



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS

AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

**Trabajo de titulación presentado como requisito previo a la obtención del
título de Ingeniero Forestal**

**“DETERMINACIÓN DEL CARBONO AÉREO ALMACENADO
EN DOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN LA GRANJA DE YUYUCOCHA”**

AUTOR

Brayan Andrés Tabango Montaluisa

DIRECTOR

Ing. Jorge Luis Ramírez López, M.Sc.

IBARRA – ECUADOR

2020

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

“DETERMINACIÓN DEL CARBONO AÉREO ALMACENADO EN DOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN LA GRANJA DE YUYUCOCHA”

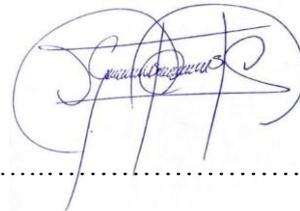
Trabajo de titulación revisado por el Comité Asesor, por lo cual se autoriza la presentación
como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

APROBADO

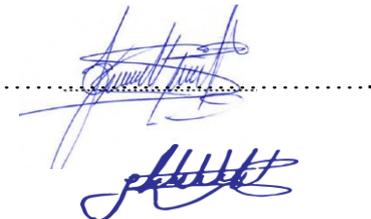
Ing. Jorge Luis Ramírez López, M.Sc.

Director de trabajo de titulación



Ing. José Gabriel Carvajal Benavides, Mgs.

Tribunal de trabajo de titulación



Ing. Carlos Ramiro Arcos Unigarro, Mgs.

Tribunal de trabajo de titulación



Ing. Eduardo Jaime Chagna Avila, Mgs.

Tribunal de trabajo de titulación



Ibarra – Ecuador

2020



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE LA OBRA			
Cédula de ciudadanía	1724430911		
Apellidos y nombres:	Tabango Montaluisa Brayan Andrés		
Dirección:	Barrio El Tambo, calle José Catucuago-Tabacundo		
Email:	batabangom@utn.edu.ec		
Teléfono fijo:	022 365 745	TELÉFONO MÓVIL	0959506722

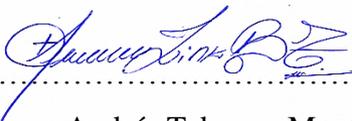
DATOS DE LA OBRA	
Título:	“DETERMINACIÓN DEL CARBONO AÉREO ALMACENADO EN DOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN LA GRANJA DE YUYUCOCHA”
Autor:	Brayan Andrés Tabango Montaluisa
Fecha:	11 de junio del 2020
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
Programa:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
Título por el que opta:	Ingeniero Forestal
Director:	Ing. Jorge Luis Ramírez López, M.Sc.

2. CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros; por lo tanto, la obra es original y es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 11 días del mes de junio del 2020

EL AUTOR



.....
Brayan Andrés Tabango Montaluisa

C.C.: 1724430911



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

CESIÓN DE DERECHOS DEL AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, Brayan Andrés Tabango Montaluisa, con cédula de identidad Nro. 172443091 - 1; manifiesto la voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor de la obra o trabajo de titulación denominado “**DETERMINACIÓN DEL CARBONO AÉREO ALMACENADO EN DOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN LA GRANJA DE YUYUCOCHA**”, que ha sido desarrollada para optar por el título de Ingeniero Forestal en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Brayan Andrés Tabango Montaluisa

C.C.: 172443091-1

Ibarra, a los 11 días de junio del 2020

RESGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Guía: FICAYA – UTN

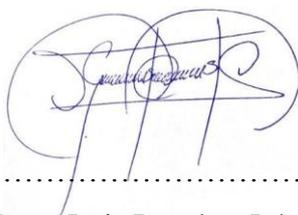
Fecha: 11 de junio del 2020

Brayan Andrés Tabango Montaluisa: “**DETERMINACIÓN DEL CARBONO AÉREO ALMACENADO EN DOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN LA GRANJA DE YUYUCOCHA**” /Trabajo de titulación. Ingeniero Forestal. Universidad Técnica del Norte. Carrera de Ingeniería Forestal. Ibarra, 11 de junio del 2020. 105 páginas.

DIRECTOR: Ing. Jorge Luis Ramírez López, M.Sc.

El objetivo principal de la presente investigación fue: Determinar la cantidad de carbono aéreo almacenado en dos sistemas de composición y estructura diferente. Entre los objetivos específicos se encuentra: estimar el carbono aéreo almacenado por el componente forestal en los dos sistemas estudiados, determinar el contenido de carbono del componente cultivo de los dos sistemas agroforestales.

Fecha: 11 de junio del 2020



.....
Ing. Jorge Luis Ramírez López, M.Sc.

Director de trabajo de titulación



.....
Brayan Andrés Tabango Montaluisa

Autor

DEDICATORIA

El presente trabajo de tesis se lo dedico con gratitud a mis padres, Pablo Tabango y Martha Montaluisa, por su esfuerzo diario, ejemplo de perseverancia y sobre todo por sus consejos brindados día a día, que han logrado inculcar en mí los valores necesarios para ser una persona de bien.

A mis hermanas Paola y Evelyn, por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTO

Al Ingiero Jorge Luis Ramírez López, quien como director de mi trabajo de tesis ha compartido su conocimiento y paciencia con buena voluntad, de manera muy profesional y sobre todo como gran ser humano.

A mis asesores, que con su experiencia han sido pilares fundamentales para culminar el trabajo de investigación.

A mis amigos Andrés, Jesús, Carlos y Leo, quienes siempre me brindaron su amistad y apoyo incondicional en los momentos alegres y difíciles durante nuestra vida universitaria.

A Dios por brindarme la fuerza necesaria y guiar mi camino.

¡Gracias totales!

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	iii
CESIÓN DE DERECHOS DEL AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	v
REGISTRO BIBLIOGRÁFICO	vi
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
RESUMEN	xiii
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 General	2
1.1.2 Específicos	2
Preguntas Directrices.....	2
CAPITULO II	3
MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 Fundamentación legal	3
2.1.1 Constitución de la República del Ecuador 2008	3
2.1.2 Código Orgánico del Ambiente.....	3
2.1.3 Objetivos del Plan Nacional de Desarrollo 2017 - 2021	4
2.1.4 Línea de investigación.....	4
2.2 Fundamentación teórica	4
2.2.1 Cambio climático	4
2.2.2 Efecto invernadero	5

2.2.3	Mitigación y adaptación al cambio climático	6
2.2.4	Carbono	9
2.2.5	Biomasa.....	11
2.2.6	Determinación de biomasa.....	12
2.2.7	Modelos alométricos	13
2.2.8	Sistemas agroforestales	14
2.2.9	Descripción de las especies	16
CAPITULO III.....		25
MATERIALES Y MÉTODOS		25
3.1	Descripción del sitio	25
3.3	Materiales y equipos.....	25
3.3.1	Materiales	25
3.3.2	Equipos.....	26
3.3.3	Software	26
3.4	Metodología	26
3.4.1	Delimitación y caracterización del área de estudio.....	26
3.4.2	Caracterización del componente forestal de los SAF.....	27
3.4.3	Determinación de la biomasa arbórea	28
3.4.4	Estimación de biomasa de detritus	35
3.4.5	Biomasa total del SAF.....	36
3.4.6	Determinación de Carbono.....	36
CAPÍTULO IV.....		40
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		40
4.1	Delimitación y caracterización del área de estudio.....	40
4.2	Caracterización del componente forestal	40
4.2.1	Censo forestal.....	40
4.3	Determinación de la biomasa arbórea	44

4.3.1 Selección y estimación de la biomasa arbórea	44
4.3.2 Densidad del fuste y ramas.....	47
4.3.3 Biomasa arbórea.....	50
4.3.4 Modelos alométricos	53
4.3.5 Biomasa del componente cultivo	55
4.3.6 Biomasa de detritus	56
4.3.7 Biomasa total.....	57
4.3.8 Carbono total.....	57
CAPÍTULO V.....	63
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
5.1 Conclusiones	63
5.2 Recomendaciones.....	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
CAPÍTULO VII	84
ANEXOS	84
ANEXO A - TABLAS	84
A1. Densidad promedio por árbol de la muestra fuste y ramas	84
A2. Densidad aparente del suelo	84
ANEXO B- FIGURAS.....	85
B1. Fase de campo	85
B2. Fase de laboratorio.....	88
B3. Resultado del porcentaje de carbono en el suelo.....	90
ABREVIATURAS	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de la densidad de la madera del fuste	31
Tabla 2 Variables dasométricas promedio del censo forestal	41
Tabla 3 Estimación del número de ramas, hojas; cálculo del área basal y volumen promedio. Área basal y volumen en el área de estudio	45
Tabla 4 Densidad promedio de los componentes: fuste y ramas (g.cm^{-3})	48
Tabla 5 Biomasa arbórea promedio por especie de la muestra y biomasa total del área de estudio (Kg)	50
Tabla 6 Modelos alométricos de mejor ajuste para la estimación de biomasa en el SAF2	53
Tabla 7 Biomasa del componente cultivo: Coffea arabica y Pennisetum clandestinum en el área de estudio.....	56
Tabla 8 Biomasa de detritus en el área de estudio	56
Tabla 9 Biomasa aérea total del componente: arbóreo, cultivo y detritus; Error! Marcador no definido.	
Tabla 10 Carbono acumulado por componente (Mg)	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa base del sitio de estudio.....	25
Figura 2 Rendimiento volumétrico	45
Figura 3 Biomasa total del componente arbóreo	51
Figura 4 Correlación de los valores de biomasa observada vs predicha.....	55
Figura 5 Carbono almacenado por componente	59

TÍTULO: “DETERMINACIÓN DEL CARBONO AÉREO ALMACENADO EN DOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN LA GRANJA DE YUYUCOCHA”

Autor: Brayan Andrés Tabango Montaluisa

Director del trabajo de titulación: Ing. Jorge Luis Ramírez López, M.Sc.

Año: 2020

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo determinar la cantidad de carbono aéreo almacenado en dos sistemas agroforestales de composición y estructura diferente. El estudio tuvo dos fases, la primera fue la fase de campo en donde se realizó el censo forestal, la selección de árboles tipo para la extracción de muestras de fuste, ramas y hojas. Además, se recolectaron muestras de detritus y suelo. La segunda fase fue de laboratorio y tubo cabida en la Xiloteca de la Granja Experimental de Yuyucocha y en el Laboratorio de Biotecnología de la Universidad Técnica del Norte. En esta fase se determinó la cantidad de biomasa y carbono aéreo de las muestras. El sistema agroforestal (SAF1) obtuvo 245.78 MgC.ha⁻¹ y el sistema silvopastoril (SAF2) 146.76 MgC.ha⁻¹. La diferencia de los valores se explica en la mayoría de edad del primer sistema y al aporte de materia orgánica que el cultivo agrícola aporta. La estimación de biomasa arbórea fue directa en especies con un número menor a 10 individuos. En el caso del SAF2 fue necesaria la construcción de los modelos alométricos $B=102.42 + 316.25*DAP^2HT$; $B= -20.76 + 518.72*DAP + 210.02*DAP^2HC$; $B= -22.78 + 136.51*DAP^2HT + 5.82*HT$ para *Eucalyptus globulus*, *Cupressus macrocarpa* y *Pinus patula* respectivamente, los cuales presentaron un alto grado de validez con un R² mayor a 0.9.

Palabras clave: sistema agroforestal, carbono, biomasa, modelos alométricos.

TITLE: “DETERMINATION OF AIR CARBON STORED IN TWO AGROFORESTAL SYSTEMS IN THE GRANJA DE YUYUCOCHA”

Author: Brayan Andrés Tabango Montaluisa

Director of thesis: Ing. Jorge Luis Ramírez López, M.Sc.

Year: 2020

ABSTRACT

The research aimed to determine the amount of aerial carbon stored in two agroforestry systems of different composition and structure. The study had two phases, the first was the field phase where the forest census was carried out, the selection of type trees for the extraction of samples of stem, branches and leaves. In addition, debris and soil samples were collected. The second phase was a laboratory and tube room at the Xiloteca of the Experimental Farm of Yuyucocha and the Biotechnology Laboratory of the Tecnica del norte University. In this phase the amount of biomass and aerial carbon of the samples was determined. SAF1 obtained 245.78 MgC.ha⁻¹ and SAF2 146.76 MgC.ha⁻¹. The difference in values is explained in the age of majority of the first system and the contribution of organic matter that the agricultural crop contributes. The estimation of tree biomass was direct in species with a number less than 10 individuals. In the case of SAF2, the construction of allometric models $B = 102.42 + 316.25 * DAP^2HT$ was necessary; $B = -20.76 + 518.72 * DAP + 210.02 * DAP^2HC$; $B = -22.78 + 136.51 * DAP^2HT + 5.82 * HT$ for *Eucalyptus globulus*, *Cupressus macrocarpa* and *Pinus patula* respectively, which presented a high degree of validity with an R² greater than 0.9.

Keywords: agroforestry system, carbon, biomass, allometric models.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha ido en aumento con alteraciones cada vez más evidentes del clima a nivel mundial desde 1990 (Chavarro *et al.*, 2007). El descontrolado cambio en la temperatura del planeta por parte de actividades antrópicas, ha provocado la acumulación desenfrenada de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmosfera, siendo el dióxido de carbono CO₂ el gas que más contribuye al calentamiento global. El cambio en los patrones climáticos no solo genera afectación al ambiente, sino que, además pone en riesgo la seguridad alimentaria y economía mundial (Díaz, 2012). Los fenómenos más puntuales atribuidos al cambio climático son la pérdida de biodiversidad, la disminución de los glaciares y la alteración del balance hídrico (Pino y Cavieres, 2012).

Para controlar las emisiones de CO₂, existen alternativas que favorecen la fijación del carbono en sumideros de biomasa vegetal y suelo. Es así que, los bosques, plantaciones y sistemas agroforestales representan un rol indispensable en respuesta a la mitigación del cambio climático (Fonseca, Ruíz, Rojas, y Alice, 2013). Estos ecosistemas brindan diversos servicios ambientales como la contribución al ciclo del agua, protección de cuencas hidrográficas, provisión de alimento, y sobre todo el almacenamiento de carbono (FAO, 2011). En los últimos años, los sistemas agroforestales, han sido considerados como gran foco de interés científico, encaminados a expandir y fortalecer la superficie boscosa del planeta (Carrilo, Acosta, Jiménez, Gonzales, y Etchevers, 2016).

Los sistemas agroforestales tienen mayor producción y mejor calidad en cada uno de sus productos, siendo uno de sus principales atributos en la economía mundial. Un ejemplo de esto es la industria cafetera, la cual ha ido en incremento en mercados como EE.UU en donde se ha estimado valores de venta de \$ 30-32 billones de dólares (Orozco *et al.*, 2012). De igual forma, los sistemas silvopastoriles generan beneficios a los productores, al generar leña, postes, madera y pastos, los cuales sirven de alimento para animales de granja (Oliva *et al.*, 2017). Dicho esto, los SAF permiten tener una perspectiva diferente de vida, ya que las actividades ligadas a su manejo generan mejores oportunidades de desarrollo desde el pequeño productor.

En este contexto, la importancia que tiene la presente investigación es la de obtener datos referenciales sobre la cantidad de carbono aéreo almacenado de dos sistemas agroforestales de

composición y estructura diferente en la Granja de Yuyucocha, que permitan promover el establecimiento y manejo de nuevos SAF, y generar información útil que sirva como sustento para la toma de decisiones. Adicionalmente se genera el potencial de fortalecer las directrices económicas, sociales y ambientales que favorezcan a la Carrera de Ingeniería Forestal de la UTN.

1.1 Objetivos

1.1.1 General

Determinar la cantidad de carbono aéreo almacenado en dos sistemas agroforestales de composición y estructura diferente.

1.1.2 Específicos

- Estimar el carbono aéreo almacenado por el componente forestal de los dos sistemas estudiados.
- Determinar el contenido de carbono del componente cultivo de los dos sistemas agroforestales.

Preguntas Directrices

¿Es factible estimar el contenido de carbono en sistemas agroforestales?

¿Un cultivo agrícola puede almacenar más carbono que una especie arbórea?

¿Cuál es la capacidad de almacenamiento de carbono en cada uno de los sistemas estudiados?

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentación legal

El presente estudio se enmarca en la siguiente normativa:

2.1.1 Constitución de la República del Ecuador 2008

Art. 14; Sección segunda: Ambiente sano; Capítulo segundo: Derechos del buen vivir; Título II: DERECHOS:

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

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

Art. 414; Sección séptima: Biósfera, ecología urbana y energías alternativas; Capítulo segundo: Biodiversidad y recursos naturales; Título VII: RÉGIMEN DEL BUEN VIVIR:

El Estado adoptará medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, mediante la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero, de la deforestación y de la contaminación atmosférica; tomará medidas para la conservación de los bosques y la vegetación, y protegerá a la población en riesgo (Asamblea Constituyente del Ecuador, 2008, p. 24 - 182).

2.1.2 Código Orgánico del Ambiente

Art. 7; Título II: DE LOS DERECHOS, DEBERES Y PRINCIPIOS AMBIENTALES:

3. Crear y fortalecer las condiciones para la implementación de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático (Asamblea Nacional del Ecuador, 2018, p. 11 - 12).

2.1.3 Objetivos del Plan Nacional de Desarrollo 2017 - 2021

La presente investigación se rige al objetivo, políticas y lineamientos detallados a continuación:

Objetivo 3. Garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones.

Política y lineamiento estratégico 3.4. Promover buenas prácticas que aporten a la reducción de la contaminación, la conservación, la mitigación y la adaptación a los efectos del cambio climático, e impulsar las mismas en el ámbito global (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo [SENPLADES], 2017, p. 64 - 66).

2.1.4 Línea de investigación

El estudio se enmarca en la línea de investigación de la carrera: Desarrollo agropecuario y forestal sostenible.

2.2 Fundamentación teórica

2.2.1 Cambio climático

Según IPCC (2015), el clima es un fenómeno natural cambiante, ocasionado por las interacciones de los fenómenos atmosféricos en diversas proporciones de tiempo y espacio. El cambio climático se puede explicar cuando el promedio de alguna variable meteorológica sale de su valor registrado por muchos años, debido a eventos naturales internos o externos como la radiación solar (Martínez y Fernández, 2004).

En el último siglo, el cambio climático ha incrementado su precocidad debido a la suma de factores antropogénicos (Lastra, Carmona, y Mendoza, 2008). A partir de la segunda mitad del siglo XX, es en donde se considera empezó la mayor variación climática (Caballero, Lozano, y Ortega, 2007), teniendo como gran punto referencial los inicios de la era industrial. El incremento poblacional acelerado y los elevados niveles de consumo de todo tipo de recursos, son la muestra y resumen de que el factor humano tiene gran responsabilidad en el clima (Barros, 2007).

La vida en el planeta se encuentra sujeta a un constante equilibrio del sistema natural (Useros, 2013), en donde micro y macro organismos coexisten en una relación de dependencia directa o indirecta con otros, es por eso que al destruirse la composición de un determinado medio natural se genera una reacción en cadena que repercute en su comportamiento habitual. Es por esto que, daños a los ecosistemas naturales generan un efecto evidente en el derretimiento de los glaciales, promueven las precipitaciones irregulares, y afectan ciclos biológicos Amestoy (2010). La modificación acelerada de los patrones climáticos probablemente sería la principal causa de pérdida de biodiversidad en todos los ecosistemas, considerándose como uno de los posibles problemas más alarmantes en la extinción de especies IPCC (2015).

Pero, además, en el mundo aún existen regiones las cuales no han presentado mucha susceptibilidad a impactos bruscos del cambio climático, de los cuales se podría potencializar la investigación para la conservación de sus ecosistemas e implementar acciones de mitigación. Gran franja de terreno en Europa, por encima del Mediterráneo indican menor vulnerabilidad, y lo mismo ocurre con la costa oriental de Estados Unidos, Canadá y la mitad noroccidental de Sudamérica (Useros, 2013).

2.2.2 Efecto invernadero

La radiación solar es absorbida y reflejada en su mayoría por la superficie terrestre, además de ser secuestrada en la atmósfera por el vapor de agua y dióxido de carbono (CO₂), capaces de retener el calor (Caballero *et al.*, 2007). Este proceso genera el calentamiento natural del planeta, conocido como balance de temperatura efectiva incidente en el día y noche (Sandoval *et al.*, 2003). Sin este balance térmico, la temperatura de la tierra sería 18°C bajo cero y la vida en la tierra no sería posible (Martínez y Fernández, 2004).

El efecto invernadero ha sufrido un cambio brusco a partir de la revolución industrial a finales del siglo XIX, época que dio inicio a la emisión desenfrenada de gases de efecto invernadero (GEI), resultantes de la quema de combustibles fósiles y la pérdida de ecosistemas naturales, lo cual ha aportado con la desenfrenada emisión de gases y promovido el aumento de la temperatura en el planeta (Benavides y León, 2007).

2.2.2.1 Gases de efecto invernadero

La mezcla de gases efecto invernadero conforman el componente gaseoso de la atmósfera (Benavides y León, 2007). Los GEI tienen por propiedad especial la absorción y emisión de radiación a partir de longitudes de onda emanadas por el espectro de la radiación infrarroja (Montes, 2001). Los principales GEI considerados como los más amenazantes son el Dióxido de carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC), Hexafluoruro de Azufre (SF₆) (ONU, 1998).

Las emisiones antropogénicas de GEI contribuyen al impacto negativo hacia la naturaleza, costo elevado que el desarrollo de la humanidad ha ocasionado (Echeverri, 2006). Olivo y Soto (2010) afirman que la mayor contribución de CO₂ proviene de la quema de combustibles fósiles de la industria en un 55%, dejando como restante, fenómenos naturales como la erupción de volcanes, la degradación de masas vegetales, entre otras.

El dióxido de carbono, al ser el principal GEI pone en riesgo la resiliencia de muchos ecosistemas ante grandes variaciones del cambio climático. Si se mantiene la emisión incontrolada de CO₂, la temperatura podría subir de entre 1.5 a 2.5°C, siendo probable que alrededor del 20 al 30% de especies desaparezcan a mediados del siglo XXI (Useros, 2013). Las enormes consecuencias que podrían suscitarse en el futuro en los ecosistemas naturales y sobre todo en la salud humana, debido a vértices como la economía y la seguridad alimentaria, requieren del aprovechamiento de enormes cantidades de recursos que cada día van escaseando. Es por esto que la sociedad enfrenta un gran desafío de adoptar medidas de mitigación y adaptación al cambio climático para evitar y reducir daños por venir, con actividades responsables con el ambiente que reduzcan la emisión de CO₂.

