



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

## ESCUELA DE POSGRADO

### DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE



#### TESIS

**EVALUACIÓN DE CARBONO ALMACENADO EN BOSQUE NATIVO DE  
*Podocarpus glomeratus* D. DON EN EL SANTUARIO NACIONAL DE AMPAY**

**PRESENTADA POR:**

**SAUL MOREANO CARRASCO**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

**PUNO, PERÚ**

**2024**

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**EVALUACIÓN DE CARBONO ALMACENADO EN BOSQUE NATIVO DE Podocarpus glomeratus D. DON EN EL SANTUARIO NACIONAL DE AMPAY**

AUTOR

**SAUL MOREANO CARRASCO**

RECuento DE PALABRAS

**21497 Words**

RECuento DE CARACTERES

**118861 Characters**

RECuento DE PÁGINAS

**98 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**8.8MB**

FECHA DE ENTREGA

**Jul 5, 2024 3:55 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Jul 5, 2024 3:57 PM GMT-5**

● **11% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 9% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 7% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 12 palabras)



Jared Luque Coyia  
ING. ESTADÍSTICO E INFORMÁTICO  
CIP. 116675



Vladimiro Ibanez Quespe  
Fac. Ing. Estadística e Informática

Resumen



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO**  
**AMBIENTE**

**TESIS**

**EVALUACIÓN DE CARBONO ALMACENADO EN BOSQUE NATIVO DE**  
***Podocarpus glomeratus* D. DON EN EL SANTUARIO NACIONAL DE**  
**AMPAY**



**PRESENTADA POR:**

**SAUL MOREANO CARRASCO**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

**APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:**

**PRESIDENTE**

.....  
Dr. EDMUNDO GERARDO MORENO TERRAZAS

**PRIMER MIEMBRO**

.....  
Dr. EDILBERTO HUAQUISTO RAMOS

**SEGUNDO MIEMBRO**

.....  
D.Sc. JAVIER MAMANI PAREDES

**ASESOR DE TESIS**

.....  
Dr. VLADIMIRO IBÁÑEZ QUISPE

Puno, 05 de abril de 2024.

**ÁREA:** Ciencias de la Ingeniería.

**TEMA:** Evaluación de carbono almacenado en bosque nativo de *Podocarpus glomeratus* D. Don en el Santuario Nacional de Ampay.

**LÍNEA:** Recursos naturales y medio ambiente.



## DEDICATORIA

A dios, por bendecirme siempre.

A mis padres Enrique y Ruth, quienes viven orgullosos de mí, y nunca dudaron de mi esfuerzo y capacidad.

A mi esposa Julia, quien en cada momento me alienta para seguir cumpliendo mis metas.

A mis hijas Yuliet y Caely, mi inspiración de vida.

A mis hermanos Seyber, Yosemite y Enith.

A mis abuelos Aquilino y Luzmila, a quienes les debo la vida.

A mi segunda madre Marisol, quien me llenó de mucho cariño.

A toda mi familia y amigos.

*Saul Moreano Carrasco*



## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Vladimiro Ibañez Quispe, por su apoyo en la elaboración de la presente investigación.

A los docentes del doctorado en Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, por los conocimientos impartidos.

A los funcionarios del SERNAMP por darme las facilidades en el desarrollo de la presente investigación.

A todos mis compañeros del doctorado con quienes intercambiamos conocimientos y dieron sugerencias al presente trabajo de investigación.

*Saul Moreano Carrasco*



## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
ÍNDICE GENERAL	III
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE ANEXOS	VIII
ACRÓNIMOS	IX
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3

### CAPÍTULO I

#### REVISIÓN DE LITERATURA

1.1	Contexto y marco teórico	5
1.1.1	<i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don	5
1.1.2	Calentamiento global	6
1.1.3	Cambio climático	9
1.1.4	Servicios ecosistémicos	9
1.1.5	Bosques andinos	10
1.1.6	Ecuaciones alométricas	12
1.1.7	Estimación de la fracción de carbono	13
1.1.8	Evaluación de carbono almacenado	14
1.2	Antecedentes	15
1.2.1	Internacionales	15
1.2.2	Nacionales	20
1.2.3	Locales	22

### CAPÍTULO II

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1	Identificación del problema	24
2.2	Enunciados del problema	26
2.2.1	Pregunta general	26
2.2.2	Preguntas específicas	26



2.3	Justificación	26
2.4	Objetivos	27
2.4.1	Objetivo general	27
2.4.2	Objetivos específicos	27
2.5	Hipótesis	28
2.5.1	Hipótesis general	28
2.5.2	Hipótesis específicas	28

### **CAPÍTULO III**

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1	Lugar de estudios	29
3.2	Población	32
3.3	Muestra	32
3.4	Método de investigación	32
3.5	Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	32
3.5.1	Objetivo específico 1	32
3.5.2	Objetivo específico 2	37
3.5.3	Objetivo específico 3	38
3.5.4	Objetivo específico 4	39
3.5.5	Objetivo específico 5	39

### **CAPÍTULO IV**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1	Resultados	40
4.1.1	Cantidad de individuos	40
4.1.2	Registro de diámetro altura de pecho (DAP)	41
4.1.3	Registro de altura	42
4.1.4	Biomasa aérea del bosque de <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don	44
4.2	Discusión	50
4.2.1	Discusión de resultados para cantidad de individuos	50
4.2.2	Discusión de resultados para diámetro altura de pecho (DAP)	51
4.2.3	Discusión de resultados para registro de altura	51
4.2.4	Discusión de resultados para biomasa aérea del bosque de <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don	52
4.2.5	Discusión de resultados para Fracción de carbono mediante el método volumétrico	54



4.2.6	Discusión de resultados para carbono almacenado en la biomasa arbórea	
4.2.7	Discusión de resultados para comparación de las metodologías de evaluación de carbono almacenado por la especie <i>Podocarpus glomeratus</i>	
	D. Don	57
	CONCLUSIONES	61
	RECOMENDACIONES	63
	BIBLIOGRAFÍA	64
	ANEXOS	83



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1. Clasificación taxonómica de la “intimpa”	6
2. Ubicación de las parcelas	34
3. Agrupación de parcelas en función del tipo de bosque	35
4. Ecuaciones alométricas seleccionadas para determinación de biomasa	38
5. Estimación de valores de parámetros de biomasa obtenido mediante ecuaciones alométricas	45
6. Estadísticos de valores promedio para biomasa	45
7. Estimación de valores de parámetros de captura de carbono almacenado, obtenidos por siete ecuaciones alométricas	47
8. Valores de los parámetros de captura de carbono almacenado obtenida en cada parcela	48
9. Análisis de varianza de captura de carbono en niveles de ecuación alométrica y parcelas mediante la prueba de Kruskal-Wallis	58
10. Comparaciones de captura de carbono entre ecuaciones alométricas mediante la prueba de Kruskal-Wallis	58
11. Carbono almacenado de acuerdo al tipo de bosque	60



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1. Árbol de <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don	5
2. El efecto invernadero	7
3. Mapa base Santuario Nacional de Ampay	30
4. Mapa de zonificación Santuario Nacional de Ampay	31
5. Dimensiones de las parcelas establecidas	33
6. Dimensiones de la muestra	36
7. Establecimiento de parcelas	35
8. Cantidad de individuos encontrados en cada parcela	40
9. Distribución de los individuos según las clases de DAP en las 10 parcelas	41
10. Distribución de clases diamétricas	42
11. Distribución de clases de altura	43
12. Histograma de datos de altura	44
13. Promedio de valores de biomasa por parcela	46
14. Promedio de valores de captura de carbono almacenado	48
15. Grafico de normalidad	49
16. Comparaciones de captura de carbono entre tres tipos de bosques	50



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
1. Matriz de consistencia	83
2. Delimitación de la parcela e inventario forestal	84
3. Muestras para determinación de fracción de carbono	84
4. Oxidación de muestras para determinación de fracción de carbono	85
5. Secado de muestras	85
6. Medición de variables dasométricas	86
7. Delimitación de parcela con cinta roja para el inventario forestal	86
8. Resultados de fracción de carbono para el <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don por el método volumétrico	87
9. Resultados de determinación de densidad básica para el <i>Podocarpus glomeratus</i> D, Don	88
10. Bosque sin intervención, perteneciente al bosque Tipo I	88
11. Presencia de caminos de herradura dentro del SNA, perteneciente al bosque tipo II	89
12. Bosque en zona límite con parcelas agrícolas, pertenecientes al bosque Tipo III	89



## ACRÓNIMOS

AGB	:	Biomasa aérea
CMNUCC	:	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CO2	:	Dióxido de carbono
DAP	:	Diámetro a la Altura de Pecho
GEI	:	Gases de Efecto Invernadero
IPCC	:	Panel Intergubernamental Sobre Cambio Climático
SERNAMP	:	Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado
SNA	:	Santuario Nacional de Ampay
t/Ha	:	Toneladas por hectárea
tC/Ha	:	Toneladas de Carbono por Hectárea
UTM	:	Universal Transversal de Mercator
SE	:	Servicio Ecosistémico
D.E	:	Desviación Estándar

## RESUMEN

Los bosques andinos desempeñan un papel crucial para mitigar el cambio climático al funcionar como depósitos de carbono; por lo tanto, obtener datos sobre captura de carbono del *Podocarpus glomeratus* D. Don (intimpa), es fundamental, para comprender su relevancia en reducir el CO<sub>2</sub>, un importante gas de efecto invernadero (GEI). El objetivo de la investigación fue evaluar la captura de carbono almacenado por la intimpa, en el SNA; se instalaron 10 parcelas, donde se realizó el inventario forestal, luego se registraron variables como son: DAP, altura del árbol y densidad básica, con estos datos se determinaron la biomasa y carbono almacenado; la fracción de carbono se determinó mediante método volumétrico; el análisis de datos de biomasa y carbono se llevó a cabo a través de estadística descriptiva e inferencial utilizando software R estudio versión 4.3.0; encontramos en el inventario forestal un total de 545 individuos; la biomasa media total se estimó en  $125,93 \pm 223,28$  t/Ha; la fracción de carbono promedio calculado fue  $47,46 \pm 1,21$  %; el stock total de carbono promedio estimado fue  $59,77 \pm 105,98$  tC/Ha; al realizar la comparación de carbono almacenado, verificamos que, entre ecuaciones alométricas presentaron diferencias; en cambio al comparar carbono entre parcelas y tipos de bosques no presentaron diferencias significativas; se concluye que los valores de biomasa y carbono estimados fueron inferiores comparados con el *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata*, no obstante, al comparar con especies nativas como el *Polylepis* sp. los valores de biomasa fueron superiores.

