la biomasa forestal. Por otro lado, el estudio de Aguirre Padilla, (2017), en bosques secos de la Provincia de Loja (Perú), considerados entre los mejor conservados de Perú documentó una captura de carbono de 32,90 TonC/ha (equivalente a 120,74Ton CO₂/ha) valor mayor al documentado en el presente estudio pero menor al de Luna Florín et al., (2021) lo cual se puede deber a que la Provincia de Loja es bosque seco natural, pero hay un poco de actividad antropogénica a diferencia de la Reserva ecológica de Arenillas. Ambos

estudios tienen la característica de tener mayor captura de CO₂ que el presente estudio debido a que hay mayor grado de conservación y menor perturbación antropogénica.

En el estudio de Siu y Ordeñana (2001), destaca el aumento del carbono almacenado con la edad del bosque, se evidencia que la diferencia radica en la mayor densidad y tamaño de los árboles adultos en ecosistemas naturales conservados. Este contraste subraya la brecha entre un arbolado urbano fragmentado como el de la Universidad del Valle y los bosques naturales, reforzando la necesidad de proteger tanto árboles jóvenes para maximizar la captura, como maduros para garantizar almacenamiento a largo plazo, así como priorizar especies eficientes en entornos urbanos.

Del estudio de Zuluaga Zuluaga y Castro Escobar (2018), se estimó el valor económico de la captura de CO₂ utilizando un precio de mercado de \$11.13 dólares por tonelada de CO₂, calculando un valor de aproximadamente 637.22 dólares por hectárea, siguiendo esta metodología el valor estimado de los servicios prestados del arbolado urbano del campus sería de 985.89 dólares por hectárea lo que equivale a \$3.943.560 COP por hectárea estimando que el valor del dólar promedio se encuentra en 4.000 COP. En contraste Aguirre Padilla (2017) empleó una metodología basada en bonos de carbono con un valor de \$5 USD por tonelada, lo que resultó que el valor por el servicio de captura de CO₂ es de US 592.20 por hectárea, siguiendo esta metodología se tendría que la universidad cuenta con 88,58 certificados de carbono por hectárea dando un valor económico de US 442.9, lo que equivale a \$1.771.600 por hectárea valor mucho menor al considerado por el anterior estudio. Esta discrepancia refleja las diferencias entre valoraciones de mercado directo (que capturan mejor el valor sociambiental en entornos urbanos) y esquemas de bonos (más restrictivos).

Los datos presentados en el informe de emisiones de GEI de Santiago de Cali (2024) revelan una disminución alarmante en la capacidad de absorción de CO₂ por parte del arbolado urbano entre 2017 y 2021, pasando de 7.269 a solo 2.095 toneladas anuales lo cual puede deberse a los cambios de uso en el suelo y a la falta de siembra de nuevos árboles. En este contexto, los resultados obtenidos en este trabajo de grado adquieren relevancia, ya que demuestran que el arbolado urbano puede desempeñar un papel significativo en la captura de CO₂, con un total de 88,58 toneladas de

CO₂ por hectárea. Sin embargo, a pesar de esta contribución, según el estudio de Nuñez et al., 2022) las emisiones totales de CO₂ de la ciudad en 2021 fueron de 2.750.973 toneladas representando una brecha considerable, ya que se requerirían aproximadamente 31.056 hectáreas con características similares a las del campus universitario para compensar dichas emisiones. Esta disparidad resalta la necesidad de ampliar y optimizar las áreas verdes urbanas, priorizando especies nativas eficientes en captura de CO₂, como *Samanea saman*, *Jacaranda caucana* y *Ceiba pentandra*.

En estudios como los de Zuluaga Zuluaga y Castro Escobar (2018) y Chávez Suazo (2018) se destaca que, a pesar de los impactos antropogénicos como la deforestación en los bosques secos tropicales, estos ecosistemas aún conservan especies nativas y mantienen una capacidad significativa como sumideros de carbono, demostrando resiliencia frente a cambios ambientales. Lo anterior se alinea con los resultados del presente estudio, en el que se resalta el papel del arbolado urbano como sumidero de carbono. Aunque este ha perdido parte de su estructura original, su conservación es crucial para preservar la biodiversidad y funciones ecológicas.

El arbolado de la Universidad del Valle cumple un papel fundamental en la provisión de servicios ecosistémicos tanto para la comunidad universitaria como para otros seres vivos. El estudio de Mendez y Silva (2020) destaca que desde la percepción universitaria los árboles constituyen el sello más distintivo del campus y son percibidos como los principales proveedores de beneficios ambientales. Entre los servicios ecosistémicos más valorados se encuentran la provisión de sombra y de alimento (Mendez & Silva), este último asociado principalmente a *Mangifera indica* especie que se ha convertido en un elemento identitario en el campus. De manera similar el arbolado urbano del campus Meléndez de la Universidad del Valle desempeña un papel fundamental como hábitat para diversas especies de aves, tanto residentes como migratorias. En el estudio de (Muñoz et al., 2007) en la Universidad del Valle, se demostró que áreas intervenidas como el campus pueden albergar una considerable diversidad de aves, siempre que se conserven áreas de vegetación y áreas arborizadas, también se demostró que especies arbóreas representativas del bosque seco como *Samanea saman*, *Calliandra pittieri* proporcionan néctar para colibríes, mientras que árboles frutales como *Mangifera indica*, *Psidium guajava* y *Pithecellobium dulce* son fuentes de alimento para otras aves.

