

UNIVERSIDAD LATINOAMERICANA CIMA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**“EVALUACIÓN DE SECUESTRO DE CARBONO EN LAS
PLANTACIONES FORESTALES DE *Eucalyptus globulus*
DE LA PROVINCIA DE TARATA, 2019”**

TESIS

Presentado por:

Edgar Chaparro Aguilar

Para obtener el Título académico de:

INGENIERO AMBIENTAL

Tacna – Perú

2019

**UNIVERSIDAD LATINOAMERICANA CIMA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

TÍTULO PROFESIONAL EN INGENIERÍA AMBIENTAL

**“EVALUACIÓN DE SECUESTRO DE CARBONO EN LAS PLANTACIONES
FORESTALES DE *Eucalyptus globulus* DE LA PROVINCIA DE TARATA,
2019”**

Tesis sustentada y aprobada el 26 de noviembre del 2019; estando como jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE : _____
Dr. Mauro Claros Limache Luque

SECRETARIO : _____
M. Sc. Ronald Javier Ticona Cárdenas

MIEMBRO : _____
Dr. César Julio Cáceda Quiroz

ASESOR : _____
M. Sc. Jorge Fernando Pacompía Vega

Dedicatoria

A mis padres y hermanos por sus enseñanzas y constante apoyo durante la realización de la presente investigación.

A nuestro Creador, por guiarme espiritualmente y permitir que logre mis objetivos en beneficio de la comunidad.

Agradecimientos

Al M. Sc. Jorge Fernando Pacompía Vega, por su constante apoyo y guía en la realización de la presente investigación.

A mis amigos y compañeros de estudio de la Carrera Profesional de Ingeniería Ambiental; a todos que, de algún modo, colaboraron con sus aportes, consejos y enseñanzas para la culminación de la presente investigación.

A la plana docente, que, por sus enseñanzas, durante los años de estudiante en la Universidad Latinoamericana CIMA de Tacna.

Índice General

	<i>Pag.</i>
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Índice General	vi
Índice de Tablas	ix
Índice de Figuras	xi
Resumen	xii
Abstract	xiii
Introducción	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	5
1.1. Descripción del problema	5
1.2. Formulación del problema	6
1.2.1. Problema general.....	6
1.2.2. Problemas específicos	6
1.3. Objetivos de la investigación	7
1.3.1. Objetivo general	7
1.3.2. Objetivos específicos	7
1.4. Hipótesis de la investigación.....	7
1.5. Justificación de la investigación.....	7
1.6. Limitaciones de la investigación	8
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	9
2.1. Antecedentes de la investigación	9
2.1.1. Antecedentes internacionales	9

2.1.2. Antecedentes nacionales	10
2.2. Bases teóricas	12
2.2.1. Especie forestal <i>Eucalyptus globulus</i>	12
2.2.1. Carbono almacenado.....	16
2.2.3. Secuestro de carbono.....	18
2.2.4. Cambio de uso de la tierra y pérdidas de carbono almacenado	18
2.2.5. El carbono en los ecosistemas forestales	19
2.2.6. El ciclo global del carbono.....	20
2.2.7. Efecto invernadero y cambio climático.....	20
2.2.8. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMCC).....	21
2.2.9. La implementación conjunta, el Protocolo de Kyoto y el mecanismo para un desarrollo limpio	22
2.2.10. Opciones de mitigación del cambio climático	22
2.2.11. Tendencia general de la captura de carbono en el suelo	23
2.3. Definición de términos básicos	23
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	26
3.1. Tipo y nivel de investigación	26
3.1.1. Tipo de investigación	26
3.1.2. Nivel de investigación.....	26
3.2. Operacionalización de variables e indicadores	26
3.3. Población y muestra de la investigación	27
3.3.1. Población.....	27
3.3.2. Muestra.....	28
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	29

3.5. Técnicas para el procesamiento de datos	33
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	34
4.1. Resultados	34
4.2. Discusión.....	50
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
ANEXOS:	65

Índice de Tablas

Tabla 1 Operacionalización variables	26
Tabla 2 Determinación del número de zonas y áreas cultivadas de <i>Eucalyptus globulus</i> por localidad en la provincia de Tarata	28
Tabla 3 Número de muestras para la evaluación de campo	29
Tabla 4 Frecuencia de <i>Eucalyptus globulus</i> por clase diametral en la provincia de Tarata, en el año 2019.....	34
Tabla 5 Determinación de la altura total y comercial de <i>Eucalyptus globulus</i> por clase diametral en la provincia de Tarata, en el año 2019.	36
Tabla 6 Determinación del volumen de la biomasa aérea de los árboles de <i>Eucalyptus globulus</i> según su clase diametral en la provincia de Tarata, en el año 2019.....	38
Tabla 7 Determinación del peso seco de la biomasa aérea de los árboles de <i>Eucalyptus globulus</i> según su clase diametral en la provincia de Tarata, en el año 2019.....	40
Tabla 8 Determinación de la captura de carbono en la biomasa aérea de <i>Eucalyptus globulus</i> por hectárea en la provincia de Tarata, en el año 2019.....	42
Tabla 9 Análisis de varianza para la estimación de captura de carbono en la biomasa aérea de <i>Eucalyptus globulus</i> en la provincia de Tarata, en el año 2019.....	44
Tabla 10 Prueba de Duncan para determinar los mejores promedios de captura de carbono por hectárea en <i>Eucalyptus globulus</i> , en ocho localidades de la provincia de Tarata, en el año 2019.....	44
Tabla 11 Determinación de la captura de carbono en la biomasa aérea de <i>Eucalyptus globulus</i> , en la provincia de Tarata, en el año 2019.....	45
Tabla 12 Análisis de varianza para la estimación de captura de carbono por <i>Eucalyptus globulus</i> en la provincia de Tarata, en el año 2019.....	48

Tabla 13 Prueba de Duncan para estimar los mejores promedios de captura de carbono por <i>Eucalyptus globulus</i> , en la provincia de Tarata, en el año 2019.	49
---	----

Índice de Figuras

Figura 1. Comparación del DAP promedio y frecuencia de <i>Eucalyptus globulus</i> por clase diametral en la provincia de Tarata, en el año 2019.....	35
Figura 2. Comparación de la altura total y comercial de los árboles de <i>Eucalyptus globulus</i> por clase diametral en la provincia de Tarata, en el año 2019.....	37
Figura 3. Comparación del volumen total y comercial de la biomasa aérea de <i>Eucalyptus globulus</i> por clase diametral en la provincia de Tarata, en el año 2019.	39
Figura 4. Comparación del peso seco total y comercial de la biomasa aérea de <i>Eucalyptus globulus</i> por clase diametral en la provincia de Tarata, en el año 2019.	41
Figura 5. Comparación de la captura de carbono por hectárea en la biomasa aérea de <i>Eucalyptus globulus</i> , en ocho localidades de la provincia de Tarata, en el año 2019.	43
Figura 6. Captura de carbono en la biomasa aérea de <i>Eucalyptus globulus</i> , en la provincia de Tarata, en el año 2019.....	46
Figura 7. Comparación de la captura de carbono en la biomasa aérea de <i>Eucalyptus globulus</i> , en la provincia de Tarata, en el año 2019.	47

Resumen

El presente trabajo de investigación se realizó en siete distritos y un anexo de la provincia de Tarata, región de Tacna, durante los meses de julio a setiembre del 2019. Geográficamente, la provincia está a una altitud de 3083 msnm, una temperatura media de 24 °C y humedad relativa de 45 %. El área en estudio estuvo conformada por 363,46 hectáreas cultivadas, las que se delimitaron con ayuda de imágenes satelitales y georeferenciadas durante las evaluaciones de campo. El tipo de investigación fue descriptivo, se seleccionó una muestra de 16 áreas irregulares y las mediciones se realizaron en parcelas de 100 m², donde se determinaron variables dasométricas como el DAP, altura total y área basal, la determinación del volumen y peso seco de la biomasa aérea se realizó por el método no destructivo. Se estimó una biomasa aérea de 706 522,12 toneladas, con un contenido de carbono secuestrado de 35 326,06 t C ha⁻¹ equivalente a 129 646,63 t CO₂ ha⁻¹. De esta manera, se demostró el potencial que tienen los cultivos forestales para mitigar el cambio climático, a través del secuestro y captura de carbono, por la especie *Eucaliptus globulus*.

Abstract

In the present research work it was carried out in seven districts and an annex of the province of Tarata of the Tacna region during the months of July to September of 2019, geographically the province is at an altitude of 3083 meters above sea level, an average temperature of 24 ° C and relative humidity of 45%, the area under study consisted of 363,46 71 hectares cultivated, which were delimited with the help of satellite images and georeferenced during field evaluations, the type of research was descriptive, a sample was selected 16 irregular areas and the measurements were made in plots of 100 m², where dasometric variables such as DAP, total height and basal area were determined, the determination of the volume and dry weight of the aerial biomass was carried out by the non-destructive method. An aerial biomass of 706 522,12 tons was estimated, with a sequestered carbon content of 35 326,06 t C ha⁻¹ equivalent to 129 646,63 t CO₂ ha⁻¹. In this way, the potential of forest crops to mitigate climate change through the sequestration and capture of carbon by the species *Eucaliptus globulus* was demonstrated.

Introducción

El servicio ambiental de secuestro de carbono que cumplen las plantaciones forestales de *Eucalyptus globulus* cultivadas en ecosistemas altoandinos de las diferentes regiones del Perú, que incluyen la provincia de Tarata en la región de Tacna, tienen la finalidad de almacenar carbono en su biomasa o fijarla en el suelo, mediante un activo intercambio de dióxido de carbono entre la biosfera y la atmósfera (Hidalgo, 2006), además, estos cultivos forestales, cumplen un papel muy importante en la reversión de la degradación de tierras erosionadas (Espina, 2006), a consecuencia de un mal uso de las mismas, el sobre pastoreo, áreas bajo manejo con falta de regeneración oportuna o incendiadas (Hanco & Callata, 2018).

De acuerdo al Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR) citado por Pariona (2017), se tiene una en Perú superficie cultivada de 824,310 hectáreas de eucaliptos con las especies de *E. globulus*, *E. viminalis*, *E. bicostata*, *E. camaldulensis* (Fernández & Sifientes, 2008) siendo la más abundante en el altiplano *E. globulus*, que fue introducida en el Perú en el año 1860.

Los bosques forestales, son vistos como una posibilidad de reducir las concentraciones de gases de efecto invernadero en especial del dióxido de carbono, así como un gran potencial para aumentar la retención de carbono, de manera tal que contribuyan con la mitigación del cambio climático (Ajete, Mercadet, Toirac, & Conde, 2012), que es una consecuencia directa o indirecta de la actividad humana, responsable de la alteración de la composición de la atmósfera y, en consecuencia, del efecto

negativo en el clima que se puede manifestar en un periodo largo o a corto plazo, y pueden presentarse bruscamente como los incrementos de calor o frío que en los últimos años se han registrado a nivel mundial (Domínguez, 2016).

La captura de carbono se da en principales unidades del planeta en un ciclo fundamental, los océanos tienen las más grandes reservas de carbono seguida por el suelo, la atmósfera y las plantas. Cualquier desequilibrio en nuestro planeta se ve reflejada en la concentración del CO₂, las plantas mediante la fotosíntesis y el suelo permiten el equilibrio de un ciclo normal (Casanova & Solorio, 2011).

Los ecosistemas terrestres juegan un papel importante en el ciclo global del carbono. Una política exitosa para el cambio climático debe tomar en consideración las dinámicas del ciclo terrestre del carbono en la atmósfera (FOREST TRENDS, 2010). Otras actividades del uso de la tierra y bosques que pueden contribuir incluyen la conservación de los bosques en peligro de deforestación, rehabilitación de bosques, reforestación o promoción de la agrosilvicultura, las prácticas que promueven un aumento en el carbono orgánico del suelo también pueden tener un efecto positivo de fijación de carbono (Marquez, 2009).

La presente tesis tiene como objetivo evaluar la cantidad de carbono secuestrado por las plantaciones forestales de *Eucalyptus globulus* en la provincia de Tarata, mediante la estimación de la cantidad de biomasa aérea, concentración de carbono y dióxido de carbono en árboles de diferentes grupos etarios cultivados en los diferentes distritos y anexos de Tarata, bajo metodologías estandarizadas que permitan conocer la potencialidad del servicio ambiental de fijación de carbono.

La investigación se justifica por los resultados obtenidos del análisis procedentes de la contrastación de la información teórica con los resultados obtenidos a nivel de campo en las diferentes zonas evaluadas respecto a la variable de servicio ambiental de secuestro de carbono, además servirá para que las asociaciones de productores de eucalipto de los distritos en mención, puedan acceder a beneficios económicos como los bonos de carbono y generar mejoras relacionadas con el manejo del cultivo de esta especie forestal en la región de Tacna.

Así mismo, las comunidades campesinas de las zonas altoandinas dedicadas al cultivo de *Eucalyptus globulus*, demostraron su interés para dar información para el registro de plantaciones forestales, propiciada por el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR) por intermedio de La Administración Técnica Forestal y de Fauna Silvestre (ATFFS) Moquegua-Tacna, como una alternativa económica y de protección del medio ambiente (SERFOR, 2016).

La metodología usada en la elaboración y ejecución de esta tesis fue la de seguir una secuencia para el análisis de las variables en estudio, siguiendo los objetivos planteados, mediante el uso de fuentes primarias y secundarias con las que se empezó a ordenarla y seguir los pasos establecidos según los autores.

Respecto a la estructura del trabajo de investigación, el primer Capítulo, aborda el planteamiento del problema donde se delimita la formulación del problema, los objetivos y la justificación de la misma, el segundo Capítulo hace referencia de los antecedentes internacionales, nacionales y locales relacionados con el tema en estudio, las bases conceptuales teóricas refuerzan los conocimientos sobre las características de *E. globulus* y el secuestro de carbono que se emplearán.

El tercer Capítulo del trabajo presenta el contexto de la evolución y situación actual de las variables a tratar y sus determinantes. Se presenta la descripción operativa de las variables, las técnicas e instrumentos de recolección de datos obtenidos en campo y laboratorio, así mismo el procesamiento de los datos a través de evaluaciones estadísticas.

En el cuarto Capítulo, se analizan los resultados obtenidos sobre la situación actual del manejo de *E. globulus* y la captura de carbono. Finalmente, con los resultados obtenidos, se elaboraron las conclusiones y recomendaciones respecto al servicio ambiental de captura de carbono que cumple *Eucalyptus globulus* en la provincia de Tarata.