### Palabras clave:

Alométrica, biomasa, bosque andino, captura carbono, *Podocarpus glomeratus* D. Don.

## ABSTRACT

Andean forests play crucial role in climate change mitigating by functioning as carbon reservoirs; therefore, obtaining data on carbon capture of *Podocarpus glomeratus* D. Don (intimpa), is essential to relevance understand in CO<sub>2</sub> reducing, an important greenhouse gas (GHG). The research proposal was to evaluate store carbon captured by intimpa, at National Ampay Sanctuary (SNA), located in Tamburco district, just north of Abancay city, Apurimac, Peru. When forest inventory was made, 10 parcels were installed and variables such as breast height diameter (DBH), tree height and basic density were recorded and biomass and stored carbon were determined. Carbon fraction was determined by volumetric method; biomass and carbon data analysis were made with both descriptive and inferential statistics using R study software version 4.3.0. During forest inventory 545 individuals were registered. Total average biomass was estimated at  $125.93 \pm 223.28$  t/Ha; calculated average carbon fraction was  $47.46 \pm 1.21\%$ . The estimated average total carbon stock was  $59.77 \pm 105.98$  t/Ha. Stored carbon comparison showed differences between allometric equations but not between parcels and forest types. Both, carbon estimated and biomass values were lower compared to *Eucalyptus globulus* and *Pinus radiata*; however, when compared with native species such as *Polylepis sp.* biomass values were higher.

### Keywords:

Allometric, andean forest, biomass, carbon capture, *Podocarpus glomeratus* D. Don.

## INTRODUCCIÓN

El calentamiento global es uno de los problemas ambientales de mayor preocupación para la humanidad y está estrechamente relacionado a las emisiones de GEI a la atmosfera, los informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), evidencian que las temperaturas globales y concentraciones globales de CO<sub>2</sub> han aumentado significativamente desde el comienzo de la revolución industrial (IPCC, 2021). Nuestro país es miembro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) desde el año 1992, dicho tratado fue ratificado en 1993, teniendo como compromiso contribuir al objetivo de la Convención el cual es: “estabilizar la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y evitar llegar a un nivel de interferencia antropogénica peligrosa” (Clemente, 2021).

Existen diversas políticas ambientales en nuestro país relacionados al cumplimiento del compromiso de estabilización de los GEI, uno de ellos está relacionado a la conservación de los bosques andinos; estos se consideran como fuentes primarias de servicios ecosistémicos vitales como, por ejemplo: regulan el clima y el suministro de agua; atenúan las inundaciones y las sequias; mitigan las emisiones de GEI y mantienen los hábitats que permiten la permanencia a largo plazo de la biodiversidad (Bosques Andinos, s.f.; PNCBMCC, 2023). El secuestro de carbono es un importante servicio ecosistémico proporcionado por este tipo de bosques, por lo tanto, una reducción significativa de la cobertura de los bosques andinos puede afectar tanto la prestación de este servicio como las metas de emisiones de gases de efecto invernadero (Alzamora y Tapia, 2020; Clemente, 2021; Ginez Quispe, 2019).

El presente trabajo de investigación tiene el propósito de valorar el bosque andino de *Podocarpus glomeratus* D. Don debido a que ofrecen servicios ecosistémicos principalmente servicios ecosistémicos de regulación que están relacionados a la captura y almacenamiento de carbono, estos ecosistemas tienen la posibilidad de mitigar la presencia de gases de efecto invernadero de la atmosfera a través de un proceso natural conocido como fotosíntesis, en el cual el CO<sub>2</sub> que está presente en la atmosfera combinado con el agua forman carbohidratos y se desprende oxígeno del proceso químico, de esta manera los bosques andinos absorben el CO<sub>2</sub> de la atmosfera y son considerados como sumideros de carbono, así mismo la investigación planteada podría ser de utilidad para comparar el potencial de captura de carbono que tiene el bosque andino de

*Podocarpus glomeratus* D. Don respecto a especies exóticas, y recomendar en futuros programas de plantaciones de árboles en la región se priorice especies nativas.

Esta investigación pertenece al área de medio ambiente, línea de investigación de recursos naturales y medio ambiente; y el tema de investigación es captura de carbono por especies vegetales. La metodología de investigación es de un enfoque cuantitativo, para lograr los objetivos planteados se trabajaron 10 parcelas de monitoreo donde se realizó el inventario forestal, la biomasa fue determinada mediante la aplicación de siete ecuaciones alométricas y la fracción de carbono del *Podocarpus glomeratus* D. Don fue determinado por el método volumétrico.

Esta investigación está organizada en cuatro capítulos, de los cuales: el primero muestra la revisión de la bibliografía utilizada y los antecedentes; toda la información consolidada, está enfocada a describir sobre los GEI y sus consecuencias en la humanidad, así como el potencial que tienen las especies forestales para capturar carbono. El segundo capítulo contiene el planteamiento del problema y su relevancia ambiental, además contiene los objetivos y las hipótesis del trabajo. El tercer capítulo se muestra los materiales y métodos, en la que primeramente se realizó la caracterización de la zona de estudio y luego se establecieron las 10 parcelas de estudio para la realización del inventario forestal. En el cuarto capítulo se muestra los resultados obtenidos en esta investigación, esto se logró luego de cuatro fases de trabajo: instalación de parcelas, inventario forestal, laboratorio y gabinete. Los datos obtenidos están enmarcados a evaluar el contenido de biomasa aérea y carbono total almacenado dentro del SNA.

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1 Contexto y marco teórico

##### 1.1.1 *Podocarpus glomeratus* D. Don

*Podocarpus glomeratus* D. Don también conocido como “intimpa” en el vocablo quechua, que traducido al castellano significa árbol del sol, es una especie de árbol conífero que pertenece a la familia Podocarpaceae, esta especie arbórea están distribuidas ampliamente en los bosques montañosos de Bolivia, Ecuador y Perú y su hábitat se encuentra entre los 1800 y 3600 m.s.n.m (Andean Forest, 2018).

Entre sus características de los árboles de “intimpa”, se encuentra que la separación de las ramas se da desde el tercio inferior de la planta, encontrándose dos tipos de fuste uno principal y otro secundario. Estos árboles son fáciles de distinguir por su forma característica y color verde oscuro, su copa tiene un aspecto globoso, la corteza externa del árbol es de color marrón y escamoso (figura 1). La corteza de los árboles mide hasta 8 mm de espesor, y la superficie externa es áspera en los árboles viejos. Entre las características de sus hojas resalta que son simples, enteras, rígidas, de forma lanceolada con ápice agudo y punzante, miden de 3 a 5 mm de ancho por 3 a 6 cm de largo. El tronco puede llegar a medir hasta 30 metros de altura, el diámetro altura pecho (DAP) alcanza hasta más de 80 centímetros, llegando a medir hasta 2,5 m. de diámetro en árboles adultos (Andean Forest, 2018; Hosting y Palomino, 1997).

#### Figura 1

*Árbol de Podocarpus glomeratus* D. Don



Nota. La figura muestra el árbol de *Podocarpus glomeratus* D. Don

**Tabla 1***Clasificación taxonómica de la “intimpa”*

<b>Taxón</b>	<b>Nombre</b>
<b>Reino</b>	Eucariota.
<b>División</b>	Spermatophyta.
<b>Nivel de organización</b>	Gymnosperma.
<b>Subdivisión</b>	Coniferophyta.
<b>Clase</b>	Pinopsidas.
<b>Subclase</b>	Coniferae.
<b>Orden</b>	Pinales.
<b>Familia</b>	Podocarpaceae S. Endlicher.
<b>Género</b>	Podocarpus.
<b>Especie</b>	<i>Podocarpus glomeratus</i> D.

Don

*Nota.* La tabla muestra la clasificación taxonómica de la “intimpa”. Fuente: Strasburger et al. (1998).