Si bien *Mangifera indica* y *Swinglea glutinosa* presentan una gran densidad arbórea, a pesar de ello no se posicionan entre las especies más eficientes para la captura de CO₂. Lo cual coincide con estudios como el de Chave et. Al (2005) y (García et al., 2021) que han demostrado que existe una relación directa entre el DAP y la cantidad de carbono almacenado en los árboles, siendo los árboles de mayor diámetro los que contribuyen de manera más significativa a la captura de CO₂. En contraste especies como *Samanea saman*, *Clitoria fairchildana* y *Ceiba pentandra*, aunque menos abundantes, muestran mayor eficiencia de captura de CO₂.

Por un lado, *Mangifera indica* aporta servicios altamente valorados por la comunidad universitaria, reforzando su importancia cultural y social. Por otro lado, especies menos predominantes, pero más eficientes en captura de CO₂ podrían ser clave para estrategias de mitigación climática. Por ello, los planes de sostenibilidad y manejo del arbolado deben considerar tanto los atributos funcionales (como la capacidad de captura de CO₂) como aquellos servicios más perceptibles y valorados por los usuarios, buscando un equilibrio que maximice los beneficios ambientales y sociales.

En el plan de silvicultura de Cali (DAGMA, 2022) se reporta que el 65% del arbolado urbano corresponde a especies exóticas o introducidas, lo que ha generado un desplazamiento progresivo de especies nativas del bosque seco tropical. El presente trabajo corrobora dicho comportamiento, en la Universidad del Valle, sede Meléndez, donde especies invasoras como *Swinglea glutinosa* predominan frente a otras especies nativas. La baja representatividad de especies nativas resalta la necesidad de alinear las estrategias de reforestación con los planes de conservación del DAGMA.

Los individuos pertenecientes a la familia *Malvaceae* como la *Ceiba Pentandra* demuestran una notable eficiencia en la captura de carbono, en comparación con otras especies de mayor densidad arbórea. En el estudio de (Dauber et al., 2021) se demostró que los individuos de la familia *Malvaceae* presentan una capacidad de captura de carbono significativamente mayor en comparación con otras especies arbóreas. En la investigación de Henao y Pérez (2022), los análisis revelaron que la familia *Malvaceae* presentó el mayor potencial de remoción de contaminantes, agrupando un tercio de las especies que se encuentran entre las 10 primeras en todas las fases de

crecimiento. Esta evidencia permite inferir que las especies de esta familia botánica poseen características particulares que las hacen especialmente eficientes en la captura de carbono tal cual como su alto DAP, así como su alta provisión de servicios ecosistémicos. En el estudio de Henao y Pérez (2022) se evidenció que *Ceiba pentandra* presenta una alta eficiencia en la captura de CO₂. Asimismo, los resultados destacaron a *Pithecellobium dulce* como una de las especies con mayor potencial de secuestro de CO₂ en su etapa adulta. Estos resultados refuerzan la relevancia de ambas especies en proyectos de reforestación y restauración ecológica.

Por lo cual un número reducido de familias botánicas es significativo para la captura de CO₂, lo que sugiere que la selección estratégica de especies, más allá de su abundancia, podría optimizar los esfuerzos de mitigación climática en proyectos de reforestación o conservación. También es importante considerar que, aunque un número reducido de familias o especies arbóreas tienen gran contribución a la captura de CO₂, el DAGMA (2022) en su plan de silvicultura promueve la diversificación de especies, priorizando aquellas propias del bosque seco y especies frutales. Ya que las especies representativas del bosque seco requieren menos mantenimiento, promueven la biodiversidad y evitan el desplazamiento de flora autóctona por especies introducidas, caso evidente de la predominancia de *Swinglea glutinosa*, especie con baja eficiencia en cuanto a captura de CO₂ y vetada del plan de silvicultura del DAGMA. Por ello, evaluar el papel ecológico, social y la capacidad de almacenamiento de carbono de las especies se vuelve fundamental.

El uso de modelos alométricos generalizados, como el aplicado en el presente estudio, proporciona estimaciones estandarizadas y metodológicamente válidas para bosques tropicales, siguiendo lineamientos aceptados por el IDEAM. Sin embargo, su precisión puede presentar limitaciones al no considerar variaciones específicas por especie. En el estudio de Patiño et al. (2018), se optó por tomar diferentes modelos alométricos dependiendo de la especie, ya que había un número manejable de especies y mayor viabilidad operativa. Estudios como el de Mejía et al. (2023) validan la confiabilidad de estos modelos a nivel de ecosistema, no obstante, es importante reconocer que la exclusión de la biomasa de las raíces implica una subestimación en los valores finales.

Mientras que las universidades de la región suelen enfocarse casi exclusivamente en la reducción de energía y agua, la gestión de zonas verdes y arbolado carece de planes específicos. Esta brecha se

explica en parte por la ausencia de estándares globales para dichas áreas, a diferencia de lo que ocurre con los edificios verdes, que cuentan con sistemas de certificación ampliamente reconocidos (Barnett-Itzhaki et al., 2025).

9. Plan de gestión ambiental del arbolado de la universidad

Tras evaluar el estado actual del arbolado, se reconoce su importancia ecológica y social. Con base en este diagnóstico, se propone el siguiente plan de acciones estratégicas para promover la captura de CO₂ y garantizar la conservación y manejo sostenible.

9.1. Programas y plan de acciones

9.1.1. Conservación y protección

Es fundamental la protección de los árboles ya existentes, ya que estos están prestando servicios clave como la captura de CO₂, así como servicios para el bienestar de la comunidad y otros seres vivos, su preservación asegura estos beneficios y fortalece la resiliencia del campus. Su valor ecológico como sumidero de carbono es irremplazable a corto y mediano plazo (Di Sacco et al., 2021).