CAPÍTULO I:

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema

La atmósfera sufre un incremento en la temperatura por los gases de efecto invernadero y el consecuente cambio climático los cuales se expresan en el comportamiento anormal del clima. Los escenarios todavía son inciertos y son de esperar serios efectos negativos; aunque se esperan también algunos efectos positivos, es importante e imprescindible ejecutar acciones para reducir las emisiones de gases de invernadero y elevar su captura en los suelos y en la biomasa. Para ello, deben ser desarrolladas estrategias y políticas para el manejo de la agricultura y los bosques. Una posibilidad en la captura de carbono en los suelos o en las biomásas forestales, basándonos en el Protocolo de Kyoto menciona como uso de la tierra, cambio en el uso de la tierra y forestación; se evidencia los artículos 1,3 y 1,4 del Protocolo de Kyoto (Organización de las Naciones Unidas , 1998).

Los bonos de carbono pueden obtenerse con iniciativas de proyectos que pueden disminuir la generación de emisión a la atmósfera gases de efecto invernadero y contribuir con ello a reducir el efecto invernadero y trae consigo el calentamiento global, el Perú no es ajeno a ello; por lo tanto, a través de diferentes entidades y en alianzas estratégicas entre el Ministerio del Ambiente (MINAM) y organizaciones privadas, lanzaron programas de incentivo económico que aminoren la generación de gases de efecto invernadero como el CO₂ (Radio Programas del Perú, 2012).

Así mismo, en la región Tacna, las comunidades campesinas dedicadas a la plantación de árboles exóticos como el eucalipto (*Eucalyptus globulus*), mostraron interés en ser parte del registro de plantaciones forestales, propiciada por el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR) por intermedio de la Administración Técnica Forestal y de Fauna Silvestre (ATFFS) Moquegua-Tacna, como una actividad que les genera ingreso económico y; asimismo, impulsar el servicio ambiental de captura de carbono que brinda las plantaciones forestales de la localidad de Estique Pampa (SERFOR, 2016).

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuál será la cantidad de carbono secuestrado por las plantaciones forestales de *Eucalyptus globulus* en la provincia de Tarata en el año 2019?

1.2.2. Problemas específicos

- a) ¿Cuál es nivel de la biomasa de plantaciones forestales de *Eucalyptus globulus* en la provincia de Tarata en el año 2019?
- b) ¿Cuál es el contenido de carbono de plantaciones forestales de *Eucalyptus globulus* en la provincia de Tarata en el año 2019?
- c) ¿Cuál es el estimado de captura de CO₂ por plantaciones forestales de *Eucalyptus globulus* en la provincia de Tarata en el año 2019?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

- Evaluar el secuestro de carbono por las plantaciones forestales de *Eucalyptus globulus* en la provincia de Tarata en el año 2019.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Estimar la cantidad de biomasa en plantaciones forestales de *Eucalyptus globulus* de la provincia de Tarata.
- b) Evaluar el contenido de carbono en plantaciones forestales de *Eucalyptus globulus* de la provincia de Tarata.
- c) Calcular la captura de CO₂ en plantaciones forestales de *Eucalyptus globulus* de la provincia de Tarata.

1.4. Hipótesis de la investigación

La cantidad de carbono secuestrado por las plantaciones forestales de *Eucalyptus globulus* en la provincia de Tarata, en el año 2019 es significativo de acuerdo a los resultados obtenidos.

1.5. Justificación de la investigación

Esta investigación tiene su justificación teórica debido a que, por medio del estudio, se analizará y ampliará los reportes de información bibliográfica referentes a

la variable servicio ambiental de secuestro de carbono, que permitirá contrastar la teoría existente con la realidad.

Esta investigación tiene una justificación metodológica debido a que se aplicarán métodos e instrumentos de recolección de datos ya descritas en la información bibliográfica para el servicio ambiental de secuestro de carbono.

La investigación tiene una justificación práctica debido a que los resultados permitirán a las asociaciones de silvicultores de eucalipto de la provincia de Tarata, puedan acceder a los bonos de carbono y generar mejoras relacionadas al buen manejo de los árboles de los *Eucalyptus globulus*.

Asimismo, se justifica en el ámbito social debido a que la Universidad Latinoamericana CIMA se involucra con la sociedad a través de la investigación.

1.6. Limitaciones de la investigación

La investigación se enfrentó a las siguientes limitaciones

- Algunas barreras de acceso a la información (escasa información local).
- La escasez de algunas vías de acceso a las áreas de plantaciones forestales.
- Cambio de clima, distancia y tiempo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Paulino (2013) en su tesis “Evaluación de la captura de carbono en tres sistemas de producción de papa en zinacantepec, estado de México” concluyó que las emisiones de CO₂ en el ciclo de la producción de papa, era menor en contraste a las cantidades fijadas de CO₂, los valores obtenidos muestran la alta capacidad del cultivo para trabajar como sumidero de carbono; asimismo, el balance neto de CO₂, determinado como carbono fijado se detectó que era superior a 25 toneladas, el cual muestra la importancia de la producción agrícola de este producto.

Domínguez (2016) en su la tesis “Estimaciones de captura de los parques y emisiones de CO₂ vehicular en Tijuana” con una técnica descriptiva y comparativa entre los parques urbanos de Tijuana y el sector transporte, principal fuente de emisión de gases de efecto invernadero; las emisiones de CO₂ estimadas por consumo de combustibles en Tijuana fue de 2,622 Giga gramos de CO₂ durante el 2015.

Rodriguez, Jiménez, Aguirre, Treviño, y Razo (2009) en el artículo “Estimación de carbono almacenado en el bosque de Pino- Encinno en la reserva de la Biosfera el cielo

México” calcularon el volumen, estimándose la biomasa con el modelo de la forma $\beta = a_0 * D^a$ dicho valor se multiplicó por el porcentaje de C obtenido con el equipo Solids TOC Analyzer para cada especie obteniendo la cantidad de C almacenado por árbol, hojarasca y necromasa. Con el modelo se obtuvo para cada especie un coeficiente de determinación (R^2) superior al 0,95 sin embargo, se estimaron 219,3 t ha⁻¹ de biomasa. Así mismo, se estimó un total de 110 t C ha⁻¹ almacenada de la forma siguiente: en fustes, ramas y hojas se encuentra el 75,3%, en raíces el 15%, en hojarasca el 9% y en los renuevos y la necromasa se encuentra el 0,4 y 0,3% respectivamente.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Vazquez (2015) en la tesis “Biomasa y carbono almacenado en los fustes de los árboles del bosque de terraza alta de la comunidad de San Pedro-quebrada Blanco, Loreto-Perú” con la investigación de tipo descriptiva y de nivel básico; con Diámetro a la altura del pecho (DAP) mayores a 10 cm y el área aproximada de 6 434 ha. Los autores concluyeron el reporte de 3 364 individuos, con 15 especies importantes valores de carbono almacenado suman 62,60 MgC/ha que representa el 63,57% del total.

Hidalgo (2006) en el trabajo de investigación “Determinación de las Reservas totales de carbono en plantaciones forestales de *Eucalyptus globulus* en Marcara Carhuas” con la metodología utilizada del transecto y parcelas de 4x25metros y obtuvo los siguientes resultados: la existencia de 215,436 tC/ha en el sistema de uso forestal de la tierra, distribuido de la siguiente manera: 91,693 tC/ha en la biomasa vegetal total

(71,768 tC/ha en la biomasa arbórea, 0,492 tC/ha en la biomasa arbustiva/herbácea, 2,889 tC/ha en la biomasa de la hojarasca y 16,544 tC/ha en la biomasa subterránea) y 123,743 tC/ha en el suelo.

Tito (2012), en la tesis de investigación “Estimación Cuantitativa de la Capacidad de captura de CO₂ en plantaciones de Olivo en el distrito de Tacna” con la metodología utilizada de diseño transeccional de tipo correlacional causal, estudió la relación alométrica para el carbono almacenado; con muestra poblacional del distrito de Tacna (La Yarada 54,8%, Los Palos 29,3% y Magollo 15,9%); 400m². La cuantificación de CO₂ equivalente estimado en el Olivo fueron: 562 051 ,3; 281 025,7 y 1 031 364,319 toneladas de CO₂ atmosférico por hectárea respectivamente.

Morales (2014) en la tesis de investigación “Estado Actual del Bosque de Polilepys y su eficiencia en la captura de CO₂ en la provincia de Tarata departamento de Tacna” de las poblaciones actuales de *Polylepis* y su eficiencia en la captura de CO₂ en la provincia de Tarata (Susapaya, Estique Pueblo, Tarucachi, Sitajara; Ticaco y Tarata). La metodología utilizada fue el de parcelas de 20 x 25 m la eficiencia de captura de CO₂ fue de 31 387,6 t de CO₂/ha/año.

Pumasupa (2018) en su tesis “Cuantificación de la captura de carbono de la especie forestal *Haplorhus peruviana* carzo como servicio ambiental en el valle de cinto, provincia Jorge Basadre, región Tacna” como servicio ambiental en el valle de

Cinto, provincia Jorge Basadre, región Tacna tuvo como resultado como estimación que el bosque relicto de carzo posee una capacidad captura de carbono de 4,5244 tC/ha.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Especie forestal *Eucalyptus globulus*

Plasticidad

Es la capacidad de adaptación que los eucaliptos tienen a diversas condiciones de suelo y clima y que poseen, en mayor o menor proporción, casi todas las especies, pero que resulta variable no solamente de unas especies a otras, sino también con las características climáticas y edafológicas de cada lugar. Asimismo, las generaciones de poblaciones de eucaliptos van aumentando su plasticidad de igual modo a la sequía, a la aridez, y al calor, la tolerancia a los cloruros (FAO, 1981).

Propagación

La propagación de los eucaliptos puede ser realizada, como en otros muchos vegetales, por dos sistemas: el genético o el vegetativo (FAO, 1981).

Genético

Siembra directa: se realiza en áreas húmedas con frecuencia de precipitaciones en todas las estaciones del año y por mantener temperaturas moderadas. La plantación es el método empleado en las repoblaciones con eucaliptos; la planta se cría en vivero, es plantada en época y momento oportuno, en suelos debida y previamente preparados,

en los correspondientes hoyos, que han sido abiertos en la forma y a la distancia adecuada para cada lugar y finalidad (De la Lama, 1976).

Clasificación sistemática

La taxonomía de *Eucalyptus globulus* Labill, es la siguiente:

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta o Angiospermae

Clase: Magnoliopsida

Orden: Myrtales

Familia: Myrtaceae

Género: *Eucalyptus*

Especie: *globulus* Labill

El género *Eucalyptus*, que agrupa en torno a 600 especies, pertenece a la familia Myrtaceae, subfamilia Leptospermoidae. Se trata de un género botánico muy rico y diverso, Presentando una asombrosa frecuencia de aparición de híbridos fértiles, la especie *Eucalyptus globulus*, fue descrito por Jacques-Julien Houtou de La Billardièrè razón porque a la especie se la conoce como *Eucalyptus globulus* Labill (Fernández & Silva-Pando, 2016).

Aunque perteneciente a un grupo antiguo, el género presenta caracteres bastantes evolucionados como el opérculo de la flor, habiéndose diversificado recientemente debido a la sequía y el empobrecimiento de suelos a finales del

Pleistoceno y la posterior reconquista bajo un clima tendente al actual. (Fernández & Silva-Pando, 2016)

Características morfológicas

El porte del eucalipto es muy variable, existiendo eucaliptos de porte arbóreo y otros de porte arbustivo, el tronco de los eucaliptos arbóreos puede ser recto o flexuoso, alcanzando hasta 1-2 metros de diámetro en la base del mismo. El sistema radical es fuerte y bien desarrollado, con predominio de la red superficial, la especie presenta una cepa fuertemente engrosada, formando un tubérculo leñoso de gran importancia en la regeneración y como reserva de nutrientes. La corteza del tronco adulto, es un elemento importante de identificación, puede ser persistente o caduca, y de diverso color, textura, grosor y constitución. La forma de la copa depende de las condiciones ambientales en que se encuentren los ejemplares, aunque en general, es poco densa, con predominio de las ramas erectas o erecto-patentes (FAO, 1981).

Las hojas, simples y persistentes, suelen presentar un heteromorfismo de gran importancia sistemática. Las jóvenes suelen ser opuestas por más o menos pares, y sentadas, con más frecuencia que pecioladas, incluso abrazadoras o trabadas, y con el limbo perpendicular al plano definido por el tallo y su nervio medio. Su coloración suele diferenciarse de las hojas adultas debido a recubrimientos glauco-céreos o distinta coloración su consistencia es más tenue. Las hojas adultas presentan gran variabilidad, aunque generalmente son alternas, pecioladas, falciformes, de bordes enteros, péndulas, con limbos en planos verticales, sin diferenciación entre el haz y el envés,

más o menos coriáceas y de recubrimiento y coloración muy variable. Las hojas suelen contener gran cantidad de cámaras con aceites característicos (FAO, 1981).

El género *Eucalyptus* se caracteriza por la falta de diferenciación de cáliz y corola, estando sus piezas soldadas y formando un receptáculo con opérculo caedizo en la floración. A la protección que el opérculo presta a las piezas sexuales hace alusión el nombre del género, que significa "bien cubierto". La caída del opérculo permite la expansión de los estambres que, inicialmente, se encuentran doblados hacia adentro. Las flores aparecen generalmente en racimos o cimas umbeliformes axilares, rara vez aisladas o en pequeños grupos. El fruto, por fin, es también muy variable tanto en forma y tamaño de la cápsula, como en la forma de abrirse, posición de las valvas y del disco circundante. La producción de semillas es abundante, tanto fértiles como abortadas. Las primeras suelen ser poliédricas, más gruesas y de diferente coloración, aunque a veces adquieren formas redondeadas o aladas. Suelen ser de tamaño pequeño (Universidad de Huelva, 2017).

Características botánicas

El eucalipto es un árbol de crecimiento rápido, que puede llegar a una altura de unos 20 metros, en un periodo de 8 años y un máximo de 70 metros en su periodo adulto, por lo que es considerado una de la especie más alta del mundo. De tronco erguido, está recubierto de una corteza plateada, a veces gris ceniza y en algunas ocasiones, blanquecina. La madera, blanca o rojiza, es dura y muy resistente a la putrefacción. Las hojas coriáceas, de un gris azulado verdoso, son redondas cuando el árbol es joven, pero rápidamente adquieren una forma ovalada acuminada y carnosa;

pueden llegar hasta unos 30 cm de largo. Son características sus flores solitarias sin pedúnculos, posicionadas en las axilas de las hojas, con amplias, arrugadas y espesas tapas. Cuando las flores se secan, la tapa de la cápsula se desprende, para dejar paso a un manojo de estambres blanquecinos o rojizos. La floración tiene lugar de febrero a julio (FAO, 1981).