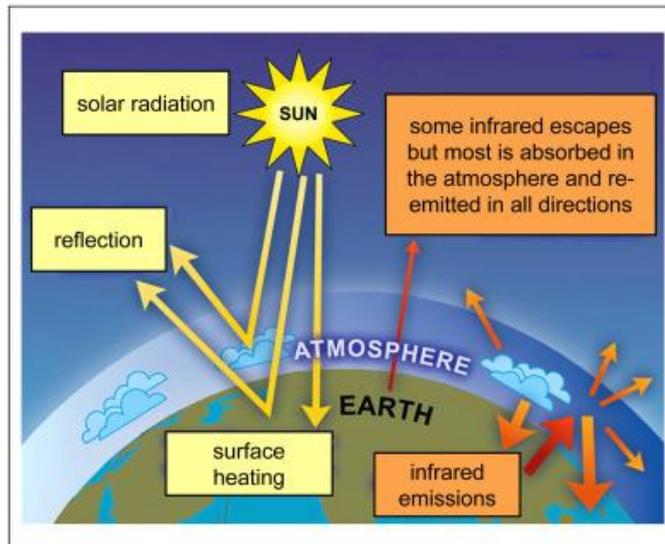
### 1.1.2 Calentamiento global

La temperatura de la tierra, está equilibrada por el ingreso de energía del sol y la pérdida de ésta al espacio, algunos gases que se encuentran en la atmosfera son vitales para este equilibrio de temperatura, a ellos se denominan gases de efecto invernadero (Barriopedro et al., 2011; Maslin, 2004). Aproximadamente un tercio de la radiación solar que llega a la Tierra es reflejado de regreso al espacio, del resto una parte es absorbida por la atmosfera, pero la mayor cantidad de radiación es absorbida por la superficie terrestre y los océanos (Cheruy et al., 2020). La tierra se calienta al recibir energía del sol y, como resultado, emite radiación infrarroja de onda larga a la atmosfera, es aquí donde los gases de efecto invernadero retienen una parte del calor y el resto fuga al espacio, cuanto más es la concentración de gases de efecto invernadero en la atmosfera más calor es retenido, el vínculo entre el CO<sub>2</sub> y el calentamiento global ha llamado la atención de científicos y políticos, a través del conocido “efecto invernadero” (Figura 1). Los gases de efecto invernadero que se producen naturalmente incluyen vapor de agua, dióxido de carbono, ozono, metano y óxido nitroso, y juntos crean un efecto

invernadero natural o efecto manta, calentando la Tierra en 35 °C (Al Yaari et al., 2023; González et al., 2024; Helbling y Meierrieks, 2023; Scheiner, 2024).

## Figura 2

*El efecto invernadero*



*Nota.* La figura muestra el equilibrio entre la radiación solar entrante (flechas amarillas) y la absorción de la radiación infrarroja reemitida por la atmósfera (flechas naranjas) impulsa el calentamiento de la superficie. Fuente: Anderson et al. (2016).

La atmósfera de la tierra está compuesta por: 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 1% de otros gases, son estos otros gases los que tienen importancia, debido a que incluyen los llamados gases de efecto invernadero. Los dos gases de efecto invernadero más importantes son el dióxido de carbono y el vapor de agua, actualmente el dióxido de carbono representa sólo entre el 0,03 y el 0,04 % de la atmósfera, mientras que el vapor de agua varía entre el 0 y el 2 %. Sin el efecto invernadero natural que producen estos dos gases, la temperatura media de la Tierra sería de aproximadamente  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Anderson et al., 2016; Maslin, 2004).

Existen evidencias claras, que los niveles de dióxido de carbono atmosférico se han incrementado desde el comienzo de la revolución industrial, primeras mediciones de las concentraciones de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera se realizaron en 1958 a una altitud de unos 4000 metros en la cima de la montaña Mauna Loa en Hawaii, estas mediciones se realizaron aquí para estar alejados de las fuentes locales de contaminación. Lo que ha evidenciado claramente que las

concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> han aumentado cada año desde 1958. La concentración media de aproximadamente 316 partes por millón por volumen (ppmv) en 1958 aumentó a aproximadamente 369 ppmv en 1998. Lo que esto muestra es que el CO<sub>2</sub> atmosférico ha aumentado desde una concentración preindustrial de aproximadamente 280 ppmv a más de 370 ppmv en la actualidad, lo que representa un aumento de 160 mil millones de toneladas, lo que representa un aumento general del 30% (Maslin, 2004; Schmidt et al., 2010; Thompson et al., 2011).

La primera fuente importante de emisión de dióxido de carbono es la quema de combustibles fósiles, ya que proviene de la producción de energía, los procesos industriales y el transporte. América del Norte, Europa y Asia emiten más del 90% del dióxido de carbono producido industrialmente en el mundo, a estos países se les conoce como los países industrializados y estos deben asumir la responsabilidad principal de reducir las emisiones de dióxido de carbono a alrededor de 22 mil millones de toneladas de carbono por año, históricamente han emitido mucho más que los países menos desarrollados. La segunda fuente importante de emisiones de dióxido de carbono es el resultado de los cambios en el uso de la tierra. Estas emisiones provienen principalmente de la tala de bosques con fines agrícolas, urbanización o carreteras. Cuando se talan grandes áreas de bosques tropicales, la tierra a menudo se convierte en pastizales menos productivos con una capacidad considerablemente menor para almacenar CO<sub>2</sub>. Aquí el patrón de emisiones de dióxido de carbono es diferente: América del Sur, Asia y África son responsables de más del 90% de las emisiones actuales del cambio de uso de la tierra, alrededor de 4 mil millones de toneladas de carbono por año. En términos de la cantidad de dióxido de carbono liberado, los procesos industriales todavía superan significativamente los cambios en el uso de la tierra (Anderson et al., 2016; Maslin, 2004; Schmidt et al., 2010; Tavassoli y Kamran-Pirzaman, 2023; Thompson et al., 2011).

### 1.1.3 Cambio climático

La definición de “cambio climático” apareció en el año 1992, la convención Marco Sobre Cambio Climático define al “cambio climático” como: cambio en el clima relacionado de manera directa o indirecta a la actividad antrópica, que ocasiona alteración en la composición de la atmósfera global y que se añade a la variabilidad natural del clima que se ha observado sobre periodos de tiempos comparables. De modo similar para el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), define cambio climático como una modificación en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, a menudo en décadas o cursos de tiempo más prolongados (Díaz, 2012; Sánchez, 2016).

El cambio climático puede manifestarse de varias maneras, por ejemplo, cambios en las temperaturas regionales y globales, cambios en los patrones de lluvia, expansión y contracción de las capas de hielo y variaciones en el nivel del mar. De acuerdo a la revisión bibliográfica se ha visto que hay pruebas claras de que las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, han ido aumentando desde la revolución industrial en el siglo XVIII. El consenso científico actual es que los cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera causan cambios en la temperatura global.

### 1.1.4 Servicios ecosistémicos

Los ecosistemas tienen funciones, estas funciones proporcionadas a los seres humanos se denominan servicios ecosistémicos (SE), así mismo los servicios ecosistémicos son los beneficios que las personas reciben de los ecosistemas para la supervivencia, el sustento y el bienestar, e incluyen la conservación del agua, el secuestro de carbono y la conservación del suelo, que son esenciales para la supervivencia y el desarrollo humano (Ci et al., 2023; Debie y Anteneh, 2022).

En este contexto, la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de 2005, clasifica los SE en las siguientes categorías: suministro, que incluye productos obtenidos de ecosistemas como alimentos, agua limpia, fibras, combustibles y

medicamentos; la regulación, en la que los beneficios se derivan de la regulación de los procesos ecosistémicos, como el clima, los regímenes hídricos y el control de patógenos; culturales, que se refiere a los beneficios no materiales que se obtienen de los ecosistemas, como los valores espirituales, éticos, recreativos, estéticos y las relaciones sociales; y el apoyo, que abarca los servicios necesarios para la producción de todos los demás SE, como la formación del suelo, el ciclo de nutrientes y la producción de biomasa primaria (Fistola, 2023; MEA, 2005).

El cambio climático y las actividades humanas podrían afectar los patrones y funciones de los ecosistemas, lo que daría lugar a cambios en los servicios ecosistémicos. Investigadores anteriores encontraron que las precipitaciones y los cambios en el uso de la tierra son los impulsores más influyentes de los cambios en los servicios ecosistémicos. La precipitación impacta a los ecosistemas modificando sus procesos biofísicos, lo que posteriormente altera los servicios ecosistémicos. En las últimas seis décadas, las actividades humanas han transformado el 26% de la tierra del mundo, imponiendo importantes desafíos a los ecosistemas globales. Además, los ecosistemas globales continúan degradándose debido al aumento de las perturbaciones antropogénicas. Muchos estudios han demostrado que el patrón, la intensidad y el tipo de cambios en el uso de la tierra pueden afectar significativamente los SE. Sin embargo, el impacto del cambio climático y las actividades humanas en los servicios ecosistémicos, como la conservación del agua, el secuestro de carbono y la conservación del suelo, sigue sin estar claro (Başkent, 2021; Ci et al., 2023; Mendoza Ponce et al., 2018; Winkler et al., 2021).

### **1.1.5 Bosques andinos**

Los bosques conocidos como bosques andinos o altoandinos, se ubican a pisos altitudinales encima de los 3000 m.s.n.m, la mayor extensión están en los tercios central y sur del país. Las precipitaciones que reciben estos bosques son entre 1000 y 4000 mm por año, y registran temperaturas que oscilan entre 6 °C y 12 °C, pocas especies arbóreas son capaces de adaptarse a estas condiciones climáticas, con poca concentración de oxígeno y arreciados por un frío que en las madrugadas registra temperaturas bajo cero (PNCBMCC, 2023).

De acuerdo al Mapa de Cobertura Vegetal del Perú, que fue elaborado por el MINAM para permitir una mejor planificación y toma de decisiones en cuanto a la gestión y manejo de los recursos naturales, se registran 42 tipos de bosques en el Perú, y es en la sierra donde se distinguen cuatro (04) tipos de bosques, siendo el área de estudio donde se encuentra al Bosque relicto meso andino de coníferas (PNCBMCC, 2023).