Objetivo: Garantizar la protección, conservación y manejo sostenible del arbolado urbano, promoviendo su salud y capacidad para proveer servicios ecosistémicos.

Acciones:

- **Compensación ambiental:** de acuerdo con el plan silvicultural del DAGMA, se debe priorizar la preservación del arbolado existente, integrando su conservación en las etapas iniciales de diseño o rediseño de proyectos para evitar afectaciones. Solo en casos estrictamente inevitables se considerará la tala, aplicando las siguientes medidas de compensación. Esta práctica se alinea con lo implementado en la Universidad del Quindío donde ante árboles caídos o en riesgo, se ejecutaron talas compensadas con seguimiento durante un año para garantizar la efectividad de las medidas.

- Reubicación de árboles: se priorizará la reubicación de árboles cuando sea viable, trasladándolos a zonas adecuadas dentro del campus.
- Siembra compensatoria: plantación de 3 nuevos árboles por cada ejemplar afectado, seleccionando especies nativas y adaptadas al ecosistema local.
- Monitoreo y garantía: seguimiento de monitoreo técnico durante 1 año para verificar la adaptación y supervivencia de los árboles reubicados o sembrados, asegurando que la compensación no sea solo simbólica, sino una restauración real y medible.

Si bien es inevitable que ciertos proyectos de infraestructura generen pérdidas de cobertura vegetal, se establecen medidas de compensación para controlar el impacto dentro de los límites manejables y asegurar procesos de restauración efectivos.

- Plan de manejo fitosanitario: es fundamental para garantizar la salud y conservación del arbolado, este incluye acciones periódicas como censos de salud vegetal, podas técnicas y fertilización controlada, orientadas a prevenir, diagnosticar y tratar afectaciones que puedan comprometer la vitalidad de los individuos arbóreos. Si bien se trata de una de las medidas más ampliamente adoptadas por las instituciones de educación superior, en la revisión bibliográfica de Barnett-Itzhaki et al., (2025), la identifican como unas principales actividades reportadas en el marco de la gestión ambiental universitaria.

- Podas semestrales:

-Eliminar ramas secas o enfermas: previene la propagación de plagas y patógenos, reduciendo el riesgo de deterioro generalizado del árbol. Esta acción también mitiga peligros para la seguridad (como caída de ramas).

-Favorecer la estructura y crecimiento equilibrado: la poda técnica favorece una estructura equilibrada de la copa, evitando crecimiento asimétrico que comprometa la estabilidad del árbol, optimizando su exposición a luz solar, distribución de nutrientes y capacidad de fotosíntesis, prolongando su vida útil.

- Registro de intervenciones: para garantizar trazabilidad y gestión eficiente de las podas

e intervenciones se propone usar la herramienta Survey123 de ArcGIS administrada por la unidad de servicios varios o hacer una encuesta con la herramienta Google Forms para documentar:

- Fecha de poda, ubicación exacta y especie del árbol intervenido
 - Tipo de poda realizada (sanitaria, formación, seguridad)
 - Fotografías del antes y después como evidencia visual
 - Estado fitosanitario detectado (plagas, enfermedades, daños)
-
- Riego eficiente: esta acción busca optimizar el uso del recurso hídrico en el mantenimiento del arbolado, tomando como referencia las prácticas implementadas por otras universidades en sus planes de gestión ambiental. El objetivo es garantizar la supervivencia de los árboles en condiciones críticas mediante un sistema de riego que maximice su efectividad. Los horarios óptimos para realizar riegos son en horarios nocturnos o en la mañana para reducir pérdidas por evaporación.
-
- Enfoque en períodos secos: intensificación de riego durante los meses de sequía como enero-febrero y julio-agosto.
 - Uso de sistemas de riego en la zona experimental de biología y zonas de siembra reciente.
-
- Fertilización: busca fortalecer la salud del arbolado mediante un esquema de nutrición vegetal eficiente:
 - Aprovechamiento de residuos: utilización de hojarasca, ramas podadas y desechos vegetales del campus para producir abono y mezclar con otros fertilizantes efectivos para mejorar el perfil nutricional.
 - Aplicar fertilizante cada 2 o 3 meses (o según sea necesario) para árboles recién sembrados o árboles que presenten deficiencias nutricionales.

Productos esperados:

- Que aumenten los individuos arbóreos con buen estado de vitalidad.

- Reducción de la mortalidad de árboles jóvenes gracias a riego eficiente, fertilización y monitoreo después de la siembra.
- Mayor eficiencia en la provisión de servicios ecosistémicos como la captura de CO₂ y beneficios sociales y culturales.

9.1.2. Informe de recuperación del bosque seco

Este informe de recuperación del bosque seco tropical servirá como instrumento clave para evaluar el progreso de las acciones de restauración en la zona experimental de biología, documentando el estado de la vegetación, la recuperación del suelo y los beneficios obtenidos. Es una herramienta fundamental para garantizar la efectividad de las acciones de restauración ecológica. Este reporte permitirá tomar decisiones basadas en datos objetivos, optimizar los procesos de siembra y mantenimiento. Esta metodología se alinea con lo propuesto por Di Sacco et al., (2021), quienes destacan la importancia de “aprender haciendo” mediante la implementación de pruebas a pequeña escala y el monitoreo continuo del crecimiento y supervivencia de las especies. En consecuencia, el informe no sólo servirá para verificar la efectividad de las técnicas de restauración aplicadas, sino que será la base para optimización de los procesos de siembra y mantenimiento.

Objetivo: Documentar y monitorear las jornadas de restauración del bosque seco en la zona experimental de biología.