Hábitat y uso

El eucalipto es originario de Australia y de Tasmania, actualmente crece en todas las regiones de clima subtropical, el laboratorio Bioforce utiliza el aceite esencial de las hojas frescas y la extremidad de las ramas, el cual se obtiene por destilación al vapor de agua, rectificando después para eliminar los aldeídos que tienen un efecto irritante en las vías respiratorias. El aceite esencial de eucalipto proviene en gran parte de Portugal y España. El aceite esencial del eucalipto proveniente de Australia, se obtiene a partir del *Eucalypto smithii* R.T.BAK. o el *E. fructicetorum* F,VON MUELL. Estos aceites esenciales son considerados igualmente como oficinales. Las hojas cortadas pueden ser empleadas en infusiones (Alegre, Arévalo, & Palma, 2002).

2.2.1. Carbono almacenado

El carbono almacenado se relaciona a la capacidad del bosque nativo o de cualquier otro sistema de uso de la tierra, de mantener una cantidad de biomasa por hectárea, la cual está en función a su heterogeneidad afectada por las condiciones del suelo y clima (Arévalo, Alegre, & Palma, 2002)

Las plantas tienen la capacidad de capturar o atrapar el dióxido de carbono de la atmósfera, basado en el hecho de que la fotosíntesis absorbe el dióxido de carbono, que luego utilizan para producir la energía como el alimento necesario para su crecimiento, estimándose en la actualidad que una hectárea de plantación arbórea puede absorber alrededor de 10 toneladas de carbono por año de la atmósfera de la tierra, dependiendo de las condiciones del lugar o zona. Se asume que el 45 por ciento de la biomasa vegetal seca es carbono (Arévalo, Alegre, & Palma, 2002).

2.2.2. Reservas de carbono

La foresta de los trópicos húmedos por los análisis realizados contienen las concentraciones más grandes de biomasa y biodiversidad en la tierra y su alteración puede traer consecuencias ambientales directas o indirectas en todo el mundo este manejo forestal es, actualmente la más extensa en la cuenca Amazónica. Cuando estos bosques son destruidos con las quemas y convertidos para otros usos, la gran cantidad del carbón que está almacenado en la vegetación el cual es liberado hacia la atmósfera principalmente como dióxido de carbono (CO_2), La combustión de combustibles fósiles es la mayor causa de la acumulación de CO_2 en la atmósfera; asimismo, la foresta tropical es un importante recurso natural para la población en desarrollo de los trópicos húmedos bajos (Alegre, Arévalo, & Palma, 2002).

2.2.3. Secuestro de carbono

Es el proceso de fijación de carbono en forma continua en cualquier sistema de uso de la tierra, como consecuencia de alguna intervención sobre áreas degradadas o en proceso de degradación estas intervenciones pueden ser planificadas de manejo de suelos con reforestación, conservación de suelos en especial, para hacer el estimado de flujos de carbono que se representan en toneladas de carbono por hectárea y año (t/ha/año), se seleccionan diferentes formas de uso de la tierra cuyos antecedentes son conocidos por los agricultores van desde el bosque primario, áreas quemadas para cultivos anuales o plantaciones perennes, bosques secundarios de diferentes edades, pasturas; sistemas agroforestales, barbechos mejorados y sistemas silvopastoriles (Arévalo, Alegre, & Palma, 2002).

2.2.4. Cambio de uso de la tierra y pérdidas de carbono almacenado

La deforestación incrementa la generación de los gases que producen el cambio climático los principales gases, que contribuyen al efecto invernadero, son el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O); el más principal es el CO_2 gas de invernadero muy abundante, y se estima que contribuye con el 50% del calentamiento global, Una forma de mitigar estos efectos y reducir las emisiones, es fijándolo o capturándolo y manteniéndolo, en el tiempo, en la biomasa vegetal y en el suelo en el primer caso se produce a través de la fotosíntesis y en el segundo caso a través de la descomposición y mineralización de la materia orgánica del suelo (Arévalo, Alegre, & Palma, 2002).

2.2.5. El carbono en los ecosistemas forestales

Los bosques cubren el 29 por ciento de las tierras agrícolas y contienen el 60 por ciento del carbono de la vegetación terrestre. El carbono almacenado en los suelos forestales representa el 36 por ciento del total del carbono del suelo en forma orgánica (1500 Pg a 1 m de profundidad y 2456 Pg a 2 m de profundidad) e inorgánica (1700 Pg). El estudio fue llevado a cabo un balance completo de los bosques de Francia, 1999 este comprendió 540 parcelas de la red europea de supervisión forestal estadísticamente la media total del carbono del ecosistema fue de 137 tC/ha; de este total, el suelo representó el 51% que represento 71 tC, los restos vegetales superficiales de la hojarasca representó el 6 por ciento, y las raíces 6 por ciento; estos datos fueron muy cercanos a los proporcionados en el último informe especial sobre escenarios de emisiones (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático - IPCC, 2000).

Según los datos para los bosques tropicales cerca de Manaus de Brasil el total de carbono en el sistema fue mayor (447 tC/ha) y así como el depósito de suelo orgánico (162 t, 36 % del total), Los ecosistemas forestales almacenaron más carbono por unidad de superficie que es semejante a cualquier otro tipo de uso de la tierra y sus suelos, que contiene cerca del 40 por ciento del total del carbono, son de importancia primaria cuando se considera el manejo de los bosques (FAO, 2002).

2.2.6. El ciclo global del carbono

Está definido como uno de los principales ciclos biogeoquímicos debido a su papel en la regulación de la concentración de CO₂ en la atmósfera de la tierra, importante gas de efecto invernadero (Gamarra, 2001). Las concentraciones crecientes de CO₂ en la atmósfera son una contribución importante al cambio climático del planeta. Los bosques realizan un papel primordial en el ciclo global del carbono porque almacenan grandes cantidades de este gas en el cuerpo vegetal y el suelo, e intercambian con la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración. Son fuentes netas de carbono atmosférico cuando son perturbados por causas humanas o naturales y se convierten en fuentes de almacenaje de carbono atmosférico durante el abandono de las tierras y su regeneración tras la perturbación. Los seres humanos tienen potencial a través de la ordenación forestal, para alterar las reservas y flujos de carbono forestal modificando con ello la función en el ciclo del carbono y su potencial para cambiar el clima (FAO, 2002).

2.2.7. Efecto invernadero y cambio climático

El efecto invernadero consiste en la retención de la energía calórica proveniente del sol en la baja atmósfera, producido por la absorción y reflexión por parte de las nubes y ciertos gases presentes en la atmósfera asimismo, la radiación solar visible (de baja longitud de onda) atraviesa la atmósfera y calienta la superficie de la tierra, la que a su vez emite radiación térmica (de alta longitud de onda), parte de la que es retenida por los denominados gases de efecto invernadero la cantidad de gases de efecto

invernadero (GEI) presente en la atmósfera puede influenciar; por lo tanto, las temperaturas terrenales (FAO, 2002).

La actividad forestal de los valles interandinos se basan en las plantaciones de *Eucalyptus globulus*, las cuales se encuentran en linderos de los terrenos de cultivo de propiedad privada y en rodales o pequeños bosquecillos en terrenos comunales el mayor potencial tanto de emisión como de captura de gases de efecto invernadero se encuentra en el cambio de uso de la tierra, siendo un nivel significativo la captura de carbono por cambios en bosques (plantaciones forestales o bosques cultivados) y otros stocks de biomasa vegetal leñosa, abandono de tierras manejadas e impacto de la agricultura sobre el suelo (Alegre, et al., 2002).

2.2.8. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMCC)

La CMCC diseñó como primer paso para enfrentar la amenaza del cambio climático antrópico el objetivo principal de la Convención fue lograr la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera, a un nivel que impida interferencias antrópicas peligrosas en el sistema climático, y el desafío que planteó fue cumplir tal objetivo, asegurando que la producción de alimentos no se vea amenazada, permitiendo, además, que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible (Gamarra, 2001).

2.2.9. La implementación conjunta, el Protocolo de Kyoto y el mecanismo para un desarrollo limpio

Si bien la CMCC estableció medidas que las partes se comprometían a adoptar a nivel nacional, también contempló la posibilidad de establecer mecanismos de mitigación de carácter internacional, el concepto de implementación conjunta se refiere a la realización de acuerdos por el cual una entidad o un país cumple parcialmente su compromiso de reducir los niveles de emisión de GEI, compensando algunas de sus emisiones domésticas con proyectos que financia en otro país (Gamarra, 2001).

Conferencia de las Partes (COP) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), fue en la COP 18 sobre cambio climático donde ratificó el segundo periodo de vigencia del Protocolo de Kioto desde el 1 de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre de 2020. La puesta en marcha de Kioto ha permitido una reducción del 22,6% en las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a los niveles de 1990 en 37 países industrializados y la UE, cuando el compromiso inicial era de una disminución del 5% (ECOINTILEGENCIA, 2015).

2.2.10. Opciones de mitigación del cambio climático

La ordenación de la tierra, especialmente la silvicultura y la ordenación de los montes, puede contribuir a los objetivos de mitigación, bien apoyando ecosistemas sanos y, de ese modo ayudar a su mantenimiento, en caso de que no aumente el sumidero natural de carbono de la tierra, o bien reduciendo las emisiones antropógenas de CO₂ de esos bosques. Las diversas actividades de la tierra se agruparon en tres

enfoques, que son: estrategias que tienen por objeto mantener y conservar los bosques existentes; las que se dirigen a aumentar las áreas de tierra forestal y las que intentan aumentar la densidad de las existencias de carbono en las tierras boscosas (Watson, 2001).

2.2.11. Tendencia general de la captura de carbono en el suelo

El ciclo del carbono orgánico del suelo representa la reserva con mayor interacción con la atmósfera y se estima aproximadamente 1500 Pg C a 1 m de profundidad (1 Pg = 1 015 g = Gt = 10^9 toneladas métricas) y cerca de 2456 Pg C a dos metros de profundidad en la vegetación (650 Pg) y en la atmósfera (750 Pg) almacenadas considerablemente menos cantidades que en los suelos los flujos entre el carbono orgánico del suelo o terrestre y la atmósfera son importantes y pueden ser positivos bajo la forma de captura o asimilación de carbono, o negativos en forma de emisiones de CO₂ (FAO, 2002).

2.3. Definición de términos básicos

(Según, el Ministerio del Ambiente, 2014).

- a) **Biomasa:** Masa total de materia viva de un componente o reservorio que se expresa como peso seco de un individuo.
- b) **Emisiones:** Liberación de gases de efecto invernadero y/o de sus precursores en la atmósfera, en una zona definida y por un periodo determinado.

- c) **Exactitud:** Acuerdo entre el valor real y el promedio de observaciones o estimaciones medidas repetidas de una variable las estimaciones no son sobrestimadas ni subestimadas y las incertidumbres asociadas son reducidas en la medida de lo posible.
- d) **Factor de Emisión:** Coeficiente que cuantifica estadísticamente las emisiones o absorciones de un gas por actividad unitaria los factores de emisión suelen basarse en una muestra de datos de medición, promediada para elaborar un índice representativo de emisión para un nivel de actividad dado, de acuerdo con un cierto conjunto de condiciones de funcionamiento.
- e) **Fuente:** Todo proceso o actividad que libere a la atmósfera en forma de un gas de efecto invernadero, un aerosol o precursor de un gas de efecto invernadero.
- f) **Incertidumbre:** Falta de conocimiento del valor verdadero de una variable que puede describirse como una función de la densidad de probabilidad que caracteriza el rango y la probabilidad de los valores posibles.
- g) **Reporte:** Implica la disponibilidad y recopilación de los datos y estadísticas nacionales para informar según un formato de inventario de Gases de Efecto Invernadero o Reporte Bienal Actualizado (BURs, por sus siglas en inglés).
- h) **Reservorio:** Componente o componentes del sistema climático en el cual almacenan una o más gases de efecto invernadero o un precursor de un gas de efecto invernadero,
- i) **Secuestro/ Remoción:** Proceso biológico que consiste en almacenar carbono en un depósito.

- j) **Sumidero:** Cualquier proceso, actividad o mecanismo que retira de la atmósfera un gas de efecto invernadero, un aerosol, o un precursor de gases de efecto invernadero.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo y nivel de investigación

3.1.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es descriptivo, debido a que se usaron conocimientos que existían en el área de las ciencias ambientales.

3.1.2. Nivel de investigación

Se realizó un diseño de tipo correlacional; donde no se intervino en sus condiciones iniciales en las unidades de estudio, en función del tiempo fue de tipo transversal, porque se dio en un momento del tiempo.

3.2. Operacionalización de variables e indicadores

A continuación, se muestra la operacionalización de variables e indicadores.

Tabla 1
Operacionalización variables

VARIABLE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADOR	SUB-INDICADOR
<ul style="list-style-type: none"> • Variable independiente: Cultivo forestal de <i>Eucalyptus globulus</i> 	Las plantaciones de forestales de Eucalipto, son realizadas por actividades silviculturales y para un ingreso económico.	<ul style="list-style-type: none"> • Biomasa aérea 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diámetro de tronco (DAP > 5 cm) ▪ Altura total y comercial (m) ▪ Volumen total y comercial (m³) ▪ Peso seco (t)
<ul style="list-style-type: none"> • Variable dependiente: Servicio ambiental de secuestro de carbono 	El servicio ambiental es de tipo de soporte por secuestrar carbono.	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura forestal • Carbono acumulado 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Área basal (m²) ▪ Carbono (t / ha) ▪ CO₂ (t / ha)

Fuente: Elaboración propia

3.3. Población y muestra de la investigación

3.3.1. Población

La población en estudio estuvo conformada por árboles de *Eucalyptus globulus* cultivadas en áreas ubicadas en los distritos y anexos de provincia de Tarata, las que fueron delimitadas por imágenes satelitales, corroboradas y enumeradas durante las

evaluaciones de campo, la cual dependió de la accesibilidad geográfica, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2
Determinación del número de zonas y áreas cultivadas de Eucalyptus globulus por localidad en la provincia de Tarata

Localidad	Código	Zonas Cultivadas (n)	Superficie (ha)
Estique Pampa	EP	28	72,78
Estique Pueblo	EPP	56	112,35
Talabaya	TL	19	38,70
Tarucachi	TR	37	51,97
Tarata	TA	22	46,30
Ticaco	TI	43	35,80
Susapaya	SU	10	2,56
Sitajara	SI	14	3,25
Total		229	363,71

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Muestra

Para determinar el número de muestras a evaluar en la provincia de Tarata, se empleó el modelo probabilístico, mediante el muestreo aleatorio estratificado con afijación proporcional para una muestra de 31 zonas forestales cultivadas con *E. globulus*, que representó el 13,53 % de la población en estudio, las muestras fueron seleccionadas de manera dirigida empleando con el Software *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) versión 19 para Windows, dentro de cada zona cultivada se

delimitó dos parcelas de 100 m², donde se contabilizaron un total de 549 unidades de estudio (Tabla 3).