El Bosque relicto meso andino de coníferas (Bre-me-co), es el tipo de bosque localizado en una pequeña porción de la vertiente montañosa interandina del departamento de Apurímac, próximo a la ciudad de Abancay y forma parte del “Santuario Nacional de Ampay”, el cual se asienta sobre características orográficas singulares del macizo del Ampay, cortada por la cuenca del río Apurímac, la subcuenca del río Pachachaca y la microcuenca del río Mariño, brindándole una configuración espacial como una isla continental, lo que permite su aislamiento que confluye en una notable especialización y presencia de endemismos propios (PNCBMCC, 2023). Ocupa una superficie de 1160 ha que representa menos del 0,001 % de la superficie nacional (INRENA, 2006). Este bosque ubicado aproximadamente entre 3000 y 4000 m. s. n. m. está representado por comunidades arbóreas de la especie arbórea *Podocarpus glomeratus* D. Don (Familia Podocarpaceae, Orden Coniferales) conocida localmente como “intimpa” o “árbol del sol”, la cual representa una muestra viviente de las únicas coníferas silvestres que viven en nuestros denominados “bosques montanos”, pudiendo alcanzar alturas hasta de 12-15 m (Huamantupa, 2019; INRENA, 2006; PNCBMCC, 2023; Young, 2009).

Los bosques andinos son fuentes primarias de servicios ecosistémicos vitales como por ejemplo: regulan el clima y el suministro de agua; atenúan las inundaciones y las sequías; mitigan las emisiones de GEI y mantienen los hábitats que permiten la permanencia a largo plazo de la biodiversidad, las personas dependen de los bosques para obtener servicios ecosistémicos como la construcción de viviendas, la leña, la producción de miel, las frutas silvestres comestibles y las especias, el suministro de alimentos, forraje para el ganado, los productos farmacéuticos, la leña y la madera, el suministro de agua filtrada, la mitigación de la erosión y las inundaciones, la conservación de la biodiversidad, la regulación del clima y los valores recreativos. Aunque los servicios

ecosistémicos forestales son muy importantes, la gente está convirtiendo los bosques en tierras agrícolas en varios países, razones por la son catalogados como prioritarios para su conservación (Bosques Andinos, s.f.).

Un papel significativo en la función del ecosistema (por ejemplo, el aumento del almacenamiento de carbono) puede ser un argumento importante para la conservación de las especies amenazadas más allá de su valor intrínseco tradicional. El almacenamiento de carbono es uno de los servicios ecosistémicos forestales más importantes, con efectos positivos o negativos sobre el cambio climático global, dependiendo de si los ecosistemas actúan como sumideros o fuentes de dióxido de carbono. Los dos principales reservorios de carbono terrestre son el carbono orgánico del suelo y el carbono de la biomasa aérea; juntas, estas dos reservas constituyen la mayor parte del carbono total de los ecosistemas forestales (Álvarez Yépez y Dovčiak, 2015).

El secuestro de carbono es un importante servicio ecosistémico proporcionado por la restauración bosques andino. Por lo tanto, una reducción significativa de la cobertura de los bosques andinos puede afectar tanto la prestación de este servicio como las metas de emisiones de gases de efecto invernadero comprometidas por el país y la región, en los acuerdos internacionales (Baidoo y Obeng, 2023; de Groot et al., 2012; Mekuria et al., 2021)

#### **1.1.6 Ecuaciones alométricas**

Para la estimación de la biomasa forestal se utiliza el método de muestreo destructivo que consiste en la tala de árboles y el pesaje de sus partes, sin embargo, en las Áreas Naturales Protegidas por el estado peruano no es posible talar los árboles. Por lo tanto, la estimación de biomasa y la existencia de carbono se puede estimar mediante modelos alométricos conocidos también como ecuaciones alométricas, que incluyen variables como son: diámetro del árbol, densidad y altura total que son obtenidos de los inventarios forestales (Salunkhe et al., 2023). El muestreo destructivo no se recomienda para lugares donde hay flora y fauna amenazadas, los métodos no destructivos incluyen el uso de ecuaciones alométricas ya disponibles para la estimación de la biomasa aérea (AGB) sin talar los árboles (Debastiani et al., 2009).

La (AGB) tiene su importancia como indicador de la estructura y funcionamiento del ecosistema, es por eso que la estimación del carbono almacenado por las especies forestales se basa principalmente en la estimación de la AGB (Basuki et al., 2009; Ganamé et al., 2021). La AGB por lo general, se mide en toneladas métricas de materia seca por hectárea (por ejemplo, t/ha o Mg ha<sup>-1</sup>) o en toneladas métricas de carbono por hectárea (por ejemplo, t C/ha o Mg C/ha) (Omar et al., 2017).

Las ecuaciones alométricas son modelos estadísticos basados en los datos del inventario forestal, como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura, la densidad de la madera y el tipo de bosque, los datos del inventario forestal son una de las fuentes más confiables para la estimación del carbono a nivel mundial. La elección de la ecuación alométrica es, sin embargo, crítica, donde una selección desconsiderada de la ecuación puede conducir a errores de hasta el 79%. Para reducir las incertidumbres en la estimación de AGB, se han enfatizado las ecuaciones alométricas específicas del sitio y de la especie (Clark et al., 2001; Debastiani et al., 2009; Zhao et al., 2019).

La biomasa forestal es un indicador del estado de carbono, ya que este representa el 50% del peso seco de un árbol (Raihan et al., 2021). Sin embargo, según el cuarto informe de evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021), hay una cantidad limitada de información disponible sobre la biomasa forestal y el estado del carbono. Para abordar el cambio climático, se requeriría la implementación a gran escala de respuestas de mitigación, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) también ha reconocido a la AGB como una Variable Climática Esencial (ECV). Los ECV son las variables físicas, biológicas y químicas o grupos de variables que afectan críticamente el clima de la Tierra (Bojinski et al., 2014; Omar et al., 2017).

### **1.1.7 Estimación de la fracción de carbono**

Una forma de estimar la fracción de carbono es mediante el Método de Walkley y Black, cuyo fundamento se basa en que la materia orgánica es oxidada con una mezcla de K<sub>2</sub>CrO<sub>7</sub> más H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. El K<sub>2</sub>CrO<sub>7</sub> actúa como oxidante, y el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> es el medio para la reacción, favoreciendo la acción del K<sub>2</sub>CrO<sub>7</sub>. El exceso

de  $K_2CrO_7$  es determinado por titulación con  $FeSO_4$  o con  $(NH_4Fe)_2(SO_4)_3$ . Este método proporciona una estimación fácilmente oxidable de carbono orgánico y es usado como una medida de carbono orgánico total. El porcentaje de carbono queda definido por el porcentaje de materia orgánica entre el factor 1,724 (Maquera, 2017).

### 1.1.8 Evaluación de carbono almacenado

La evaluación de biomasa y la capacidad de almacenamiento de carbono de los bosques se realiza en función de las diferencias de edad, ubicación, agroclima, especies arbóreas y causas de existencia (naturales o antrópicas) (Besar et al., 2020; Justine et al., 2015). Esto se debe a que los resultados obtenidos permiten comprender la capacidad de biomasa y almacenamiento de carbono de diferentes especies arbóreas y ayudan a desarrollar políticas forestales y opciones de gestión adecuadas para el desarrollo de los recursos implementado para obtener modelos robustos y estandarizados que maximicen la precisión (Picard et al., 2012). Desde entonces, los modelos alométricos específicos de cada especie son mejores que otros modelos para tener en cuenta el potencial de almacenamiento de carbono de los bosques (Chave, Réjou, et al., 2014).

El concepto de "secuestro de carbono" o "carbono almacenado" es el almacenamiento gradual de carbono en sustancias bióticas y abióticas (por ejemplo, minerales, rocas, suelos y océanos) (Friedlingstein et al., 2021; Justine et al., 2015); es la captura y almacenamiento de carbono atmosférico en los tejidos de plantas u otras sustancias; o en parte una conversión del CO atmosférico basada en la fotosíntesis a los compuestos orgánicos (Keenan et al., 2015). El secuestro de carbono se produce a través de procesos naturales y antropogénicos. Por ejemplo, el carbono se transfiere naturalmente de la atmósfera al carbono biótico a través del proceso de fotosíntesis, de modo que se almacena en forma de biomasa aérea y subterránea de bosques naturales, plantaciones forestales y otros ecosistemas de vegetación (Besar et al., 2020; Bluffstone et al., 2017).

## 1.2 Antecedentes

### 1.2.1 Internacionales

Kutchartt et al. (2021) determinaron la cantidad de carbono en el fuste, ramas, hojas y corteza en 16 especies forestales en un bosque nativo de Chile, los contenidos de carbono orgánico en promedio oscilaron entre 34,9 y 48,3%, así mismo encontraron que el contenido de carbono entre especies y entre cada parte del árbol presentan diferencias significativas.

Mankou et al. (2021) crearon dos modelos alométricos; la primera permitió estimar la biomasa aérea total y la segunda el carbono aéreo total, ambos considerando una variable conocida como diámetro a la altura del pecho (DAP) para la especie forestal *Pinus patula Schl. Et. Cham*, la ecuación planteada para estimar la biomasa de *Pinus patula*, quedó expresada como:  $AGB = 0,0509 \times \rho(D^2)H$  donde: AGB representa la biomasa, D diámetro a la altura del pecho y H como altura total.