2.2.3 Mitigación y adaptación al cambio climático

Varios son los escenarios que la humanidad deberá abordar con sinergias de mitigación y adaptación al cambio climático a fin de evitar daños irreversibles a la naturaleza (Barton, 2009). Es por eso que, lograr un equilibrio de la mano con acciones que reduzcan los niveles de contaminación, permitirá que el aumento de temperatura en la atmósfera no sobrepase los 2°C hasta finales del siglo XXI (IPCC, 2014).

Por lo dicho, la mitigación es una estrategia de lucha oportuna ante el cambio climático, la cual reúne una serie de acciones que aminoran la acelerada emisión de gases contaminantes

que provocan daños a los sistemas naturales (Portilla, Andrade, y Défaz, 2014). Mientras se generen procesos de mitigación es necesario que los diversos escenarios afectados por el cambio climático se acojan a capacidades de adaptación ante actuales y futuras causas de vulnerabilidad (UICN, 2011).

La adaptación va ligada a la reducción de riesgos y vulnerabilidades que busca, aumentar la capacidad de sobrevivencia de un ecosistema en respuesta a un entorno cambiante. Es así que todos los sectores como ciudades, industrias, pequeños productores, dependen totalmente del estado de conservación de un determinado entorno natural, el cual provee de bienes y servicios que han sido explotados y mal utilizados en la historia del desarrollo humano (Magrin, 2015).

La adaptación y mitigación al cambio climático puede ser beneficiosa si se aplica actividades REDD+ en pro del fortalecimiento de la resiliencia forestal (FAO, 2019):

- Reducción de las emisiones debidas a la deforestación
- Reducción de las emisiones debidas a la degradación forestal
- Conservación de las reservas forestales de carbono
- Incremento de las reservas forestales de carbono
- Ordenación forestal sostenible
- Economía verde

Cambiar el sistema, la manera de hacer agricultura, ganadería, y sobre todo la forma de pensar de todas las personas, permitirá dar el primer paso y el más importante para reducir el impacto del calentamiento global.

2.2.3.1 Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador (ENCC) 2012-2025

Ecuador ha sufrido los efectos del cambio climático en manifestaciones irregulares del clima, como los incrementos del nivel del mar, la variación de la escorrentía, la pérdida de biodiversidad, las afectaciones en el sistema social, perjudicando la soberanía alimentaria, el sector productivo, la salud y la economía del país. Acciones de mitigación y adaptación a tomar por parte del Estado ecuatoriano y colectividad son de carácter prioritario.

A través del Ministerio del Ambiente MAE (2012), el país ha desarrollado un material práctico (ENCC) para la toma de decisiones en pro del cuidado del ambiente y desarrollo social,

siguiendo un trabajo coordinado entre las medidas de adaptación que reduzcan la vulnerabilidad de los sectores económico, social y ambiental. Así mismo la mitigación dependerá de que las emisiones de GEI se reduzcan con la creación de sumideros de carbono cumpliendo los siguientes principios:

- Articulación regional e internacional.
- Consistencia con principios internacionales sobre cambio climático.
- Énfasis en la implementación local.
- Integridad ambiental
- Participación ciudadana
- Proactividad
- Protección de grupos y ecosistemas vulnerables
- Responsabilidad intergeneracional
- Transversalidad e integralidad

2.2.3.2 Plan de Acción REDD+ Ecuador 2016 - 2025

La reducción de emisiones por deforestación y degradación de los bosques (REDD+), se encarga de la de la gestión sostenible y conservación de los bosques, la cual va de la mano con mejorar las reservas de carbono, constituyendo una parte fundamental en los esfuerzos globales por mitigar el cambio climático (UICN, 2009).

Los ecosistemas naturales como bosques y páramos brindan servicios ambientales imprescindibles al almacenar carbono, proveer de refugio a la biodiversidad, contribuir la protección de suelos y reservas de agua dulce (FAO, 2011) . Para las comunidades indígenas los bosques guardan gran riqueza económica, cultural y espiritual, además de asegurar la subsistencia para miles de personas que dependen del bosque (MAE, 2016)

Ecuador cuenta con el Plan de Acción REDD+, el cual forma parte del Plan Nacional de Mitigación de la Estrategia Nacional de Cambio Climático, siendo un instrumento de política transversal de la gestión del cambio climático a nivel de gobierno. El Plan de Acción REDD+ también se articula con el Modelo de Gobernanza Forestal, cuyo objetivo es instaurar una nueva institucionalidad forestal en el país a través de la gestión sostenible de los bosques. Para garantizar la legalidad y sostenibilidad a largo plazo de la implementación del mecanismo

REDD+ es importante llevar adelante procesos inclusivos, que involucren a la sociedad civil, comunidades, pueblos y nacionalidades indígenas (MAE, 2016).

2.2.4 Carbono

2.2.4.1 Ciclo del carbono

El carbono es un elemento natural presente en todos los compuestos orgánicos del planeta, circulante en la materia orgánica y el ambiente físico, localizado en tres enormes sumideros del planeta, el océano, la atmósfera y biomasa terrestre, (Rügnitz, Chacón, y Poro, 2009). Dentro de los ecosistemas boscosos, la fijación de carbono se da en la parte aérea y subterránea de los árboles, la hojarasca, la madera muerta y el carbono orgánico del suelo (IPCC, 2006).

El ciclo del carbono está definido por el almacenamiento y transferencia de moléculas en el sistema litosfera, hidrosfera, biosfera, atmósfera y rizosfera (Chivelet, 2010), del elemento en estado natural y derivado de actividades antropogénicas (Saugier y Pontailier, 2006).

El suelo también tiene su relación en el ciclo del carbono, al existir la descomposición de materia orgánica en procesos de intervención de bacterias, la materia orgánica se mineraliza, cierta parte se devuelve a la atmósfera, otra permanece en el sitio, y una parte debido a procesos hidrológicos es llevada al mar, en donde se deposita a manera de carbonatos (CO_3) (FAO, 2017).

2.2.4.2 El carbono en ecosistemas forestales

Los bosques cubren alrededor del 30.6% de la superficie terrestre (FAO, 2015), siendo además los que mayor cantidad de carbono almacenan ante el resto de ecosistemas (Pardos, 2010). La potencialidad de almacenamiento dependerá de variables tales como la edad, tasas de crecimiento y contenido inicial de carbono (Yepes y Silveira Buckeridge, 2011). La acumulación de carbono es variable con respecto al tipo de bosque, y elevaciones, en el cual los bosques tropicales tienden a presentar mayor potencial de almacenamiento de carbono en comparación a aquellos de clima elevado y frío, debido a que son ecosistemas extremadamente dinámicos (Lapeyre, Alegre, y Arévalo, 2004).

El CO_2 atmosférico es incorporado en los árboles a través de los estomas en las hojas durante el proceso fotosintético (Benjamín y Masera, 2001), en el cual producen compuestos orgánicos usados en su crecimiento (Yepes y Silveira Buckeridge, 2011). La cantidad de

carbono fijada a la planta se transforma en carbohidratos, conocida como producción primaria bruta de 120 PgC/año (1Pg [Petagramo] = 10^{15} g), cuya mitad es devuelta a la atmósfera por acción de la respiración autotrófica (Martínez y Fernández, 2004). El crecimiento anual de las plantas puede entenderse de manera simplificada a la diferencia existente del carbono fijado y respirado, en el cual el desarrollo de los componentes del árbol en sus raíces, tronco, ramas, hojas y frutos su biomasa aumenta, hasta definirse su altura y diámetro de madurez fisiológico (Escalona et al., 2007). El carbono puede ser devuelto a la atmósfera por acción de descomposición de agentes biológicos y la combustión del material vegetal (Kramer, 2003).

2.2.4.3 Mercado de carbono

El mercado de carbono surge como una propuesta de lucha y acción ante el desenfrenado aumento de emisiones de GEI generadas fundamentalmente por el uso irracional de combustibles fósiles. El cambio y uso de suelo, además de la tala de bosques y quema de la cobertura vegetal, por lo cual dentro de la Convención Macro de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y con el Protocolo de Kioto (PK) en 1997, se establecen la normativa y objetivos que determinarán el cumplimiento de la reducción de emisiones (Lohmann, 2012).

Ipinza y Barros (2011) mencionan que dentro del PK se han inscrito el mercado regulado y voluntario como mecanismos accesibles del mercado de carbono definidos a continuación:

a) Mercado regulado

El mecanismo regulado permite el cumplimiento de acuerdos legales de actores cuyo compromiso ha sido concretado ante la exigencia que establece el PK en los fondos del Banco Mundial.

- **Comercio Internacional de Emisiones (CIE)**

Esta modalidad permite que los actores comprometidos a reducir las emisiones de contaminantes aumenten su valor fijado con el afán de vender la diferencia de aumento a países que requieran de igual manera, aumentar su reducción de emisiones.

- **Implementación Conjunta (IC)**

La implementación conjunta permite a los actores cuyo compromiso no ha logrado ser cumplido, este pueda obtener la diferencia faltante mediante la

aplicación de proyectos de reducción en el territorio de otro actor, como puede ser en ayudar a culminar algún proyecto que el actor hospedante se encuentre en fase de desarrollo.

- Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)

MDL permite que los países en vías de desarrollo, realicen el inicio de sus actividades de una manera sostenible contribuyendo al cuidado del medio ambiente, y sobre todo tener la facilidad de venta de sus resultados en el mercado internacional.

b) Mercado voluntario

La operatividad de proyectos que aporten la reducción de GEI no se encuentra dentro de lo dispuesto por el PK muy propios de quien los ejecute, ya que su nivel de trabajo no representa la capacidad de cubrir la inversión y trámite que el PK considera en el mercado regulado.

Varias empresas y ONG en el mundo han optado por realizar proyectos de reducción de emisiones desde un punto de vista más comercial para sus productos, al considerar el mercado voluntario como la oportunidad de dar un valor agregado, mermando así la opinión ambiental y desarrollo productivo.

El Ecuador ha optado por integrarse al mercado de carbono en el año 2003, con apuesta a la implementación de proyectos que presenten mecanismos de desarrollo limpio (MDL), desde ese entonces el país desarrolló el primer proyecto MDL del uso de focos ahorradores, teniendo como meta la disminución de toneladas de CO₂ y una enorme retribución monetaria al estado, además de abrir paso a la implementación de nuevos proyectos con ideas innovadoras con proyección a la venta del mercado mundial (Gallegos, 2012).

2.2.5 Biomasa

La biomasa permite conocer cuál es la capacidad de almacenamiento de material orgánico de un bosque (Jimeno, Burgos, y Fernandez, 2002), razón por la cual su cálculo es considerado como el hincapié necesario para conocer la capacidad productiva y la contribución de estos ecosistemas ante el ciclo del carbono (Ruíz, Rodríguez, Leyva y Enríquez, 2014). Se considera biomasa a la fracción biodegradable de productos de origen biológico, vegetal y animal, que se encuentran en la parte aérea y subterránea de un ecosistema forestal (Herguedas, Taranco,

Rodríguez, y Paniagua, 2012). La biomasa forestal comprende todo el manejo y transformación que se le da a la materia prima de las masas boscosas (Martínez, 2009).

2.2.6 Determinación de biomasa

La estimación de la biomasa puede obtenerse al apear un árbol y pesar sus componentes directamente en el campo (Picard, Saint, y Henry, 2012). Otra forma de estimar la biomasa arbórea es la construcción de modelos alométricos que relacionan variables dasométricas DAP, HT, HC. La cantidad de biomasa se estima al multiplicar el valor de la superficie del sitio de estudio con la cantidad de biomasa obtenida (Méndez, Luckie, Capó, y Nájera, 2011).

Los métodos utilizados para estimar la biomasa son (Carrilo et al., 2016):

2.2.6.1 Método tradicional o no destructivo

El método no destructivo permite estimar la biomasa cercana al valor real que contienen los árboles sin la necesidad de cortarlo (Fernández, 2017). Los modelos alométricos generados a partir del método destructivo posibilitan dicha estimación ya que emplean variables que fácilmente se obtienen en el campo, siendo el DAP y la altura total las mayormente utilizadas (Honorio y Baker, 2010). Se debe considerar que la relación de la biomasa con dichas variables no siempre será la misma, ya que individualmente cada individuo presenta un desarrollo ontogénico (Sánchez-olate, Zapata, Sáez, y Ríos, 2008).

2.2.6.2 Método destructivo

El método destructivo permite obtener el valor exacto de la biomasa de un árbol al apearlo y pesar sus componentes (tronco, ramas, raíz y hojas) (Ruíz et al., 2014). La aplicación de este método limita a las facultades de operatividad, recursos y tiempo (Fernández, 2017). Es por esto que en grandes masas forestales se obtiene la biomasa a partir de una muestra representativa de la superficie total.

2.2.6.3 Sensores remotos

La percepción remota o teledetección es otra manera en la cual se puede estimar el contenido de carbono en especies arbóreas, al proporcionar información espectral de componentes de las plantas, como la clorofila (Honorio y Baker, 2010).

2.2.7 Modelos alométricos

Los modelos alométricos son ecuaciones matemáticas que permiten predecir la biomasa, volumen, y carbono (BVC) de un árbol a partir de variables de fácil medición en campo que comúnmente son el DAP y altura total (Gómez, Etchevers, Monterrosos, Campo, y Tinoco, 2011).

Para llevar a cabo la construcción de modelos alométricos es necesario definir el tipo de ecosistema con la selección de especies de interés, determinar el tamaño de la muestra, seleccionar los individuos muestra, medición, corte y estimación de (BVC), selección de los mejores modelos alométricos (Segura y Andrade, 2008).

2.2.7.1 Selección del modelo de mejor ajuste

Para determinar el modelo que mejor ajuste presente, es necesario emplear estadígrafos que indiquen el modelo con el menor error. Algunos utilizados son (Segura y Andrade, 2008):

- El coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de determinación ajustado (R^2 -ajust). El primero muestra la proporción de la variación total observada en la variable dependiente explicada por el modelo. El segundo es una variante del primero que no necesariamente aumenta al incluir una variable independiente adicional en el modelo, debido a que penaliza la inclusión de nuevas variables independientes. Cuanto más se acercan a 1 estos coeficientes, el ajuste del modelo será mejor.
- El error estándar de la estimación o raíz del cuadrado medio del error (RCME), permite lograr un mayor ajuste al modelo cuando los valores proporcionados. Mientras más bajo sea el RCME, mayor será el ajuste del modelo. Se lo calcula de la siguiente manera:

$$RCME = \sqrt{SCR/(n - p)}$$

Dónde:

RCME: error estándar de la estimación o raíz del cuadrado medio del error

SCR: suma del cuadrado de los residuos, número de observaciones

p: número de parámetros del modelo lineal (incluyendo el término β_0 , el intercepto).

n: número de observaciones

- La suma de cuadrados de los residuos de los predichos (*PRESS*). Se lo calcula de la siguiente manera:

$$PRESS = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_{ip})^2$$

Dónde:

PRESS= suma de cuadrados de los residuos

Y_i= valor observado

Ŷ_{ip}=valor predicho.

2.2.8 Sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales (SAF) describen claramente el uso potencial del suelo, en donde existe la misma combinación espacial y temporal entre componentes arbóreos, agrícolas y animales, que permiten la producción sustentable del sistema, procurando aumentar su rendimiento, además de ser una estrategia de conservación y mejoramiento del suelo (Molina y Lopez, 1998).

2.2.8.1 Clasificación de los sistemas agroforestales

Existen varios criterios para lograr una clasificación representativa de los sistemas agroforestales (Marín et al., 2011). La clasificación de los sistemas agroforestales es muy necesaria el tener la necesidad de evaluar de su funcionamiento desde su implementación. Según Mendieta y Rocha (2007) estructuralmente los sistemas agroforestales pueden clasificarse de tres formas:

a) Sistemas agrosilviculturales

Asociación de cultivos agrícolas y especies leñosa, cuya funcionalidad depende del diseño dado y la selección de especies correctas.

b) Sistemas silvopastoriles

Conformadas por el asocio de árboles, pasto y animales, según Benavides (2013) es una opción de producción pecuaria, los cuales pueden proveer de forraje que sirve como alimento animal, además de proporcionar sombra que en el caso del ganado lechero es útil ya que reduce el estrés calórico el cual ocasiona una baja producción.

c) Sistemas de producción forestal multipropósito

Considerados como sistemas de mayor complejidad ya que pueden desempeñar funciones de producción (alimento, forraje, leña, entre otros productos) y protección (conservación y mejoramiento de la fertilidad de los suelos, protección de amenazas externas), cada uno de aquellas con mayor intensidad.

Entre los sistemas multipropósito, se tiene los sistemas especiales:

- **Silvoentomología**, estos sistemas se distinguen por asociar árboles e insectos útiles, tal es el caso de la producción de miel.
- **Silvoacuicultura**, relaciona árboles, agua y peces, ya que las especies forestales pueden contribuir al crecimiento de peces en estques de producción.

2.2.8.2 El papel potencial de los árboles

Debido a la forma de agricultura convencional, los árboles han sido subutilizados al no conocer los beneficios técnicos que estos brindan en las asociaciones agroforestales estratégicas (Marín *et al.*, 2011). Algunos de sus beneficios son:

- **Características del suelo**
Aumenta la capacidad de conservar la humedad, reducir de evapotranspiración, mantener un buen drenaje e infiltración, además de asegurar la materia orgánica de los nutrientes incorporados por la propia biomasa.
- **Microclima**
La regulación de la temperatura dentro del SAF es el factor clave ante el crecimiento o pérdida de cultivos agrícolas, ya que los árboles reducen el exceso de viento y el ingreso de energía solar innecesaria.
- **Hidrología**
De igual manera, el ingreso de agua en el SAF es regulado por la estructura de los árboles, permitiendo la caída brusca a los cultivos además de frenar la erosión hídrica, este proceso empieza interceptando la precipitación en la copa, posteriormente esta se distribuye por el tronco hasta llegar al suelo.

2.2.8.3 Ventajas de los sistemas agroforestales

Varios son los beneficios que un SAF bien diseñado puede aportar al productor y al ambiente, en el rendimiento y productividad entre sus componentes (Molina y Lopez, 1998):

- Ambientales

Mayor eficiencia en el uso de los recursos naturales, sobre todo en aprovechar el ciclaje de nutrientes generado por la interacción de los componentes de todo el sistema. Al existir variabilidad de organismos se promueve la aparición y aumento de mayor biodiversidad en el sistema, aves, mamíferos e insectos.

- Socioeconómicas

Se genera un aumento considerable en la producción agrícola, forestal y animal en base a la unidad de superficie establecida.

Se mantiene un ingreso regular al existir cultivos con diferentes tiempos de cosecha y venta al mercado.

2.2.8.4 Desventajas de los sistemas agroforestales

Según (Marín *et al.*, 2011) las principales desventajas de los sistemas agroforestales son las siguientes:

- Conflictos generados por el ganado vacuno y caprino debido al ramoneo.
- Disminución de la producción de cultivos debido a la intensidad entre árboles y alelopatía generada.
- Reducción de la cantidad de agua debido a la intercepción por la copa arbórea.
- Los niveles de sombra pueden favorecer al desarrollo de algunas plagas y enfermedades de ataque al cultivo agrícola.
- El establecimiento de estos sistemas puede demandar de mayor cantidad de dinero y tiempo.

2.2.9 Descripción de las especies

2.2.9.1 *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Pinus patula tiene su origen en zonas subtropicales de México, en altitudes de 1 500 a 3100 msnm, con precipitaciones de entre 600 a 2500 mm anuales (Ospina *et al.*, 2011). La especie

fue introducida al Ecuador por Luciano Andrade Marín en 1925 (Mancheno, 2011). De acuerdo a Brandbyge (1992) citado por Novillo (2013), la primera plantación a gran escala fue establecida en 1960, por la superficie de los páramos del volcán Cotopaxi. Su gran adaptabilidad a climas extremas por encima de los 3000 msnm, han hecho que la demanda de su producción sea elevada.

a) Descripción taxonómica

Reino: Vegetal

División: Espermatofita

Subdivisión: Gymnospermae

Orden: Coniferales

Familia: Pinaceae

Género: Pinus

Epíteto específico: patula

Nombre científico: *P. patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Nombre común: pino, pino patula

Fuente: (Perry, 1991, citado por Peralta, 2007)

b) Descripción morfológica

Sus hojas se conforman en grupos de 3 y a veces 4, raramente 5 en algunos fascículos, aciculares, delgadas, verticalmente caídas, color verde claro brillante, con bordes finamente aserrados. Sus flores son en inflorescencias, femeninas muy vistosas de color amarillo cremoso o anaranjado. Su fruto es largamente cónico, de 7 a 9 cm y a veces hasta 12 cm, sésiles, algo encorvados, oblicuos, puntiagudos, por lo general agrupados de 3 a 6 (Andrade, 2000).

2.2.9.2 *Pinus radiata* D. Don

Pinus radiata, tiene su origen en las costas Californianas de los Estados Unidos, encontrándose en un rango altitudinal de 1500 a 3000 msnm, con precipitaciones de entre los

350 a 1000 mm anuales (Espinoza, 2014). De acuerdo a Brandbyge (1992) citado en Novillo (2013), la especie se introdujo al Ecuador en 1905, expandiéndose en todo el país a lo largo del tiempo, proliferando su monocultivo con fines comerciales de madera.

a) Descripción taxonómica

Reino: Plantae

División: Gymnospermae

Clase: Coníferas

Orden: Pinales

Familia: Pinaceae

Género: Pinus

Epíteto específico: radiata

Nombre científico: *P. radiata* D. Don

Nombre común: pino, pino radiata

Fuente: (Jara, 2003)

b) Descripción morfológica

Árbol entre 15 y 50 m de altura, raramente 60 m, con un diámetro normal de 30 a 90 cm. Corteza externa es parda agrietada y la corteza interna es crema rosácea que segrega resina transparente. Hojas en forma de agujas en fascículos agrupadas generalmente de tres. Flores masculinas con estambres peltados y las femeninas en conos o estróbilos. Fruto en cono o estróbilo con forma de piña leñoso con semillas aladas (Vergara, 2004).