Tabla 3
Número de muestras para la evaluación de campo

Localidades	Código	Coordenadas UTM		N° muestras	N° árboles / parcela		Total
		X	Y		<i>m</i> ₁	<i>m</i> ₂	
Estique Pampa	EP	300657	8060047	5	30	25	55
Estique Pueblo	EPP	390930	8060267	8	62	48	110
Talabaya	TL	393433	8060212	3	60	29	89
Tarucachi	TR	389898	8062345	4	35	35	70
Tarata	TA	390039	8063150	3	38	35	73
Ticaco	TI	389757	8063398	4	40	31	71
Susapaya	SU	388825	80715112	2	20	28	48
Sitajara	SI	379665	8078231	2	15	18	33
TOTAL				31	300	249	549

Fuente: Elaboración propia

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Evaluaciones dendrométricas

3.4.1.1. Determinación del DAP

La determinación del diámetro altura de pecho (DAP), se realizó en base a la metodología propuestas por Ferrere, et al (2005) y Mora & Vallejos (2013), se determinó la circunferencia del tronco (CAP) de *E. globulus*, empleando una cinta métrica flexible a una altura de 1,30 metros de la base, también conocida como altura

de pecho, los datos fueron anotados en la ficha de campo (Anexo1), para obtener el DAP se empleó la fórmula de Villareal, et al. (2004).

$$DAP = \frac{CAP}{\pi}$$

Dónde:

DAP : Diámetro del tronco del árbol a 1,30m
CAP : Circunferencia del tronco del árbol a 1,30m
 π : 3,1416

3.4.1.2. Altura total y comercial

Para la medición de altura total y comercial, se utilizó el clinómetro Suunto (Moras & Vallejos, 2013), se midió 5 árboles representativos por clase diametral en cada parcela muestreada, la medición de altura total del árbol se realizó desde la base a una distancia de 10 a 20 metros, como el punto máximo encima de la copa y la base, luego se sumó las dos lecturas observadas en el clinómetro, para determinar la altura comercial (fuste), se tomaron en cuenta los 5 árboles medidos anteriormente, y se midió desde la base hasta primera ramificación, considerando que el fuste este recto y se pueda utilizarse como troza comercial, los datos fueron anotados en la ficha de campo (Anexo1).

3.4.1.3. Volumen total y comercial

El volumen total y comercial, se determinaron por el método no destructivo, según la metodología de Quiceno *et al*, (2016) y Espina (2006), en árboles de *E. globulus*, con un DAP mayor o igual a 5 cm, en cada una de la parcelas de 100 m², ubicadas en las ocho localidades de la provincia de Tarata, con los resultados del

DAP, altura total, altura comercial, y el factor mórfico de 0,71 para especies andinas según el MIMAN (2009), se determinó el volumen unitario y total de la zona evaluada, mediante las siguientes fórmulas:

$$V = AB \times Ht \times ff$$

Dónde:

- V** : Volumen total en metros cúbicos
- AB** : Área basal en metros cuadrados
- Ht** : Altura total o altura comercial en metros
- ff** : Factor de 0,71 para *E. globulus* mayor a 3 años

El área basal se calculó mediante la fórmula:

$$AB = \frac{\pi}{4} DAP^2$$

Dónde:

- AB** : Área basal en metros cuadrados
- DAP** : Diámetro del tronco del árbol a 1,30 m
- π : 3,1416

3.4.2. Determinación de la biomasa aérea seca

Para determinar la biomasa seca de los árboles en pie se realizó, según la metodología empleada por Pumasupa (2018) y Alfaro & Cabrera (2017), se estimó en base a la información del volumen y la gravedad específica, empleando la siguiente fórmula:

$$BAS = V \times GE$$

Dónde:

- BAS** : Biomasa aérea seca
- V** : volumen de la biomasa
- GE** : Gravedad específica

3.4.2.1. Gravedad específica

Esta prueba se realizó en el laboratorio de química analítica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Jorge Basadre Grohmann de la Región de Tacna, empleando la metodología de Mora & Vallejos (2013) y Xol (2017), se trabajó con muestras de madera de 1 cm³, obtenida de los árboles de *E. globulus*, las que se colocaron durante 12 horas en una estufa a 110°C hasta obtener el peso seco al horno, se preparó y determinó el peso del sistema sin muestra, el cual estaba compuesto por una balanza analítica, un beacker y agua destilada, luego se colocó la muestra en el sistema y se obtuvo el peso del sistema con muestra, con la diferencia de los pesos anteriores se calculó el peso del agua destilada desplazado y se calculó la gravedad específica (g/cm³) con la siguiente fórmula:

$$GE = \frac{PSH}{VM}$$

Dónde:

GE : Gravedad específica (g/cm³)
PSH : Peso seco al horno (g)
VM : Volumen de la muestra (cm³)

3.4.3. Metodología para la determinación de las reservas de carbono

3.4.3.1. Estimación de carbono

Para la estimación indirecta por hectárea y por localidad del contenido de carbono en la biomasa aérea de *Eucalyptus globulus* en la provincia de Tarata, se basó en que aproximadamente el 50% de la biomasa vegetal corresponde al carbono (Gonzales, 2012; Quiceno *et al.*, 2016), multiplicando la biomasa total por el factor 0,5 empleando la siguiente fórmula (IPCC, 2003):

$$CBT = BTS \times Fc$$

Dónde:

CBT : Carbono almacenado (t C ha⁻¹)

BTS : Biomasa aérea seca (t / ha⁻¹)

Fc : 0,5

3.4.3.2. Estimación de dióxido de carbono

De acuerdo a FOREST TRENDS (2010) citado por Quiceno *et al.* (2016), sobre la base de los pesos moleculares una tonelada de carbono equivale a 3,67 toneladas de CO₂, de esta forma, para saber la cantidad de CO₂ capturado se multiplicó la cantidad de carbono capturado por el valor numérico 3,67 (44/12), la cuantificación del carbono en forma de dióxido de carbono, se realizó con la siguiente fórmula:

$$CO_2 = C \times Kr$$

Dónde:

CO₂ : Toneladas de dióxido de carbono (t CO₂ ha⁻¹)

C : Carbono (t ha⁻¹)

Kr : Factor de conversión 3,67

3.5. Técnicas para el procesamiento de datos

Los resultados para las variables en estudio fueron procesados con el Software *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) versión 19 para Windows, donde se determinó estadísticos como la media, desviación estándar e intervalo de confianza, así como el análisis de varianza para determinar la diferencia de captura de carbono en la biomasa aérea de *Eucalyptus globulus* cultivadas en las ocho localidades evaluadas en la provincia de Tarata.

CAPÍTULO IV:
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Resultados

Tabla 4

Frecuencia de Eucalyptus globulus por clase diametral en la provincia de Tarata, en el año 2019.

Clase diametral		Árboles	Densidad	D.E.	I.C.	
DAP (cm)	DAP Promedio	Nº/ha	relativa (%)		Límite inferior	Límite superior
5 a 10	6,70	2356	68,05	1327,7	1442,5	3282,5
10,1 a 15	11,97	681	19,68	366,5	446,1	953,9
15,1 a 20	16,27	213	6,14	249,3	25,5	424,5
20,1 a 25	22,30	125	3,61	184,7	43,0	318,5
25,1 a 30	26,19	88	2,53	124,6	12,0	228,5
TOTAL		3463	100,00	1177,7	2696,4	4328,6

Nota: **DAP**: diámetro altura de pecho, **D.E.** : desviación estándar, **I.C. 95%** : Intervalo de confianza al 95 %

Fuente: Elaboración propia.

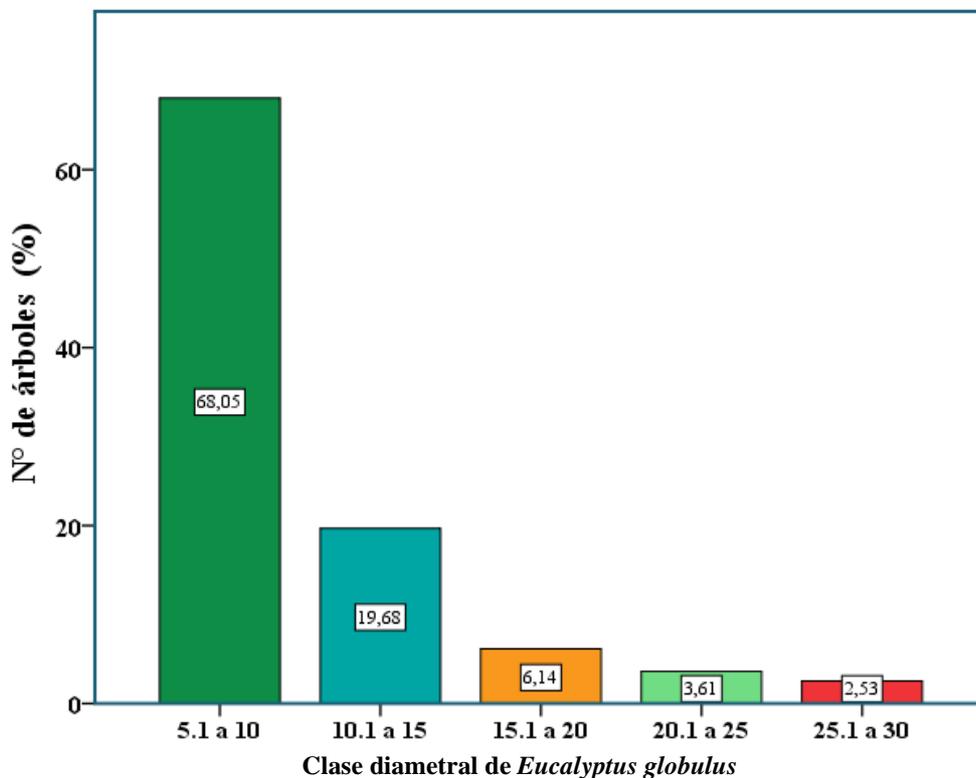


Figura 1. Comparación del DAP promedio y frecuencia de *Eucalyptus globulus* por clase diametral en la provincia de Tarata, en el año 2019.

INTERPRETACIÓN: En la Tabla 4 y Figura 1, se observa que la clase diametral de 5 a 10 cm presenta un DAP promedio de 6,70 cm y es la más frecuente por hectárea con un 68,05 % (2356 pl / ha) en la provincia de Tarata, seguido de la clase diametral de 10,1 a 15 cm con 11,97 cm de diámetro y una frecuencia de 19,68 (681 pl / ha); la clase con un DAP promedio de 16,27 cm tiene una densidad de 6,14 (213 pl / ha), mientras que los menos frecuentes son las clases 20,1 a 25 cm y de 25,1 a 30 cm, cuya frecuencia es de 3,61 % (125 pl / ha) y 2,53 % (88 pl / ha) respectivamente, el número promedio de árboles de *E. globulus* en la provincia de Tarata es de 3463 árboles por hectárea.

Tabla 5
Determinación de la altura total y comercial de Eucalyptus globulus por clase diametral en la provincia de Tarata, en el año 2019.

Clase diametral	Altura promedio (m)		D.E.	I.C.	
	Total	Comercial		Límite inferior	Límite superior
DAP (cm)					
5 a 10	9,41	4,21	0,70	8,93	9,90
10,1 a 15	14,04	9,68	0,30	13,83	14,25
15,1 a 20	16,76	12,83	1,11	15,87	17,65
20,1 a 25	18,77	15,14	0,32	18,45	19,08
25,1 a 30	19,99	16,55	0,06	19,92	20,06
Promedio	15,79	9,68	1,62	14,67	16,92

Nota: **DAP**: diámetro altura de pecho, **D.E.** : desviación estándar, **I.C. 95%** : Intervalo de confianza al 95 %

Fuente: Elaboración propia.

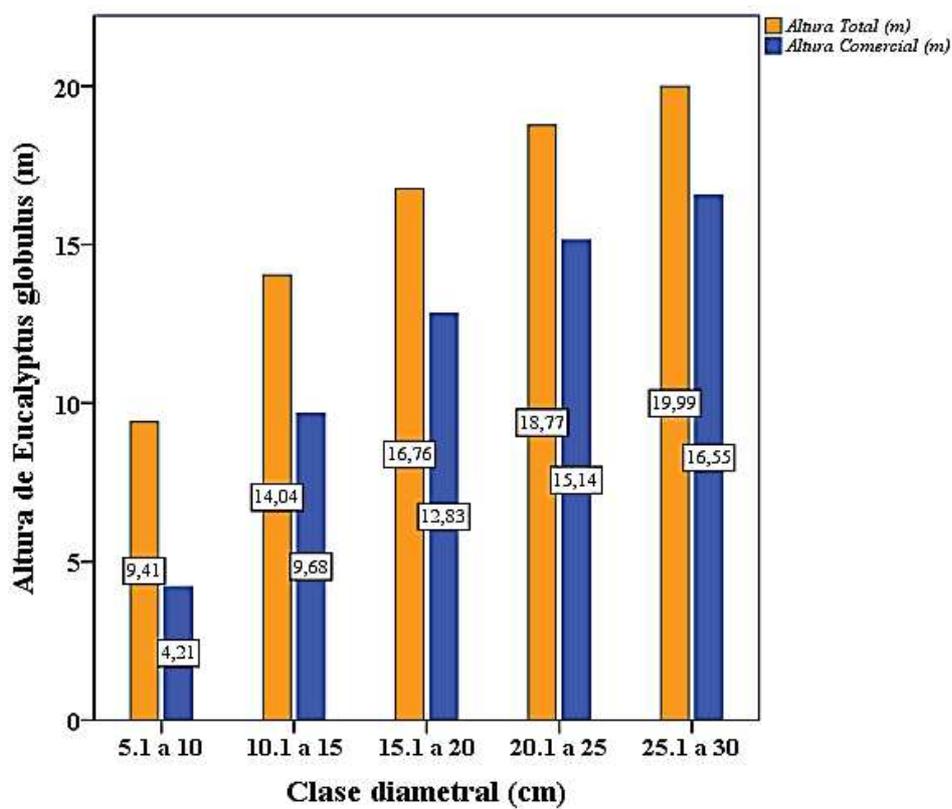


Figura 2. Comparación de la altura total y comercial de los árboles de *Eucalyptus globulus* por clase diametral en la provincia de Tarata, en el año 2019.