Chave et al. (2014) analizaron una base de datos global de árboles cosechados directamente en 58 sitios, que abarcan una amplia gama de condiciones climáticas y tipos de vegetación (4004 árboles  $\geq 5$  cm de diámetro tronco), todo este procedimiento fue realizado con la finalidad de disponer de modelos alométricos confiables para inferir la biomasa aérea de los árboles secos a partir de los datos de inventarios forestales. Cuando incluyeron el diámetro del tronco, la altura total del árbol y la gravedad específica de la madera en el modelo de biomasa aérea como covariables, se encontró que un solo modelo se mantenía en todos los tipos de vegetación tropical, sin efecto detectable de la región o los factores ambientales. La densidad básica del fuste fue una variable importante en el cálculo de la biomasa aérea.

Fernando et al. (2014) desarrollaron dos ecuaciones para determinar biomasa y carbono en *Pinus montezumae* y *Alnus jorullensis* especies de importancia ecológica de los bosques de la Sierra Nevada en el Estado de México. Las ecuaciones determinadas presentaron la forma siguiente  $Y = bx^k$  donde Y representa el contenido de biomasa expresado en kg y X el diámetro a la altura del pecho expresado en cm. Los valores b y k del modelo para cada especie fueron

estimados utilizando 15 árboles de *Pinus montezumae* y 16 de *Alnus jorullensis ssp. jorullensis*.

Návar Cháidez et al. (2004) presentan tres modelos alométricos aditivos ponderados para la determinación de la biomasa arbórea en plantaciones de pino pertenecientes a bosques de coníferas de la sierra del Estado de Durango, México. Realizaron un análisis estadístico para elegir las mejores ecuaciones. Así como para las ecuaciones de regresión lineal simple y múltiple, los modelos dieron estimaciones con más precisión en los componentes de la biomasa.

Chave et al. (2005) plantean modelos alométrico para determinar biomasa de especies forestales, en este modelo de regresión se considera únicamente la densidad de la madera y el diámetro del fuste, estos modelos fueron probados para bosques primarios y secundarios, para bosques secos, húmedos y muy húmedos, para bosques de tierras bajas y montanos, y para bosques de manglares. El diámetro del tronco, la gravedad específica de la madera, la altura total y el tipo de bosque (seco, húmedo o mojado) medidas dasométricas del árbol, fueron los predictores que tienen más importancia en el cálculo de la biomasa. Para establecer estos modelos utilizaron un gran conjunto de datos de 2410 árboles cuyos diámetros fueron  $\geq 5$  cm de diámetro.

Tanwar et al. (2020) dan a conocer la evaluación de biomasa y contenido de captura de carbono por una especie forestal *Hardwick binata* para ello utilizaron siete modelos, utilizaron como variables diámetro a la altura del pecho y biomasa, el modelo que mejor rendimiento obtuvo fue el  $Y = a \times DAP^b$  donde Y representa la biomasa aérea, DAP diámetro a la altura del pecho a y b son parámetro del modelo, las ecuaciones desarrolladas presentaron un alto valor de R.

Yan et al. (2022) han evaluado la existencia de biomasa y carbono en tres tipos de bosque de pinos: bosques naturales de pino Masson (MPNF), bosques de plantación de pino Masson (MPPF) y bosques de plantación de pino Slash (SPPF) en la zona kárstica del suroeste de china, los resultados de la investigación mostraron que el almacenamiento total de C del ecosistema forestal, C total del rodal y C total del dosel superior fue significativamente mayor en los rodales SPPF que en los rodales MPNF y MPPF. La variación en las existencias de C en

los diferentes tipos de bosques se debió a las diferencias en las características de las especies de árboles y las densidades de los rodales. Los resultados sugieren que los bosques de plantación tenían reservas de C más altas que los bosques nativos en la etapa temprana de crecimiento en esta área kárstica específica del noroeste de China.

Pradhan et al. (2019) desde septiembre de 2015 hasta enero de 2016, estudiaron la diversidad de especies de árboles, la biomasa y las existencias de carbono en la biomasa de dos bosques diferentes en el oeste de Odisha: un santuario de vida silvestre y un bosque sagrado. Los resultados presentados evidenciaron que el bosque sagrado tenía una mayor riqueza, densidad y diversidad de especies en comparación con el santuario de vida silvestre. La densidad en diferentes clases de diámetro mostró que el bosque sagrado se está regenerando con un buen potencial de regeneración, pero el santuario de vida silvestre tenía un pobre potencial de regeneración con menor número de árboles jóvenes que de adultos. Sin embargo, el contenido de biomasa y carbono del santuario de vida silvestre fue mayor que en el bosque sagrado. Esto puede deberse a la presencia de una mayor proporción de árboles viejos en el santuario de vida silvestre en comparación con el bosque sagrado.

Qasim y Csaplovics (2023) realizaron un estudio comparativo de biomasa forestal y reservas de carbono del Parque Nacional Margalla Hills, Pakistán; en el estudio estimaron la biomasa forestal en dos bosques del Parque Nacional Margalla Hills (MHNP): Bosque subtropical de pino Chir (SCPF) y Bosque subtropical de hoja perenne de hoja ancha (SBEF), para ello utilizaron parcelas circulares de muestreo de 20m de radio para la recolección de las variables, “diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura”. Analizaron estadísticamente para explorar las relaciones de regresión entre las variables, encontrándose Carbono Aéreo (AGC) medio de  $73,36 \pm 32,55$  Mg C/ ha en SCPF y un AGC medio de  $16,88 \pm 25,81$  Mg C/ ha en SBEF. La biomasa aérea media (AGB) para SCPF se registró como  $146,73 \pm 65,11$  Mg/ ha, mientras que para SBEF fue de  $33,77 \pm 51,63$  Mg/ ha.

Chimdessa (2023) en el estudio evaluaron la variación de las existencias de carbono forestal con la altitud. Utilizaron una técnica de muestreo sistemático

para seleccionar las parcelas de muestreo, en el cual obtuvieron un total de 36 (12 parcelas de cada clase de altitud) parcelas cuadradas con un tamaño de 20 m × 20 m. Se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura de los árboles individuales de DAP > 5 cm de todas las parcelas de muestra seleccionadas. La altitud tuvo un efecto significativo en la biomasa de árboles por encima y por debajo del suelo y en la reserva de carbono de la hojarasca, pero no en la madera muerta ni en la reserva de carbono orgánico del suelo. La biomasa aérea y subterránea y el carbono de la hojarasca fueron mayores en altitudes más bajas, los cuales se atribuyeron a una mayor producción de biomasa debido a una mayor fotosíntesis y una mayor producción primaria neta.

Haq et al. (2023) cuantificaron la biomasa y la partición de existencias de C en múltiples estratos de vegetación (capas de árboles, arbustos, hierbas y suelo) de los principales tipos de bosques en Jammu y Cachemira, Himalaya occidental, India. Han utilizado una estrategia de muestreo estratificado aleatorio por conglomerados para recopilar datos de campo en 96 rodales forestales de 12 tipos de bosques (rango altitudinal: 350 a 3450 m) en la región de estudio. Se valuó el grado en que la reserva de carbono de todo el ecosistema dependía de los múltiples estratos de vegetación utilizando el método de Pearson.

Calderón-Balcázar et al. (2023) estimaron las reservas de carbono importantes para la evaluación de las emisiones potenciales causadas por la deforestación, para ello han utilizado datos de inventario forestal y modelos alométricos para estimar la biomasa y las existencias de carbono de tipos de vegetación natural (bosque de galería-GF, morichal-MOR y sabana-SAV) y cultivos de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) en la biorregión de la Orinoquía. en el oriente colombiano. Han encontrado que los bosques naturales (GF y MOR) albergan 542,45 Mg/ha de biomasa aérea, mientras que las plantaciones de palma aceitera almacenan 284,87 Mg/ha. La vegetación de morichal, comúnmente conocida como bosques pantanosos de turba, acumuló la mayor biomasa aérea y carbono por hectárea entre todos los tipos de vegetación (natural y agrícola), con una estimación de 402,76 Mg/ha.

Ferrere y Lupi (2023) cuantificaron la biomasa y el carbono almacenado en los principales componentes del ecosistema en plantaciones de *Pinus radiata*

a lo largo de una secuencia de edad en la región pampeana de Argentina. Las plantaciones se establecieron en terrenos no agrícolas, al sureste de la provincia de Buenos Aires. Seleccionaron catorce sitios de plantaciones de *Pinus radiata*, de 9, 13, 15, 19 y 21 años, en una primera rotación forestal. Muestrearon destructivamente 42 árboles, se establecieron funciones alométricas y se estimó la biomasa para los diferentes compartimentos (copa, ramas, fuste). La biomasa de raíces fue estimada a partir de ecuaciones ajustadas por el muestreo de veinticuatro árboles. Las existencias de C en el componente arbóreo aumentaron con la edad del rodal, mientras que el COS y las existencias de C en el suelo y el sotobosque del bosque no se relacionaron con la edad del rodal. La reserva de C a nivel del sistema fue de 273,1, 263,7, 269,7 y 324,1 Mg/ ha para los rodales de 9, 13, 19 y 21 años.