2.2.9.3 *Cupressus macrocarpa* Hartweg

El género *Cupressus* abarca entre 12 a 20 especies, cuya especie es nativa de Monterrey, y distribuido en muchas regiones templadas y subtropicales del mundo (Merino, 2015).

a) Descripción taxonómica

Reino: Plantae

Clase: Pinopsida

Subclase: Pinidae

Orden: Pinales

Familia: Cupressaceae

Género: Cupressus

Epíteto específico: macrocarpa

Nombre científico: *C. macrocarpa* Hartweg

Nombre común: ciprés, ciprés monterrey

Fuente: (Rojas, 2001, citado por Pomacahua, 2011)

b) Descripción morfológica

Hojas escamosas imbricadas de 1.3–2 mm de largo, opuestas, toda la rama decidua como una unidad, hojas de las ramas terminales de 6–7 mm de largo. Las flores son solitarias, de color pardo amarillentas. Las masculinas en las extremidades de las ramas, separadas de las femeninas. Produce frutos secos, dehiscentes, tipo cono. De color azul, glauco al principio y luego café rojizo al madurar. Los pedúnculos son cortos de 6 a 8 escamas y de 1 a 1,5 mm de diámetro (INAB, 2017).

2.2.9.4 *Eucalyptus globulus* Labill

E. globulus. Labill, en estado natural se encuentra en Australia, al sur y sureste de Tasmania, conformando masas puras o asociadas (Morales, 1973).

El eucalipto fue introducido al Ecuador en 1865 por el presidente Gabriel García Moreno, y desde ese entonces dada su rapidez de crecimiento ha logrado tener una presencia muy notoria en todo el callejón interandino (Acosta, 1949).

a) Descripción taxonómica

Orden: Angiospermas

Familia: Mirthaceae

Género: Eucalyptus

Epíteto específico: globulus

Nombre científico: *E. Globulus* Labill

Nombre común: eucalipto

Fuente: (Morales, 1973)

b) Descripción morfológica

Es un árbol de hasta 45-75 m. de altura. Tronco alcanza hasta 2 m. de diámetro, tendente a torsión helicoidal, corteza lisa, fibrosa y caediza. Hojas dimórficas, opuestas, azuladas, ovadas u ovado lanceoladas, con la base redondeada, sésiles y glaucas. Hojas adultas lanceoladas, alternas y pecioladas. Flores cortamente pediceladas, se reúnen en inflorescencias tipo umbela, con los pétalos soldados formando un opérculo caduco que deja al descubierto los numerosos estambres. Fruto en cápsula globosa con hipanto leñoso, rugosa con cuatro costillas (Renobales y Sallés, 2001).

c) Usos

En la industria maderera se lo utiliza para elaborar muebles, aglomerados. En lo que respecta a la industria química se ha elaborado desinfectantes, insecticidas, aceites esenciales. La leña del eucalipto es una buena fuente en biomasa para generar energía para uso doméstico (Pruna, 2014).

2.2.9.5 *Casuarina equisetifolia* L.

Casuarina equisetifolia es nativa de las costas tropicales de Burma, Las Filipinas, Las Marianas, Las Islas de Pascua, Las Marquesas, Nueva Caledonia, Sumatra y las Islas de Andamán (CATIE, 1991). *Casuarina* crece en topografías costeras, en llanos con suelos arenosos, pero sobre todo tiene la facultad de adaptarse a suelos moderadamente pobres (CONANP, 2013).

a) Descripción taxonómica

Reino: Plantae

División: Tracheophyta

Clase: Magnoliopsida

Superorden: Ronaseae

Orden: Fagales

Familia: Casuarinaceae

Género: Casuarina

Epíteto específico: *equisetifolia*

Nombre científico: *Casuarina equisetifolia* L.

Nombre común: casuarina, pino común

Fuente: (ITHIS, s-f)

b) Descripción morfológica

Corteza grisácea lisa en estado de juventud, rugosa agrietada al madurar. Ramas colgantes de color verde oscuro a pardo. Sus hojas son escamosas de menos de un milímetro de longitud. Flores a manera de racimos poco conspicuos de color marrón. Los racimos masculinos son delgados y se encuentran al final de las ramillas; las flores femeninas se encuentran en forma de cabezas de pedicelo corto. Los frutos se presentan en forma de pequeños conos o piñas de 13 a 20 mm de diámetro, y sus semillas son aladas con 6 mm de longitud (CATIE, 1991).

c) Usos

El uso de la casuarina sobresale en la producción maderera específicamente de plantaciones, además de su aporte en sistemas agroforestales como cortina rompevientos y en la recuperación de suelos debido a su gran capacidad de adaptación (CATIE, 1991).

2.2.9.6 *Coffea arabica* L.

Según ICAFE-MAG (2003), citado por Hagggar, Pavón, Madriz, Moraga, y Blanco, (2014), el género *Coffea* tiene alrededor de 80 especies originarias de África y Sudán, cuyo centro de origen más probable constituye las montañas suroccidentales de Etiopía, el altiplano de Sudán y el norte de Kenia. Este arbusto se desarrolla en estado natural entre los 1300 a 2000 msnm.

En el Ecuador la producción de café comienza a inicios del siglo XX con *Coffea arábica*. En la década de los 50, se realiza la introducción de café robusta, siendo estas dos especies las más comercializadas en el país (Tarupí, 2016).

a) Descripción taxonómica

Reino: Vegetal

División: Magnoliophyta

Clase: Dicotyledoneae

Subclase: Asteridae

Orden: Rubiales

Familia: Rubiaceae

Género: *Coffea*

Epíteto específico: *arabica*

Nombre científico: *C. arabica* L.

Nombre común: café

Fuente: (Sotomayor y Duicela, 1993)

b) Descripción morfológica

Sus hojas son elípticas, acabadas en punta y aparecen por pares. Presentan peciolo cortos y pequeñas estipulas, y en el envés pueden aparecer unas pequeñas cavidades que albergan pequeños artrópodos, conocidas como domotia. Las hojas pueden ser también de distintos

colores: verde lima, verde oscuro, bronce o con matices purpúreos. Los frutos son tipo drupa, con epicarpio carnoso y doble semilla. Las flores aparecen en inflorescencias (Sotomayor y Duicela, 1993).

c) Usos

El café es uno de los cultivos de mayor producción y comercialización a nivel mundial debido a su amplio rango de adaptabilidad de condiciones climáticas (Córdova y Carreño, 2016). En el mundo más de 50 países se dedican a la exportación de café, cuyo producto deriva una bebida muy apreciable por los consumidores (Capa, 2015).

2.2.9.7 *Pennisetum clandestinum* Hochst

La especie es originaria de las zonas montañosas del este y centro de África. Puede llegar a crecer hasta 40 cm de alto sin pastoreo, pero en el caso contrario, se convertirá en un pasto muy denso. Se desarrolla muy bien en precipitaciones de 1000 a 1600 mm anuales. Es una especie muy tolerante a las sequías (Salazar, 2016).

Según Guaña (2014), citado por Salazar (2016), esta especie fue introducida al país en los años 40, la cual a lo largo del tiempo se ha desarrollado en la región interandina. Desde su aparición se la ha utilizado como pasto para la producción animal.

a) Descripción taxonómica

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Poales

Familia: Poaceae

Subfamilia: Panicoideae

Género: *Pennisetum*

Epíteto específico: *clandestinum*

Nombre científico: *P. clandestinum* Hochst

Nombre común: Kikuyo, pasto

Fuente: (Rueda, 2002, citado por Guaña, 2014)

b) Descripción morfológica

Especie perenne, estolonífera y rizomatosa, de 30 o 40 cm de altura. Los estolones son ramificados y aplanados. La vaina de la hoja es de color amarillo pálido verdoso. Inflorescencia reducida a un grupo de 2-4 espiguillas, casi encerrada en la vaina de la hoja. Espiguillas de 10-20 mm de largo, comprende dos flores, filamentos delgados de 50 mm de largo, con anteras 5-7 mm de largo. Cariópsides ovoides, de color marrón oscuro, de unos 2,5 mm de largo y 1,5 mm. Posee un sistema radicular profundo (CORPOICA, 2013).

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del sitio

La investigación se la realizó en la Granja Experimental Yuyucocha, perteneciente a la Universidad Técnica del Norte, ubicada en la provincia de Imbabura, cantón Ibarra, parroquia Caranqui. Geográficamente se encuentra en la latitud $00^{\circ} - 21' - 53''$ N, y longitud $78^{\circ} - 06' - 32''$ W, a una altitud de 2243 msnm. La temperatura promedio de la zona es de 18.4°C , mientras que la precipitación media es de 589.30 mm (Cadena y Enriquez, 2013). El lugar de estudio consta de un sistema agroforestal (SAF1) y un sistema silvopastoril (SAF2).

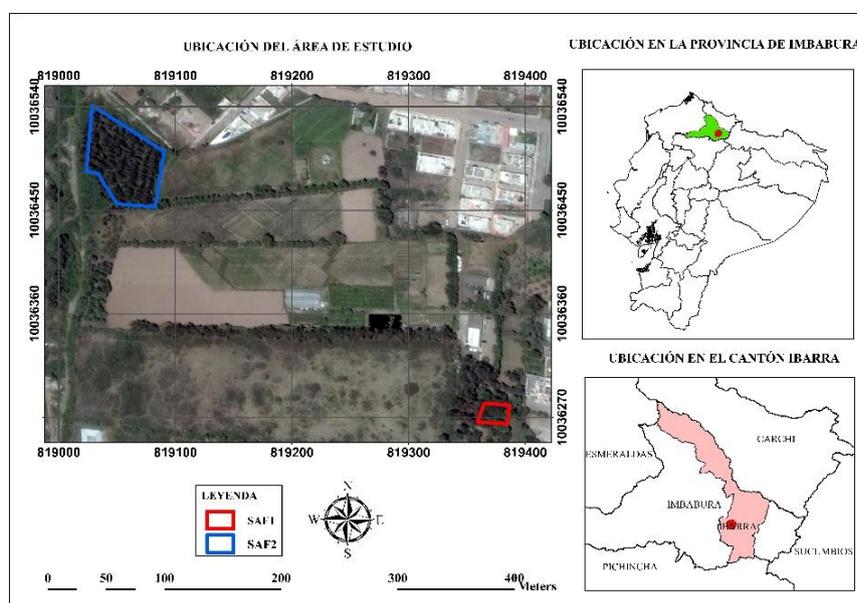


Figura 1 Mapa base del sitio de estudio

3.3 Materiales y equipos

3.3.1 Materiales

- Cinta métrica
- Cinta adhesiva
- Libreta de campo
- Fundas plásticas
- Sierra curva

- Etiquetas para datos de campo
- Implementos de oficina

3.3.2 Equipos

- GPS
- Cámara digital
- Estufa
- Computadora
- Barreno Pressler
- Clinómetro Suunto
- Balanza digital
- Equipo de escalar (arnés, casco, escalera)

3.3.3 Software

- Software GIS
- Software estadístico

3.4 Metodología

3.4.1 Delimitación y caracterización del área de estudio

La delimitación y caracterización se la aplicó a dos sistemas agroforestales de la Granja de Yuyucocha, a través de la información obtenida en campo.

Para la delimitación de los sistemas en estudio se realizó un levantamiento de coordenadas con GPS, posteriormente se ingresó y procesó la información en un software GIS obteniéndose el mapa base y área.

La caracterización del primer sistema (SAF1), permitió diferenciarlo como sistema agroforestal. Se realizó la identificación de cuatro especies arbóreas y una agrícola en base a sus características botánicas. El SAF2 fue identificado como un sistema agrosilvopastoril por el asocio de árboles y pasto.

La información recopilada en campo, tanto del SAF1 y SAF2 fue verificada con los registros técnicos de los ingenieros Carlos Boada y Miguel Echeverria, quienes fueron administradores de la Granja Experimental de Yuyucocha, y además establecieron respectivamente cada uno de los sistemas en estudio.

3.4.2 Caracterización del componente forestal de los SAF

3.4.2.1 Censo Forestal

Se realizó la numeración y georeferenciación de los individuos existentes en los SAF estudiados. Se identificó su especie y midió las características dasométricas: DAP, altura total y comercial con el siguiente proceso:

a) Diámetro a la altura del pecho (DAP)

La medición de la circunferencia a la altura del pecho (CAP) se la realizó utilizando una cinta métrica a 1.30 m de altura del suelo. Para la transformación a diámetro a la altura del pecho se usó la ecuación 1 (Ec.1):

$$D = C/\pi \quad (\text{Ec.1})$$

Fuente: Wabo, 2002

Dónde:

D: diámetro (m)

C: circunferencia (m)

π : constante 3.1416

b) Altura total y comercial

Para medición de la altura total y comercial se utilizó un clinómetro Suunto. En el primer caso se fijó la mirada hacia el punto más alto de la copa del árbol. En el segundo caso se identificó la sección comercial del fuste y se estimó que disponga de un diámetro mayor a 0.10 m.

En cada una de las alturas se empleó distancias horizontales de 15 a 20 m con respecto al fuste y el observador. Para la obtención de las alturas se aplicó la ecuación 2 (Ec.2):

$$H = (\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2) \times L \quad (\text{Ec.2})$$

Fuente: Wabo, 2002

Dónde:

H: Altura (m)

α_1 : lectura por encima de la horizontal (Grados)

α_2 : lectura por debajo de la horizontal (Grados)

L: distancia horizontal (m)

3.4.3 Determinación de la biomasa arbórea

3.4.3.1 Selección y estimación de la biomasa de los individuos muestreados

Para determinar la biomasa de los SAF se siguió la metodología propuesta por Álvarez, Balboa, Merino, y Rodríguez (2005), donde se seleccionó una muestra de 10 árboles por especie. Los individuos seleccionados fueron aquellos cuyo DAP y Altura total estaban más cercana a la media reduciendo el rango de error (Picard *et al.*, 2012). En las especies cuyo número de individuos fue menor a diez, se seleccionaron todos los árboles para su medición.

Adicionalmente, en los individuos muestreados se realizó la medición y cálculo de los siguientes parámetros:

- a) Número de ramas

Para cada especie dentro de los SAF se dividió la copa en tres cuadrantes diferenciados, alto, medio y bajo. El conteo de las ramas se lo realizó ascendiendo la copa con la ayuda de una escalera y un equipo de escalar con arnés.

El número de hojas se determinó cortando una rama del cuadrante alto, medio y bajo, realizando el conteo del número de hojas existentes en cada rama. Se extrapolaron los datos por cuadrante y por ramas totales de copa (Patiño, 2005).

b) Área basal

El cálculo del área basal se realizó con la ecuación 3 (Ec.3):

$$AB = \frac{\pi}{4} \times D^2 \quad (\text{Ec.3})$$

Fuente: Chave et al. 2005

Dónde:

AB: área basal (m²)

D: diámetro (m)

π : constante 3,1416

c) Volumen del fuste

El volumen del fuste se lo obtuvo con la ecuación 4 (Ec.4):

$$V = AB \times H \times ff \quad (\text{Ec.4})$$

Fuente: MAE, 2014

Dónde:

V: volumen (m³)

AB: área basal (m²)

H: altura (m)

ff: factor de forma (0.7)

3.4.3.2 Determinación de la densidad del fuste

Con el barreno Pressler se tomaron muestras del fuste de los individuos seleccionados. Estas fueron codificadas y medidas con un calibrador digital, posteriormente embaladas en fundas plásticas para ser transportadas al laboratorio.

El volumen de la muestra se obtuvo aplicando la fórmula de Hubber en la ecuación 5 (Ec.5):

$$V = \left(\frac{\pi}{4}\right) \times D_{\text{centro}}^2 \times L \quad (\text{Ec.5})$$

Fuente: Segura y Andrade, 2008

Dónde:

V: volumen de la muestra estado verde (m³)

D²: diámetro en el centro de la pieza (m²)

L: longitud de la muestra (m)

Posterior las muestras fueron secadas en la estufa del laboratorio de anatomía de maderas y Xiloteca a una temperatura de 103 ± 2°C durante 48 horas. Seguidamente fueron llevadas al laboratorio de biotecnología de la UTN, en donde fueron pesadas con una balanza de precisión, obteniéndose su peso seco. Obtenidos los valores de volumen y peso de las muestras, se procedió a determinar su densidad con la ecuación 6 (Ec.6):

$$Db = Ps / Vv \quad (\text{Ec.6})$$

Fuente: Giraldo, Nieto, Sarmiento y Borralho, 2014

Dónde:

Db: densidad básica (kg/m³)

Ps: Peso seco (Kg)

Vv: volumen verde (m³)

La clasificación de la densidad de la madera se la realizó con la propuesta de Castillo (2004), misma que se detalla en la Tabla 1:

Tabla 1
Clasificación de la densidad de la madera del fuste

Rango	Densidad (Kg.m⁻³)
Ligeras	< 500
Semiligeras	500 a 599
Semipesadas	600 a 649
Pesadas	650 a 799
Muy pesadas	> 800

3.4.3.3 Densidad de ramas

Se cortó una rama de la parte baja, media y alta de cada árbol. De cada rama se obtuvo una pieza de 0.10m de longitud al ras del tronco utilizando una sierra curva (Patiño, 2005).

Una vez obtenida cada muestra se determinó su volumen en verde aplicando la ecuación 5 (Ec.5). Seguidamente fueron llevadas al laboratorio de maderas y xiloteca, para ser secada en la estufa a una temperatura de $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 48 horas. La densidad se la obtuvo empleando la ecuación 6 (Ec.6).

3.4.3.4 Cálculo de la biomasa arbórea

a) Biomasa del fuste y ramas

La biomasa del fuste y ramas de las muestras se obtuvo aplicando la ecuación 7 (Ec.7) propuesta por Segura y Andrade (2008).

$$Bf = V \times df$$

(Ec.7)

Fuente: Segura y Andrade, 2008

Dónde:

Bf: biomasa arbórea (kg)

V: volumen del fuste y ramas (m³)

df: densidad el fuste y ramas (kg.m⁻³)

b) Biomasa de hojas

De las ramas seleccionadas por cuadrante, se extrajo todo el follaje existente, los cuales fueron empaquetados en fundas plásticas para ser pesadas y posteriormente secadas obteniendo así sus valores de peso inicial, peso seco y porcentaje de peso seco que servirán para determinar la biomasa empleando la ecuación 8 (Ec.8).

$$\%Ps = \frac{(Pi - Ps)}{Pi} * 100 \quad (Ec.8)$$

Dónde:

Ps: Peso seco (%)

Pi: Peso fresco (Kg)

Ps: Peso seco (Kg)

Una vez obtenidos los valores del peso seco en porcentaje, se procedió a calcular la biomasa con la ecuación 9 (Ec.9).

$$B = (Pi * Ps\%)/100 \quad (Ec.9)$$

Fuente: Segura y Andrade, 2008

Dónde:

B: Biomasa (Kg)

Pi: Peso fresco (Kg)

Ps: Peso seco (%)

La biomasa de hojas por rama fue extrapolada por el número total de ramas.

3.4.3.5 *Biomasa del componente arbóreo*

La biomasa total del componente arbóreo se lo obtuvo mediante la ecuación 10 (Ec.10):

$$BTa = Bf + Br + Bh \quad (Ec.10)$$

Dónde:

BTa: biomasa del árbol (kg)

Bf: biomasa total del fuste (kg)

Br: biomasa de ramas (kg)

Bh: Biomasa de hojas (Kg)

3.4.3.6 *Construcción de fórmulas alométricas*

Las fórmulas alométricas fueron construidas de manera específica para aquellas especies que disponían de 10 individuos considerados como muestra, a fin de estimar e interpolar el contenido de biomasa arbórea de toda su población. Para aquellas especies con un número de individuos menor a la muestra, solo se trabajó con su biomasa obtenida sin aplicar la alometría.

La información obtenida en campo de las variables regresoras: DAP, altura total, altura comercial, fue ordenada en columnas, detalladas en filas por individuo y especie. De la misma manera se lo hizo con la variable dependiente biomasa total. Seguidamente se realizó gráficas de dispersión de la relación biomasa con las variables de regresión para analizar la tendencia y probar modelos diferentes, determinando si el modelo presenta o no linealidad.

Con la ayuda de un software estadístico se realizaron todos los modelos posibles, y se depuró las ecuaciones con el proceso de selección de variables regresoras paso a paso (Stepwise). Finalmente, la selección del modelo se la realizó en base a los siguientes criterios:

- Coeficiente de determinación (R^2) y Coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado).

- Error estándar de la estimación o raíz del cuadrado medio del error (RCME), se lo obtiene a partir de la ecuación 11 (Ec.11):

$$RCME = \sqrt{SCR/(n - p)} \quad (Ec.11)$$

Dónde:

RCME: error estándar de la estimación o raíz del cuadrado medio del error

SCR: suma del cuadrado de los residuos, número de observaciones

p: número de parámetros del modelo lineal (incluyendo el término β_0 , el intercepto).

n: número de observaciones

- Suma de cuadrados de los residuos de los predichos (PRESS), se lo obtiene con la ecuación 12 (Ec.12):

$$PRESS = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_{ip})^2 \quad (Ec.12)$$

Dónde:

PRESS: suma de cuadrados de los residuos

Y_i : valor observado

\hat{Y}_{ip} : valor predicho

Una vez realizados los criterios de selección, se ponderó la información con el propósito de elevar el valor a 1 de los modelos que no presentasen el mejor ajuste. Seguidamente se sumaron las ponderaciones, obteniendo el valor más alto que es el que mejor se ajusta.

3.4.3.7 *Determinación de la biomasa de Coffea arabica*

Para la obtención de la biomasa del café se realizó la medición del diámetro normal de todos los individuos a la altura de 0.10 m del suelo con un calibrador digital. Además, se empleó un modelo alométrico cuyo R^2 fue mayor a 0.90 al ser utilizado en cinco SAF asociados con café. Se lo expresa en la ecuación 13 (Ec.13):

$$Y = 0.2811D^{2.0635} \quad (\text{Ec.13})$$

Fuente: Espinoza, Krishnamurthy y Torres, 2012

Dónde:

Y: biomasa (Kg)

D: diámetro normal (cm)

3.4.3.8 *Determinación de la biomasa de Pennisetum clandestinum*

Se realizaron dos parcelas de 0.50 x 0.50 m dentro del SAF2. Con una pala se extrajo el pasto desde raíz. Seguidamente la raíz fue lavada para eliminar la tierra, y el exceso de agua se eliminó agitando las raíces para que no afecte en los cálculos. Cada muestra fue codificada, y pesada para obtener su peso inicial. Seguidamente se las sometió al secado en la estufa a $58 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 48 horas (Yaranga y Villanueva, 2013).