A continuación, se presentan las acciones:

- Elaborar informes técnicos sobre la supervivencia y crecimiento de las especies sembradas: al documentar sistemáticamente el desarrollo de la vegetación, se establece un marco de referencia para mejorar continuamente las estrategias de recuperación del bosque seco tropical y proteger la sostenibilidad a largo plazo de los ecosistemas intervenidos.
- Integración de los datos a un SIG: resulta fundamental para garantizar una gestión más eficiente y trazable. Se propone que el SIG incluya los siguientes datos:
 - Ubicación exacta de los individuos lo cual facilita su monitoreo y manejo.

- Estado de vitalidad (Bueno, regular, malo), posibilitando intervenciones oportunas.
- Fechas de siembra y últimas intervenciones, permitiendo evaluar crecimiento y planificar mantenimientos futuros.
- Permitir ediciones periódicas para actualizar el estado de los árboles, es de gran importancia para mantener una base de datos precisa y confiable sobre el arbolado.

Productos esperados:

- Informes técnicos de supervivencia y crecimiento de especies sembradas: estos documentos permitirán evaluar el desempeño de las especies en la Universidad del Valle, identificado cuáles presentan mayor adaptabilidad y facilidad de establecimiento.
- Actualización de datos de captura de CO₂: la información obtenida contribuirá a la actualización de la capacidad de absorción de CO₂ por parte del arbolado de la universidad.

9.1.3. Reforestación y diversificación de especies

Debido a que el porcentaje de individuos arbóreos de vitalidad buena no es tan alto como se esperaría, se busca incrementar este indicador sin afectar las especies ya existentes. Para ello, se propone reemplazar los árboles que presenten un mal estado de vitalidad, por especies representativas del bosque seco especialmente aquellas que tengan baja densidad en el campus. Esta medida se fundamenta en la literatura científica de Barnett-Itzhaki et al. (2025) y Di Sacco et. (2021) estos destacan la importancia de elegir especies nativas o adaptadas al medio para asegurar su supervivencia, por otro lado también señalan que mantener un ecosistema más biodiverso incrementa la provisión de servicios ecosistémicos, mejorando así la resiliencia del arbolado urbano.

Objetivo: Reemplazar especies en estado de vitalidad “Muerto” o “Malo”, por nativas del bosque seco y especies frutales, priorizando las menos representadas.

Acciones:

- Seleccionar especies a reemplazar: Los criterios de selección son:

- Representativa del bosque seco
 - Alta eficiencia en captura de CO₂
 - Bajo requerimiento de mantenimiento
 - Que tenga baja representación en el campus
- Reemplazar especies en mal estado de vitalidad por especies representativas del bosque seco como *Samanea saman*, *Ceiba pentandra*, *Calliandra pittieri*, *Anarcadium excelsium*, *Gliricida sepium*, especies frutales tales como *Mangifera indica*, *Psidium guajava* y otras especies consideradas en el punto anterior.

Productos esperados:

- Aumento de diversidad de especies del bosque seco.
- Mayor captura de CO₂ debido al reemplazo con especies más eficientes y en buen estado.
- Mejora en servicios ecosistémicos.
- Reducción de especies invasoras.

9.1.4. Monitoreo y tecnología

Objetivo: Mantener los datos del inventario arbóreo actualizados.

Acciones:

- Actualización del Inventario arbóreo mediante herramientas SIG: actualizar periódicamente el inventario arbóreo mediante Sistemas de Información Geográfica es crucial para una gestión eficiente del arbolado y facilitan la toma de decisiones.
 - Actualización de individuos arbóreos existentes: es necesario actualizar el inventario arbóreo ya que durante las temporadas extensas de lluvia se han presentado caídas recurrentes de algunos ejemplares, también hay un porcentaje de árboles en estado de vitalidad muertos.
 - Cargar mediciones anuales de DAP y altura.

- Recalcular la captura de CO₂.

Productos esperados:

- Un SIG actualizado periódicamente de los registros de captura de CO₂, con incrementos progresivos acordes al crecimiento del arbolado.

9.1.5. Participación comunitaria

Di Sacco et al, (2021) dice que involucrar activamente a la comunidad local desde la planificación hasta el monitoreo no solo fomenta la corresponsabilidad ambiental, sino que aprovecha conocimientos locales, previene conflictos y fortalece la resiliencia a largo plazo del ecosistema transformando a la comunidad en guardianes activos de su entorno por lo cual la participación de la comunidad universitaria en el manejo del arbolado del campus es fundamental porque fomenta la corresponsabilidad ambiental y conocimientos.

Objetivo: Involucrar a la comunidad universitaria en la conservación del arbolado.

Acciones:

- Realización de campañas de educación ambiental donde se resalte:
 - Importancia del bosque seco.
 - Servicios ecosistémicos.
- Jornadas de siembra que incluya a estudiantes, profesores y trabajadores: se busca que estas jornadas de siembra tengan un enfoque educativo, donde no solo se planten árboles, sino que también se comprenda la importancia de la selección de especies. Cada siembra irá acompañada de una breve explicación sobre el valor ecológico y cultural fomentando así un sentido de pertenencia, garantizando que la reforestación sea consciente y sostenible más allá del simple acto de plantar.
- Recorridos por la universidad: hacer recorridos mostrando los árboles notables de la universidad y la zona de restauración, los recorridos tienen el objetivo de dar a conocer el patrimonio arbóreo, educar sobre las interacciones ecológicas y fomentar la conservación

activa, así mismo observar el estado de los árboles sembrados. En la Figura 34 se observa la ubicación de los árboles notables y el polígono de restauración del bosque seco.