Chopra et al. (2023) estimaron el almacenamiento y el potencial de secuestro de carbono en plantaciones de *Dalbergia latifolia* y *Melia composita* de diferentes edades (4 y 6 años). Un total de 14 ecuaciones de regresión se utilizaron y la variable que se consideró fue DAP (diámetro a la altura del pecho), se seleccionaron principalmente para ambas especies de árboles por componentes. La biomasa total de árboles, arbustos y hierbas en las plantaciones de diferentes edades varió de 68,86 a 145,14 Mg/ha; 1,29 a 2,41 Mg/ ha y 1,14 a 3,68 Mg/ha, respectivamente.

Salunkhe et al. (2023) estimaron la biomasa y las existencias de carbono de las especies de árboles forestales del centro-oeste de la India para proporcionar información de referencia. Adoptaron el enfoque de ecuaciones alométricas no destructiva para calcular la biomasa, las reservas de carbono y el equivalente de dióxido de carbono de un total de 28 parcelas de 0,1 ha en siete sitios de bosques caducifolios secos del centro oeste de India. En el presente estudio, los resultados de biomasa y stock de carbono se calcularon empleando dos modelos alométricos diferentes. El modelo con el diámetro del árbol y la gravedad específica de la madera dio estimaciones más altas de la biomasa vegetal total (123,39 – 65,86 Mg/ha) y las existencias de carbono (58,61—31,28 Mg/ha) en comparación con el modelo que solo tenía el diámetro del árbol (108,84 – 55,91 Mg/ha) y (51,70 - 26,55 Mg/ ha), respectivamente.

### 1.2.2 Nacionales

Riofrío et al. (2015) dan a conocer que los sistemas agroforestales de los bosques en selva baja, situados a pisos altitudinales menores a 400 msnm, llegan a poseer biomasa de 10,04 t/ha/año que expresado en secuestro de CO<sub>2</sub> representa 17,68 t/ha/año. Así mismo Chmura et al., (2021) estimaron la captura de carbono en la biomasa aérea de rebrotes de plantaciones de *Eucalyptus globulus Labill*, concluyendo que los rebrotes de *Eucalyptus globulus Labill*, en Montil, captan el 48% de carbono respecto a la biomasa en seco.

Vásquez et al. (2014) estudiaron la reserva total de carbono del ecosistema formado por bosque de *Polylepis incana*, para ello determinaron primero biomasa aérea (árboles de dosel y sotobosque) luego la biomasa de raíces y finalmente las reservas de carbono del suelo. Como parte de este estudio, desarrollaron una ecuación alométrica para la cuantificación de la biomasa aérea que por primera vez fue desarrollada para árboles individuales de *Polylepis incana*.

Marcelo Bazán et al. (2022) si bien es necesario reducir las concentraciones de gases de efecto invernadero, observamos que existen pocos estudios sobre el secuestro de carbono en sistemas agroforestales realizados en los Andes peruanos. El objetivo de este estudio fue determinar el potencial de almacenamiento de carbono de *Eucalyptus viminalis* en un sistema silvopastoril junto con otros sedimentos en Cajamarca, Perú. La biomasa forestal aérea se determinó mediante ajuste del modelo, y la biomasa necrótica y herbácea se determinó mediante muestreo sistemático. El carbono almacenado en la biomasa se determinó en la fracción 0,5 y el carbono almacenado en el suelo se estimó mediante análisis de laboratorio. *Eucalyptus viminalis* mostró potencial para secuestrar carbono en el sistema silvopastoril debido a su alta densidad de población y alta capacidad de progenie debido a la transitoriedad de sus componentes traza. Esta especie puede ser un importante almacén de carbono en sistemas que equilibran la producción y la conservación.

Cárdenas (2022) en el estudio realizado en plantaciones de *Eucalyptus Globulus Labir* ubicada en Comunidad Campesina de Uñas, Huancayo, región Junín, tuvo como objetivo determinar la cantidad de dióxido de carbono atmosférico almacenado dentro de la finca. Para la estimación de la biomasa

utilizó un método indirecto no destructivo que utiliza ecuaciones proporcionales y las variables altura y diámetro a la altura del pecho (DAP), datos que fueron recolectados en el inventario forestal. Se obtuvieron los siguientes resultados: biomasa aérea almacenó 75,64 tC/ha y capturó un total de 277,62 tCO<sub>2</sub>C/ha, biomasa subterránea almacenó 17,40 tC/ha y capturó 6,85 tCO<sub>2</sub>C/ha, y necromasa almacenó 0,09 tC/ha y capturó así 0,32 tCO<sub>2</sub>C/ha, el suelo almacenó 44,45 tC/ha y capturó 163,14 tCO<sub>2</sub>C/ha.

Alzamora y Tapia (2020) realizaron el estudio para determinar el potencial de secuestro de carbono de los eucaliptos (*Eucalyptus globule*) y (*Pinus radiata*) como posible medio de mitigación del cambio climático en la provincia de Sihuas-Ancash. El estudio se realizó en tres etapas: trabajo de campo, trabajo de laboratorio y trabajo de oficina. Se concluyó que el potencial de almacenamiento de carbono del eucalipto es de 359,75 Tn/Ha, y el potencial de almacenamiento de carbono del pino es de 155,75 Tn/Ha, convirtiéndose a en la primera vez en tener el mayor potencial de almacenamiento de carbono en la cuenca microbiana de Sihua en 2019.

Yantas (2022) realizó su investigación en el municipio de Huarriaca, Región Pasco, con el objetivo de evaluar el secuestro de CO<sub>2</sub> en plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus*), ciprés (*Cupressus macrocarpa*) y pino (*Pinus radiata*), que mitigan el cambio climático. Se realizaron estimaciones descriptivas de los valores de biomasa, carbono y dióxido de carbono considerando un área de estudio de una hectárea y una muestra de 2500 m<sup>2</sup> para cada especie; para ello se utilizó un sistema no destructivo, el cual estimó el diámetro a la altura del pecho (DAP) con calibradores y mediciones. El clinómetro estima la altura total de cada árbol. Luego, los datos se analizaron utilizando una ecuación exponencial para estimar la cantidad de CO<sub>2</sub> capturado por árbol (toneladas). hectáreas. Los resultados obtenidos mostraron la cantidad de dióxido de carbono absorbido por tres especies de árboles forestales y se encontró que el valor de CO<sub>2</sub> para la especie de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) alcanzó 196.30 t/ha, mientras que el valor de CO<sub>2</sub> para la especie de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) alcanzó 196,30 t/ha. La captura fue de 526,64 t/ha, el valor de CO<sub>2</sub> de la especie *Pinus radiata* alcanzó 315.56 t/ha, estas diferencias se deben a que cada especie no tiene las mismas

características en cuanto a tipo de plantación y diámetro a la altura del pecho y altura.

Barnechea (2019) en el estudio que realizó, comparó el valor económico y el secuestro de CO<sub>2</sub> de plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus labile*) y pino (*Pinus radiata*) de 11 años en Cochatama, Distrito de Huacara, con el objetivo de estimar el potencial de secuestro de CO<sub>2</sub> de ambos, para ello demarcaron 02 hectáreas de bosque de plantación y se evaluaron 4114 unidades forestales con una extensión de 3 x 3 m. Evaluaron en árboles vivos con diámetro a la altura del pecho  $\geq 10$  cm y analizaron variables como altura total, altura del tronco, diámetro a la altura del pecho para biomasa aérea, secuestro de carbono y dióxido de carbono. Durante el proceso de evaluación encontraron que *Eucalyptus globulus labile* tiene la mayor población con 2142 unidades, mientras que *Pinus radiata* tiene la menor población con 1972 unidades. De acuerdo a los resultados del secuestro de dióxido de carbono se encontró que la cantidad total de CO<sub>2</sub> captada por el eucalipto es de 521.18 tCO<sub>2</sub>/ha, que es la mayor; seguidas de las plantaciones de pino, con una emisión total de dióxido de carbono de 519,93 toneladas/ha; En términos de valor económico, esta plantación de eucalipto tiene un valor económico de USD 12.112,23, seguida de las plantaciones de pino con un valor económico total de USD 12.083,17.

### 1.2.3 Locales

Huamantupa (2019) investigó en el SNA perteneciente a la región Apurímac, donde avaluó la diversidad y biomasa arbórea de cuatro parcelas permanentes cuyas dimensiones fueron 60 m x 60 m, en total registraron 1920 individuos de plantas, que pertenecen a 35 especies, 27 géneros y 20 familias, la especie más abundante identificada fue el *Podocarpus glomeratus*, los resultados de biomasa reportados fueron 135,40/141,49 t/Ha.

Jimenez Ortega (2022) realizó evaluación de la captura de carbono y respiración foliar del bosque de Intimpa (*Podocarpus glomeratus D. Don*) en el SNA, durante el periodo de enero del 2018 a enero del 2020 con la finalidad de determinar la densidad y conductancia estomática, así como la biomasa arbórea y carbono almacenado en los tallos leñosos. Para la estimación del carbono almacenado realizó un inventario de la biomasa aérea en 4 parcelas de 60 m x 60



m y considerando  $DAP \geq$ , el reporte de resultados indica que el *Podocarpus glomeratus* D. Don posee una biomasa de 277,11 t/Ha y 296,37 t/Ha obtenida por dos ecuaciones alométricas, del mismo modo reportaron resultados de carbono almacenado siendo estos 138,56 tC/Ha y 148,18 tC/Ha.