INTERPRETACIÓN: En la Tabla 5 y Figura 2, se observa los valores promedios de la altura total y comercial de *E. globulus* en la provincia de Tarata, la clase diametral de 5 a 10 presentan una altura total de 9,41m mientras que su sección comercial es de 4,21 metros, la clase diametral de 10,1 a 15 presentan valores de alturas de 14,04 y 9,68 metros, la clase 15,1 a 20 se incrementan ligeramente a 16,76 y 12,83 metros, la clase 20,1 a 25 cm tiene valores de altura de 18,77 y 15,14 metros, mientras que los árboles de la clase diametral comprendida entre 25,1 a 30 cm de DAP, son los más altos con 19,99 (total) y 16,55 metros (comercial).

Tabla 6
Determinación del volumen de la biomasa aérea de los árboles de Eucalyptus globulus según su clase diametral en la provincia de Tarata, en el año 2019

Clase					
Diametral	Área	Volumen Total		Volumen Comercial	
DAP	Basal				
(cm)	(m² / ha)	(m³/ ha)	%	(m³/ ha)	%
5 a 10	8,09	54,28	18,61	31,18	19,80
10,1 a 15	7,67	72,88	24,99	40,28	25,57
15,1 a 20	2,76	50,99	17,48	26,87	17,06
20,1 a 25	3,03	71,19	24,41	37,11	23,56
25,1 a 30	1,76	42,35	14,52	22,06	14,00
TOTAL	23,31	291,69	100,00	157,50	100,00

Nota: **DAP**: diámetro altura de pecho

Fuente: Elaboración propia.

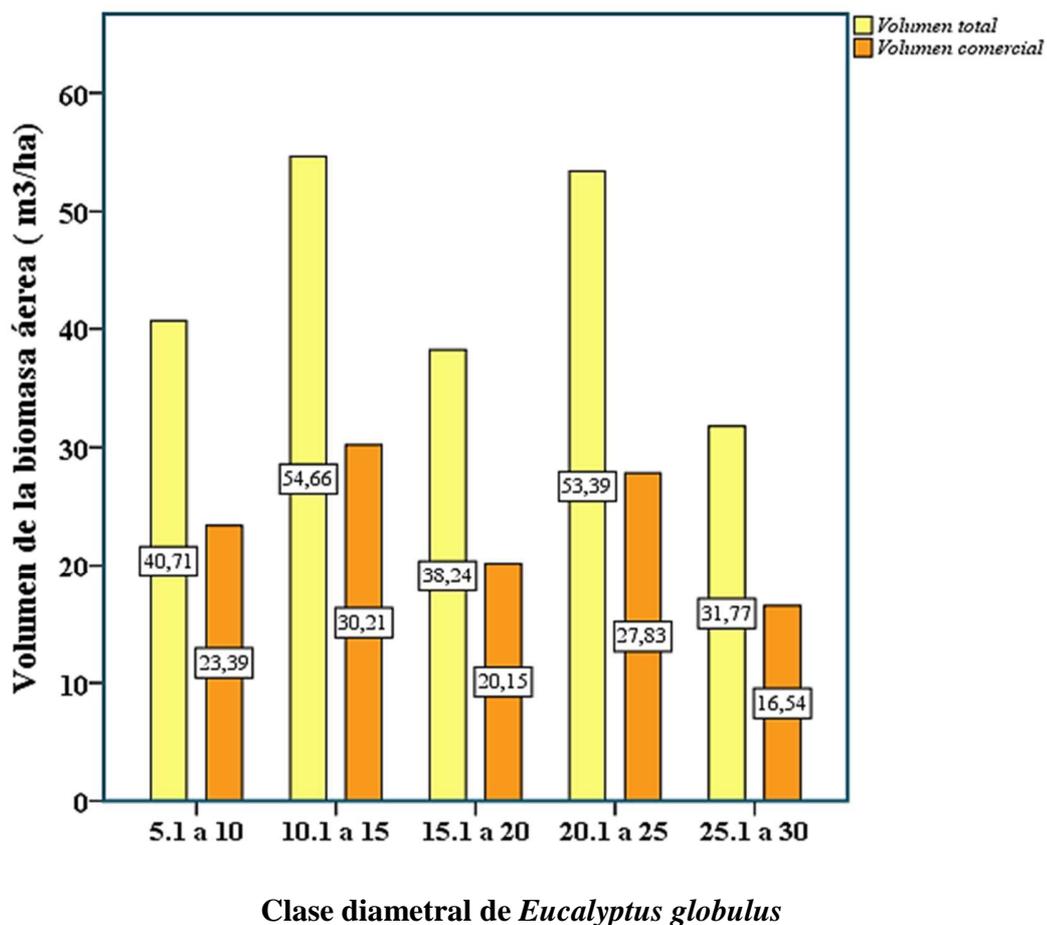


Figura 3. Comparación del volumen total y comercial de la biomasa aérea de *Eucalyptus globulus* por clase diametral en la provincia de Tarata, en el año 2019.

INTERPRETACIÓN: En la Tabla 6 y Figura 3, se observa los valores promedios del volumen en las diferentes clases diametrales por hectárea de *E. globulus* en la provincia de Tarata, donde el volumen total de las clases diametrales 10,1 a 15 cm y 20,1 a 25 cm presenta las mayores concentraciones con 72,88 m³/ha y 71,19 m³/ha seguido de la clase 5 a 10 cm y 15,1 a 20 con 54,28 m³/ha y 50,99 m³/ha respectivamente, mientras que un volumen de 42,35 m³/ha contiene la clase diametral 25,1 a 30 cm, en cuanto al volumen comercial, se observa el mismo comportamiento donde las clases diametrales

con DAP de 10,1 a 15 cm y 20,1 a 25 cm presenta las mayores concentraciones con 40,28 m³/ha y 37,11 m³/ha seguido de las clases diametrales con DAP de 5 a 10 cm y 15,1 a 20 cm, quienes presentan 31,18 m³/ha y 26,87 m³/ha respectivamente, mientras la clase diametral de 25,1 a 30 cm presenta un volumen promedio de 22,06 m³/ha.

Tabla 7

Determinación del peso seco de la biomasa aérea de los árboles de Eucalyptus globulus según su clase diametral en la provincia de Tarata, en el año 2019.

Clase Diametral DAP (cm)	Peso Total ^a		Peso Comercial	
	(t / ha)	%	(t / ha)	%
5 a 10	40,71	18,61	23,39	19,80
10,1 a 15	54,66	24,99	30,21	25,57
15,1 a 20	38,24	17,48	20,15	17,06
20,1 a 25	53,39	24,41	27,83	23,56
25,1 a 30	31,77	14,52	16,54	14,00
TOTAL	218,76	100,00	118,12	100,00

Nota: **DAP**: diámetro altura de pecho, **a**: Obtenida al multiplicar el volumen por la Gravedad específica (0,75 t/m³)

Fuente: Elaboración propia

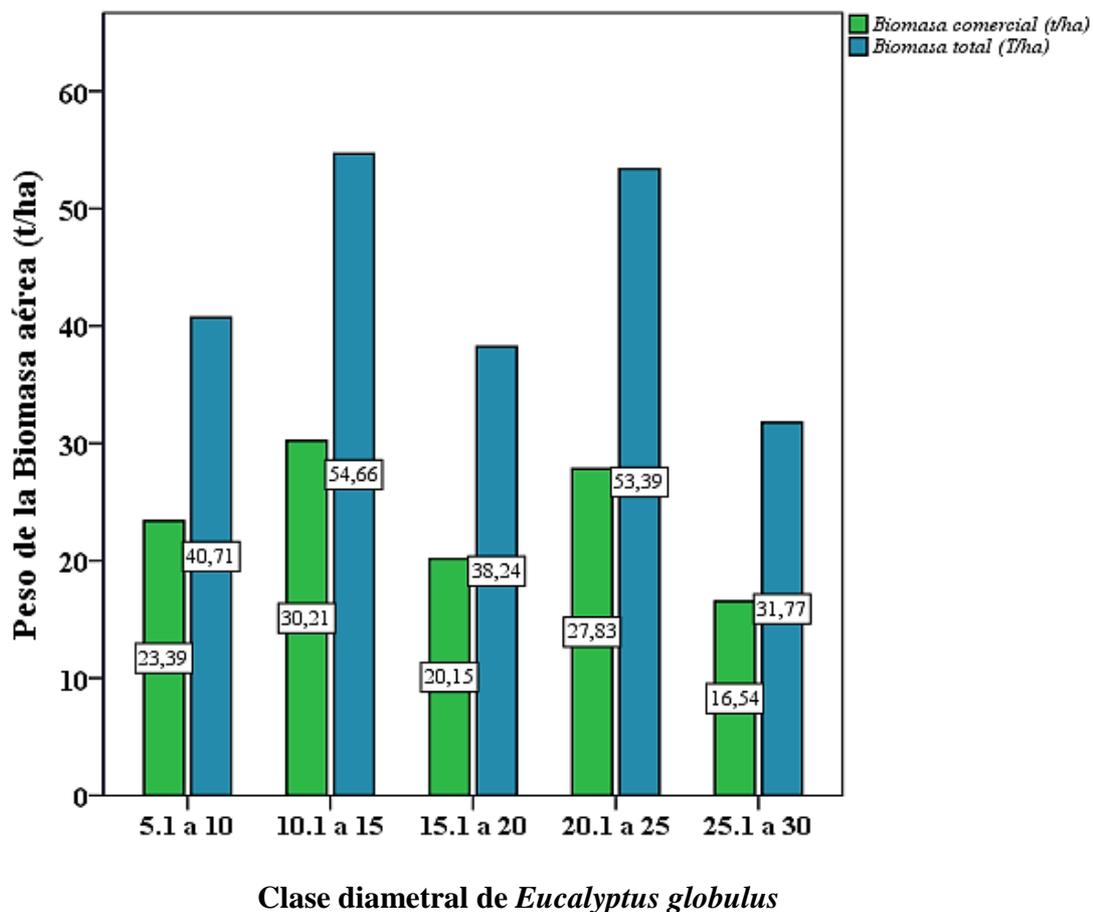


Figura 4. Comparación del peso seco total y comercial de la biomasa aérea de *Eucalyptus globulus* por clase diametral en la provincia de Tarata, en el año 2019.

INTERPRETACIÓN: En la Tabla 7 y Figura 4, se observan los valores promedios del peso seco de las diferentes clases diametrales por hectárea de *E. globulus* en la provincia de Tarata, respecto al peso seco total del árbol, las clases diametrales 10,1 a 15 cm y 20,1 a 25 cm presenta las mayores concentraciones con 40,71 t ha⁻¹ y 38,24 t ha⁻¹ seguido de la clase 5 a 10 cm y 15,1 a 20 con 40,71 t ha⁻¹ y 38,24 t ha⁻¹ respectivamente, mientras que 31,77 t ha⁻¹ se presenta en la clase 25,1 a 30 cm de DAP, respecto al peso seco en la parte comercial o fuste del árbol, las clases diametrales con

DAP de 10,1 a 15 cm y 20,1 a 25 cm presenta las mayores concentraciones con 30,21 t ha⁻¹ y 27,83 t ha⁻¹ seguido de las clases diametrales con DAP de 5 a 10 cm y 15,1 a 20 cm, quienes presentan 23,39 t ha⁻¹ y 20,15 t ha⁻¹ respectivamente, mientras la clase diametral de 25,1 a 30 cm presenta un volumen promedio de 16,54 t ha⁻¹,

Tabla 8

Determinación de la captura de carbono en la biomasa aérea de Eucalyptus globulus por hectárea en la provincia de Tarata, en el año 2019.

Zonas de evaluación	Volumen Total (m ³ /ha)			Peso seco (t / ha)	Carbono (t C/ ha)	Dióxido de carbono (t CO ₂ /ha)
	<i>x</i> ₁	<i>x</i> ₂	Media			
Estique Pampa	79,11	97,83	88,47	66,35	33,18	121,76
Estique Pueblo	150,51	185,44	167,97	125,98	62,99	231,17
Talabaya	113,81	156,08	134,94	101,21	50,60	185,72
Tarucachi	530,70	757,86	644,28	483,21	241,61	886,69
Tarata	166,98	268,70	217,84	163,38	81,69	299,80
Ticaco	312,82	715,67	514,25	385,68	192,84	707,73
Susapaya	213,69	215,62	214,66	160,99	80,50	295,42
Sitajara	354,35	347,80	351,08	263,31	131,65	483,17
TARATA						
Promedio			291,69	218,76	109,38	401,43

Fuente: Elaboración propia

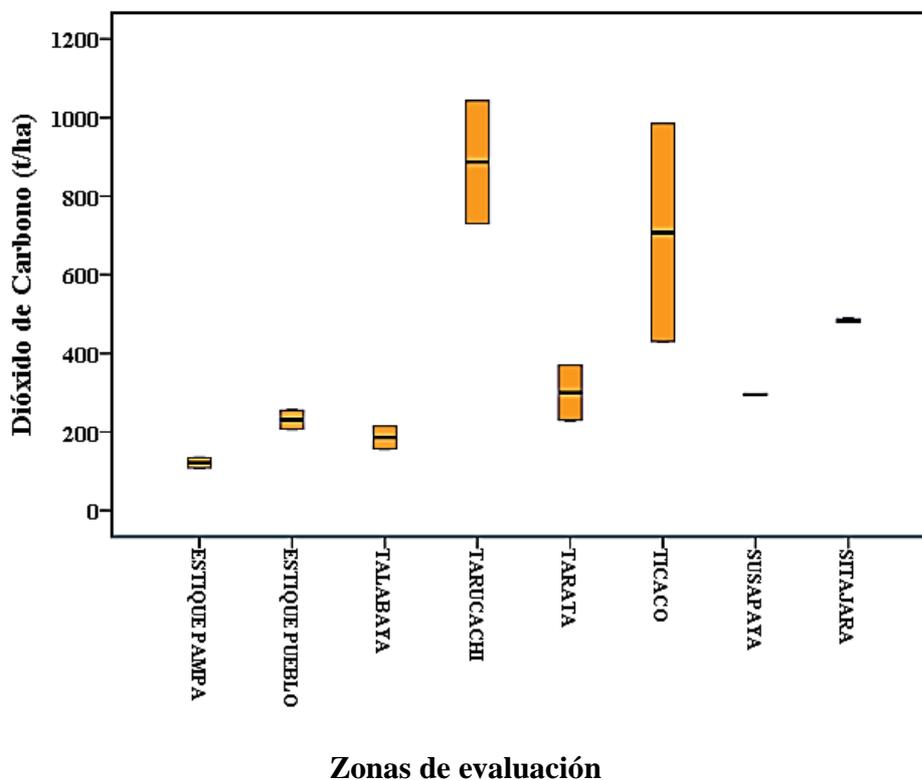


Figura 5. Comparación de la captura de carbono por hectárea en la biomasa aérea de *Eucalyptus globulus*, en ocho localidades de la provincia de Tarata, en el año 2019.