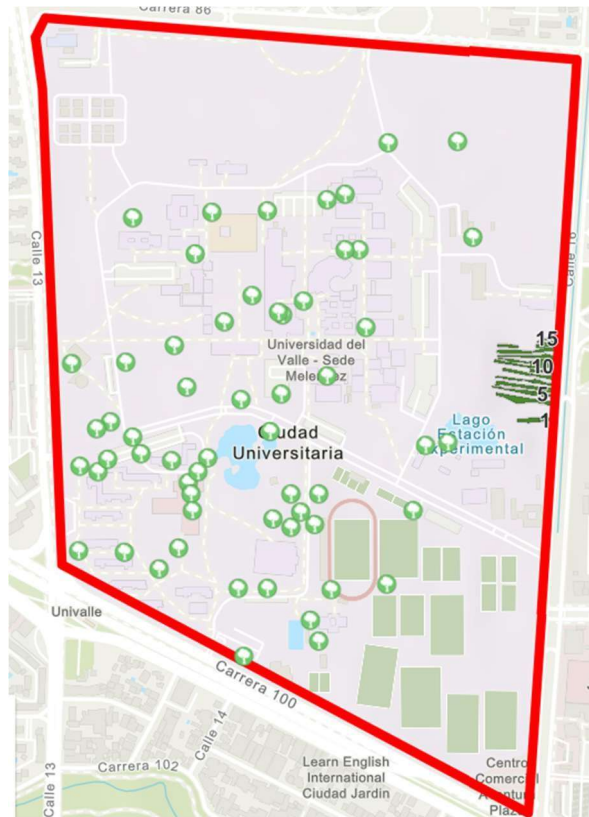


Figura 34. Ubicación de árboles notables y polígono de restauración

- Realizar un grupo de voluntarios “Guardianes del arbolado”

Vía una aplicación de SIG o vía grupos en WhatsApp, que las personas interesadas reporten daños o necesidades de mantenimiento de los árboles.

9.2. Cronograma

Los resultados de los programas se proyectan a 5 años, pero las medidas de conservación y protección deberían implementarse de forma continua.

Tabla 8. Cronograma actividades para el desarrollo del plan de gestión ambiental

Conservación y protección							
Acciones		Responsables	2025	2026	2027	2028	2029
Compensación ambiental	Reubicar los individuos en zonas adecuadas del campus.	Área de Gestión Ambiental y Servicios Varios.	Cuando sea necesario por motivo de construcción.				
	Sembrar 3 árboles por cada individuo afectado.	Área de Gestión Ambiental y Servicios Varios y personas voluntarias.					
	Monitorear su adaptación por 1 año.	Área de Gestión Ambiental y Servicios Varios.					
Manejo fitosanitario	Eliminar ramas secas o enfermas.	Área de Gestión Ambiental y Servicios Varios.	•	•	•	•	•
	Registro de intervenciones		•	•	•	•	•
	Riego: enfocado principalmente en épocas de sequía (enero-febrero y julio-agosto)		•	•	•	•	•
	Fertilización: aplicar fertilizante cada 2 o 3 meses (o según sea necesario)		•	•	•	•	•
Informe de recuperación del bosque seco	Elaborar informes técnicos sobre la supervivencia y crecimiento de las especies sembradas.	Área de Gestión Ambiental y Servicios Varios.	•	•			
	Integrar los datos a un SIG y permitir ediciones periódicas para actualizar el estado de los árboles	Área de Gestión Ambiental y Servicios Varios.	•	•	•	•	•
Reforestación y diversificación	Seleccionar especies a reemplazar	Área de Gestión Ambiental y Servicios Varios.	•	•			

	Reemplazar especies en mal estado de vitalidad	Área de Gestión Ambiental y Servicios Varios.		•	•		
Monitoreo y tecnología	Cargar mediciones anuales de DAP y altura.	Área de Gestión Ambiental y Servicios Varios.	•	•	•	•	•
	Recalcular la captura de CO ₂ .	Área de Gestión Ambiental y Servicios Varios.		•	•	•	•
Participación comunitaria	Campañas de educación ambiental	Área de Gestión Ambiental y Servicios Varios.		•	•	•	•
	Jornadas de siembra	Área de Gestión Ambiental y Servicios Varios.					
		Voluntarios de la comunidad universitaria. Investigadores.		•	•		
	Recorridos por la universidad	Área de Gestión Ambiental y Servicios Varios.					
		Voluntarios de la comunidad universitaria. Investigadores.		•	•	•	•

9.3. Seguimiento

Para garantizar la efectividad del plan, se propone un sistema de seguimiento basado en indicadores, organizados en las siguientes categorías:

Tabla 9. Indicadores de seguimiento PGA

Programa	Indicadores	Meta
Conservación y protección	Porcentaje de árboles con vitalidad “Bueno”	Aumentar del 58.7% al 60% en 5 años
	Número de árboles reubicados o sembrados como compensación	3 árboles por individuo arbóreo afectado
	Frecuencia en podas y registros actualizados en SIG	2 podas semestrales con registro en Survey

Restauración del bosque seco	Supervivencia de especies del bosque seco sembradas	70% de supervivencia anual
	Incremento en la diversidad de especies del bosque seco	+ 10 especies incorporadas en 5 años
Reforestación y diversificación	Reducción de especies invasoras	Disminuir especies invasoras en mal estado de vitalidad en un 20% en 5 años
	Aumento en la captura de CO ₂ por hectárea	+5% respecto al valor actual (88.58 ton/ha)
Monitoreo tecnológico	Actualización anual del SIG	100% de datos de DAP y altura cargados anualmente
	Uso de herramientas digitales para reportes	100% de intervenciones registrada en ArcGIS
Participación comunitaria	Número de jornadas de siembra, seguimiento y capacitaciones realizadas	2 actividades anuales
	Integrantes activos en “Guardianes del arbolado”	50 voluntarios registrados en 2 años