Una vez obtenidos los valores de peso inicial y peso seco, se determinó la biomasa de la misma manera que se realizó en la biomasa de hojas aplicando las ecuaciones 8 (Ec.8) y 9 (Ec.9).

3.4.4 **Estimación de biomasa de detritus**

El detritus fue recolectado a los extremos dentro de los SAF estableciendo dos marcos muestrales de 0.50 x 050 m, según la propuesta de la Evaluación Nacional Forestal realizada por (MAE, 2012) en los cuales se recogió todo el material existente tales como: hojarasca, corteza, flores, entre otras (Andrade y Ibrahim, 2003), posteriormente el detritus fue pesado en su estado de humedad, secado en la estufa, obteniendo así su peso seco.

La biomasa fue obtenida aplicando las ecuaciones 8 (Ec.8) y 9 (Ec.9).

3.4.5 Biomasa total del SAF

La biomasa total del sistema se obtuvo sumando los valores totales del componente aplicando la ecuación 14 (Ec.14):

$$\boxed{BTs = Ba + Bc + Bd} \quad (\text{Ec.14})$$

Fuente: Sifuentes, 2015

Dónde:

BTs: biomasa aérea total del sistema ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

Ba: biomasa arbórea

Bc: biomasa cultivo

Bd: biomasa detritus

3.4.6 Determinación de Carbono

3.4.6.1 Arbóreo

Los valores de biomasa obtenidos fueron multiplicados por el factor de expansión de 0.5 propuesto por IPCC (2006), obteniendo la cantidad de carbono fijado por el componente forestal.

3.4.6.2 Café

Los valores de biomasa obtenidos fueron multiplicados por el factor de expansión de 0.5 propuesto por IPCC (2006), obteniendo la cantidad de carbono fijado por el componente agrícola.

3.4.6.3 Pasto

Los valores de biomasa obtenidos fueron multiplicados por el factor de expansión de 0.47 propuesto por IPCC (2006), obteniendo la cantidad de carbono fijado por el componente agrícola.

3.4.6.4 *Detritus*

Los valores de biomasa obtenidos fueron multiplicados por el factor de expansión de 0.4 propuesto por IPCC (2006), obteniendo la cantidad de carbono fijado por el detritus.

3.4.6.5 *Suelo*

Muestreo

Dentro de cada SAF se tomó 10 muestras de suelo aleatoriamente en cilindros metálicos a 10 cm de profundidad. Cada muestra fue pesada en estado de humedad, secada en la estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 48 horas.

Para determinar el contenido de carbono presente en el suelo se mezcló todas las muestras en estado seco obteniendo una muestra representativa de 200 gr (INIAP, 1975 y Agro Cabildo, 2017), la misma fue enviada al laboratorio LABONORT de la ciudad de Ibarra para su respectivo análisis y determinación del porcentaje de carbono orgánico. Para la transformación del carbono orgánico a carbono almacenado se empleó la ecuación 15 (Ec15):

$$Cc = \%CO \times da \times Ps$$

(Ec.15)

Fuente: Andrade y Ibrahim, 2003

Dónde:

Cc: carbono contenido ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

%CO: porcentaje de carbono orgánico del suelo

da: densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

Ps: profundidad del suelo (cm)

La determinación del carbono almacenado se realizó con la obtención de la densidad aparente y volumen del cilindro de la siguiente manera:

Densidad aparente

De la masa de suelo seco de todas las muestras por SAF, se realizó un promedio general, mismo que fue aplicado en la ecuación 16 (Ec.16):

$$Da = \frac{ms}{v \text{ total}}$$

(Ec.16)

Fuente: Centro Mundial Agroforestal [ICRAF], 2009

Dónde.

Da: densidad aparente (g.cm^{-3})

ms: masa de suelo seco (g)

V: volumen del cilindro (cm^3)

El volumen del cilindro se lo calculó con la ecuación 17 (Ec.17):

$$V = \pi \times r^2 \times h$$

(Ec.17)

Fuente: ICRAF, 2009

Dónde:

V: volumen del cilindro (cm^3)

r: radio (cm)

h: altura (cm)

3.4.6.6 *Carbono total*

El carbono total se obtuvo aplicando la ecuación 18 (Ec.18):

$$CT = Ca + Cc + Cd + Cs$$

(Ec.18)

Dónde:

CT: carbono total (Mg.ha⁻¹)

Ca: carbono arbóreo (Mg.ha⁻¹)

Cc: carbono cultivo (Mg.ha⁻¹)

Cd: carbono detritus (Mg.ha⁻¹)

Cs: carbono suelo (Mg.ha⁻¹)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Delimitación y caracterización del área de estudio

El SAF1 presentó una superficie de 376.5 m² conformado por *Pinus patula*, *Pinus radiata*, *Cupressus macrocarpa* y *Casuarina equisetifolia*. Las especies forestales fueron plantadas en 2003, con un distanciamiento de 3x6 m. De igual manera se registró *Coffea arabica*, plantado el 15 de julio del 2016, en un distanciamiento de 2x2 m.

El SAF2 presenta una superficie de 3 653.5 m² conformado por *Eucalyptus globulus*, *Pinus patula*, *Pinus radiata*, *Cupressus macrocarpa* y *Casuarina equisetifolia*. Las especies forestales fueron plantadas en noviembre de 2010, con un distanciamiento de 3x6 m. En la misma fecha se realizó la implementación de *Pennisetum clandestinum*.

4.2 Caracterización del componente forestal

4.2.1 Censo forestal

En la tabla 2 se muestra el análisis estadístico de las variables medidas en campo DAP y altura total. En el caso del SAF1 no se observa variación significativa de los valores dasométricos, ya que su coeficiente de variación presenta homogeneidad en el crecimiento de las especies.

En el SAF2 el análisis estadístico determinó valores que van de muy homogéneos a heterogéneos. *Cupressus macrocarpa* es la especie que presentó su crecimiento con mayor homogeneidad. Por otra parte, *Casuarina equisetifolia* obtuvo el crecimiento con mayor heterogeneidad debido al reducido número de individuos y las condiciones edafoclimáticas del sitio, lo cual permite considerar que datos muy heterogéneos al momento de realizar la medición en campo, no necesariamente se deben a errores de medición.

Tabla 2*Variables dasométricas promedio del censo forestal*

	Especie	N° Individuos	Estadísticos	DAP (m)	HT (m)
SAF1	<i>Casuarina equisetifolia</i> L.	1	\bar{X}	0.33	16.50
			\bar{X}	0.28	20.00
	<i>Cupressus macrocarpa</i> Hartweg	6	S	0.03	1.38
			S \bar{X}	0.01	0.57
			CV	11.50	6.92
			\bar{X}	0.38	19.70
	<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham	10	S	0.08	1.12
			S \bar{X}	0.03	0.35
			CV	22.04	5.70
			\bar{X}	0.38	18.50
SAF2	<i>Casuarina equisetifolia</i> L.	6	\bar{X}	0.07	7.00
			S	0.03	2.31
			S \bar{X}	0.01	0.94
			CV	47.69	32.99
	<i>Cupressus macrocarpa</i> Hartweg	24	\bar{X}	0.16	8.50
			S	0.01	0.50
			S \bar{X}	0.008	0.35
			CV	6.80	5.88
	<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham	54	\bar{X}	0.09	5.79
			S	0.03	1.56
			S \bar{X}	0.00	0.21
			CV	35.54	26.85
	<i>Pinus radiata</i> D. Don	2	\bar{X}	0.17	12.75
			S	0.02	2.75
S \bar{X}			0.02	1.94	
CV			12.75	22.45	
<i>Eucalyptus globulus</i> Labill	188	\bar{X}	0.21	15.93	
		S	0.07	3.83	
		S \bar{X}	0.01	0.28	
			CV	34.42	24.04

\bar{X} : Media; S: Desviación estándar; S \bar{X} : Error estándar de la media; CV: Coeficiente de variación; DAP: Diámetro a la altura del pecho; HT: Altura total.

Casuarina equisetifolia en el SAF1 presentó valores dasométricos superiores a lo descrito por Parrotta (s-f), con 0.23 m de DAP y 14.50 m de altura total en una plantación de *Casuarina equisetifolia* de 14 años en Puerto Rico. La densidad de su estudio entre individuos fue de 3x3 m en altitudes no mayores a los 1000 msnm y con una precipitación media anual de 800 mm. Dichos resultados difieren de la presenta investigación ya que tanto la edad de 15 años, valores en altitud de 2243 msnm y la intensidad de 3x6 m son elevados, siendo indicativos que permitieron un mejor desarrollo de la especie, pese a tener una precipitación inferior de 589.30

mm. También se debe considerar que *Casuarina equisetifolia* obtuvo un buen crecimiento al encontrarse en asocio con diversas especies de coníferas dentro del sistema (Wang *et al.*, 2013).

Así mismo Paredes *et al.* (2004), encontraron 0.15 m de DAP y 16.80 m de altura total para *Casuarina equisetifolia* en una plantación a los 12 años. El espaciamiento de los individuos fue de 3x1.5 m con precipitaciones de 1400 mm anuales. La media estimada en el SAF1 fue mayor por la diferencia de edad y densidad. A pesar que se tuvo menor precipitación, la especie presentó crecimiento normal de las variables dasométricas.

En el SAF2 *Casuarina equisetifolia* su desarrollo fue inferior a lo reportado por Paredes *et al.* (2004), con 0.10 m de DAP y 13.00 m de altura total. La densidad de plantación fue de 2x2 m, en precipitaciones de 1400 mm anuales a los nueve años. Aunque la edad del sistema en el presente estudio es menor, no se logró obtener un crecimiento ideal. Wang *et al.* (2013) mencionan que *Casuarina equisetifolia* puede tener factores limitantes en su crecimiento al ser plantada en suelos pedregosos, con falta de humedad, y sobre todo la carencia de manejo silvicultural en los primeros años (Palma, s-f). Por lo dicho el valor obtenido en este trabajo puede deberse a que en el sitio de estudio se observó gran pedregosidad en el suelo, lo que pudo dificultar el desarrollo radicular. Farfán y Urrego (2004) recomiendan analizar el asocio con las diferentes especies forestales, ya que pueden ocasionar alelopatía y competencia de luz solar. Por lo expuesto se puede atribuir que las una de las principales causales del bajo crecimiento dasométrico fueron las mencionadas, y se sugiere evitarlas al implementar sistemas futuros.

Cupressus macrocarpa obtuvo la dominancia en altura total del SAF1. INAB (2017), en su investigación determinó una media de 0.30 m de DAP y 21.00 m de altura total en plantaciones de *Cupressus macrocarpa* con densidad de 3x3 m, precipitación de 1000 mm anuales y 2000 msnm de altitud a los 15 años. Los resultados obtenidos en el presente trabajo son muy idénticos, en vista de que las características de ambos sitios aportaron positivamente al crecimiento de la especie. Somerville (1993) recomienda establecer plantaciones de estos individuos en condiciones similares cuando exista buena humedad del suelo para obtener resultados positivos. Según Chaves, Chinchilla y Mora (2012) el crecimiento dasométrico en la presente investigación es positivo al encontrarse dentro del rango aceptable de 0.20 m de DAP y 24 m de altura total en *Cupressus macrocarpa*.

De igual manera, *Cupressus macrocarpa* en el SAF2 presentó un desarrollo dasométrico muy inferior en comparación a, (INAB, 2017) con 0.24 m de DAP y 17.00 m de altura total, con características de sitio de 3x3 m de densidad, precipitación de 1000 mm anuales y 2000 msnm de altitud a los 10 años. El resultado obtenido en el presente trabajo puede deberse a la diferencia de edad y precipitación, ya que la densidad y altitud del estudio citado es similar. Condiciones de pedregosidad, poca profundidad efectiva y baja humedad del suelo pueden limitar el desarrollo de la especie (Somerville, 1993). Pomacahua (2011) sostiene que *Cupressus macrocarpa* presenta limitaciones de crecimiento cuando es asociada con especies de mayor competencia como el eucalipto. Lo expuesto permite sugerir que la especie no debe plantarse cuando se tenga las condiciones antes dichas.

Los resultados de *Pinus patula* del SAF1 presentaron la mayor correlación de sus variables, muy superior a lo encontrado por Álvarez (2016) en donde la media fue de 0.17 m de DAP y 11.2 m de altura total, en una plantación de *Pinus patula* 15 años en condiciones de sitio similares. El autor sustenta que obtuvo esos valores debido a que no se aplicó un aclareo oportuno que reduzca la competencia de nutrientes, además de encontrarse en suelos con indicios de erosión. Los tratamientos silviculturales, las condiciones de sitio, asociación y distribución espacial bien aplicados, pueden mejorar el crecimiento (Arteaga y Castelán, 2008). Según Romo, Navarro, De Los Santos, Hernández y López (2014) el desarrollo de *Pinus patula* es positivo en el presente estudio en vista de encontrarse en el rango óptimo.

Además, Álvarez (2016) determinó 0.12 m de DAP y 9.00 m de altura total en plantaciones de *Pinus patula*, cuyo resultado es superior a lo registrado en el SAF2. Un resultado similar obtuvo Romo et al. (2014) de 14.8 m de altura total en plantaciones de 11 años. Probablemente los valores superiores en sus estudios se deben a que se analizaron sistemas puros y con mejores condiciones de sitio. Para que *Pinus patula* logre crecimiento sobre todo en altura, debe ser plantado en plantaciones con suelos franco arenosos a franco arcillosos con buena capacidad de campo, sobre todo en climas templados a fríos (García, Velasco, Rodríguez, y Enríquez, 2017). Especies de rápido desarrollo como *Eucalyptus globulus*, requieren de mayor demanda de agua, y nutrientes, lo que ocasiona que individuos de menor competitividad sean desplazados de su proceso normal de crecimiento (Mijangos, Rojas, y Benavides, 2014). Puede ser que estas consideraciones infirieran en el desarrollo de *Pinus patula* en esta investigación.

Pinus radiata obtuvo el mayor crecimiento diametral al igual que *Pinus patula* en el SAF1, con resultados muy superiores en comparación a Merino Barrios, Brañas Lasala, Rey, y

Rodríguez Soalleiro (2003), quienes registraron 0.15 m de DAP y 17 m de altura total, a 610 msnm, con precipitaciones de 1000 mm anuales, en una plantación de 16 años. Así mismo Cargua, Rodríguez, Recalde y Vinueza (2014) estimaron 0.22 m de DAP y 9.04 m de altura a los 18 años en una plantación a los 3000 msnm en un estudio realizado en el Parque Nacional Sangay en Ecuador. Los autores sostienen que estos resultados se deben a que, en la plantación no se realizó ningún manejo silvícola, y permaneció con 1000 arb.ha⁻¹. A pesar de que la edad de la plantación estudiada por los autores es mayor, no fue suficiente para que supere los resultados obtenidos en este trabajo. Lo dicho puede explicar que el crecimiento de la especie será lento en altitudes elevadas, y por lo tanto condiciones edafoclimáticas y diseño del sistema en el presente trabajo, brindará un mejor resultado.

Eucalyptus globulus tuvo un crecimiento menor a lo reportado por (Winck et al., 2015) con 0.30 m de DAP y 29.40 m de altura en una plantación de *Eucalyptus grandis* de nueve años en precipitaciones de 1947 mm anuales en la región NE de Argentina. En comparación con el SAF2, la precipitación citada es mayor, lo cual pudo ocasionar un mejor crecimiento, ya que, para Geldres y Schlatter (2004), el género *Eucalyptus* mejora su adaptabilidad si los escenarios de crecimiento disponen de mejores características, ya que mientras mayor elementos nutricionales y eventos atmosféricos disponga, el resultado será favorable. Esto podría explicar lo obtenido en el presente trabajo, considerando además la diferencia de edad de un año.

4.3 Determinación de la biomasa arbórea

4.3.1 Selección y estimación de la biomasa arbórea

Los resultados obtenidos de selección y estimación de la biomasa arbórea se describen en la tabla 3:

Casuarina equisetifolia obtuvo los menores valores de área basal y volumen dentro de los dos sistemas estudiados. Parrota (s-f) obtuvo 14 m².ha⁻¹ en un rodal puro de *Casuarina equisetifolia* de 10 años en Puerto Rico, quién únicamente alude que la intensidad de raleo es la principal determinante en la acumulación de las variables en estudio.

Tabla 3

Estimación del número de ramas, hojas; cálculo del área basal y volumen promedio. Área basal y volumen en el área de estudio

	Especie	N°	R	H	AB (m ²)	V (m ³)	AB-AE (m ²)	V-AE (m ³)
SAF1	<i>Casuarina equisetifolia</i> L.	1	70	770	0.09	1.01	0.09	1.01
	<i>Cupressus macrocarpa</i> Hartweg.	6	149	4 210	0.06	0.87	0.37	5.23
	<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltl. & Cham.	10	106	1 952	0.12	1.67	1.19	16.71
	<i>Pinus radiata</i> D. Don	1	102	12 612	0.11	1.43	0.11	1.43
SAF2	<i>Casuarina equisetifolia</i> L.	6	20	185	0.004	0.03	0.03	0.16
	<i>Cupressus macrocarpa</i> Hartweg.	24	108	2 574	0.02	0.10	0.34	1.83
	<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltl. & Cham.	54	48	240	0.01	0.07	0.35	1.65
	<i>Pinus radiata</i> D. Don	2	24	2 031	0.02	0.24	0.05	0.43
	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	188	106	33 086	0.05	0.74	7.44	91.84

N°: Número de individuos; R: Número de ramas; H: Número de hojas; AB: Área basal promedio de la muestra; V: Volumen del fuste promedio de la muestra; AB-AE: Área basal total del área de estudio; V-AE: Volumen total del fuste del área de estudio.

En el SAF1 a pesar que existió el menor número de individuos de las especies forestales por superficie, se encontraron mayores diámetros, lo cual permitió obtener un mayor volumen de madera. En el SAF2 se reporta el menor rendimiento volumétrico, el cual contó con mayor número de individuos, pero a su vez presentó una considerable disminución de madera. Este análisis se lo observa en la (Figura 2).

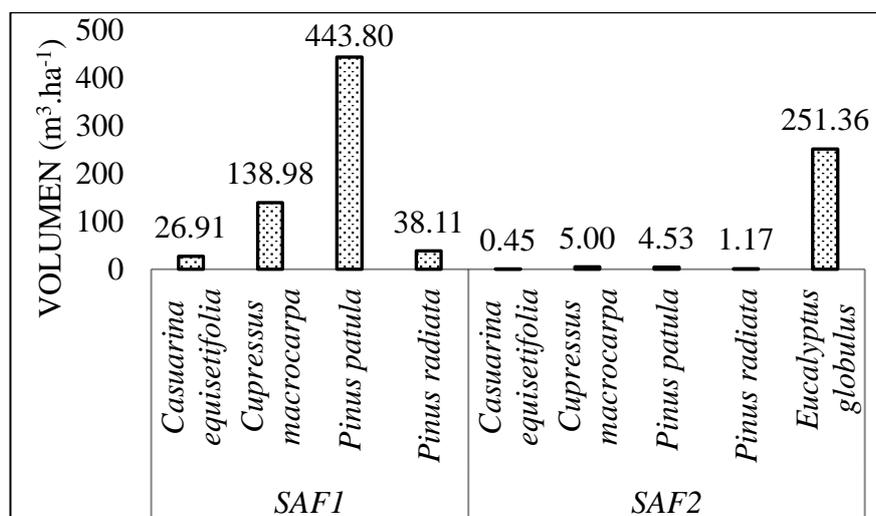


Figura 2 Rendimiento volumétrico

La figura 2 indica el rendimiento volumétrico que tuvo *Cupressus macrocarpa* en el SAF1. Cano (2017) determinó $300 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ en una plantación de la misma edad. Según (Somerville, 1993), el volumen de madera de la especie puede disminuir ante la presencia de un déficit hídrico ocasionado por precipitaciones irregulares o falta de riego. Si se desea obtener rendimientos volumétricos ideales, es recomendable que los individuos remanentes se encuentren en una densidad de $7 \times 7 \text{ m}$ (Barreto y León, 2005). La diferencia de resultados, puede deberse que, en la etapa inicial de desarrollo, la especie requirió mayor demanda de agua, y también la aplicación de raleos que aumenten el distanciamiento entre individuos.

Así mismo Cano (2017) determinó $180 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ en una plantación de 10 años, siendo estos valores, muy superiores a lo encontrado en el SAF2. La diferencia de resultados puede atribuirse a la interacción de especies forestales como el eucalipto, el cual suprime en gran medida el desarrollo normal de *Cupressus macrocarpa*, ya que sus raíces exudan compuestos terpénicos considerados tóxicos (Ballester, Arias, Cobián, López y Vieitez, 1982). Barquero et al. (2014), recomiendan asociar la especie con cultivos agrícolas si se desea obtener mayor volumen de madera debido al aporte indirecto de fertilizante.

De acuerdo con Argueta (2011) uno de los principales factores que influyen en el desarrollo *Cupressus lusitánica* es el pH, siendo ideal para que la especie se desarrolle positivamente de 5.5 a 8.5, razón por la cual si el terreno presenta valores menores el crecimiento será menor, además de presentar deficiencias de fósforo (P), magnesio (Mg) y calcio (Ca). Se puede inferir que los factores edáficos de este trabajo presentan bajos niveles de estos elementos, por lo cual se sugiere realizar un análisis más profundo sobre las necesidades nutricionales que la especie demanda.

Pinus patula obtuvo el mayor rendimiento en el SAF1. Romo et al. (2014) determinaron $447.30 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ en una plantación de 15 años. El valor registrado en el presente trabajo es positivo, al encontrarse en el rango óptimo de rendimiento por disponer de los nutrientes requeridos durante los primeros años de crecimiento (Barreto y León, 2005).

García et al. (2015) registraron $101.00 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ en una plantación *Pinus patula* de 10 años, valor muy superior a lo reportado en el SAF2. Una de las casuales del resultado del presente trabajo puede ser la baja disponibilidad de nutrientes y la capacidad exploratoria de raíces por el suelo pedregoso (Barreto y León, 2005), además de considerar que los individuos crecen de

manera positiva en sistema puros (García et al., 2017). Por lo dicho, es permisible asumir que en esta investigación el bajo volumen se debe a las condiciones de sitio.