INTERPRETACIÓN: En la Tabla 8 y Figura 5, se observa que la biomasa aérea (peso seco) promedio de *Eucalyptus globulus* en los diferentes distritos y anexos de la provincia de Tarata es de 218,76 t ha⁻¹, la cantidad de carbono capturado es de 109,38 t C ha⁻¹ equivalentes a 401,43 t CO₂ ha⁻¹, a nivel de distritos, Tarucachi y Ticaco, presentan valores más altos con 886,69 t CO₂ ha⁻¹, y 707,73 t CO₂ ha⁻¹ respectivamente, los distritos de Tarata (299,80 t CO₂ ha⁻¹), Susapaya (295,42 t CO₂ ha⁻¹) y Estique Pueblo (231,17 t CO₂ ha⁻¹) presentan concentraciones similares, mientras que el anexo de Talabaya (185,72 t CO₂ ha⁻¹) y Estique Pampa (121,76 t CO₂ ha⁻¹) presentan los valores más bajos por hectárea.

Tabla 9

Análisis de varianza para la estimación de captura de carbono en la biomasa aérea de Eucalyptus globulus en la provincia de Tarata, en el año 2019.

F.V.	G.L.	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F_(α=0,05)	Sig,
Inter-grupos	7	1022571,561	146081,65	5,421	0,015
Intra-grupos	8	215589,032	26948,62		
Total	15	1238160,592			

INTERPRETACIÓN: Al realizar el análisis de varianza a los promedios de carbono capturado en la biomasa aérea por hectárea en las zonas de evaluación de la provincia de Tarata, se muestra que hay diferencias altamente significativas entre ellas a un nivel de confianza del 95 % (Tabla 9).

Tabla 10

Prueba de Duncan para determinar los mejores promedios de captura de carbono por hectárea en Eucalyptus globulus, en ocho localidades de la provincia de Tarata, en el año 2019.

Nº	Zonas de evaluación	Código	Medias (t CO₂/ha)	Significancia (F_{α=0,05})
1	Tarucachi	TA	886,69	A
2	Ticaco	TI	707,73	A B
3	Sitajara	SI	483,17	B C
4	Tarata	TA	299,80	C
5	Susapaya	SU	295,42	C
6	Estique Pueblo	EPP	231,17	C
7	Talabaya	TL	185,71	C
8	Estique Pampa	EP	121,75	C

INTERPRETACIÓN: Mediante la prueba de Duncan se determinó que en el distrito de Tarucachi se captura la mayor concentración de carbono por hectárea con 886,69 t CO₂ ha⁻¹, en segundo lugar se encuentra Ticaco (707,73 t CO₂ ha⁻¹) a diferencia de los distritos de Tarata (299,80 t CO₂ ha⁻¹), Susapaya (295,42 t CO₂ ha⁻¹), Estique Pueblo (231,17 t CO₂ ha⁻¹) Talabaya (185,72 t CO₂ ha⁻¹) y Estique Pampa (121,76 t CO₂ ha⁻¹) presentan los valores más bajos por hectárea.

Tabla 11

Determinación de la captura de carbono en la biomasa aérea de Eucalyptus globulus, en la provincia de Tarata, en el año 2019.

Localidades	Código	Área (ha)	Peso (t)	Carbono (t C)	Dióxido de carbono (t CO ₂)
Estique Pampa	EP	72,78	4829,10	2414,55	8861,39
Estique Pueblo	EPP	112,35	14153,88	7076,94	25972,36
Talabaya	TL	38,70	3916,75	1958,37	7187,23
Tarucachi	TR	51,97	25112,47	12556,24	46081,39
Tarata	TA	46,30	7564,52	3782,26	13880,90
Ticaco	TI	35,80	13807,51	6903,76	25336,79
Susapaya	SU	2,56	412,14	206,07	756,28
Sitajara	SI	3,25	855,75	427,88	1570,31
TARATA					
Total		363,71	70 652,12	35 326,06	129 646,63

Fuente: Elaboración propia

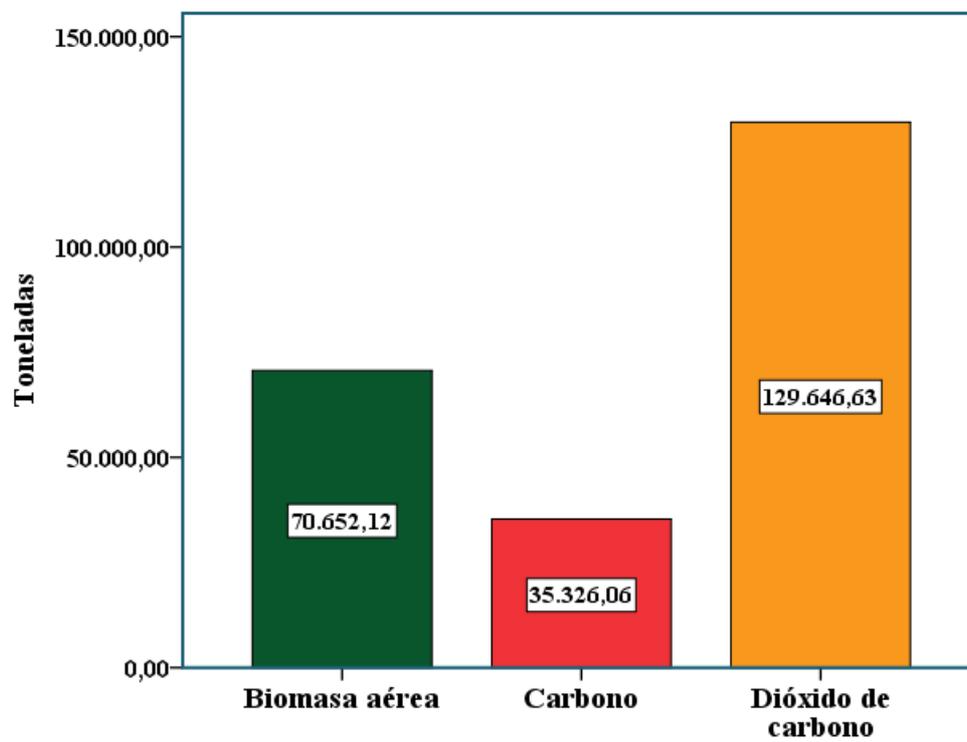


Figura 6. Captura de carbono en la biomasa aérea de *Eucalyptus globulus*, en la provincia de Tarata, en el año 2019.

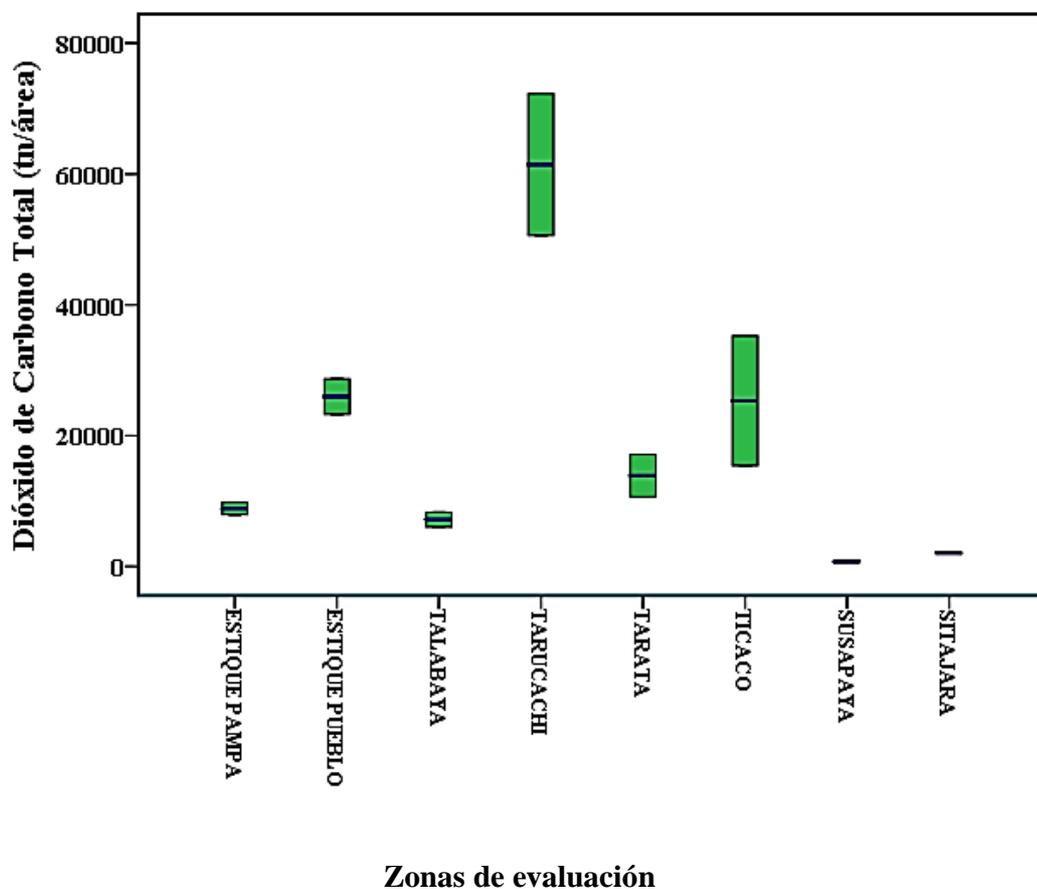


Figura 7. Comparación de la captura de carbono en la biomasa aérea de *Eucalyptus globulus*, en la provincia de Tarata, en el año 2019.

INTERPRETACIÓN: En la Tabla 11 y Figura 6, se observan que la biomasa aérea total estimada de *Eucalyptus globulus* en la provincia de Tarata fue de 70 652,12 toneladas, con 35 326,06 toneladas de carbono equivalentes a 129 646,63 toneladas de dióxido de carbono. En el distrito de Tarucachi (46 081,39 t CO₂) se observa la mayor captura de carbono, en Estique Pueblo (25 972,36 t CO₂), Ticaco (25 336,79 t CO₂) y Tarata (13 880,90 t CO₂), almacena una considerable cantidad de carbono a diferencia

de Talabaya (7187,23 t CO₂ ha⁻¹) Sitajara (1 570,31 t CO₂) y Susapaya (756,28 t CO₂) se encuentran las concentraciones más bajas de carbono (Tabla 11 y Figura 7).

Tabla 12

Análisis de varianza para la estimación de captura de carbono por Eucalyptus globulus en la provincia de Tarata, en el año 2019.

F.V.	G.L.	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F_(α=0,05)	Sig.
Inter-grupos	7	5544081847,21	792011692,45	13,438	0,001
Intra-grupos	8	471523022,08	58940377,76		
Total	15	6015604869,28			

INTERPRETACIÓN: Al realizar el análisis de varianza a los promedios de carbono capturado en la biomasa aérea en las zonas de evaluación de la provincia de Tarata, se muestra que hay diferencias altamente significativas entre ellas a un nivel de confianza del 95 % (Tabla 12).

Tabla 13
Prueba de Duncan para estimar los mejores promedios de captura de carbono por Eucalyptus globulus, en la provincia de Tarata, en el año 2019.

N°	Localidad	Código	Medias (t CO ₂ /ha)	Orden
1	Tarucachi	TA	46 081,39	A
2	Estique Pueblo	EPP	25 972,36	B
3	Ticaco	TI	25 336,79	B
4	Tarata	TA	13 880,90	C
5	Estique Pampa	EP	8 861,39	C
6	Talabaya	TL	7 187,23	C
7	Sitajara	SI	1 570,31	D
8	Susapaya	SU	756,28	D

INTERPRETACIÓN: Mediante la prueba de Duncan, se determinó que la mayor concentración de carbono capturado ocurre en el distrito de Tarucachi (46081,39 t CO₂), en segundo lugar se encuentran Estique Pueblo (25972,36 t CO₂) y Ticaco (25336,79 t CO₂), mientras que Tarata (13880,90 t CO₂), Estique Pampa (8861,39 t CO₂ ha⁻¹) y Talabaya (7187,23 t CO₂ ha⁻¹) aun almacena una considerable cantidad de carbono en su superficie cultivada a diferencia de Sitajara (1570,31 t CO₂) y Susapaya (756,28 t CO₂) donde se encuentran los valores más bajos.

4.2. Discusión

Eucalyptus globulus, es una de la 600 especies de eucaliptos que existen a nivel mundial (Hinostroza, 2016), en el Perú, es cultivada en diferentes regiones como sucede en la provincia andina de Tarata de la Región de Tacna, donde SERFOR, como autoridad nacional forestal y de fauna silvestre, viene promoviendo, desde el 2016, las plantaciones con fines comerciales, de protección o recuperación sobre tierra que no cuenten con cobertura de bosques primarios, ni bosques secundarios, porque contribuyen a la producción de madera y de productos no maderables, lo cual indica que la extensión forestal seguirá en aumento, pero aparte de generar aportes económicos para la comunidad, esta especie cumple servicios ecosistémicos, como la captura de carbono, sobre la cual no hay mucha información local y es la razón de la presente investigación.

Entre las variables dendrométricas evaluadas, el DAP clasificados en clases diametrales de 5 cm de amplitud y su densidad relativa, son parámetros que permiten conocer el manejo forestal de este cultivar, los resultados de la tabla 4, muestran que el número promedio de árboles de *E. globulus* es de 3463 árboles por hectárea, los árboles juveniles con un DAP promedio de 6,70 cm son los más frecuentes con un 68,05 % (2356 pl / ha), seguido de un 19,68 % (681 pl / ha) con diámetro promedio de 11,97 cm, los eucaliptos con DAP promedio de 16,27 cm tiene una densidad de 6,14 % (213 pl / ha), mientras que los menos frecuentes son los árboles comprendidos en las clases diametrales de 20,1 a 25 cm y de 25,1 a 30 cm, cuya frecuencia es de 3,61 % (125 pl / ha) y 2,53 % (88 pl / ha), respectivamente.

La densidad de cultivo de los eucaliptos depende del propósito que se le dá, de acuerdo a los ensayos realizados por (Bin, 2017), estableció que la mejor densidad de siembra es de 5000 árboles por hectárea con un marco de siembra de 1 x 2 metros, seguida de la densidad de 3333 árboles por hectárea con un marco de siembra de 1 x 3 m., el marco de siembra en los diferentes distritos y anexos evaluados es variable y según los agricultores, en la localidad de Estique Pampa y el anexo de Talabaya, los nuevos plantones de eucaliptos presentan una densidad de siembra de 5000 pl / ha, (DAP < 5 cm, los que no fueron evaluados).