10. Conclusiones

- El arbolado de la Universidad del Valle sede Meléndez demuestra una capacidad significativa de captura de carbono, con un total de 88.58 toneladas de CO₂ por hectárea. Especies como *Pithecellobium dulce*, *Samanea saman* y *Ceiba pentandra* destacan por su alta eficiencia, a pesar de no ser las más abundantes. Estos resultados respaldan la necesidad de priorizar especies nativas en proyectos de reforestación, ya que requieren menos mantenimiento, promueven la biodiversidad y están adaptadas a las condiciones locales.
- Aunque *Mangifera indica* y *Swinglea glutinosa* son las especies más abundantes en el campus, su contribución a la captura de carbono es baja. *Swinglea glutinosa*, además, es una especie invasora vetada por el DAGMA (2022), lo que refuerza la necesidad de reemplazarla progresivamente por alternativas de especies nativas más eficientes.
- Se confirmó una correlación directa entre el DAP y la capacidad de almacenamiento de carbono. Especies con diámetros mayores, como *Ficus benjamina*, capturan más CO₂ a pesar de su baja densidad poblacional. Esto subraya la importancia de preservar árboles

maduros y promover el crecimiento de especies con potencial de desarrollo diamétrico.

- Aunque el arbolado de la Universidad del Valle sede Meléndez representa una fracción mínima de la capacidad total de captura de carbono necesaria para compensar las emisiones de Cali, este provee servicios ecosistémicos clave como la conservación de la biodiversidad, regulación térmica, mejora de la calidad del aire entre otros.
- La integración de sistemas de información geográfica permitió visualizar los datos del inventario arbóreo y sus características, así como la cuantificación de CO₂, facilitando la divulgación efectiva de los resultados tanto a la comunidad universitaria como a entidades ambientales.
- Más allá de la captura de carbono, el arbolado del campus provee servicios culturales (espacios de recreación), ecológicos (hábitat para fauna) y climáticos (regulación térmica), reforzando su papel como un valor integral en entornos urbanos.

11. Recomendaciones

- Trabajar con el DAGMA y otras entidades ambientales para alinear estrategias con el plan de silvicultura de Cali, promoviendo políticas públicas que favorezcan la diversificación de especies zonas urbanas.
- Priorizar la siembra de especies representativas del bosque seco tales como *Pithecellobium dulce*, *Samanea saman*, *Jacaranda cauca*, *Tabebuia rosea* y *Ceiba pentandra*, que han demostrado alta eficiencia en captura de CO₂. Esto asegura menor mantenimiento y mayor adaptabilidad al ecosistema local.
- En el SIG del inventario arbóreo se observó el 38,2% de los árboles presentan vitalidad regular y 3% están en mal estado o muertos, por lo cual se recomienda implementar una estrategia de reemplazo selectivo priorizando los individuos más deteriorados, en lugar de eliminar masivamente las especies invasoras, para mantener temporalmente los servicios ecosistémicos que aún brindan estos individuos.
- Utilizar el SIG desarrollado para monitorear la salud, distribución y captura de carbono del

arbolado. Facilitando la planificación urbana y la toma de decisiones. También que el SIG se esté actualizando cada cierto tiempo.

- Proteger e implementar programas de mantenimiento para árboles con alto DAP, como *Ceiba pentandra*, ya que su biomasa contribuye significativamente a la captura de CO₂.
- Capacitar a la comunidad universitaria sobre el papel del arbolado en la provisión de servicios ecosistémicos.
- Establecer una red de colaboración entre universidades de la ciudad para implementar acciones conjuntas que promuevan el cuidado, conservación y valoración del arbolado urbano, reconociendo su importancia ambiental, social y educativa.

12. Bibliografía

- Acuña-Simbaqueva, L. M., Andrade, H. J., Segura, M. A., Sierra-Ramirez, E., Canal-Daza, D. S., & Greñas-Corrales, O. E. (2021). Mitigation of greenhouse gas emissions from households by urban woodland in Ibagué-Colombia. *Ambiente e Sociedade*, 24, 1-20. <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC20200191VU2021L3AO>
- Agudelo Guinand, M. (2009). Biomasa aérea y contenido de carbono en bosques de quercus humboldtti y colombobalanus excelsa corredor de conservación de robles guantiva la rusia iguaque (Santander - Boyacá). (trabajo de grado - pregrado). Universidad Autónoma de Occidente. Recuperado de <http://red.uao.edu.co/handle/10614/8101>.
- Aguirre Padilla, N. I. (2017). Captura de carbono en el compartimiento leñoso del bosque seco en la provincia de Loja con perspectivas de mercado. (Tesis de maestría). Escuela superior Politécnica de Chimborazo.
- Barraza, J., J. M. Montes, N. J. Martinez y C. Deloya. (2010). Ensamblaje de escarabajos coprófagos (Scarabaeidae: Scarabaeinae) del Bosque Tropical Seco, Bahía Concha, Santa Marta (Colombia). *Revista colombiana de Entomología* 36 (2):285-291.
- Boyd J, Banzhaf J. (2007). What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*; 63:616-628.
- Cali Cómo Vamos. (2023). Informe medio ambiente y espacio público- 22 de junio 2023.
- Camacho-Valdez, V., & Ruiz-Luna, A. (2012). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista Bio Ciencias*, 1(4). <https://doi.org/10.15741/revbio.01.04.02>
- Chávez Suazo, J. P. (2018). Captura y almacenamientos de carbono de los bosques estacionalmente secos de costa norte (Lambayeque), como mitigación frente al cambio climático. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Constanza, R., dArge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., Oneill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M., (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 235-260
- Constanza, R., (2000). Social goals and the valuation of ecosystem services. *Ecosystems* 3,4-10.
- Constanza, R., Kubiszewski, I., Ervin, D., Bluffstone, R., Boyd, J., Brown, D., Chang, H., Dujon, V., Granek, E, Polasky, S., Shandas, V., Yeakley, A., (2011), Valuing ecological systems and services. *F1000 Biol. Rep* 3, 14.
- Corzo, G. T. (2007). Manejo del arbolado urbano en Bogotá. territorios, (16-17), 149-173 Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente – DAGMA. (2019). Documento técnico para el Plan de Gestión Ambiental de Cali PGAC.
- Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente – DAGMA. (2022). Plan de silvicultura de Santiago de Cali.
- Daily, G., Ed. 1997. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Washington, D.C., Island Press.
- DANE. (2020) *Demografía y población*.
- Dauber, E., Terán, J., & Guzman, R. (2021). Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana* Vol 1 N 1.
- De Groot R. S, Wilson M. A, Boumans RMJ. (2002). A typology for the classification, description and

- valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41: 393-408.
- Di Sacco, A., Hardwick, K.A., Blakesley, D., Brancalion, P.H.S., Breman, E., Rebola, L.C., Chomba, S., Dixon, K., Elliott, S., Ruyonga, G., Shaw, K., Smith, R.J. y Antonelli, A. (2021). Ten golden rules for reforestation to optimize carbon sequestration, biodiversity recovery and livelihood benefits. *Global Change Biology*, 27(7), pp. 1328. <https://doi.org/10.1111/geb.15498>
- Farber, S.C. Constanza, R., Wilson, M.A. (2002). Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. *Ecol. Econ.* 41, 375-392.
- Fisher B, Turner KR, Morling P (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*; 68: 643-653.
- Forero-Chavez, N., Arenas-Clavijo, A., Armbrecht, I. y Montoya-Lerma,. (2024) Urban patches of dry forest as refuges for ants and carabid beetles in a neotropical overcrowded city. *Urban Ecosystems*, 27, pp. 1263-1278. <https://doi.org/10.1007/s11252-023-01504-y>
- Frieri, M., Grodillo, M., & Sepúlveda, L. (2024). Effects of climatic variables on dengue incidence in Cali. <https://doi.org/10.1101/2024.05.01.24306676>.
- García, H., G. Corzo, P. Isaacs y A. Etter. 2014. Distribución y estado actual de los remanentes del bioma de Bosque Seco Tropical en Colombia: insumos para su gestión. Pp: 228-251. En: Pizano, C. y H. García (Eds.). *El Bosque Seco Tropical en Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá.
- García, Y., Arteaga, Y., Torres, B., Bravo, C., & Robles, M. (2021). Aerial biomass of botanical families in piedmont evergreen forest subject to intervention levels. *Colombia Forestal*, 24(1), 45–59. <https://doi.org/10.14483/2256201X.15939>
- Gómez, E., & Martín, B. (2015). Ecological economics perspectives on ecosystem services valuation. En *Handbook of Ecological Economics* (pp. 260–282). Edward Elgar Publishing Ltd. <https://doi.org/10.4337/9781783471416.00015>
- Growning, M. H. E. M., Locke, D. H., Konijnendijk, C., Labib, S. M., Rigolon, A., Yeager, R., Bardhan, M., Berland, A., Dadvaard, P., Helbich, M., Li, F., Li, H., James, P., Klompmaker, J., Reuben, A., Roman, L. A., Tsai, W.-L., Patwary, M., O'Neil-Dunne, J., Ossola, A., Wang, R., Yang, B., Yi, L., Zhang, J., & Nieuwenhuijsen, M. (2024). Measuring the 3-30-300 rule to help cities meet nature access thresholds. *Science of the Total Environment*, 907, 167739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167739>
- INECC. (2020). Revisión y análisis sobre valoración económica de los servicios ecosistémicos de México de 1990 a 2019. <http://www.gob.mx/inecc>
- Ismat, E. M. (2024). Urban Green Areas per Resident: Review Study. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 12(7), 400-405. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.63573>
- Johnson, K. L., Gislason, M. K., Silva, D. S., Smith, M. J., & Buse, C. (2024). Advancing Planetary Health Through Interspecies Justice: A Rapid Review. *Challenges*, 15(4), 45. <https://doi.org/10.3390/challe15040045>
- Kahneman, D., (2011). *Thinking fast and slow*. Farrar, Straus and Giroux, New York.
- Lapeyre, T., Alegre, J., & Arévalo, L. (2004). Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*, 3(2), 35-44.
- Londoño L, V. & Torres G, A.M (2015). Estructura y composición vegetal de un bosque seco tropical