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1 Identificación del problema

En el mundo el calentamiento global es uno de los problemas ambientales de mayor preocupación para la humanidad, este se produce a consecuencia del incremento de emisiones de los GEI a la atmosfera (IPCC, 2021). La mayor contribución al aumento de los GEI es el CO<sub>2</sub> considerado como el principal gas de efecto invernadero, investigaciones realizadas estiman que alrededor de 36 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> se emiten al año en el mundo, debido a la quema de combustibles fósiles, la producción de cemento y los procesos químicos. Los informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), evidencian que las temperaturas globales y concentraciones globales de CO<sub>2</sub> han aumentado significativamente desde el comienzo de la revolución industrial, el calentamiento global, cambio climático y la perturbación climática, son impulsados por el aumento de la concentración de GEI (Didenko et al., 2017; Rosenstock et al., 2013; Tucker, 2018).

En el contexto nacional, Perú es un país miembro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) desde el año 1992 dicho tratado fue ratificado en 1993, confirmando de esta manera la responsabilidad de contribuir al objetivo de la Convención de: “estabilizar la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y evitar llegar a un nivel de interferencia antropogénica peligrosa”. El país también se comprometió a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero y adaptarse al cambio climático. En cumplimiento a este compromiso, durante los últimos años, varias instituciones de carácter gubernamental y no gubernamental, así como algunos gobiernos regionales y sectores, han desarrollado iniciativas de cuantificación de existencias de carbono en las diferentes regiones y tipos de bosque en el Perú. Estos esfuerzos, no se han desarrollado de manera conjunta más al contrario fueron desarrollados de manera dispersa y aislada (Clemente, 2021).

En la región de Apurímac se ha implementado el Programa Bosques Manejados, uno de los programas con financiamiento público de mayor envergadura en plantaciones forestales entre las regiones andinas del Perú, con intervención en las 7 provincias que comprende la Región. El objetivo del programa es recuperar la cobertura arbórea como

medio para conservar importantes servicios ecosistémicos entre ellos incrementar la captura de carbono. Las especies forestales utilizadas para las plantaciones en función del número de árboles fueron: *Pinus radiata* 64,7 %, *Eucalyptus globulus* 14,8%, *Caesalpinia spinosa* 11,4% y especies nativas como el *Podocarpus glomeratus* D. Don, *Schinus molle* y *Escallonia resinosa* representaron menos del 2,5 %, como se puede observar las plantaciones dominantes fueron especies exóticas, reconocidos como mayores consumidores de agua frente a especies nativas como el *Podocarpus glomeratus* D. Don (Arce Baca, 2018).

Apurímac se encuentra situado en el sector sureste de los andes Centrales y dentro de la cobertura vegetal que se encuentra en esta región encontramos al bosque andino que cumplen un rol clave en la provisión de bienes y servicios ecosistémicos, sin embargo en este tipo de bosques, no se han desarrollado investigaciones relacionadas a captura y almacenamiento de carbono por parte de especies forestales, teniendo en cuenta que si existen cobertura vegetal encontrándose principalmente especies nativas entre ellos el *Podocarpus glomeratus* D. Don (Aragón et al., 2021; Dilas Jiménez y Huamán Jiménez, 2020; Huamantupa, 2019).

Este proyecto de investigación será una de las primeras en determinar la importancia de los bosques andinos en la provisión de servicio ecosistémicos de captura y almacenamiento de carbono, de esta manera se pretende valorar el bosque andino de *Podocarpus glomeratus* D. Don debido a que ofrecen servicios ecosistémicos principalmente servicios ecosistémicos de regulación que están relacionados a la captura y almacenamiento de carbono, estos ecosistemas tienen la posibilidad de mitigar la presencia de gases de efecto invernadero de la atmosfera a través de un proceso natural conocido como fotosíntesis, en el cual el CO<sub>2</sub> que está presente en la atmosfera combinado con el agua forman carbohidratos y se desprende oxígeno del proceso químico, de esta manera los bosques andinos absorben el CO<sub>2</sub> de la atmosfera y son considerados como sumideros de carbono, así mismo la investigación planteada podría ser de utilidad para comparar el potencial de captura de carbono que tiene el bosque andino de *Podocarpus glomeratus* D. Don respecto a especies exóticas, y recomendar en futuros programas de plantaciones de árboles en la región se priorice especies nativas.

## 2.2 Enunciados del problema

### 2.2.1 Pregunta general

- ¿Cuál es la diferencia del uso de diferentes metodologías de evaluación, para determinar carbono almacenado en el bosque nativo de *Podocarpus glomeratus* D. Don en el Santuario Nacional de Ampay?

### 2.2.2 Preguntas específicas

- ¿Cuál es la importancia de realizar el inventario forestal de la intimpa, en la obtención de variables dasométricas y variables posicionales como son las coordenadas UTM de las parcelas, para determinar carbono almacenado?
- ¿Cuál es el contenido de biomasa aérea del bosque de intimpa al estimar mediante ecuaciones alométricas?
- ¿Cuál es el método adecuado para determinar fracción de carbono de la intimpa?
- ¿Cuál es el contenido de carbono almacenado en la biomasa arbórea del bosque de intimpa estimados mediante ecuaciones alométricas?
- ¿Existe diferencia en la comparación de metodologías de estimación de carbono almacenado por la intimpa?

## 2.3 Justificación

Es importante realizar estudios que logren obtener resultados de biomasa en bosques andino con la finalidad de obtener datos exactos de cantidad de carbono que pueden almacenar estos ecosistemas, en el Perú existen numerosas investigaciones referidos a captura y almacenamiento de carbono en bosques, pero se han dado principalmente en la región de la selva por la gran cobertura de especies forestales. Por el contrario, en la zona andina son escasas las investigaciones relacionadas a captura y almacenamiento de carbono por parte de especies forestales, teniendo en cuenta que si existen cobertura vegetal en esta región siendo principalmente especies autóctonas como el *Podocarpus glomeratus* D. Don, *Schinus molle* y *Escallonia resinosa*, las que se desarrollan en estos ecosistemas.

El presente trabajo de investigación, plantea la determinación de biomasa y por ende la capacidad que tiene el bosque andino de intimpa de capturar carbono, el cual podría ser útil para mitigar el cambio climático ocasionados por la emisión de los GEI

puestos que estos se consideran como sumideros de carbono. Así mismo se pretende valorar el bosque andino del Santuario Nacional de Ampay, por un importante servicio ecosistémico que ofrece a la humanidad el cual es servicios ecosistémicos de captura y almacenamiento de carbono.

Los resultados de la investigación podrían ser útiles para valorar estos bosques andinos de intimpa y plantearse para futuros programas de plantaciones forestales en la Región Apurímac como especie mayoritaria, ya que las especies exóticas como el Pino y Eucalipto no son nativos de muchos de los lugares donde se han plantado, lo que puede tener consecuencias negativas para los ecosistemas locales.

## 2.4 Objetivos

### 2.4.1 Objetivo general

- Evaluar la captura de carbono almacenado por el bosque nativo de intimpa, en el Santuario Nacional de Ampay, mediante el uso de diferentes metodologías

### 2.4.2 Objetivos específicos

- Efectuar el inventario forestal de intimpa para obtener las variables: diámetro de altura de pecho, altura total del árbol y variables posicionales como son coordenadas UTM de las parcelas
- Estimar la biomasa aérea del bosque de intimpa mediante ecuaciones alométricas
- Determinar la fracción de carbono de la intimpa mediante el método volumétrico
- Estimar el contenido de carbono almacenado en la biomasa arbórea del bosque de intimpa
- Comparar las diferentes metodologías de evaluación de carbono almacenado por la intimpa

## 2.5 Hipótesis

### 2.5.1 Hipótesis general

- El uso de diferentes metodologías de evaluación, para determinar carbono almacenado en el bosque nativo de intimpa en el Santuario Nacional de Ampay, presenta diferencias significativas

### 2.5.2 Hipótesis específicas

- La realización del inventario forestal de intimpa es importante, ello permitirá la obtener variables dasométricas y variables posicionales como son las coordenadas UTM de las parcelas.
- El contenido de biomasa aérea del bosque de intimpa, estimado mediante siete ecuaciones alométricas presentan diferencias significativas.
- La fracción de carbono de la intimpa se estima mejor mediante el método volumétrico.
- El contenido de carbono almacenado en la biomasa arbórea del bosque de intimpa son diferentes para las diez parcelas de estudio y tipos de bosque.
- La comparación de diferentes metodologías de evaluación de carbono almacenado por la intimpa presenta diferencias en los resultados de captura de carbono.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Lugar de estudios