Pinus radiata logró rendimientos inferiores en el SAF1 y SAF2 en comparación a lo registrado por Ferrere, Lupi, y Boca (2015) en Argentina con $189.70 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$. Lo obtenido resultó de la estimación en una plantación de 13 años con raleo del 50%, es decir con alrededor de $550 \text{ arb}.\text{ha}^{-1}$. A pesar de que los rendimientos comparados no difieren mucho de la edad de los sistemas en este trabajo, el bajo rendimiento puede estar relacionado con la falta de técnicas silvícolas como las podas y raleos que favorecen el crecimiento y calidad comercial. Por su parte Somerville (1993) calculó $331 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ en plantaciones, recalando que las labores silviculturales son factores imprescindibles en el interés de mejorar la producción volumétrica.

Eucalyptus globulus obtuvo un rendimiento cercano a lo registrado por Gamarra (2001) con $273.20 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ en Perú. Según Álvarez et al. (2005) el eucalipto no presenta limitantes en su capacidad de adaptación y competencia de nutrientes en sistemas puros o mixtos, lo cual genera un rango aceptable de rendimiento maderero. Su rápido crecimiento y sistema radicular con capacidad de expandirse ampliamente (Alvarez, 2008), pueden explicar el resultado obtenido en el presente trabajo.

4.3.2 Densidad del fuste y ramas

La tabla 4 indica la densidad fustal de cada una de las especies arbóreas. Con respecto a la densidad de las ramas, el resultado puede deberse a que la muestra requirió de un tiempo con mayor prolongación de secado.

La densidad que la madera de *Casuarina equisetifolia* fue mayor en el SAF1, cuyo valor es relativamente inferior al compararlo con Chowdhury et al. (2009). La densidad promedio para *Casuarina equisetifolia* fue de $0.73 \text{ g}.\text{cm}^{-3}$ en plantaciones adultas, quien consideró que la relación edad, DAP y altura total son determinantes para que la lignificación de la madera sea propicia en la especie. A esta especie se le atribuye la característica de ser una madera pesada y dura, sin embargo, presenta variaciones de densidad bajas a altas desde la médula hacia el duramen y albura, debido al aumento gradual de la fibra en cada segmento (Villaseñor y Rutiaga, 2016).

Por otra parte, Kindo, Edward, Mndolwa, y Chamshama (2014) determinaron una densidad de $0.68 \text{ g}.\text{cm}^{-3}$ cuyo DAP promedio fue de 0.12 m. La diferencia de la tasa de crecimiento

muestra la influencia de variabilidad en la densidad que datos heterogéneos pueden ocasionar (Chowdhury et al., 2009). Tanto el elevado entrelazamiento de las fibras, el grosor de 4.2 micras de la pared celular, y sobre todo la composición química de elementos como el Ca, K, Mg, Ba, Fe y Cu, son determinantes directos de la densidad de *Casuarina equisetifolia* (Villaseñor y Rutiaga, 2016). En esta investigación se obtuvo un valor inferior en el SAF2, ya que las características que menciona el autor son diferentes, sobre todo en el valor diametral, el cual es sustancial para la densidad en relación a la longitud de las fibras.

Tabla 4

Densidad promedio de los componentes: fuste y ramas (g.cm⁻³)

	Especie	Densidad fuste	Densidad ramas	Clasificación
SAF1	<i>Casuarina equisetifolia</i> L.	0.70	0.74	Pesada
	<i>Cupressus macrocarpa</i> Hartweg.	0.47	0.57	Ligera
	<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	0.47	0.55	Ligera
	<i>Pinus radiata</i> D. Don	0.44	0.55	Ligera
SAF2	<i>Casuarina equisetifolia</i> L.	0.58	0.61	Semiligera
	<i>Cupressus macrocarpa</i> Hartweg.	0.40	0.56	Ligera
	<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	0.39	0.54	Ligera
	<i>Pinus radiata</i> D. Don	0.41	0.53	Ligera
	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	0.56	0.60	Semiligera

En el SAF1, *Cupressus macrocarpa* obtuvo una densidad similar a lo expuesto por Elzaki y Khider (2013) de *Cupressus lusitanica* en Sudan, con 0.45 g.cm⁻³ a los 20 años obteniendo el volumen de la muestra por desplazamiento en agua. Los valores comparados se encuentran dentro del rango normal para maderas blandas del ciprés, debido a la relación de la densidad con una resistencia moderada, ideal para ser usada en la construcción (Bektaş y Kurt, 2010). Según Elzaki y Khider (2013) las principales variantes en la densidad del ciprés, se deben a condiciones edafoclimáticas y edad.

Bektaş y Kurt (2010) determinaron una densidad en *Cupressus macrocarpa* de 0.54 g.cm⁻³. De acuerdo a Panshin y Dezeeuw citado por Bektaş y Kurt (2010) los bosques y plantaciones que se encuentren en rangos altitudinales bajo los 1 000 msnm la densidad de la madera será mayor, debido a que el rápido crecimiento provoca un menor distanciamiento entre anillos y

aumenta la resistencia paralela a la fibra. *Cupressus macrocarpa* evidentemente, presenta problemas al desarrollar una densidad baja, al menos en este estudio. Se consideraría analizar las características del sitio más a profundidad, para encontrar causas puntuales de esta disparidad en futuras investigaciones.

En *Pinus patula* la densidad tuvo un grado mayor leve en el SAF1, al comparar lo consignado por Goche, Velázquez, Borja, Capulín y Palacios (2011) 0.46 g.cm^{-3} . Los autores atribuyen que las características anatómicas, rasgos genéticos y edad, influyen en la variabilidad de la densidad, la cual es amplia en esta especie. La densidad aumenta y decrece a medida que se inicia y termina su corteza, al ser una característica propia de las coníferas (Goche et al., 2011). Al comparar lo obtenido en el SAF1, el valor de la densidad no presenta diferencias significativas, por la razón de que el valor de la densidad se encuentra en el rango normal.

Para Meneses (2011) la densidad obtenida de *Pinus patula* fue 0.32 g.cm^{-3} a los 12 años. Características como la anisotropía y heterogeneidad de los tejidos, influyen en la variación de la densidad en el pino (Yoza, Baradit, y Acevedo, 2015), además Meneses 2011 considera que la edad no siempre determinará la relación existente entre el grado de lignificación con la densidad. Los resultados obtenidos difieren por lo dicho, sin embargo, la especie en el SAF2 obtuvo un valor mayor, por lo cual se puede considerar las condiciones ambientales y sobre todo la edad influyen en su densidad.

La densidad de la madera de *Pinus radiata* fue ligera en los dos sistemas. Vilches, Correalmódol y Voltas (2017) determinaron 0.52 g.cm^{-3} , quienes mencionan que la especie presentó alta capacidad higroscópica lo que generó menor variación en la dureza de la madera. Días, Ananias, Valenzuela, Torres y Rodríguez (2012) mencionan que densidades elevadas en la madera *Pinus radiata*, dependen de la disponibilidad constante de agua en la primera década de crecimiento, lo cual promueve mayor retención del líquido en las paredes celulares. Además, añaden que los árboles con inclinación de su fuste, la densidad será mayor. En comparación al SAF1, la densidad en este trabajo fue menor, lo cual permite considerar que las características comparadas influyen en la dureza de la madera.

Bautista (2014) determinó 0.44 g.cm^{-3} en individuos adultos de *Pinus radiata*, en donde el rango de variaciones existentes depende de la temperatura de secado de las muestras y edad. Constanzo (2016) indica que es imposible establecer valores definitivos en la densidad de

especies forestales. Maldonado y otros (2007) indican que la influencia de temperatura, método de secado y la generalidad anatómica de la muestra, repercuten en la densidad a obtener. El resultado obtenido en el SAF2 se asemeja a lo comparado, ya que se encontró variación en el peso y volumen de las muestras obtenidas.

La densidad de la madera en *Eucalyptus globulus* fue muy similar en comparación de Monteoliva, Barotto, y Fernández (2015), quienes determinaron 0.55 g.cm⁻³ en *Eucalyptus globulus*. En el trabajo se menciona que mientras mayor sea la cantidad de fibras por unidad de superficie y condiciones ecológicas, la especie mejora su capacidad de soportar el estrés hídrico. Espina (2006) concuerda que, características anatómicas específicas como el tamaño y la cantidad de vasos también tienen influencia en la densidad de la madera. La densidad obtenida en esta investigación puede atribuirse a características propias de la especie en interacción con el ambiente en que se encuentra.

4.3.3 Biomasa arbórea

En la tabla 5 se observa la biomasa acumulada de hojas, ramas y fuste. Estos valores presentaron notablemente variación entre especie y sistema. La variación en el desarrollo y acumulación de biomasa es atribuible a la diferencia marcada de edad, factores edafoclimáticos y alelopatía entre especies (Douterlungne, Herrera, Ferguson, Siddique, y Soto, 2013).

Tabla 5

Biomasa arbórea promedio por especie de la muestra y biomasa total del área de estudio (Kg)

	Especie	Hojas	Ramas	Fuste	B \bar{X} (Kg)	BT-AE (Kg)
SAF1	<i>Casuarina equisetifolia</i> L.	15.84	178.74	551.07	764.33	764.33
	<i>Cupressus macrocarpa</i> Hartweg.	60.12	152.21	474.21	686.54	4 119.26
	<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	35.34	191.87	783.92	1 011.12	10 111.17
	<i>Pinus radiata</i> D. Don.	45.61	192.89	602.70	841.20	841.20
SAF2	<i>Casuarina equisetifolia</i> L.	1.81	5.94	7.62	15.37	92.24
	<i>Cupressus macrocarpa</i> Hartweg.	13.81	20.36	42.24	76.41	1 324.51
	<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	2.14	6.04	31.43	39.61	997.39
	<i>Pinus radiata</i> D. Don.	4.46	9.19	86.11	99.76	199.52
	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	17.68	106.11	405.56	529.36	72 182.18

B \bar{X} : Biomasa promedio de la muestra; BT-AE: Biomasa total del área de estudio.

En el SAF1 *Pinus patula* y *Cupressus macrocarpa*, fueron las especies de mayor acumulación de biomasa. Sin embargo, en el SAF2, *Eucalyptus globulus*, es la única especie que sobresale de las demás (Figura 3). La cantidad de biomasa en árboles suele ser variada en individuos de la misma especie, debió a efectos de condiciones edafoclimáticas, rasgos hereditarios y competencia de recursos (Pardos, 2010).

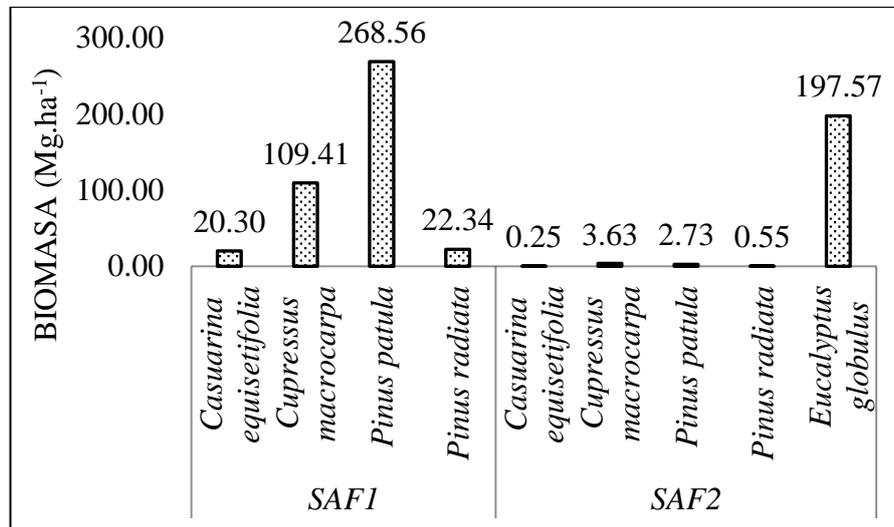


Figura 3 Biomasa total del componente arbóreo

La figura 3 indica que la biomasa de *Casuarina equisetifolia* fue la especie de menor fijación de carbono en cada sistema. Paredes *et al.* (2004) determinaron biomásas de 81.64 y 46.95 Mg.ha⁻¹ en *Casuarina equisetifolia* con 12 y nueve años respectivamente. En la investigación se señala que, con precipitaciones superiores a los 1000 mm anuales y densidades de 3x1.5 y 2x2 m, la especie tiene mayor acumulación de biomasa en la primera década. La biomasa obtenida en este trabajo en cada uno de los SAF es inferior, pese a que la edad de los sistemas de estudio fue mayor. Una de las razones que explican el resultado en el SAF2, puede ser la falta de requerimientos edafoclimáticos (Mijangos *et al.*, 2014), sobre todo la precipitación. El crecimiento diametral y de altura mantiene una relación directamente proporcional con la cantidad de biomasa, es por esto que, de la etapa inicial de desarrollo, dependerá la capacidad de acumulación (Ruiz *et al.*, 2014). Con respecto al SAF1, el único individuo no permite realizar una aproximación real.

Cupressus macrocarpa fue la segunda especie que mayor acumulación de biomasa obtuvo dentro del SAF1. Sin embargo, en el SAF2 la especie obtuvo una acumulación que no significó un gran aporte. Rojas (2014) estimó 123.20 Mg.ha⁻¹ en una plantación de *Cupressus lusitanica*, quien considera, que el valor se encuentra dentro del rango en individuos adultos. En

comparación al SAF1, se evidencia una similitud del valor registrado, cuyo resultado puede ser la diferencia de edad, especie y la metodología empleada (Orozco, Brumér, Quirós, 2006).

Pinus patula fue la especie que mayor biomasa obtuvo en el SAF1, sin embargo menor en comparación de Barreto y León (2005) en plantaciones de individuos adultos de *Pinus patula* con 328.18 Mg.ha⁻¹. En la investigación se considera favorable la cantidad de biomasa, si la especie crece con precipitaciones mayores a los 1000 mm anuales en rangos altitudinales menores a los 2000 msnm. La acumulación de biomasa mantiene relación directa con el tipo de suelo y nivel de fertilidad que disponga (Oliva et al., 2017). Ciertamente los resultados obtenidos en este trabajo son positivos ya que la biomasa estimada se encuentra dentro del rango normal para la especie (Romo et al., 2014).

Pinus patula fue la segunda especie que mayor masa acumuló en el SAF2. En lo realizado por Oliva et al. (2017) aplicando el método destructivo, se encontró que *Pinus patula*, asociada con herbáceas y arbustos acumuló 19.37 Mg.ha⁻¹ en un sistema silvopastoril a los 10 años, con DAP mayores en condiciones de sitio diferentes. Actividades silvícolas, número de individuos, la proporción de ramas y hojas pueden ocasionar grandes variaciones en el resultado de la cuantificación de la biomasa (Romo et al., 2014). La biomasa obtenida en este trabajo es mucho menor en comparación de (Oliva et al., 2017), la diferencia de resultados puede atribuirse a la edad, sitio y método de estimación empleado en este estudio. El bajo desarrollo de la especie puede suscitarse si el sistema radicular no dispone de buen suelo para su normal desplazamiento y asimilación de nutrientes (Álvarez, 2016).

Pinus radiata fue la tercera especie que mayor biomasa acumuló en el SAF1, pero a la vez muy inferior en lo expuesto de Merino et al. (2003) cuyo valor fue de 93.90 Mg.ha⁻¹ con 16 años a los 610 msnm en una plantación manejada. Para que la especie presente buena acumulación de biomasa, no se recomienda ser plantada en suelos que no sean de aptitud forestal, ya que variables de erosión y deficiencia de nutrientes, promueven su desarrollo anormal (Zanabria y Cuellar, 2015). Al disponer de suelos pobres es necesario aplicar fertilización en años posteriores a la plantación (Somerville, 1993). Los resultados de biomasa en este trabajo fueron muy bajos, pese a tener casi la misma edad, el bajo rendimiento puede deberse a que las condiciones del sitio, no fueron las requeridas por la especie, por cual lo más acertado sería evitar el uso de espacios similares.

Cargua et al. (2014) estimaron 16.72 Mg.ha⁻¹ de biomasa en una plantación de *Pinus radiata*, en donde los individuos presentaban un DAP promedio de 0.13 m en una altitud de 3000 msnm. Lo mencionado es superior al resultado en este trabajo, pudiendo deberse a la falta de materia orgánica en suelos arenosos, y a su vez la porosidad que permite el almacenamiento temporal de agua que *Pinus radiata* demanda (Somerville, 1993). Además el manejo inadecuado del manto superficial, afecta directamente a la disposición de nutrientes y conservación del suelo que esta especie requiere (Rey, Brañas, Rodríguez, y Merino, 2001). Al no existir la disponibilidad natural de nutrientes y fertilización voluntaria, en el SAF2, la especie no logró crecer y acumular mayor biomasa.

Eucalyptus globulus obtuvo la mayor acumulación de biomasa en el SAF2. Valores cercanos se registraron en las investigaciones de Gamarra (2001) con 144.24 Mg.ha⁻¹, y Álvarez et al. (2005) con 142 Mg.ha⁻¹. La biomasa obtenida en el presente trabajo es superior a lo reportado por los autores, lo que indica que la especie presenta un comportamiento positivo en las condiciones edafoclimáticas del lugar. Por otra parte, si se requiere aumentar la fijación de biomasa, pueden aplicarse raleos selectivos que favorezcan el crecimiento diametral (Borrero, 2014), lo cual no se llevó a cabo en los trabajos mencionados.

4.3.4 Modelos alométricos

Selección del mejor modelo

En la tabla 6 se muestran los criterios de selección de mejor ajuste para cada modelo alométrico.

Tabla 6

Modelos alométricos de mejor ajuste para la estimación de biomasa en el SAF2

Modelo	Ecuación	R ²	R ² Ajust.	RCME	RvsP	Ponderación
A	B=102.42 + 316.25*DAP ² HT	0.97	0.97	28.54	0.97	0.97
B	B= -20.76 + 518.72*DAP + 210.02*DAP ² HC	0.93	0.91	6.92	0.91	0.92
C	B= -22.78 + 136.51*DAP ² HT + 5.82*HT	0.98	0.98	3.48	0.93	0.96

A: *Eucalyptus globulus*; B: *Cupressus macrocarpa*; C: *Pinus patula*; R²: Coeficiente de determinación; R² Ajust.: Coeficiente de determinación ajustado; RCME: Cuadrado medio del error; R: Residuos; P: Predichos; B: Biomasa; DAP: Diámetro a la altura del pecho; HT: Altura total.

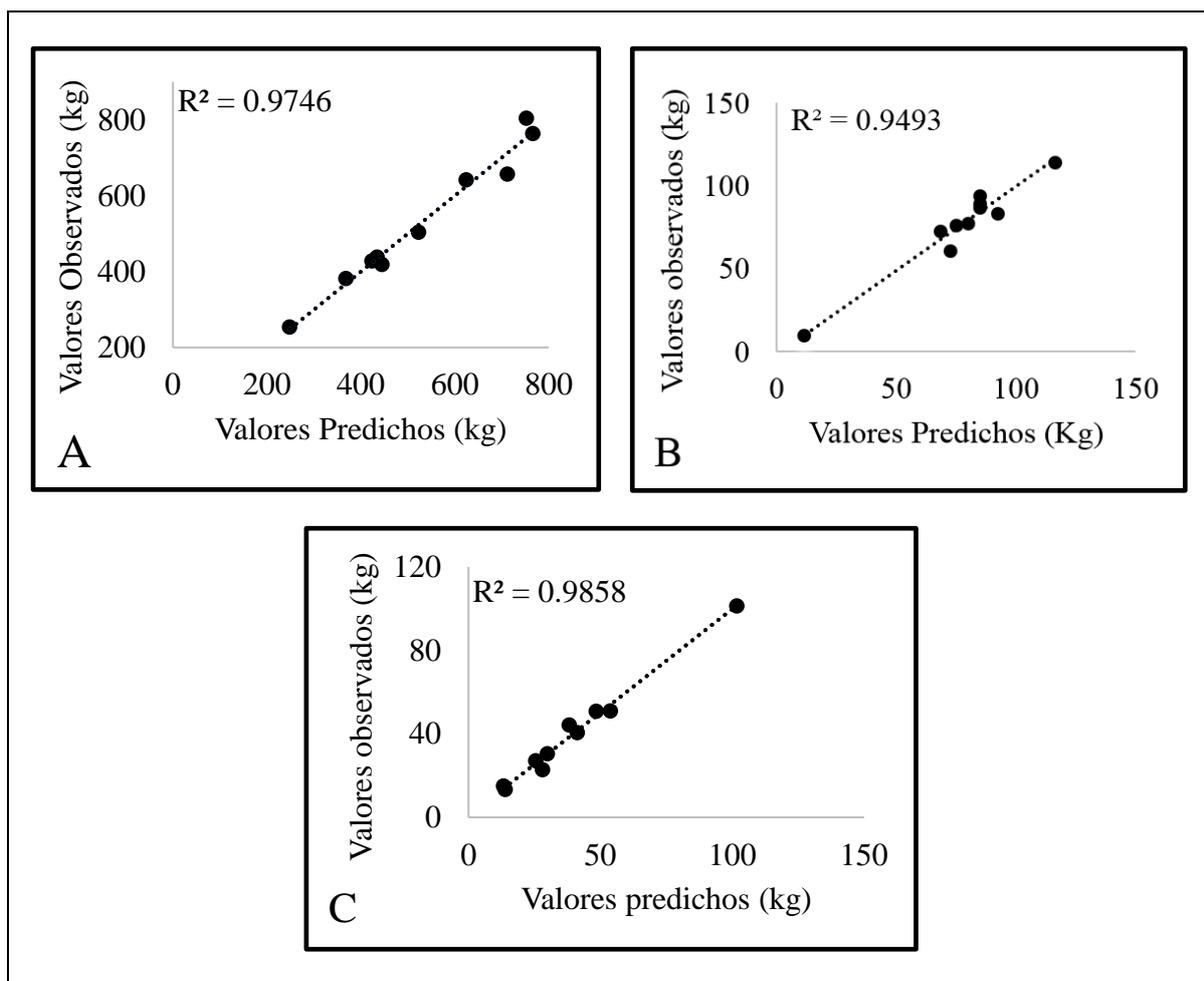
El modelo alométrico en *Eucalyptus globulus* empleó las variables DAP y HT, las cuales brindan mayor confiabilidad en la estimación de biomasa (Cerruto, Boechat, Fehrmann, Goncales, y von Gadow, 2015), para el sitio de estudio. Esto confirma que los modelos de mejor predicción de biomasa utilizan variables combinadas (Segura y Andrade, 2008). Goya, Frangi, y Dalla (1997) obtuvieron un R^2 de 0.99 en plantaciones de *Eucalyptus globulus*. La diferencia puede deberse a que las variables regresoras en este estudio presentaron datos más heterogéneos, entendiéndose que en plantaciones la linealidad del modelo será mejor.