De acuerdo a los reportes de Ferrere *et al.* (2005), una alta densidad favorece el incremento del DAP, donde la competencia por luz y nutrientes es son factores que incrementan su crecimiento y tiende a producir más volumen total, pero densidades bajas los hacen más vulnerables a vientos que hacen que no crezcan, presentan más ramas y mayor corteza como los empleados como cerco o cortinas rompe vientos, comunes las observadas en las localidades de Susapaya y Sitajara, pero cuando la densidad es excesiva, se incrementa la proporción de árboles suprimidos o dominados (Hinostroza, 2016) .

Respecto a la altura de la especie *E. globulus*, bajo las condiciones edafoclimáticas y técnicas manejo de este cultivo forestal, se determinó que los eucaliptos de la provincia de Tarata, alcanzan una altura total promedio de 15,79 metros con una troza comercial de 9,68 metros, al organizar los datos de la evaluación

de campo en clases diametrales como se muestra en la tabla 5, se observa un crecimiento acelerado en los árboles jóvenes con diámetros de tronco de 5 a 10 cm (9,41 metros) hasta los que tienen un DAP menor o igual a 20 quienes presentan una altura promedio de 16,76 m, mientras los que se encuentran por encima de ese DAP, desarrollan más diámetro que altura como se aprecia en la Tabla 5, donde la clase diametral de 20,1 a 25 cm que presenta una altura de 18,77 m, solo se incrementa en 19,99 metros al alcanzar un DAP 26,19 cm (Tabla 4), esto se debe a que desarrollan más corteza que altura, pero desde el punto de vista comercial los árboles de menor DAP, no alcanzan una buena troza comercial como se demuestra en la clase diametral de 5 a 10 cm, a pesar de tener una altura total de 9,41 metros, su troza comercial es de 4,21 metros, a diferencia de la clase 20,1 a 25 cm, donde una gran longitud de su altura total 18,77 m, es comercial 15,14 m.

Los resultados obtenidos en las diferentes clases diametrales de *E. globulus*, concuerdan con los reportados por Moras & Vallejos (2013), quienes indican que las plantaciones comerciales de *Eucalyptus globulus* var *globulus* en el sur de Uruguay, presentan un incremento medio anual de 1,2 a 1,6 metros en altura y de 1,1 a 1,2 cm en diámetro bajo una densidad de siembra de 1111 y 1667 árboles por hectárea, por debajo de la densidad promedio en Tarata, la diferencia está en la finalidad del manejo, en países como Uruguay, Argentina, el propósito del cultivo de eucaliptos, son con fines de obtención de pulpa blanca y en Perú, para la obtención de madera rolliza principalmente.

El volumen de la biomasa aérea depende de muchos factores especialmente del manejo forestal, en las localidades evaluadas se determinó que el volumen total promedio por hectárea es de $291,69 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ con un área basal $23,31 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, bajo la densidad de siembra en la provincia de Tarata, donde las clases diametrales 10,1 a 15 cm y 20,1 a 25 cm presenta las mayores concentraciones de volumen con $72,88 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $71,19 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, mientras que concentración más baja se obtuvo en la clase 25,1 a 30 cm de DAP con un $42,35 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, el volumen comercial promedio es de $157,50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, el fuste al derivar del mismo árbol, presenta el mismo comportamiento, donde las clases diametrales con DAP de 10,1 a 15 cm y 20,1 a 25 cm presenta los mayores volúmenes de biomasa (Tabla 6).

El volumen total y comercial promedio obtenido en las evaluaciones (Tabla 6), difieren de los reportados por Mora & Vallejos (2013), quienes al evaluar diferentes establecimientos obtuvieron volúmenes totales de $191,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (1111 pl / ha) y $174,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (1250 pl / ha) y para el volumen comercial $103,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (1667 pl / ha) y $188,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (1667 pl / ha), a pesar de tener una mayor densidad promedio (3463 pl / ha) en la provincia de Tarata el volumen es ligeramente superior a estos resultados; asimismo, Geldres & Schlatter (2004), al evaluar el cultivo de *E. globulus* en suelos rojos arcillosos en Chile, determinaron $256,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, para una densidad de 1507 plantas por hectárea, estos resultados demuestra la influencia de varios factores que repercuten en el crecimiento de los eucaliptos en la provincia de Tarata.

De acuerdo a Balmelli *et al.* (2006), la utilización de semillas mejoradas de eucaliptos producen una mayor tasa de crecimiento, calidad sanitaria y rendimiento de pulpa por unidad de superficie, como lo realizan en Uruguay, Chile, España y Australia, además la poca profundidad del suelo, el mal drenaje, la salinidad, la presencia de un alto contenido de carbonatos asimilables y el tipo de fertilización, son factores que influyen fuertemente para tener un alto rendimiento de biomasa aérea en *E. globulus* (Espina, 2006).

La obtención peso seco de la biomasa aérea se obtuvo de multiplicar los valores del volumen por la gravedad específica, los análisis físicos de laboratorio determinaron que la gravedad específica para *E. globulus* cultivados en la provincia de Tarata, es de $0,754 \text{ g cm}^{-3}$, según este dato el peso seco promedio para la biomasa aérea es de $218,76 \text{ t ha}^{-1}$ y $118,12 \text{ t ha}^{-1}$ para la troza comercial (Tabla 7), según las clases diametrales los arboles con DAP 11,97 cm y 22,30 cm, obtiene los mayores pesos con $40,71 \text{ t ha}^{-1}$ y $38,24 \text{ t ha}^{-1}$ respectivamente, del mismo modo las trozas comerciales con $30,21 \text{ t ha}^{-1}$ y $27,83 \text{ t ha}^{-1}$, esta variación del peso de la biomasa aérea según las clases diametrales están relacionadas con la edad del árbol, el tamaño de las fibras, espesor de pared celular, tipo y diámetro de células presentes en la madera (Espina, 2006).

Con los datos de la biomasa seca se estimó la captura de carbono en la provincia de Tarata, de acuerdo a métodos no destructivos descritos en el capítulo de metodología, en la tabla 8, se observa que la biomasa aérea ($218,76 \text{ t ha}^{-1}$) de *E. globulus* captura $109,38 \text{ t C ha}^{-1}$ equivalentes a $401,43 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, a nivel de localidades

evaluadas en el distrito de Tarucachi se captura la mayor cantidad de carbono por hectárea con 886,69 t CO₂ ha⁻¹, en segundo lugar se encuentra Ticaco (707,73 t CO₂ ha⁻¹), seguido de Sitajara (43,17 t CO₂ ha⁻¹), mientras que en Tarata (299,80 t CO₂ ha⁻¹), Susapaya (295,42 t CO₂ ha⁻¹), Estique Pueblo (231,17 t CO₂ ha⁻¹), el anexo de Talabaya (185,72 t CO₂ ha⁻¹) y Estique Pampa (121,76 t CO₂ ha⁻¹) se captura menos carbono por hectárea, el promedio de carbono capturado en Tarata es superior a los reportados por Gamarra (2001), al evaluar el bosque de *Eucalyptus globulus* Labill en la comunidad campesina de Hualhuas en Junín, donde la biomasa captura 73,03 t C ha⁻¹ equivalentes a 268,02 t CO₂ ha⁻¹ del mismo modo Alfaro & Cabrera (2017), reporta 85,95 t C ha⁻¹ equivalentes a 315,43 t CO₂ ha⁻¹, en la provincia de Otuzco en la Libertad, ambos promedios son inferiores al encontrado en Tarata, esta diferencia puede ser atribuida a las condiciones ambientales, temperatura, precipitación, altitud, edad de los árboles y manejos silviculturales (Luza, 2013 y Espina, 2006).

Tomando en cuenta las 363,71 hectáreas cultivadas con *Eucalyptus globulus* en los diferentes distritos de Tarata y considerando solo árboles con DAP mayor a 5 cm, se estima que la biomasa aérea de este cultivar es de 70 652,12 toneladas y según la metodología aplicada captura 35 326,06 toneladas de carbono equivalentes a 129 646,63 toneladas de dióxido de carbono, al redistribuir estas cantidades a nivel de los distritos evaluados, en la en la tabla 11 se observa que en Tarucachi, se captura la mayor cantidad carbono (46 081,39 t CO₂), en segundo lugar se encuentran Estique Pueblo (25 972,36 t CO₂) y Ticaco (25 336,79 t CO₂) mientras que en Tarata (13 880,90 t CO₂) Estique Pampa (8 861,39 t CO₂ ha⁻¹) y Talabaya (7 187,23 t CO₂ ha⁻¹) se captura

una regular cantidad de carbono a diferencia de Sitajara (1 570,31 t CO₂) y Susapaya (756,28 t CO₂) donde se encuentran los valores más bajos, este comportamiento puede deberse a que Tarucachi, además de poseer áreas cultivadas de eucaliptos para la obtención de trozas comerciales, también presenta árboles sembrados en los linderos, generalmente son más grandes y ramificados, que incrementan la biomasa total de esa localidad, mientras que en Estique Pampa, Estique pueblo y el anexo de Talabaya se caracterizan por la siembra intensiva de esta especie forestal con una alta densidad de plantones jóvenes por hectárea (Tabla 8) y mayor superficie cultivada, razón por la cual se le considera el “pulmón ecológico” de la región de Tacna, a diferencia de los distritos de Susapaya y Sitajara, donde la especie es empleada mayoritariamente como cerco vivo, con mayor biomasa acumulada por hectárea pero al tener una menor superficie cultivada, su aporte a la fijación de captura de carbono en la provincia es menor como lo demuestra la prueba de Duncan en la Tabla 13.

Gracias a la plantación forestal de *Eucalyptus globulus* en la provincia de Tarata, se captura un total de 129 646,63 toneladas de dióxido de carbono (CO₂), gas que es uno de los principales causantes del efecto invernadero a nivel mundial, y funcionan como importante sumidero de carbono en la Región de Tacna.

Uno de los grandes desafíos ambientales para la sociedad en la actualidad es el cambio climático, porque las diversas actividades humanas la generación de los gases de efecto invernadero, especialmente del dióxido de carbono; por eso la búsqueda de nuevos sumideros de carbono como las plantaciones forestales de la provincia de

Tarata, es de mucha importancia; porque contribuyen a la reducción de este gas; no obstante, hay que tener en cuenta que no todo el CO₂ capturado por los árboles queda almacenado para siempre en la biomasa, hay una parte importante de dióxido que se devuelve a la atmósfera.

CAPÍTULO V:
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se evaluó el secuestro de carbono de plantaciones forestales *Eucalyptus globulus* en la provincia de Tarata, en el año 2019.

- Se estimó que la biomasa aérea en *Eucalyptus globulus* cultivadas en la provincia de Tarata, fue de 706 522,12 toneladas.

- El contenido de carbono secuestrado en la biomasa aérea de *Eucalyptus globulus* fue de 35 326,06 t C ha⁻¹.

- La captura de dióxido de carbono fue de 129 646,63 t CO₂ ha⁻¹ en la biomasa aérea de *Eucalyptus globulus* de la provincia de Tarata.

5.2. Recomendaciones

- Realizar estudios de captura de CO₂ en otras especies forestales como el pino, la tara y otras especies nativas propias de la provincia de Tarata, como medio de preservación y conservación para ofertar un aire más limpio y puro de oxígeno.
- Se recomienda realizar un inventario forestal actualizado de las diferentes especies en los distritos de Tarata, buscando no solo la viabilidad económica, a través de la captura de carbono, sino también como un medio de preservación y conservación del medio ambiente.
- Evaluar técnicas de propagación para las especies de eucaliptos cultivados en la provincia de Tarata y para las próximas actividades de reforestación emplear plantones procedentes de semillas mejoradas para obtener mayor biomasa aérea.
- Las autoridades locales y regionales deberían promover este ecosistema forestal de la provincia de Tarata a nivel nacional e internacional como importante sumidero de dióxido de carbono.
- Analizar la calidad de suelo y agua empleado en los cultivos de eucaliptos en la provincia de Tarata.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ajete, A., Mercadet, A., Toirac, W., & Conde, F. (2012). *Estimación del contenido de carbono en los bosques de la empresa forestal integral Guantánamo*. *Forestal Baracoa*, 2(31), 3 - 8.
- Alegre, J., Arévalo, L., & Palma, C. (2002). *Secuestro de carbono con sistemas alternativos en el Perú*. Lima: Congreso Baseleiro de Agroforestais, Bahía Brasil.
- Alfaro, R., & Cabrera, A. (2017). *Captura de carbono en rebrotes de Eucalyptus globulus en la provincia de Otuzco, La Libertad*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo.
- Arévalo, L., Alegre, J., & Palma, C. (2002). *Manual de determinación de reservas de carbono*. Lima.
- Balmelli, G., Resquin, F., Altier, N., & Marroni, V. (2006). *Semilla mejorada de Eucalyptus grandis en el Programa Nacional Forestal del INIA*. Lima: Instituto Nacional de Innovación Agraria.
- Bin, E. (2017). *Evaluación de densidades de plantación Eucalyptus; San Juan Chamelco, Alta Verapaz*. Universidad de Alta Verapaz, Alta Verapaz. Guatemala.
- Casanova, P., & Solorio, J. (2011). Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Chapingo Series Ciencia Forestales y del Ambiente*, 17(1), 5-118.
- De la Lama, G. (1976). *Atlas del eucalipto*. Sevilla: Ministerio de Agricultura, Instituto Nacional de Investigaciones agrarias.
- Domínguez, A. (2016). *Estimaciones de captura de los parques y emisiones de CO₂ vehicular en Tijuana, B.C.* Tijuana: Colegio de la Frontera Norte México.
- ECOINTILEGENCIA. (2015). *Protocolo de Kioto: Conoces en que consiste*. Paris.