- en regeneración en Bataclan (Cali, Colombia). *Colombia Forestal*, 18 (1), 71-85.
- López, E., Posada, C., & Moreno, J. G. (s.f). Los sistemas de información geográfica. I Congreso de Ciencia Regional de Andalucía: Andalucía en el umbral del siglo XXI. Universidad de Sevilla.
- Luna Florín, A. D., Sánchez Asanza, A. W., Maza Maza, J. E., Castillo Figueroa, J. E. (2021). Biomasa forestal y captura de carbono en el bosque seco de la Reserva Ecológica Arenillas. *Revista Científica Agroecosistemas*, 9(2), 140-46.
- Marquez, C. G. (2000). Vegetación, población y huella ecológica como indicadores de Sostenibilidad en Colombia. *Gestión y Ambiente* 5:33-49.
- Mauri, A., Girardello, M., Forzieri, G., Manca, F., Beck, P. S. A., Cescatti, A., & Strona, G. (2023). Assisted tree migration can reduce but not avert the decline of forest ecosystem services in Europe. *Global Environmental Change*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102676>
- MEA. (2005). *Ecosystems and human well-being*. Island Press.
- Mejía, C. E., Andrade, H. J., & Segura, M. (2023). Estimación de biomasa y carbono con herramientas de teledetección en bosques secos tropicales del Tolima, Colombia. *Revista de Teledeteccion*, 2023(62), 57–70. <https://doi.org/10.4995/raet.2023.19242>
- Moreno, J. A., Burgos, J. D., Nieves, H. E., & Buitrago, C. (2005). Modelo alométrico general para la estimación del secuestro de carbono por plantaciones de caucho *Hevea brasiliensis* mull Arg. En Colombia. *Revista Colombia Forestal* Vol. 9 No 18.
- Murad, R. (2003). Estudio sobre la distribución espacial de la población en Colombia. CEPAL <https://repositorio.cepal.org/items/82cfea02-151d-4b49-9598-cccc426a6793>
- Namin, S., Xu, W., Zhou, Y., & Beyer, K. (2020). The legacy of the Home Owners' Loan Corporation and the political ecology of urban trees and air pollution in the United States. *Social Science and Medicine*, 246. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2019.112758>
- National Geography. (2022). Qué es un ecosistema? Niklas, K. J., Midgley, J., & Enquist, B. J. (2003). A General Model for Mass-Growth-Density Relations across Tree-Dominated Communities. <https://www.researchgate.net/publication/216813370>
- Norman, C. & Kreye M. (2023). How forests store carbon. PennState Extension. <https://extension.psu.edu/how-forests-store-carbon>
- Nowak, D. J., Ellis, A., & Greenfield, E. J. (2022). The disparity in tree cover and ecosystem service values among redlining classes in the United States. *Landscape and Urban Planning*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104370>
- ONU. (2015). Acuerdo de París de la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático.
- Ramachandra, T., Aithal, B., Kulkarni, G. y Vinay, S. (2017). Espacios verdes en Bengaluru: Cuantificación mediante técnicas geoespaciales. *The Indian Forester* , 143, 307-320.
- Sierra-Guerrero, M. C., & Amarillo-Suárez, A. R. (2027). Socioecological features of plant diversity in domestic gardens in the city of Bogotá, Colombia.
- Solano, D. y Ospina, J. (2017). Áreas naturales de bosque seco tropical en el Valle del Cauca, Colombia: una oportunidad para la restauración., 18, 9-34. <https://doi.org/10.21068/c2017v18s01a01>
- Patiño, S., Suárez, L. N., Andrade, H. J., & Segura, M. A. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista de investigación Agraria y Ambiental*.

- Pistón, N., Silva Filho, D. S. E., & Dias, A. T. C. (2022). Social inequality deeply affects people's perception of ecosystem services and disservices provided by street trees. *Ecosystem Services*, 58, 101480. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101480>
- Priego, C. (2002). Beneficios del Arbolado Urbano.
- Retamal, C. (2015). Cuantificación de servicios ecosistémicos urbanos en Cerros Isla. Instituto de estudios urbanos y territoriales.
- Sharp, R., Tallis, H., Ricketts, T., Guerry, A., Wood, S., Chaplin-Kramer, R., & Douglass, T. (2016). Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs.
- Siu, M. Y., & Ordeñana, W. (2001). Estimación del contenido y almacenamiento de carbono en el bosque seco secundario del Refugio de vida silvestre Chococente. Universidad Nacional Agraria.
- Stand for threes. (2022). Por qué los árboles nos hacen tanto bien?
- Suchocka, M., Heciak, J., Błaszczuk, M., Adamczyk, J., Gaworski, M., Gawłowska, A., Mojski, J., Kalaji, H. M., Kais, K., Kosno-Jończy, J., & Heciak, M. W. (2023). Comparison of Ecosystem Services and Replacement Value calculations performed for urban trees. *Ecosystem Services*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101553>
- Torres-Torres, J. J., Mena-Mosquera, V. E., & Álvarez-Dávila, E. (2017). Carbono aéreo almacenado en tres bosques del Jardín Botánico del Pacífico, Chocó, Colombia. *ENTRAMADO*, 13(1), 200–209. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25110>
- Trespalacios, J., Blanquicett, C., & Carrillo, P. (2018). Gases y efecto invernadero.
- Turner RK, Georgiou S, Fisher B. (2008) Valuing Ecosystem Services: The Case of multi-functional wetlands. London: Cromwell Press. 240.
- U.S. Environmental Protection Agency (2004). Ecological benefits assessment strategic plan. Washington. DC: SAB
- USDA. (2018). i-Tree Eco Manual del usuario. www.itreetools.org
- Wallace KJ (2007). Classification of ecosystem services: problems and solutions. *Biological Conservation* 139: 235–246
- Yepes, A., Duque, A., Navarrete, D., & Cabrera, K. (2011). Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa- carbono en Colombia. IDEAM
- Yepes, A., Herrera, J., Phillips, J., Cabrera, E., Galindo, G., Granados, E., Duque, Á., Barbosa, A., Olarte, C., & Cardona, M. (2015). Contribución de los bosques tropicales de montaña en el almacenamiento de carbono en Colombia. En *Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol. ISSN (Vol. 63, Número 1)*.
- Zuluaga Zuluaga, L., & Castro Escobar, E. S. (2018). Valoración de servicios ambientales por captura de CO₂ en un ecosistema de Bosque Seco Tropical en el municipio de el Carmen Bolívar, Colombia. <https://doi.org/10.17151/luaz.2019.47.1>