Cupressus macrocarpa obtuvo un coeficiente de determinación similar a lo expuesto por Cai, Kang, y Zhang, (2013) con un R^2 de 0.94. La aplicación de variables combinadas entre DAP y HC demostraron disminuir el error de precisión, esto ya que mantienen una estrecha relación en el crecimiento de la especie (Flores, López, Ángeles, De la Isla, y Calva, 2019). Alvarez, (2008) recomienda utilizar el estadígrafo (RCME) ya que, al disminuir su valor el R^2 aumenta cuando se emplea la variable HC. EL valor obtenido en este trabajo se debe a las características citadas, con las que se obtuvo el mejor modelo alométrico de tendencia lineal.

En *Pinus patula* se obtuvo un coeficiente de determinación igual a lo reportado por Flores et al., (2007), de 0.98; así mismo Acosta, Vargas, Velázquez, y Etchevers (2002) en *Pinus patula*, *Liquidambar spp.*, y *Quercus spp.*, con un $R^2 > 0.97$ con el solo uso del DAP. Teniendo a favor que la medición de la altura, se dificulta por las características de copa y genera mayor demanda de recursos. Por lo dicho se puede explicar que en *Pinus patula* el uso de variables simples o combinadas, genera modelos de alto grado de validez. Otras de las consideraciones a tomar es que la competencia con otros árboles (Méndez et al., 2011), y las condiciones climáticas, rigen a que los modelos sean específicos de un determinado lugar (Alvarez, 2008).

Representación gráfica de los valores de la biomasa observada vs la predicha

La figura 4 indica la relación de los valores de biomasa observada vs predicha. Para los modelos A y C que se utilizó el (DAP, HT), y en el B (DAP, HC), se tuvo una tendencia lineal muy satisfactoria en vista de que no se evidenció dispersión en su relación.



A: *Eucalyptus globulus*; B: *Cupressus macrocarpa*; C: *Pinus patula*
 Figura 4 Correlación de los valores de biomasa observada vs predicha

4.3.5 Biomasa del componente cultivo

La biomasa estimada de *Coffea arabica*, fue de 0.12 Mg.ha⁻¹. Según lo expuesto por Segura y Andrade (2012), quienes determinaron 3.20 Mg.ha⁻¹ de *Coffea arabica* en un sistema agroforestal asociado con *Cupressus lusitánica* a 1 600 msnm, en donde el cultivo se encontraba en etapa inicial de producción 6 años. Conforme el café va creciendo en sus primeros años, la acumulación de biomasa será proporcional hasta llegar a un proceso de equilibrio a partir del declive productivo (Jezeer y Verweij, 2015). La dinámica del café, las condiciones de sitio y sobre todo la edad permiten aclarar la diferencia en la cantidad de biomasa registrada en esta investigación

Tabla 7

Biomasa del componente cultivo: Coffea arabica y Pennisetum clandestinum en el área de estudio

	Especie	N° Individuos	Biomasa (Mg)
SAF1	<i>Coffea arabica</i>	77	0.004
SAF2	<i>Pennisetum clandestinum</i>	n	15.09

n: material total de biomasa extraída

La biomasa estimada para *Pennisetum clandestinum*, fue de 41.40 Mg.ha⁻¹, superior a lo reportado por (Orrala, 2007) con 8.12 Mg.ha⁻¹ de pasto saboya (*Panicum maximun*) de tres años, en un sistema silvopastoril asociado con teca; así mismo Oliva et al. (2017) obtuvieron 3.50 Mg.ha⁻¹ en *Pennisetum clandestinum*, *Philoglossa mimuloides* y *Dactilys glomerata L.*, atribuyendo a la primera especie el 38% del valor total, todas estas en estado inicial de crecimiento en un sistema silvopastoril con *Pinus patula*. En cada uno de los trabajos se analizó solamente la biomasa aérea del pasto. Según Botero (2011) para que los pastos obtengan el mayor rendimiento de biomasa neta, es necesario que dispongan de un sistema de radicular muy profundo. La cantidad de biomasa en este trabajo se debe a que se obtuvo la muestra con todo y raíz, lo cual, incrementó su valor, además de considerar que en el SAF2 no se han realizado labores de pastoreo, que ha permitido la abundancia invasiva de *Pennisetum clandestinum*. La falta de manejo en pastos, puede acarrear problemas si es usado como forraje, ya que la calidad nutritiva disminuye con la edad (Ramírez, Sandra Posada, y Noguera, 2015).

4.3.6 Biomasa de detritus

La biomasa de detritus se encuentra relacionada de manera directa con el raleo y podas. De forma natural mantiene relación con la caída de hojarasca y ramas ocasionada por acción del viento, mientras más biomasa sea incorporada a la superficie del suelo, la acumulación de detritus será mayor (Lapeyre et al., 2004).

Tabla 8

Biomasa de detritus en el área de estudio

		Biomasa (Mg)
Detritus	SAF1	0.20
	SAF2	5.11

La biomasa de detritus fue de 5.20 y 14.00 Mg.ha⁻¹ en el SAF1 y SAF2 respectivamente, lo cual varía según lo dicho por Oliva et al. (2017) quienes estimaron 2.64 Mg.ha⁻¹ en un sistema silvopastoril conformado por *Pinus patula* y herbáceas. Según Concha, Alegre y Pocomucha (2007) la biomasa que el detritus contribuye en los sistemas agroforestales, depende de, la edad, diversidad de especies y sobre todo, si se han efectuado actividades de limpieza. La existencia de malezas invasiva en sistemas agroforestales por lo regular influye en la contribución de detritus (Espinoza, Krishnamurthy, y Torres, 2012). Lo obtenido en el presente trabajo puede deberse a la falta de actividades silvícolas de limpieza en los dos sistemas, lo que permitió la acumulación de biomasa de muchos años.

4.3.7 Biomasa total

En la tabla 9 se puede observar la cantidad de biomasa aérea obtenida por componente. En el SAF1 el componente arbóreo fue aquel que mayor acumulación de biomasa obtuvo, representando el 98.75%, seguido del cultivo con 0.03% y detritus con 1.22%. De la misma manera el SAF2 el componente arbóreo representa 85.66%, seguido del cultivo con 8.48% y detritus con 5.86%. Estos valores mantienen relación a lo investigado por Zanabria y Cuellar (2015) quienes encontraron que en sistemas de *Eucalyptus* y *Pinus*, la biomasa que más acumulación tiene es en el componente arbóreo, seguido de variaciones en la hojarasca y cultivos agrícolas.

Tabla 9

Biomasa aérea total del componente: arbóreo, cultivo y detritus

	Biomasa Mg.ha ⁻¹			Total
	Arbóreo	Cultivo	Detritus	
SAF1	420.61	0.12	5.20	425.93
SAF2	204.72	41.40	14.00	260.12

4.3.8 Carbono total

4.3.8.1 Suelo

Se obtuvo 2.30 y 1.47% de carbono con 33.34 y 19.36 Mg.ha⁻¹ en el SAF1 y SAF2 respectivamente, valores bajos según lo expuesto por Oliva et al. (2017) con 3.29% de carbono obtuvo 30.60 Mg.ha⁻¹ a una profundidad de 10 cm, en un sistema silvopastoril conformado de *Pinus patula* y especies herbáceas. Una de las casuales de los valores de este trabajo pudo ser

que la acumulación de biomasa superficial de ramas y hojas para la descomposición e incorporación de materia orgánica al suelo tuvo un nivel bajo (Sánchez et al., 2011). Además, Espinoza et al. (2012) mencionan que, la mayor fijación de carbono se da en suelos arcillosos debido a que el intercambio catiónico en sus agregados es mayor, lo cual favorece a la actividad microbiana. Esto permite explicar la cantidad de carbono almacenado en los dos sistemas, ya que, y la baja acumulación en el SAF2, acusa del suelo arenoso (W. Espinoza et al., 2012).

Zanabria y Cuellar (2015) obtuvieron 26.13 Mg.ha⁻¹ a 10 cm de profundidad, con 2.99% de carbono en un sistema conformado por *Eucalyptus globulus* y pastizales. Una de las causas que desfavorece la acumulación de carbono en el suelo, es la baja incorporación de compuestos orgánicos al mantillo, con características hidrofóbicas, presentes en hojas de coníferas (Galicia et al., 2016).

4.3.8.2 Total

En la tabla 10 se indica la acumulación de carbono por componente de cada SAF.

Tabla 10
Carbono acumulado por componente (Mg)

	Carbono en el área de estudio (Mg)	Carbono/hectárea (Mg)
SAF1	<i>Casuarina equisetifolia</i> L.	0.38
	<i>Cupressus macrocarpa</i> Hartweg.	2.06
	<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	5.06
	<i>Pinus radiata</i> D. Don	0.42
	<i>Coffea arabica</i> L.	0.004
	Detritus	0.08
	Suelo	1.25
	Total	9.25
SAF2	<i>Casuarina equisetifolia</i> L.	0.05
	<i>Cupressus macrocarpa</i> Hartweg.	0.66
	<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	0.50
	<i>Pinus radiata</i> D. Don.	0.10
	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	36.09
	<i>Pennisetum clandestinum</i> Hochst.	7.11
	Detritus	2.05
	Suelo	7.07
Total	53.63	

En la figura 5 se puede observar que en el SAF1 el componente que más carbono almacena, proviene de la biomasa arbórea, seguido de la retención por parte del suelo, con la acumulación total del sistema de 245.78 Mg.ha⁻¹. Oliva et al. (2017) encontraron que en un sistema silvopastoril, el suelo es el sumidero con mayor acumulación de carbono, seguido del componente arbóreo de *Pinus paula* con 92.13 Mg.ha⁻¹. La diferencia puede explicar que la edad del sistema en este trabajo, fue cinco años mayor a lo citado, además de disponer de mayor diversidad de especies forestales que proporcionan biomasa para su descomposición (Aguirre y Jiménez, 2019).

Sin embargo Acosta, Carrillo, y Díaz (2009), encontraron que el sumidero de mayor fijación es el suelo, seguido del componente arbóreo de oyamel y pino con 301.90 Mg.ha⁻¹. Según Espinoza et al. (2012) la eficiencia de fijación de carbono en sistemas agroforestales, supone la capacidad de raíces de cultivos agrícolas para la inmovilización del carbono y las condiciones climáticas propias de cada sitio.

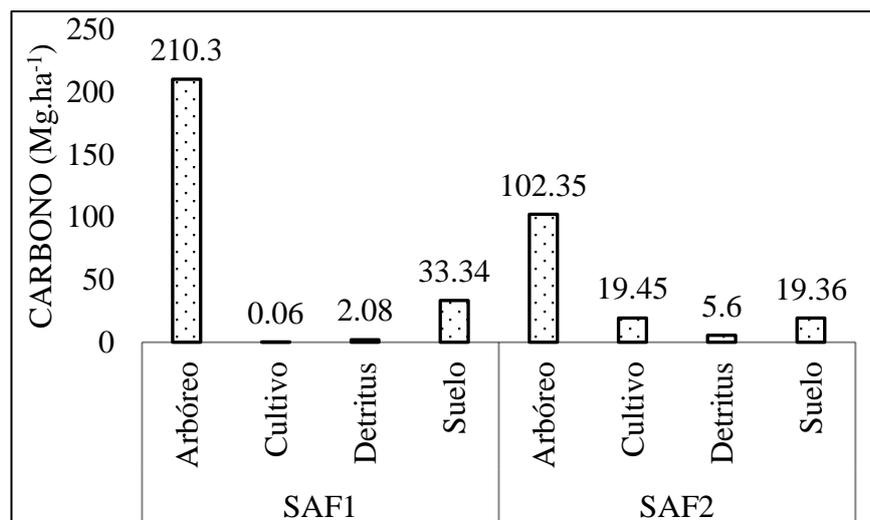


Figura 5 Carbono almacenado por componente

La tabla 10 indica que *Casuarina equisetifolia* obtuvo la menor fijación de carbono en los dos sistemas estudiados. Si se compara lo registrado en el SAF1 con lo descrito por Wang et al. (2013), con 55.90 Mg.ha⁻¹ a los 13 años, en el sureste de China. El valor registrado en el presente trabajo representa menos de la mitad al citado. A pesar de que la especie es considerada de rápido crecimiento y las condiciones de sitio son apropiadas (Mijangos et al., 2014), el limitado número de la muestra en esta investigación (un individuo), no fue representativo para comparar el potencial de fijación de carbono por unidad de superficie.

De la misma manera, Rodríguez, Ajete, Orta, Rondón y Rivera (2018) obtuvieron 29.28 Mg.ha⁻¹ de un arbolado urbano en Guantánamo. Mijangos et al. (2014) señalan que, *Casuarina equisetifolia* a pesar de tener gran adaptabilidad a diversos escenarios, las condiciones de sitio y sobre todo la alelopatía entre especies con el eucalipto pueden limitar y reducir el nivel de fijación de carbono (Rodríguez et al., 2018). Por lo cual se puede atribuir que el asocio entre especies y las condiciones edafoclimáticas en el SAF2, no fueron las recomendadas para la especie.

La cantidad de carbono fijado por *Pinus patula* fue superior entre las especies forestales del SAF1. Acosta, Carrillo y Díaz (2009) estimaron 89.10 Mg.ha⁻¹ para *Pinus patula* en asocio con *Quercus spp.*, en estado adulto. La fijación en el presente estudio fue superior, en vista de que la especie pudo desarrollar su máximo potencial (García et al., 2017).

En el SAF2, la fijación de carbono de *Pinus patula* fue baja. Según Oliva et al. (2017) encontraron que dicha especie asociada con herbáceas y arbustos, la fijación fue de 8.27 Mg.ha⁻¹ a los 10 años. Para Fonseca et al. (2013), la baja fijación de carbono en especies forestales, se debe a factores como la falta de lignificación por deficiencia de macro y micronutrientes en el suelo, además del desarrollo atrofiado radicular. Dicha mención permite explicar el por qué, del valor obtenido en el SAF2, ya que, al parecer, las condiciones del sitio en este caso, no fueron las más idóneas.

De igual forma, Álvarez (2016) calculó 54.03 y 50.60 Mg.ha⁻¹ de carbono en plantaciones de 12 y 10 años respectivamente, valores muy altos en comparación con el SAF2. En *Pinus patula* la fijación de carbono es acelerada durante la primera década, lo cual mantiene relación con la densidad que sencillamente será clave para la relación acumulación de biomasa y fijación del carbono (García et al., 2017). Sin embargo, en el presente trabajo el resultado obtenido no fue acorde a lo reportado en la literatura, pudiendo asumir que unos de los factores que limitó su capacidad de almacenamiento, fue el diseño del sistema, el tipo de suelo y la topografía Aguirre y Jiménez (2019), por lo cual se recomienda profundizar en estudios más detallados como el análisis del suelo, alelopatías, entre otras.

Pinus radiata ocupa el tercer lugar de fijación de carbono en el SAF1, sin embargo, en el SAF2 su aportación no fue significativa. Zanabria y Cuellar (2015) encontraron 112.39 Mg.ha⁻¹ para la especie de 30 años en asocio con pastos. Suelos con bajo contenido de materia orgánica y elevadas densidades entre árboles, repercuten en la relación biomasa-carbono por efectos de

asimilación nutricional que la especie demanda (Cargua et al., 2014), es por esto que además, se ha encontrado que la fijación de carbono es mayor cuando no existe la competencia con especies de rápido crecimiento (Zanabria y Cuellar, 2015). Cargua et al. (2014) determinó 14.69 Mg.ha⁻¹ de carbono en una plantación en estado de adultez de *Pinus radiata* sin manejo. Según el autor la cantidad de carbono obtenida disminuye por la demanda de grandes volúmenes de agua para su crecimiento. Lo obtenido en el SAF2 puede deberse a que las condiciones ambientales no fueron las más apropiadas para la especie, además de la edad en comparación con lo dicho por los autores.

Eucalyptus globulus fue la especie forestal que más fijación de carbono aporta al SAF2, presentando además un valor cercano a lo registrado por Gamarra (2001) de 73.03 Mg.ha⁻¹ en una plantación de 10 años a más de 3000 msnm. Cerruto, Boechat, Fehrmann, Goncales, y von Gadow (2015) registraron 63.70 Mg.ha⁻¹ en Brasil, cuyo valor se encuentra dentro del rango ideal en plantaciones de eucalipto. El eucalipto es una de las especies que mejor adaptabilidad tiene, con tendencia a acelerar su crecimiento en sistemas agroforestales (Viera y Rodríguez, 2019). Posiblemente las características de sitio en esta investigación fueron las más apropiadas, ya que se obtuvo mayor cantidad de carbono acumulado.

El carbono fijado por *Coffea arabica* no reflejó un aporte significativo en el SAF1. Segura y Andrade (2012) determinaron 1.60 Mg.ha⁻¹ en asocio con *Eucalyptus spp.* y *Cordia alliodora*. Orozco et al. (2012) menciona que el café aumenta la fijación de carbono y el rendimiento productivo, al asociarlo con especies forestales como *Inga spp.* y *Cordia alliodora*, las cuales brindan sombra con capacidad del 40% en adelante, ideal para *C. arabica*. Jezeer y Verweij (2015) ha encontrado cantidades importantes de carbono almacenado en cafetales establecidos en suelos con gran contenido de materia orgánica, bajo diferentes estratos. La edad y el diseño del sistema pudo atribuir la baja fijación de carbono en este estudio.

Pennisetum clandestinum fue una de las especies que mayor carbono fijado contribuyó en el SAF2, lo cual difiere a (Oliva et al., 2017) con 1.49 Mg.ha⁻¹; de igual forma (Orrala, 2007) con 3.65Mg.ha⁻¹ en *Panicum maximum*. La fijación de carbono en pastos depende del asocio entre especies, y el manejo que se le dé para obtener mayor producción de biomasa superficial y subterránea (Ramírez et al., 2015). La diferencia de edad, y el método de extracción de biomasa aérea y subterránea, permiten aclarar la cantidad de carbono almacenado en este trabajo.

El contenido de carbono de detritus en el SAF1 fue similar a lo obtenido por Oliva et al. (2017) quien determinó $2.00 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en un sistema silvopastoril con *Pinus patula*. La capacidad de acumulación de carbono en el detritus depende de la cantidad de material biológico disponible dentro del sistema agroforestal (Anguiano, Aguirre, y Palma, 2013). Esto puede explicar la mayor fijación de carbono en el SAF2, al existir un mayor suministro de material orgánico por el número de individuos arbóreos y la abundante maleza.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La tasa de acumulación del carbono aéreo del SAF1 fue mayor a la registrada en el SAF2. Si bien existe un mayor número de individuos en el segundo, esto no influyó para que sus valores sean superiores al primero. La diferencia de resultados puede explicarse a la mayoría de edad del componente forestal del SAF1 y el asocio con el café (*Coffea arabica*), lo cual contribuyó a que el crecimiento dasométrico de los árboles sea mejor.
- El componente forestal fue aquel que mayor cantidad de carbono fijado aporta a cada uno de los sistemas, en donde *Pinus patula* y *Eucalyptus globulus* son las especies que sobresalen en el SAF1 y SAF2 respectivamente.
- Las ecuaciones alométricas generadas en el presente estudio mostraron resultados satisfactorios al predecir la cantidad de carbono almacenado. Esto ratifica la efectividad de usar el DAP, HT y HC como variables regresoras en sistemas agrosilvopastoriles.
- La biomasa producto de la producción primaria del café es inferior a la registrada por los pastos. Pese a que las plantas de café muestran una mayor estructura y densidad, la distribución del pasto sobre el área hace que se almacene mayor cantidad de carbono.
- La biomasa de detritus del SAF2 fue mayor a la obtenida en el SAF1. La falta de un manejo silvícola de limpieza favoreció a la acumulación de biomasa desde su implementación, caso contrario que se evidencia en el SAF1, ya que existe una limpieza de la hojarasca y ramas arbóreas.
- El carbono almacenado en el suelo fue mayor en el sistema agroforestal. Esto se debe al gran aporte de materia orgánica proveniente del café.

5.2 Recomendaciones

- Los valores de carbono almacenado de los sistemas en estudio pueden ser empleados como información referencial para determinar la capacidad de fijación de dicho elemento en sistemas agroforestales y silvopastoriles en condiciones edafoclimáticas similares.

- Determinar la biomasa de raíces del componente arbóreo para disponer de información real que favorezcan, además, la construcción de modelos alométricos para el cálculo del carbono fijado.
- Establecer los mecanismos necesarios para la implementación del pago de servicios ambientales en el mercado de carbono, y aprovechar las capacidades socioeconómicas que los sistemas agroforestales pueden brindar a la carrera de Ingeniería Forestal de la UTN.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, M, Carrillo, F., & Díaz, M. (2009). DETERMINACIÓN DEL CARBONO TOTAL EN BOSQUES MIXTOS DE *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana*, 27, 105–114. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311834003.pdf>
- Acosta, Miguel, Vargas, J., Velázquez, A., & Etchevers, J. D. (2002). Estimacion del la biomasa aerea mediante el uso de relaciones alometricas en seis especies de arboreas en Oaxaca, Mexico [Estimation of aboveground biomass using allometric equations in six tree species in Oaxaca, Mexico]. *Agrociencia*, 36(06), 725–736. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30236610>
- Acosta, S. (1949). *El eucalipto en el Ecuador*. Retrieved from [http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/20449/1/13631 El eucalipto en el Ecuador.pdf](http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/20449/1/13631%20El%20eucalipto%20en%20el%20Ecuador.pdf)
- Aguirre, O. A., & Jiménez, J. (2019). Evaluación Del Contenido De Carbono En Bosques Del Sur De Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(6), 73–84. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i6.575>
- Alvarez, G. (2008). *Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba , Bolivia*. 1–89. Retrieved from http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/4357/Modelos_alometricos_para_la_estimacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Álvarez, J., Balboa, M., Merino, A., & Rodríguez, R. (2005). Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. *Recursos Rurais*, 1(1), 21–30. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3178817.pdf>
- Álvarez, M. (2016). *CAPTURA DE CARBONO EN PLANTACIONES DE Pinus patula Schltdl. et Cham EN TONALACO, VERACRUZ*. Retrieved from <https://www.uv.mx/mcef/files/2018/04/CAPTURA-DE-C-EN-PLANTACIONES-DE-P.-Patula-EN-TONALACO.pdf>
- Amestoy Alonso, J. (2010). *El Planeta Tierra en peligro : calentamiento global, cambio climático, soluciones*. Retrieved from

<https://books.google.com.ec/books?id=A6vXg35c8LIC&printsec=frontcover&dq=Comportamiento+Global+Cambio+Climático+Solución+AMESTOY+JOSE+ALONSO+2010&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjhh4y4wdbiAhWGnFkKHbtUCKMQ6AEILDAB#v=onepage&q=Comportamiento Global Cambio Climático S>

Andrade, H. J., & Ibrahim, M. (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería En Las Américas*, 10(39–40), 109–116.