- Espina, A. (2006). *Densidad básica de la madera de Eucalyptus globulus en dos sitios en Chile*. Tesis, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- FAO. (1981). *El Eucalipto en la repoblación forestal*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- FAO. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. Roma: Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación.
- Fernández, A., & Sifientes, O. (2008). *Estudio de prefactibilidad para la producción y comercialización de papel a partir de eucalipto*. Tesis. Facultad de ciencias e Ingeniería. Lima: Universidad Católica del Perú.
- Fernández, E., & Silva-Pando, F. (2016). El Género Eucalyptus (Myrtaceae) en Galicia: Claves y descripción. *Nova Acta Científica Compostelana (Biología)*, 23-51.
- Ferrere, P., López, G., Boca, R., Galetti, M., Esparrach, C., & Pathauer, P. (2005). Efecto de la densidad de plantación sobre el crecimiento de Eucalyptus globulus en un ensayo Nelder modificado. *Londres: Invest Agrar: Sist Recur For* 14(2), 174-184.
- FOREST TRENDS. (2010). *Aprendiendo sobre pagos por servicios ambientales fundamentos para la elaboración de proyectos de carbono forestal*. Recuperado el 10 de Marzo de 2017, de http://www.katoombagroup.org/documents/events/event42/Aprendiendo_Final.pdf
- Gamarra, J. (2001). *Simulación de captura de carbono en un bosque de Eucalyptus globulus labill, mediante el modelo CO2FIX, Versión 1.2*. Huancayo: Congreso nacional del Eucalypto.
- Geldres, H., & Schlatter, J. (2004). Crecimiento de las plantaciones de Eucalyptus globulus sobre suelos rojo arcillosos de la provincia de Osorno, Décima Región. *Bosque*, 25(1), 95 - 101.
- Gonzales, R. (2012). *Estimation of accumulated carbon in a permanent plot of Andean forest in the Francisco Vivar Castro university park*. Loja .

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático - IPCC. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios*. Ucrania: Cambridge University Press.
- Hanco, E., & Callata, E. (2018). *Determinación de la captura de carbono en suelos con eucalipto (Eucalyptus globulus Labill) en el distrito de Huancané-Puno, 2018*. Tesis, Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú.
- Hidalgo, P. (2006). *Determinación de las Reservas totales de carbono en plantaciones forestales de Eucalyptus globulos en Marcará Carhuas*. Huaraz: Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo.
- Hinostroza, S. (2016). *Anatomía y propiedades físicas de la madera de primera y tercera corta de Eucalyptus globulus Labill*. Universidad del Centro del Perú, Huancayo.
- ICRAF-CODESOL. (2003). *Manual de determinación de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de usos de la tierra en Lima*. Lima: Centro Internacional para la investigación en Agroforestería.
- IPCC. (2003). *Cambio climático 2001. Informe de síntesis. Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático*. Ginebra: Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático.
- Luza, I. (2013). *Stock de carbono almacenado en la biomasa aérea, sobre bosque y suelo andino, Huancayo*. Junín: Universidad Continental.
- Marquez, L. (2009). *Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso del suelo*. ONG Fundación solar, Guatemala.
- MINAM. (2016). *Estimación de los contenidos de carbono de la biomasa aérea en los bosques de Perú*. Lima: Ministerio del Ambiente.
- Ministerio del Ambiente. (2012). *Glosario de términos para la Gestión Ambiental Peruana*. Lima: dirección general de políticas, normas e instrumentos de gestión ambiental.
- Mora, G., & Vallejos, O. (2013). Tablas de volumen para árboles individuales de *Eucalyptus globulus ssp, globulus* cultivados en la región sur de Uruguay. *Agrociencia*, 17(2), 11 - 24.

- Morales, L. (2014). *Estado Actual del Bosque de Polilepys y su eficiencia en la captura de CO₂ en la provincia de Tarata departamento de Tacna*. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Organización de las Naciones Unidas . (1998). *Protocolo de kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climatico*. Kyoto: Unidas Naciones.
- Pariona, F. (2017). *Proyecto de Ley de incentivos para las plantaciones forestales. Proyecto 2550/2017 Congreso de la Republica*. Lima.
- Paulino, M. (2013). *Evaluación de la captura de carbono en tres sistemas de producción de papa en zinacantepec, estado de Mexico*. Toluca de lerdo: Universidad Autonoma del estado de México.
- Pumasupa, M. (2018). *Cuantificación de la captura de carbono de la especie forestal Haplorhus peruviana carzo como servicio ambiental en el valle de Cinto, provincia Jorge Basadre, región Tacna*. Tacna: Tesis de la Universidad Privada de Tacna.
- Quiceno, N., G., T., Marquez, A., & Álvarez, R. (2016). *Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena piapoco chigüiro-chátare* . Colombia: Luna azul .
- Radio Programas del Perú. (2012). *Conozca los bonos de carbono y qué hace Perú al respecto*. Lima, Lima, Perú.
- Rodriguez, R., Jiménez, J., Aguirre, O., Treviño, E., & Razo, R. (2009). *Estimación de carbono almacenado en e bosque de Pino- Encinno en la reserva de a Biosfera el cielo Mexico*. Tamaulpaca: Universidad Autónoma Indígena de Mexico.
- SERFOR. (2016). *Registro de plantaciones forestales de eucalipto y tara en zona altoandina de Tacna*. Tacna, Tarata, Perú.
- Tito, C. (2012). *Estimación Cuantitativa de la Capacidad de captura de CO₂ en plantaciones de Olivo en el distrito de Tacna, 2010*. Tacna: Tesis Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann .

- Universidad de Huelva. (2017). Obtenido de Centro de Investigación y Documentación del Eucalipto (CIDEU): <https://www.uhu.es/cideu/index.htm>
- Vazquez, C. (2015). *Biomasa y carbono almacenado en los fustes de los árboles del bosque de terraza alta de la comunidad de San Pedro-quebrada Blanco, Loreto-Perú, 2013*. Iquitos: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana.
- Villareal, H. Á., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., & Umaña, A. (2004). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Watson, R. (2001). *Cambio climático 2001: Informe de síntesis*. Switzerland: Banco mundial.
- Xol, L. (2017). *Evaluación del volumen de plantaciones forestales de teca (tectona grandis l.f.); las cruces, Petén*. Tesis, Alta Verapaz, Guatemala.

ANEXOS:

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORIZACIÓN

Yo, Edgar Chaparro Aguilar, identificado con DNI. N° 40206961, de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad latinoamericana CIMA declaro bajo juramento, autorizar, en merito a la Resolución del Consejo Directivo N° 033-2016-SUNEDU/CD del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar el Título de Ingeniero Ambiental:

a) Acceso abierto; tiene la característica de ser público y accesible al documento a texto completo por cualquier tipo de usuario.

b) Acceso restringido; solo permite el acceso al registro del metadato con información básica, mas no al texto completo, ocurre cuando el autor de la información expresamente no autoriza su difusión, de acuerdo con lo declarado en el anexo N° 2 del presente Reglamento.

Edgar Chaparro Aguilar

Autor

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA

Yo, Edgar Chaparro Aguilar, identificado con DNI. N° 40206961, egresado de la Carrera de Ingeniería Ambiental declaro bajo juramento ser el autor de la Tesis denominada “Evaluación de secuestro de carbono en las plantaciones forestales de *Eucalyptus globulus* de la provincia de Tarata, 2019”. Además de ser un trabajo original, de acuerdo a los requisitos establecidos en el artículo 27° del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad latinoamericana CIMA.

Edgar Chaparro Aguilar

Autor

Anexo 4: Evidencia de evaluación en campos



Figura 8. Instalación de la parcela de evaluación



Figura 9. Troncos de Eucalipto talado



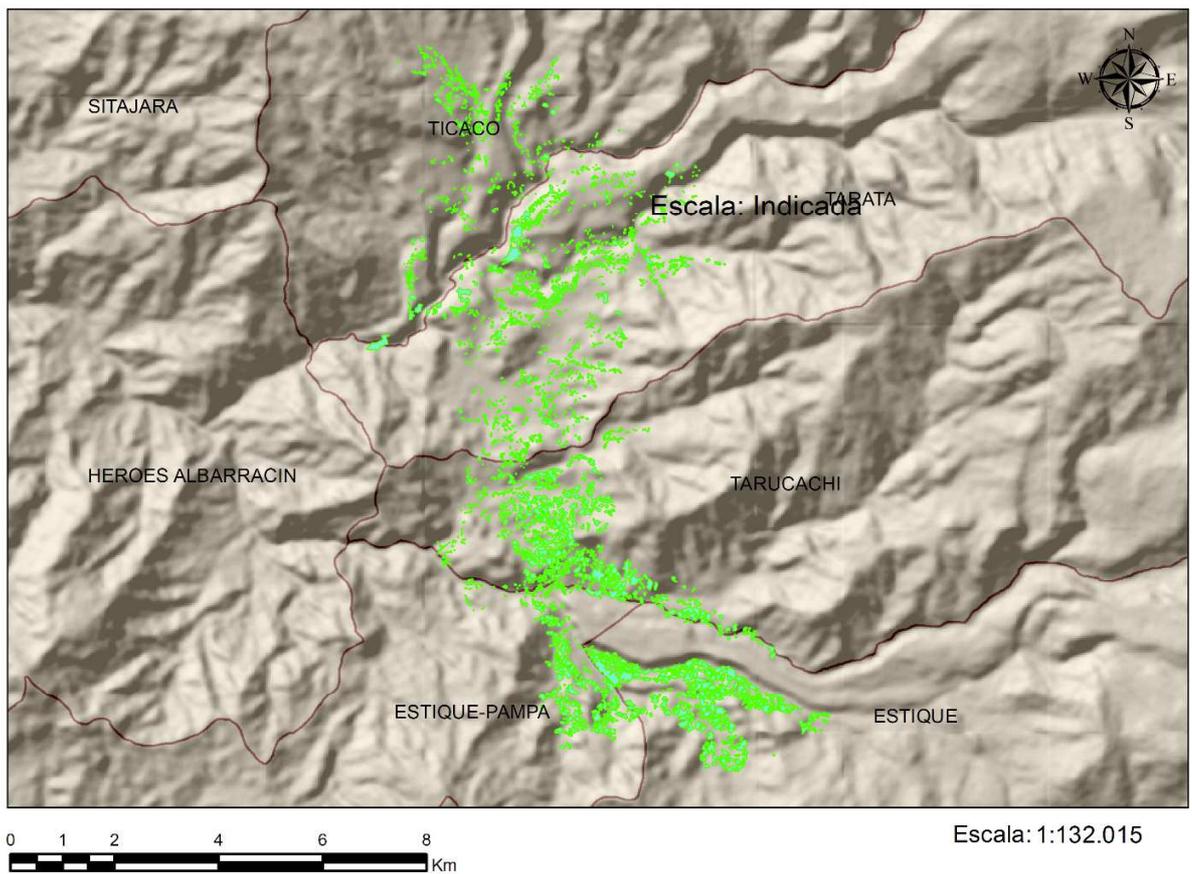
Figura 10. Medición del DAP diámetro a la altura del pecho del árbol en pie



LOCALIZACION REGIONAL



LOCALIZACION NACIONAL



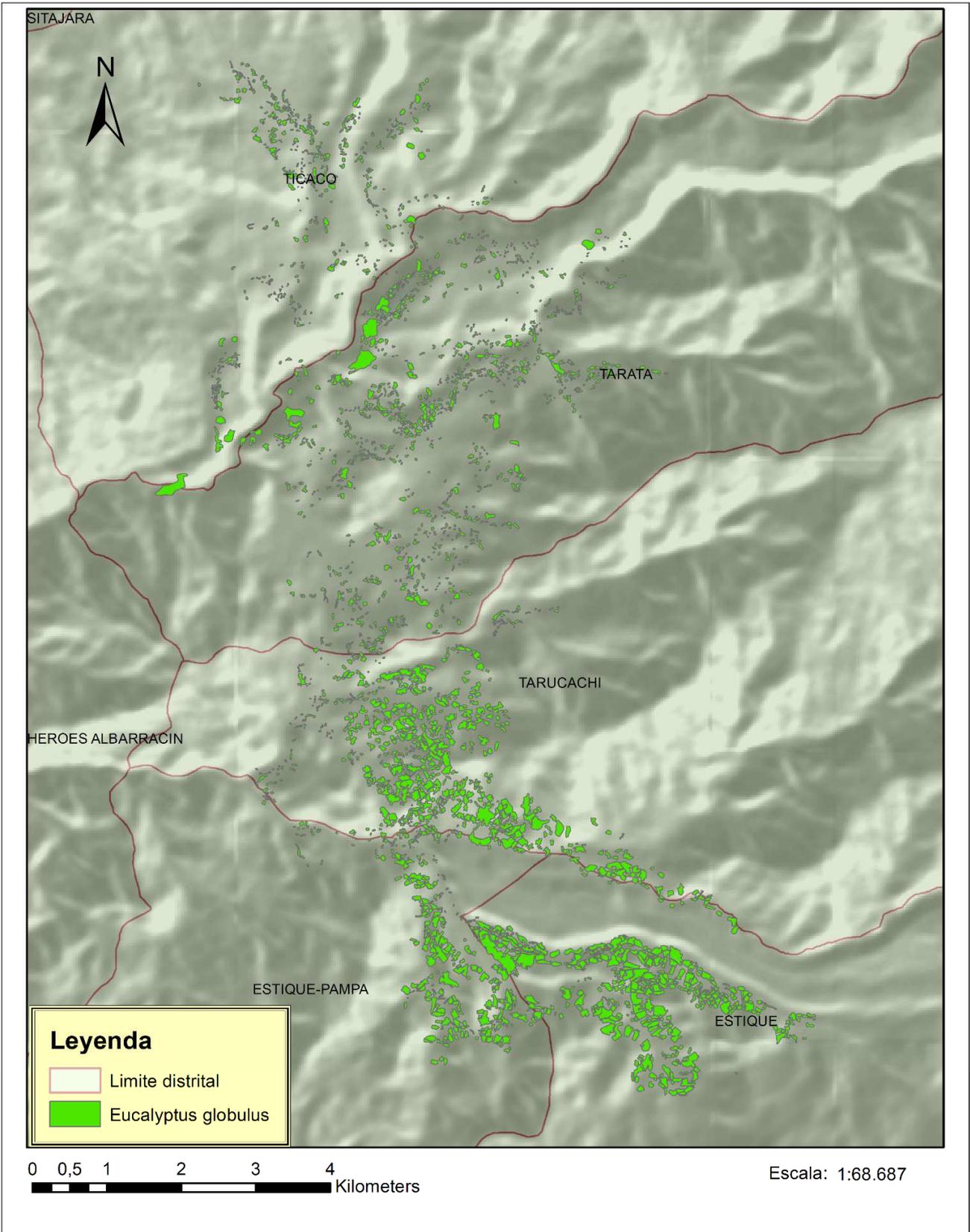
“EVALUACIÓN DE SECUESTRO DE CARBONO EN LAS PLANTACIONES FORESTALES DE *Eucalyptus globulus* DE LA PROVINCIA DE TARATA, 2019”

Elaborado por: Edgar Chaparro Aguilar

Fecha: 30/09/2019

Escala: Indicada

LAMINA:
001



"EVALUACIÓN DE SECUESTRO DE CARBONO EN LAS PLANTACIONES FORESTALES DE *Eucalyptus globulus* DE LA PROVINCIA DE TARATA, 2019"

Elaborado por: Edgar Chaparro Aguilar

Fecha: 30/09/2019

Escala: Indicada

**LAMINA:
002**