Anguiano, J. M., Aguirre, J., & Palma, J. M. (2013). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de un sistema agrosilvopastoril de Cocos nucifera , *Leucaena leucocephala* Var. *Avances En Investigacion Agropecuaria*, 17(1), 149–160. Retrieved from Secuestro de carbono en la biomasa aérea%0Ade un sistema agrosilvopastoril de Cocos

Arteaga, B., & Castelán, M. (2008). Evaluación dasométrica temprana de una plantación agroforestal de tres especies introducidas, en el Municipio de Huehuetla, Hidalgo. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 14(2), 105–111. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/rcscfa/v14n2/v14n2a5.pdf>

Asamblea Constituyente Ecuador. (2008). Constitución del Ecuador. *Registro Oficial*, (20 de Octubre), 173. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Asamblea Nacional del Ecuador. (2018). *Código Orgánico del Medio Ambiente*. 1–92. Retrieved from www.lexis.com.ec

Ballester, A., Arias, A. M., Cobián, B., López, E., & Vieitez, E. (1982). *Estudio de potenciales alelopáticos originados por Eucalyptus globulus Labill., Pinus pinaster Ait. y Pinus radiata* D. 12(1), 239–254. Retrieved from <http://polired.upm.es/index.php/pastos/article/viewFile/818/831>

Barquero, D., Ramírez, D., Araya, A., & Villalobos, M. (2014). Efectos inhibidores de crecimiento producidos por el ciprés, *Cupressus lusitanica* (Cupressaceae), en el Bosque de La Hoja, Costa Rica. *UNED Research Journal*, 6 (1), 35–42. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=515651795004>

Barreto, L. H., & León, J. D. (2005). MASA TOTAL Y CONTENIDO DE NUTRIENTES EN RAÍCES FINAS DE ECOSISTEMAS FORESTALES (*Pinus patula* Schldl y *Cham Cupressus lusitanica* Mill y *Quercus humboldtii* Bonpl.) DE PIEDRAS BLANCAS,

ANTIOQUIA-COLOMBIA TOTAL FINE ROOT MASS AND NUTRIENT CONTENT
IN FOREST E. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 58(2), 2007–2930.

- Barros, V. (2007). *El cambio climático global: ¿Cuántas catástrofes antes de actuar?*
Retrieved from <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=hxIjOfHB11oC&oi=fnd&pg=PA7&dq=cambio+global+y+glaciares&ots=L4GvnpIjTW&sig=BT2qyYR4-AUOw3ITJThHLrTA53E#v=onepage&q=alpinos&f=false>
- Barton, J. R. (2009). *Adaptación al cambio climático en la planificación de ciudades-regiones 1* (Vol. 43). Retrieved from <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rgeong/n43/art01.pdf>
- Bektaş, I., & Kurt, R. (2010). Principal mechanical properties of cypress wood (*Cupressus Sempervirens* L.) naturally grown in (Kahramanmaraş) Eastern Mediterranean of Turkey. *Gazi University Journal of Science*, 23(3), 357–362. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/279582200_Principal_Mechanical_Properties_of_Cypress_Wood_Cupressus_Sempervirens_L_Naturally_Grown_in_Kahramanmaras_Eastern_Mediterranean_of_Turkey
- Benavides, A. (2013). *Evaluación de los Sistemas Agroforestales para la Elaboración de un Plan de Manejo y Aprovechamiento Sustentable de los Recursos en el Ceypsa, parroquia Eloy Alfaro, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi.*
- Benavides, H. O., & León, G. E. (2007). Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. *Ideam*, 1–102. <https://doi.org/IDEAM-METEO/008-2007>
- Benjamín, J. A., & Masera, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. In *Madera y Bosques* (Vol. 7). Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/617/61770102.pdf>
- Borrero, J. C. (2014). *Biomasa aérea y contenido de carbono en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá.* Retrieved from <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/8987>
- Botero, J. (2011). *Contribución de los sistemas ganaderos tropicales al secuestro de Carbono.* Retrieved from <http://www.fao.org/3/Y4435S/y4435s07.htm>

- Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2007). *Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra*. Vol.8, 1–12. Retrieved from <http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/int78.htm>
- Cadena, S. A., & Enriquez, M. G. (2013). *EFECTO DE Azolla sp., EN LA PRODUCTIVIDAD Y MEJORAMIENTO DEL SUELO EN LA GRANJA EXPERIMENTAL YUYUCOCHA, IMBABURA*. Retrieved from http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/2068/1/03_RNR_164_TESIS.pdf
- Cai, S., Kang, X., & Zhang, L. (2013). Allometric models for aboveground biomass of ten tree species in northeast China. *Annals of Forest Research*, 56(1), 105–122. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/26771385.pdf>
- Capa, D. (2015). *Efecto de la fertilización orgánica y mineral en las propiedades del suelo, la emisión de los principales gases de efecto invernadero y en las diferentes fases fenológicas del cultivo de café (Coffea arabica L.)*. Retrieved from <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/2069/1/T-SENESCYT-01190.pdf>
- Cargua, F. E., Rodríguez, M. V, Recalde, C. G., & Vinueza, L. M. (2014). Cuantificación del Contenido de Carbono en una Plantación de Pino Insigne (*Pinus radiata*) y en Estrato de Páramo de Ozogoché Bajo, Parque Nacional Sangay, Ecuador. *Informacion Tecnologica*, 25(3), 83–92. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000300011>
- Carrilo, F., Acosta, M., Jiménez, C., Gonzales, L., & Etchevers, J. (2016). *Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de Pinus hartwegii en el Parque Nacional Ixta-Popo, México * Allometric equations for estimating biomass and carbon from the aerial part of Pinus hartwegii in Ixta-Popo National Park*. 7, 681–691. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7n3/2007-0934-remexca-7-03-681-en.pdf>
- CATIE. (1991). *Casuariana equisetifolia, especie de árbol de uso múltiple en América Central*. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=CVRryvzoy3QC&pg=PR2&lpg=PR2&dq=CASUARINA+EQUISETIFOLIA++CATIE&source=bl&ots=q2xJD5D4wa&sig=ACfU3U375T->

nXMPi7PgYt_RjvMN1UMKIPg&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjsgOey_8zlAhVSx1kKHXJcAS0Q6AEwCHoECAkQAQ#v=onepage&q=CASUARINA EQUISET

- Cerruto, S., Boechat, C., Fehrmann, L., Goncales, L., & von Gadow, K. (2015). ABOVEGROUND AND BELOWGROUND BIOMASS AND CARBON ESTIMATES FOR CLONAL EUCALYPTUS TREES IN SOUTHEAST BRAZIL. *Árvore*, 39(1), 353–363. Retrieved from <http://www.scielo.br/pdf/rarv/v39n2/0100-6762-rarv-39-02-0353.pdf>
- Chavarro Pinzón, M., Corradi, C., García Guerrero, A., Lara Henao, W., Perugini, L., & Ulloa, A. (2007). *Sembrando Bosques, opciones frente al cambio climático global. Mecanismo de desarrollo limpio-forestal*. UNODC-UNAL-MAVDT-UNITUS. Carbono & Bosques. Bogotá. Colchester, M. 2001
- Chivelet, J. M. (2010). Carbon Cycle and Climate : the geological perspective Fundamentos Conceptuales y didácticos. *Enseñanza de Las Ciencias*, 2010, 33–46. Retrieved from <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/download/200083/267542>
- Chowdhury, M. Q., Ishiguri, F., Iizuka, K., Takashima, Y., Matsumoto, K., Hiraiwa, T., ... Yoshizawa, N. (2009). Radial variations of wood properties in *Casuarina equisetifolia* growing in Bangladesh. *Journal of Wood Science*, 55(2), 139–143. <https://doi.org/10.1007/s10086-008-1004-2>
- CONANP. (2013). *Ficha de identificación Casuarina equisetifolia*. Retrieved from <http://www.conanp.gob.mx/conanp/dominios/especies/pdf/playero.pdf>
- Concha, J. Y., Alegre, J. C., & Pocomucha, V. (2007). DETERMINATION OF CARBON RESERVATIONS IN THE AERIAL BIOMASS OF AGROFORESTRY SYSTEMS OF *Theobroma cacao* L . IN THE DEPARTMENT OF SAN MARTÍN , PERU. *Ecología Aplicada*, 6, 75–82.
- Córdova, M. E., & Carreño, F. S. (2016). Crecimiento de posturas de cafeto (*Coffea arabica* L .) con cuatro niveles de sombra en dos condiciones edafoclimáticas de Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 37(2), 72–78. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4335.7681>
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, (CORPOICA). (2013). *Pennisetum clandestinum* (Kikuyo). *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(4), 2013.

Retrieved from https://www.doc-developpement-durable.org/file/Fertilisation-des-Terres-et-des-Sols/eaux-et-sols-salins/plantes-pour-sols-salins/Pennisetum-clandestinum/Pennisetum-clandestinum_Kikuyo_Colombia.pdf

Díaz, G. (2012). CIENCIA Y SOCIEDAD Volumen XXXVII, Número 2 Abril-Junio 2012 EL CAMBIO CLIMÁTICO. In *Ciencia y Sociedad*. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/870/87024179004.pdf>

Douterlungne, D., Herrera, A. M., Ferguson, B. G., Siddique, I., & Soto, L. (2013). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono de cuatro especies leñosas neotropicales con potencial para la restauración [Allometric equations to estimate biomass and carbon in four neotropical wood species with potential for restoration]. *Agrociencia*, 47(4), 385–397.

Echeverri, C. (2006). Estimación de la emisión de gases de efecto invernadero en el municipio de Montería (Cordoba, Colombia). *Revista Ingenierías Universidad de Medellin*, 5(9), 85–96. <https://doi.org/1692-3324>

Elzaki, O., & Khider, T. (2013). Physical and Mechanical Properties of Cupressus lusitanica as a Potential Timber Tree for Sudan. *Journal of Forest Products & Industries*, 2(1), 43–46. Retrieved from https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/32076185/vol2-no1-6.pdf?response-content-disposition=inline%3Bfilename%3DPhysical_and_Mechanical_Properties_of_Cu.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20190910%2Fus

Escalona, P., Aldrete, A., Guerrero, A. G., González, A. M. F., Cetina-alcalá, V. M., & Vaquera, H. (2007). ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LA BIOMASA AÉREA DE UNA PLANTACIÓN JOVEN DE PINUS GREGGII Engelm. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 30(3), 251. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/610/61003006.pdf>

Espina, A. I. (2006). Densidad básica de la madera de Eucalyptus globulus en dos sitios en Chile. Retrieved from <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/fife.77d/sources/fife.77d.pdf>

Espinoza, R. (2014). *Efectos de dos tratamientos pregerminativos y tres niveles diferentes de sustratos en la germinación de pino (Pinus radiata D. Don.)*. Retrieved from

<http://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/5280>

- Espinoza, W., Krishnamurthy, L., & Torres, A. (2012). *Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café*. 18(1), 57–70. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.04.030>
- FAO. (2011). SERVICIOS AMBIENTALES. In *Unasyuva*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/i2015s/i2015s04.pdf>
- FAO. (2015). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015*. Retrieved from www.fao.org/forest-resources-assessment/es
- FAO. (2017). *Liberación del potencial del carbono orgánico del suelo - Documento de resultados*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/b-i7268s.pdf>
- FAO. (2019). Visión general | REDD+ Reducción de las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación de los bosques | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Retrieved June 13, 2019, from <http://www.fao.org/redd/overview/es/>
- Farfán, F., & Urrego, J. B. (2004). Comportamiento de las especies forestales *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis* como sombrío e influencia en la productividad del café. *Cenicafé*, 55(4), 317–329. Retrieved from [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc055\(04\)317-329.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc055(04)317-329.pdf)
- Fernández, M. (2017). *REVISIÓN DE MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO ALMACENADAS EN BOSQUES NATURALES*. Retrieved from <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/16394/Fen%E1ndezLosadaMagdaYolima2017.pdf;jsessionid=E3890C67CB348FA321CDD5E9409680DD?sequence=3>
- Ferrere, P., Lupi, A., & Boca, T. (2015). Crecimiento del *Pinus Radiata* sometido a diferentes tratamientos de raleo y poda en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Bosque*, 36(3), 423–434. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000300009>
- Flores, E., Etchevers-Barra, J. D., Carrillo-Anzures, F., Díaz-Franco, R., Buendía-Rodríguez, E., & Acosta-Mireles, M. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25–34.

<https://doi.org/10.21829/myb.2007.1311233>

- Flores, P., López, M. Á., Ángeles, G., De la Isla, M. D. L., & Calva, G. (2019). MODELOS PARA ESTIMACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE BIOMASA DE *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. EN PROCESO DE DECLINACIÓN. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(8), 9–20. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i8.543>
- Fonseca, W., Ruíz, L., Rojas, M., & Alice, F. (2013). Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*. *Revista de Ciencias Ambientales*, 46(46), 37–50. <https://doi.org/10.15359/rca.46-2.4>
- Galicia, L., María, A., Cáceres, G., Cram, S., Vergara, B. C., Ramírez, V. P., & Saynes, V. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1–20. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n1/2395-8030-tl-34-01-00001.pdf>
- Gallegos, M. (2012). Análisis del mercado de carbono en Ecuador. *Observatorio de Economía Ecuatoriana*, 1(70), 50. Retrieved from <http://www.eumed.net/cursecon/ecolat/ec/2012/magg.html>
- Gamarra, J. (2001). *Estimación del contenido de carbono en plantaciones de Eucalyptus globulus Labill, en Junin, Perú*. 1–21.
- García, Á., Velasco, V., Rodríguez, G., & Enríquez, J. (2017). Influencia de la calidad de sitio sobre el crecimiento de una plantación de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(44), 1–23.
- García, W., De Los Santos, H., Ángeles, G., Valdez, J., Corral, J., Rodríguez, G., & García, E. (2015). Modelos de crecimiento y rendimiento de totalidad del rodal para *Pinus patula*. Retrieved from <http://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/459/639>
- Geldres, E., & Schlatter, J. E. (2004). Crecimiento de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* sobre suelos rojo arcillosos de la provincia de Osorno, Décima Región. *Bosque (Valdivia)*, 25(1), 95–101. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002004000100008>
- Goche, J. R., Velázquez, A., Borja, A., Capulín, J., & Palacios, C. (2011). VARIACIÓN RADIAL DE LA DENSIDAD BÁSICA EN *Pinus patula* Schltdl. et Cham. DE TRES

- LOCALIDADES EN HIDALGO. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(7), 71–78.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i7.568>
- Gómez, J. D., Etchevers, J. D., Monterrosos, A. I., Campo, J., & Tinoco, J. A. (2011). ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMAR BIOMASA Y CARBONO EN *Quercus magnoliaefolia*. *REVISTA CHAPINGO SERIE CIENCIAS FORESTALES Y DEL AMBIENTE*, XVII(2), 261–272. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.11.117>
- Goya, J., Frangi, J., & Dalla, F. (1997). Relación entre biomasa aérea, área foliar y tipos de suelos en plantaciones de *Eucalyptus grandis* del NE de Entre Ríos, Argentina. *Revista de La Facultad de Agronomía*, 102(1), 11–21.
- Guaña, L. J. (2014). *Producción del kikuyo (Pennisetum clandestinum Hochst) con dos alturas de corte, cinco niveles de fertilización nitrogenada y en mezcla con trébol blanco (Trifolium repens L)*. Retrieved from <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/2485/1/T-UCE-0004-58.pdf>
- Haggar, J., Pavón, G., Madriz, J. D. C., Moraga, P., & Blanco, M. (2014). Morfología del café (*Coffea arabica* L.), en lotes comerciales . Nicaragua. *Agronomía Mesoamericana*, 14(1), 97. <https://doi.org/10.15517/am.v14i1.11996>
- Herguedas, A., Taranco, C., Rodríguez, E., & Paniagua, P. (2012). Biomasa, Biocombustibles Y Sostenibilidad. *Transbioma*, 13(2), 105–109. Retrieved from [http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C Biocombustibles y Sostenibilidad.pdf](http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf)
- Honorio, E. N., & Baker, T. R. (2010). *Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos*. Retrieved from [http://www.rainfor.org/upload/ManualsSpanish/Honorio_Baker2010 Manual carbono.pdf](http://www.rainfor.org/upload/ManualsSpanish/Honorio_Baker2010%20Manual%20carbono.pdf)
- Instituto Nacional de Bosques, (INAB). (2017). *Ciprés común Cupressus lusitanica Miller*. Retrieved from <http://www.canadaplants.ca/display.php?id=4530;Scamperdale,2009.18dejuniode2016> <https://www.flickr.com/photos/36517976@N06/4945590629/;KiddP.2010.18dejuniode2015> <https://www.flickr.com/photos/paulkidd/172204730/2017>

- Integrated Taxonomic Information System, (IThis). (n.d.). *Casuarina equisetifolia* L. Retrieved from https://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search_topic=TSN&search_value=19516#null
- IPCC. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. *IPCC*.
- IPCC. (2014). El Quinto Reporte de Evaluación del IPCC ¿Qué implica para Latinoamérica? *Alianza Clima y Desarrollo*, 40. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0027964> [PONE-D-11-08163 [pii]]
- IPCC. (2015). *Cambio climático 2014 Equipo principal de redacción Equipo principal de redacción Unidad de apoyo técnico para el Informe de síntesis*. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- Ipinza, R., & Barros, S. (2011). *El cambio climático, los bosques y la silvicultura*. (January). Retrieved from <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26346/cambioclimaticov5.pdf?sequence=1>
- Jara, F. (2003). Evaluación de tres especies forrajeras nativas bajo una plantación de pino (*Pinus radiata* D. Don) en El Toldo provincia de Chimborazo. Retrieved June 26, 2019, from <https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=p4gzAQAAMAAJ&oi=fnd&pg=PP9&dq=pinus+radiata+INIAP&ots=xH9FhPEeWS&sig=asUyF0IZXjdpcljgclDbS9r5BOg#v=onepage&q=pinus+radiata+INIAP&f=false>
- Jezeer, R., & Verweij, P. A. (2015). *Café en sistemas agroforestales - Doble dividendo para la biodiversidad y los pequeños agricultores en Perú*. (November 2017), 1–58. Retrieved from <file:///E:/JezeerVerweij2015Cafensistemasagroforestales-DobledividendoparalabiodiversidadylospequeosagricultoresenPer.pdf>
- Jimeno, C. L., Burgos, J. I., & Fernandez, P. A. G. (2002). Biomasa, El recorrido de la energía. Retrieved June 18, 2019, from FENERCOM website: <https://www.fenercom.com/pdf/aula/recorrido-de-la-energia-biomasa.pdf>

- Kindo, A. I., Edward, E., Mndolwa, M. A., & Chamshama, S. A. (2014). Survival, growth, wood basic density and wood biomass of seven-year-old *Casuarina* species/provenances grown at Kongowe, Kibaha, Tanzania. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 76(2), 85–92. <https://doi.org/10.2989/20702620.2014.915370>
- Kramer, F. (2003). *Educación ambiental para el desarrollo sostenible*. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=2zwM-A7buDIC&pg=PA63&dq=carbono+devuelto+a+la+atmosfera&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwinsMCQm4rjAhUGuVkKHxo7CI4Q6AEIKDAA#v=onepage&q=carbono+devuelto+a+la+atmosfera&f=false>
- 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, PERU. *Ecología Aplicada*, 3(12).
- Lastra, J., Carmona, M., & Mendoza, S. (2008). *Ra Ximhai Universidad Autónoma Indígena de México TENDENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL Y LOS EVENTOS EXTREMOS ASOCIADOS*. Retrieved from <http://uaim.edu.mx/webraximhai/Ej-12articulosPDF/6-Dr Santiago UNICH.pdf>
- Lohmann, L. (2012). Mercados de carbono. *Temas de Management*. Retrieved from <http://www.carbontradewatch.org/downloads/publications/Mercados-de-carbono-FINAL.pdf>
- MAE. (2012). *Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador 2012-2025*. Retrieved from <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu140074.pdf>
- MAE. (2016). *Plan de Acción REDD+ del Ecuador “Bosques para el Buen Vivir” (2016-2025)* (Vol. 6). Retrieved from http://suia.ambiente.gob.ec/documents/10179/185860/MAE_2016_11_21+ART+LIBRO+REDD+17+nov+2016.pdf/e282f00c-37b2-4183-8349-54ecc9837bc8
- Magrin, G. (2015). Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe. *Repositorio Comisión Económica Para América Latina y El Caribe (CEPAL)*, 15, 80. Retrieved from <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/39842%0Ahttp://www.cepal.org/es/publicaciones/39842-adaptacion-al-cambio-climatico-america-latina-caribe>

- Mancheno, A. C. (2011). Análisis de los impactos en la calidad del suelo causados por el pino (*Pinus patula*) en comparación con el suelo ocupado por *polylepis* (*Polylepis reticulata*) en el Parque Nacional Cajas. Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1086/15/UPS-CT002204.pdf>
- Marín, G., Pereira, C., Maycotte, C., Restrepo, B., Francesco, M., Montes, A., & Velarde, M. (2011). *SISTEMAS AGROFORESTALES*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Martínez, J., & Fernández, A. (2004). *Cambio climático: una visión desde México*. Retrieved from <https://ens9004-mza.infed.edu.ar/sitio/upload/3-MARTINEZ & FERNANDEZ - LIBRO - Cambio Clim%Eltico - Una visi%F3n desde M%E9xico.pdf#page=75>
- Martínez, S. (2009). Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña. *Universidad de Girona, GI-910(4)*, 285. Retrieved from <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/7920/tsml1de1.pdf?sequence=3>
- Méndez, J., Luckie, S. L., Capó, M. A., & Nájera, J. A. (2011). Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., En Guanajuato, México. *Agrociencia*, 45(4), 479–491.
- Mendieta, M., & Rocha, L. (2007). *Sistemas Agroforestales*. 1–117. Retrieved from <http://infobosques.com/descargas/biblioteca/465.pdf>
- Meneses, O. (2011). *IDENTIFICACIÓN DE USOS PROBABLES DE Pinus patula Schlect.et Cham. CON BASE EN LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y DE TRABAJABILIDAD DE LA MADERA EN ILTAQUI- COTACACHI-IMBABURA*. Retrieved from <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/1982/1/03TESIS192.pdf>
- Merino Barrios, A., Brañas Lasala, J., Rey, C., & Rodríguez Soalleiro, R. (2003). Biomasa arbórea y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D.Don en Galicia. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 12(2), 85–98. <https://doi.org/10.5424/803>
- Merino, P. (2015). *EVALUACIÓN DE UNA TÉCNICA DE PROPAGACIÓN ASEXUAL CON*

ESQUEJES APICALES DEL CIPRÉS LIMÓN (Cupressus macrocarpa) Var. Gold crest.

- Mijangos, A. I., Rojas, F., & Benavides, H. (2014). Estimación del contenido y captura de carbono en la biomasa arbórea del bosque de San Juan de Aragón, Distrito Federal. *Estado Actual Del Conocimiento Del Ciclo Del Carbono y Sus Interacciones En México: Síntesis a 2014*, (May 2014), 165–171.
- Molina, L., & Lopez, O. (1998). *Desarrollo Agroforestal En El Piedemonte Caqueteno* (p. 104). p. 104. Retrieved from [http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2476/Technical/pd172-91-p2-6_rev2_\(F\)s_Desarrollo_Agroforestal_S.pdf](http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2476/Technical/pd172-91-p2-6_rev2_(F)s_Desarrollo_Agroforestal_S.pdf)
- Monteoliva, S., Barotto, A., & Fernández, M. (2015). Anatomía y densidad de la madera en Eucalyptus: variación interespecífica e implicancia en la resistencia al estrés abiótico. *Revista de La Facultad de Agronomía*, 114(2), 209–217. Retrieved from https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/62448/CONICET_Digital_Nro.fab4fda3-902d-4f2f-91ed-097e47eb2381_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Montes, J. (2001). *Medio ambiente y desarrollo sostenido*. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=wbig4qCRQZAC&pg=PA100&dq=gases+de+efecto+invernadero+radiación+infrarroja&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjD8qP6mIrjAhXEtlkKHXL0B1oQ6AEILzAB#v=onepage&q=gases+de+efecto+invernadero+radiación+infrarroja&f=false>
- Morales, S. (1973). ZONIFICACIÓN ECOLÓGICA DE Gmelina arborea Robx. y Eucalyptus globulus Labill. PARA PERÚ. Retrieved June 26, 2019, from <https://books.google.com.ec/books?id=OeENAQAIAAJ&pg=PR13&dq=eucalyptus+globulus+labill&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjn0Zf8vIjjAhUIzlkKHdw1BT0Q6AEIMD AC#v=onepage&q=eucalyptus+globulus+labill&f=false>
- Novillo, M. G. (2013). *Evaluación de las reservas de carbono y nitrógeno a lo largo de un gradiente altitudinal en un área forestal al sur de los Andes ecuatorianos*. Retrieved from http://dSPACE.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/14713/1/Novillo_Navarro_Manuel_Geovanny.pdf
- Oliva, M., Culqui, L., Leiva, S., Collazos, R., Salas, R., Vásquez, H., & Maicelo, J. L. (2017).

Reserve of carbon in a silvopastoral system composed of *Pinus patula* and native herbaceous. *Scientia Agropecuaria*, 8(2), 149–157. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.02.07>

Olivo, M., & Soto, A. (2010). Comportamiento de los gases de efecto invernadero y las temperaturas atmosféricas con sus escenarios de incremento potencial. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 15(57), 221–230. Retrieved from http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S1316-48212010000400002&script=sci_arttext

ONU. (1998). *PROTOCOLO DE KYOTO DE LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO*. Retrieved from <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>

Orozco, G. V., Mercedes, C., Espinosa, O., Carlos, J., Salazar, S., Fabián, C., & Pantoja, L. (2012). *Carbon storage in agroforestry arrangements associated with coffee (Coffea arabica) in the south of Colombia*. 213–221.

Orozco, L., Brumér, C., & Quirós, D. (2006). Aprovechamiento de impacto reducido en Bosques Latifoliados Húmedos Tropicales. In *Catie* (Vol. 2). Retrieved from file:///E:/Aprovechamiento_de_impacto_reducido.pdf

Orrala, R. E. (2007). *Almacenamiento de carbono en dos Sistemas Silvopastoriles instalados en Quevedo Provincia de Los Ríos*. Retrieved from <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/93857/D-65420.pdf>

Ospina, C. M., Hernández, R. J., Ocampo, E. A., Sánchez, F. A., Urrego, J. B., Rodas, C. A., ... Herrera, N. M. (2011). Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina Colombiana El pino pátula. In *Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina colombiana*. Retrieved from <https://www.cenicafe.org/es/publications/pinus.pdf>

Palma, A. L. (n.d.). *Casuarina equisetifolia (pino australiano)*.

Pardos, J. A. (2010). *Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global*. Retrieved from <http://www.060.es>

- Paredes, L., Portillo, A. M., Antonia, M., Dupuy, G., Leufrido, Y., & Valdés, Y. (2004). RESULTADOS DEL RENDIMIENTO DE BIOMASA DE CASUARINA EUISETIFOLIA FORST. EN CUATRO CONDICIONES EDAFOCLIMÁTICAS. In *Revista Forestal Baracoa*. Retrieved from http://www.actaf.co.cu/revistas/rev_forestal/Baracoa-2004-1/FAO12004/RESULTADOS DEL RENDIMIENTO DE BIOMASA.pdf
- Parrotta, J. (n.d.). Casuarinaceae Casuarina , pino australiano Familia de las casuarinas. *Africa*, 107–117. Retrieved from file:///E:/Casuarinaequisetifolia (9).pdf
- Peralta, A. (2007). *Efecto del tipo de envase en la calidad y costo de producción de Pinus patula Schiede ex Schlechtendal & Chamisso var. patula en Vivero* (Vol. 1). Retrieved from <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/576/Efecto del tipo de envase calidad y costo pinus patula.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Picard, N., Saint, L., & Henry, M. (2012). Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles. In *Cirad - FAO*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/i3058s/i3058s.pdf>
- Pino, S. P., & Cavieres, C. V. (2012). *Efecto ambiental del derretimiento del Ártico y su impacto en el turismo*. 1–9. Retrieved from <http://riat.utralca.cl/index.php/test/article/viewFile/ISSN 0717-235X/pdf>
- Pomacahua, G. A. (2011). *Descripción dendrológica y germinativa del ciprés (Cupressus macrocarpa Hartweg) en tres tratamientos en la comunidad de Puerto Acosta, Provincia Camacho*. Retrieved from <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/10019/T-1495.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Portilla, A., Andrade, A., & Défaz, S. (2014). *Reporte de la Huella Ecológica del Ecuador* (pp. 1–72). pp. 1–72. Retrieved from http://huella-ecologica.ambiente.gob.ec/files/Reporte_de_la_Huella_Ecológica_del_Ecuador_2008-2011.pdf
- Pruna, V. (2014). *EL EUCALIPTO ALTERNATIVA POCO ECOLÓGICA DE*

REFORESTACIÓN EN LA ZONA ORIENTAL DE SALCEDO (Vol. 3).
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2009.01.043>

- Ramírez, J., Sandra Posada, O., & Noguera, R. (2015). Effects of Kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*) age and different forage: Concentrate ratios on methanogenesis. *Revista MVZ Cordoba*, 20(3), 4726–4738.
- Renobales, G., & Sallés, J. (2001). *Eucalyptus globulus: morfología y ecología*. Retrieved from <https://www.ehu.es/documents/1686888/3913390/26.+Eucalyptus+globulus.pdf>
- Rey, C., Brañas, J., Rodríguez, R., & Merino, A. (2001). *Biomasa y acumulación de nutrientes en plantaciones de Pinus radiata D. Don del norte de España*. 1–4.
- Rodríguez, Y., Ajete, A., Orta, S., Rondón, D. N., & Rivera, J. R. (2018). Comportamiento del carbono retenido en el arbolado urbano en el sur de la ciudad de Guantánamo. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 6(3), 284–299. Retrieved from <http://scielo.sld.cu/pdf/cfp/v6n3/2310-3469-cfp-6-03-284.pdf>
- Rojas, M. (2014). Carbono almacenado en plantaciones forestales de *Pinus caribaea*, *Cupressus lusitanica* y *Eucalyptus deglupta* en el Proyecto Hidroeléctrico Cachí. *Revista de Ciencias Ambientales*, 0(47), 5–15. <https://doi.org/10.15359/rca.47-1.1>
- Romo, D., Navarro, H., De Los Santos, H., Hernández, O., & López, J. (2014). CRECIMIENTO MADERABLE Y BIOMASA AÉREA EN PLANTACIONES JÓVENES DE *Pinus patula* Schiede ex Schltdl . et Cham . EN ZACUALPAN , VERACRUZ. *Rev. Mex. Cien. For*, 5, 79–91. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v5n23/v5n23a7.pdf>
- Rügnitz, M., Chacón, M., & Poro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. 233.
- Ruíz, C., Rogríguez, G., Leyva, J., & Enríquez, J. (2014). Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México. Methodologies for estimating biomass and carbon in forest species from Mexico. *NATURALEZA Y DESARROLLO*, 12(1). Retrieved from https://www.ciidiroaxaca.ipn.mx/revista/sites/www.ciidiroaxaca.ipn.mx.revista/files/pdf/vol12num1/nyd_vol12_num1_2014_art3.pdf

- Salazar, A. N. (2016). *Determinación del cambio de la distribución altitudinal del kikuyo (*Pennisetum clandestinum* L), como posible indicador biológico del cambio climático*. Retrieved from [http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/11386/DETERMINACIÓN DEL CAMBIO DE LA DISTRIBUCIÓN ALTITUDINAL DEL KIKUYO%28PENNISETUM CLANDESTINUM%29%2C COMO.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/11386/DETERMINACIÓN_DEL_CAMBIO_DE_LA_DISTRIBUCIÓN_ALTITUDINAL_DEL_KIKUYO%28PENNISETUM_CLANDESTINUM%29%2C_COMO.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Sánchez-olate, M., Zapata, J., Sáez, P., & Ríos, D. (2008). *Competencia morfogénica de embriones maduros de *Pinus radiata* cultivados invitro y su relación con la posición del cono en el árbol*. 29(3), 212–216.
- Sánchez, R., Ramos, R., Geissen, V., Mendoza, J., de la Cruz, E., Salcedo, E., & Palma, D. (2011). Carbon Content in Soils with Several Farming Uses in the Mexican Tropic. *Redalyc*, 29, 211–219. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57321257011>
- Sandoval Estrada, M., Lau, N. S., Venegas, E. Z., Flores, M. M., Julio, Y., & Montano, J. (2003). El secuestro de carbono en la agricultura y su importancia con el calentamiento global. *Theoria*, 12, 65–71. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/299/29901206.pdf>
- Saugier, B., & Pontailier, J. Y. (2006). El ciclo global del carbono y sus consecuencias en la fotosíntesis en el Altiplano boliviano. *Ecología En Bolivia*, 41(3), 71–85. Retrieved from http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282006001200006&lang=pt%5Cnhttp://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v41n3/v41n3a06.pdf
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, (SENPLADES). (2017). *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021-Toda una Vida*. 84. Retrieved from http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/PNBV-26-OCT-FINAL_0K.compressed1.pdf
- Segura, M., & Andrade, H. (2008). Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?. How to develop biomass models of woody perennials species. *Agroforestería En Las Américas (CATIE)*. 2008, 89–96. Retrieved

from <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A3127e/A3127e.pdf>

Segura, M., & Andrade, H. (2012). HUELLA DE CARBONO EN CADENAS PRODUCTIVAS DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) CON DIFERENTES ESTÁNDARES DE CERTIFICACIÓN EN COSTA RICA. *Luna Azul*, (35), 60–77. <https://doi.org/10.17151/luaz.2012.35.5>

Somerville, A. (1993). Growth and utilisation of young *Cupressus macrocarpa*. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 23(2), 163–178. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.708.8016&rep=rep1&type=pdf>

Sotomayor, I., & Duicela, L. (1993). *Manual del Cultivo del café*. Retrieved from [file:///E:/Manual del cultivo de cafe.pdf](file:///E:/Manual%20del%20cultivo%20de%20cafe.pdf)

Tarupí, J. A. (2016). *Proyecto de factibilidad para la exportación de café arábigo desde Guayaquil Ecuador hacia Santiago de Chile en el periodo de 2010-2019*. Retrieved from http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/8087/1/44472_1.pdf

UICN. (2009). *REDD-plus y la distribución de los beneficios*. Retrieved from <http://cmsdata>.

UICN. (2011). Ciencia y Conservación. Medidas de adaptación frente al cambio climático en la cuenca del Río Santa. In *Trofeo Pesca*. Retrieved from <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2011-089.pdf>

Users, J. (2013). Climate Change : Causes and Environmental Effects. *Anales de Medicina*, 50, 71–98.

Vergara, K. (2004). *Respuesta del inóculo Micorrizal del hongo Scleroderma ve"ucosum en la Producción de Plántulas de Pinus radiata D. Don en Jauja*. Retrieved from <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/1741/P34-V4-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Viera, M., & Rodríguez, R. (2019). A complete assessment of carbon stocks in above and belowground biomass components of a hybrid eucalyptus plantation in southern Brazil. *Forests*, 10(7), 1–12. <https://doi.org/10.3390/f10070536>

Villaseñor, J. C., & Rutiaga, J. G. (2016). La madera de *Casuarina equisetifolia* L., química e

- índices de calidad de pulpa. *Madera y Bosques*, 6(1), 29.
<https://doi.org/10.21829/myb.2000.611340>
- Wabo, E. (2002). *Curso de Biometría Forestal – Medición de Diámetros , Alturas y Edad del Árbol*. 1–6.
- Wang, F., Xu, X., Zou, B., Guo, Z., Li, Z., & Zhu, W. (2013). Biomass Accumulation and Carbon Sequestration in Four Different Aged Casuarina equisetifolia Coastal Shelterbelt Plantations in South China. *PLoS ONE*, 8(10), 2–8.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077449>
- Winck, R. A., Fassola, H. E., Barth, S. R., Crechi, E. H., Keller, A. E., Videla, D., & Zaderenko, C. (2015). Modelos predictivos de biomasa aérea de eucalyptus grandis para el Noreste de Argentina. *Ciencia Florestal*, 25(3), 595–606. <https://doi.org/10.5902/1980509819611>
- Yepes, A., & Silveira Buckeridge, M. (2011). *RESPUESTAS DE LAS PLANTAS ANTE LOS FACTORES AMBIENTALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL (REVISIÓN)* (Vol. 14). Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/4239/423939616005.pdf>
- Yoza, L., Baradit, E., & Acevedo, M. (2015). CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DE ESPECIES, PINO (Pinus patula) Y TORNILLO (Cedrelinga cateniformis) PROVENIENTES DEL PERÚ UTILIZANDO TECNICAS NO DESTRUCTIVAS. *Anales Científicos*, 76(1), 12.
<https://doi.org/10.21704/ac.v76i1.758>
- Zanabria, R., & Cuellar, J. (2015). Carbono total almacenado en los depósitos de diferentes sistemas de uso de tierra del ecosistema alto andino , valle del Mantaro , Junín. *Xilema Vol.*, 28, 43–52. Retrieved from <http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/xiu/article/view/597/580>

CAPÍTULO VII

ANEXOS

ANEXO A - TABLAS

A1. Densidad promedio por árbol de la muestra fuste y ramas

	Especie	PS (gr)		L (cm)		D (cm)		V (cm ³)		d (gr.cm ⁻³)		
		F	R	F	R	F	R	F	R	F	R	
SAF 1	<i>Casuarina equisetifolia</i>	0.89	36.20	8.70				1.26	48.81	0.70	0.74	
	<i>Cupressus macrocarpa</i>	0.45	34.39	6.41				0.93	59.67	0.47	0.57	
	<i>Pinus patula</i>	0.65	33.68	9.50				1.38	61.55	0.47	0.55	
	<i>Pinus radiata</i>	0.53	37.23	8.30				1.21	67.23	0.44	0.55	
						10	0.43					
SAF 2	<i>Casuarina equisetifolia</i>	0.20	15.64	2.34				1.63	0.34	26.72	0.58	0.61
	<i>Cupressus macrocarpa</i>	0.37	16.28	6.24				1.89	0.91	28.96	0.40	0.56
	<i>Pinus patula</i>	0.24	12.58	4.18				1.69	0.61	23.20	0.39	0.54
	<i>Pinus radiata</i>	0.27	16.66	4.6				2	0.67	31.49	0.41	0.53
	<i>Eucalyptus globulus</i>	0.59	38.11	7.39				2.83	1.07	63.23	0.56	0.60

PS: Peso seco; L: Longitud; D: Diámetro; V: Volumen en verde; d: Densidad; F: Fuste; R: Ramas

A2. Densidad aparente del suelo

Densidad aparente (gr.cm ⁻³)	SAF1	SAF2
\bar{X}	1.45	1.32
S^2	0.02	0.03
S	0.16	0.16
$S\bar{X}$	0.05	0.05
CV	10.78	12.27

\bar{X} : Media; S^2 : Varianza; S: Desviación estándar; $S\bar{X}$: Error estándar de la media; CV: Coeficiente de variación; DAP: Diámetro a la altura del pecho; HT: Altura total; HC: Altura comercial.

ANEXO B- FIGURAS

B1. Fase de campo



Fotografía 1 Censo forestal



Fotografía 2 Selección y estimación de la biomasa arbórea



Fotografía 3 Toma de muestras de fuste



Fotografía 4 Recolección de muestras de kikuyo



Fotografía 5 Recolección de muestras de detritus

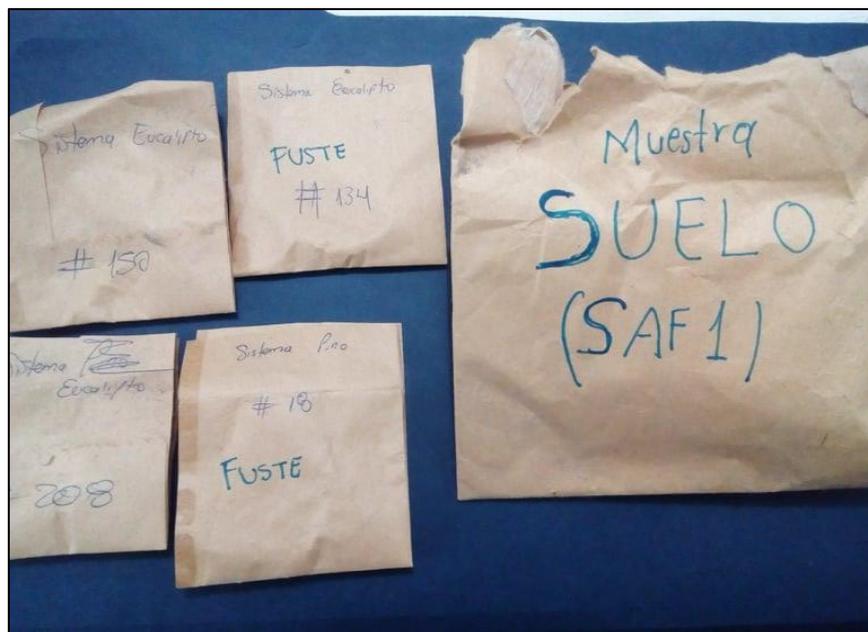


Fotografía 6 Recolección de muestra de suelo

B2. Fase de laboratorio



Fotografía 7 Muestras en el laboratorio



Fotografía 8 Empaquetado de las muestras



Fotografía 9 Secado de muestras en la estufa

B3. Resultado del porcentaje de carbono en el suelo

LABONORT			
LABORATORIOS NORTE			
Av. Cristóbal de Troya 493 y Jaime Roldos		Ibarra-Ecuador	Tel. cel. 0999591050

REPORTE DE ANÁLISIS DE %C EN SUELO

DATOS DEL PROPIETARIO NOMBRE : BRAYAN TABANGO CIUDAD : Ibarra TELÉFONO : 0993661337 FAX :	DATOS DE LA PROPIEDAD PROVINCIA : Imbabura CANTÓN : Ibarra PARROQUIA : Caranqui SITIO : Yaguachi
DATOS DEL LOTE SITIO : Yaguachi MUESTRA : 8640- 8641 N. CAMPC : Suelo Lote 1 lote 2	DATOS DE LABORATORIO No REPORTE : R 8640 - 41 No MUES LAB : L 8640- 41 FECHA DE MUESTREO : FECHA DE INGRESO : 12 10 2018 FECHA DE REPORTE : 16 10 2018

RESULTADOS

MUESTRA	N. DE CAMPO	% C (en suelo)
8640	Lote 1	2.30
8641	Lote 2	1.47

Método: Walkley y Black (oxidación sulfocromica)


Dr. Quím. Edison M. Miño M
RESPONSABLE DE LABONORT



Análisis del porcentaje de carbono del SAF1 y SAF2

ABREVIATURAS

BVC. Biomasa, volumen, carbono.

CAP. Circunferencia la altura del pecho.

CATIE. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

CMNUCC. Convención Macro de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

DAP. Diámetro a la altura del pecho.

ENCC. Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación.

GEI. Gases de Efecto Invernadero.

IPCC. Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

MAE. Ministerio del Ambiente del Ecuador.

MDL. Mecanismo de desarrollo limpio.

ONU. Organización de las Naciones Unidas.

REDD+. Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los Bosques.

SAF1. Sistema agroforestal.

SAF2. Sistema silvopastoril.

UICN. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.

UTN. Universidad Técnica del Norte.