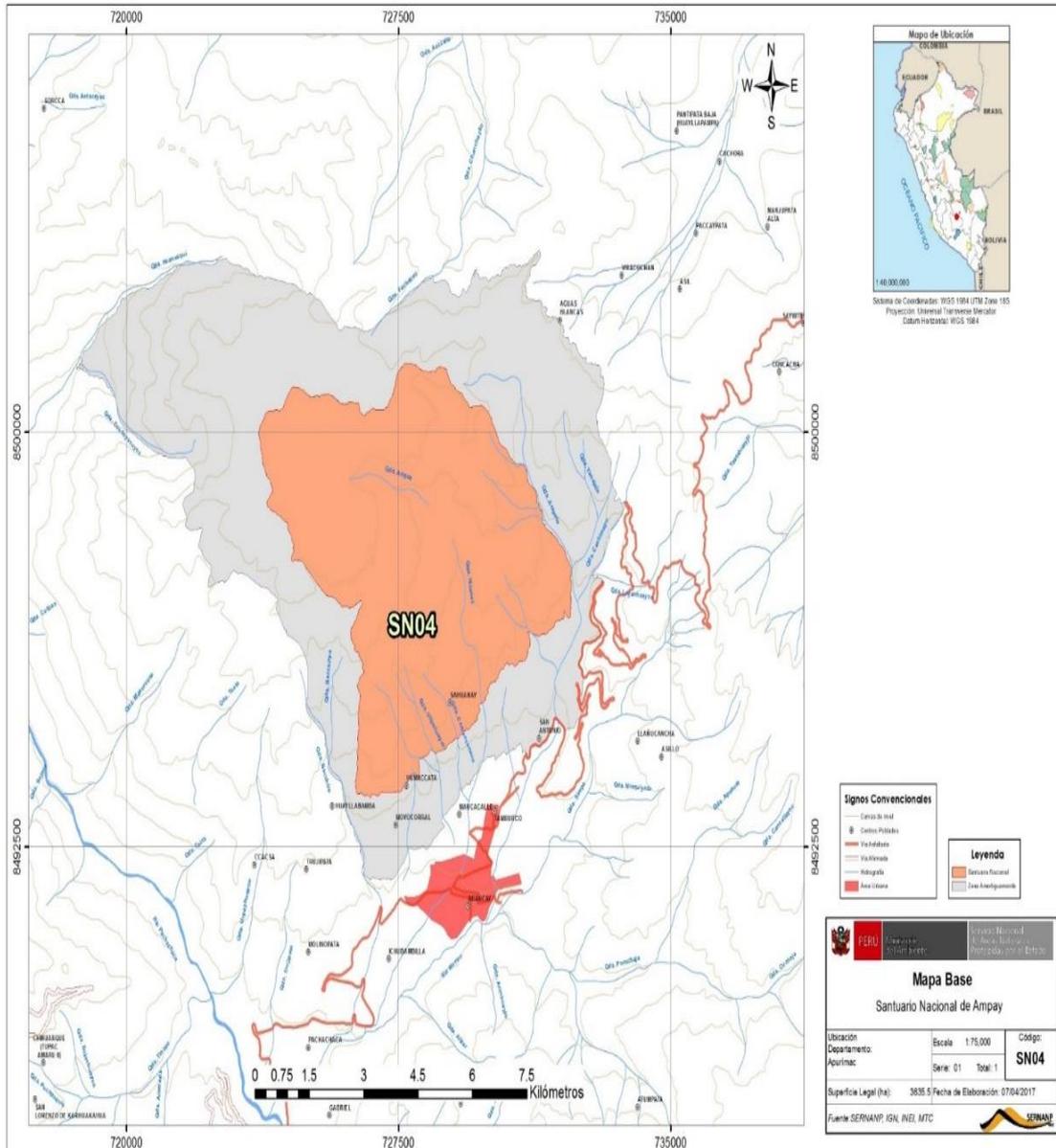
El trabajo de investigación se realizó dentro del Santuario Nacional de Ampay (SNA), ubicado en el ámbito geopolítico del distrito de Tamburco, provincia de Abancay, departamento de Apurímac; geográficamente se encuentra en la Zona 18 L, Coordenada Este 729817,10 m E, Coordenada Norte 8495139,56 m S; reconocida como área protegida por el estado mediante Decreto Supremo N° 042-87-AG el 23 de julio de 1987 (Figura 1) (SERNAMP, 2022b).

El (SNA) se ubica en medio de los Andes peruanos, que forma parte del concatenamiento de los picos nevados de la Cordillera de Vilcabamba y de los Andes del sur, con un rango altitudinal que va desde los 2900 a los 5235 m.s.n.m., tiene una extensión de 3635,50 hectáreas, en su interior se contempla una enorme diversidad de riachuelos y manantiales que le confieren una belleza e importancia única al lugar, es prácticamente toda una escarpada pendiente, en las faldas del nevado Ampay, con escasas zonas planas donde aparecen algunas bellas lagunas que forman un paisaje espectacular. En la sección sur y más baja del área se encuentra el majestuoso bosque de Intimpa, objeto de conservación principal del SNA. Ubicado a pocos kilómetros de Abancay y de la importante ruta entre Cusco-Lima, este lugar es muy accesible y es un punto atractivo para el turismo de naturaleza (Andean Forest, 2018).

Es en esta área, donde se trabajaron 10 parcelas no permanentes, para la evaluación de captura de carbono por la especie forestal *Podocarpus glomeratus* D. Don.

**Figura 3**

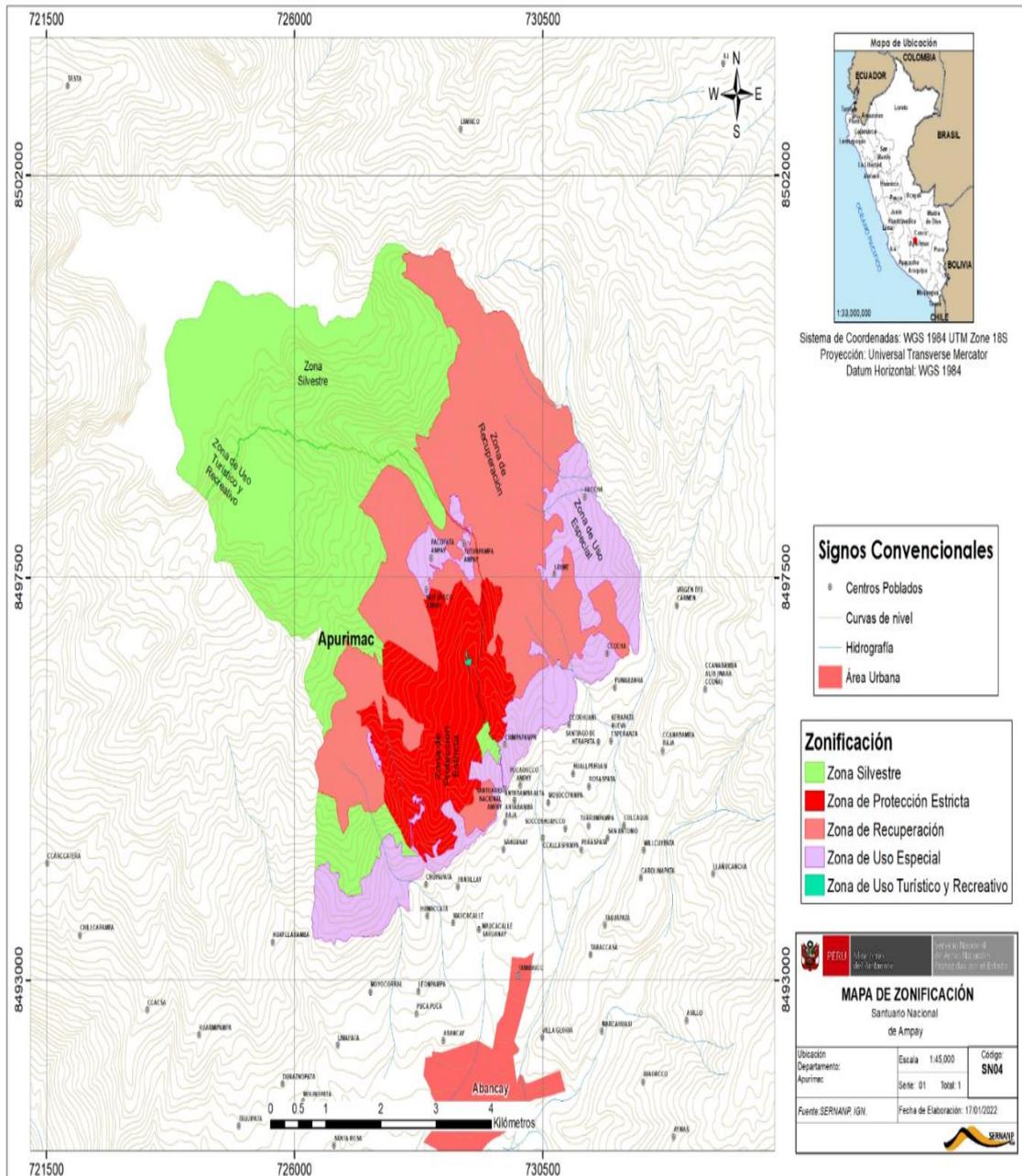
*Mapa base Santuario Nacional de Ampay*



*Nota.* La figura muestra el mapa base del SNA, zona naranja comprende el área de protección estricto y zona ploma representa zona de amortiguamiento. Fuente: SERNAMP (2022a).

**Figura 4**

*Mapa de zonificación Santuario Nacional de Ampay*



Nota. La figura muestra mapa de zonificación del Santuario Nacional de Ampay. Fuente: SERNAMP (2022a)

### 3.2 Población

La población de estudio estará constituida por árboles de *Podocarpus glomeratus* D. Don, considerados en el inventario forestal para luego estimar su biomasa a través de siete ecuaciones alométricas.

### 3.3 Muestra

Se tomarán muestras representativas de 10 % de los árboles considerados en el inventario forestal en cada parcela establecida, luego se extraerán tarugos de forma cilíndrica de dimensiones: 200 mm de longitud por 5,15 mm de diámetro para evaluar fracción de carbono y densidad básica del *Podocarpus glomeratus* D. Don.

### 3.4 Método de investigación

Esta investigación pertenece al área de medio ambiente, línea de investigación de recursos naturales y medio ambiente; y el tema de investigación es captura de carbono por especies vegetales. La metodología de investigación es de un enfoque cuantitativo, para lograr los objetivos planteados se trabajaron 10 parcelas de monitoreo donde se realizó el inventario forestal, la biomasa fue determinada mediante la aplicación de siete ecuaciones alométricas y la fracción de carbono del *Podocarpus glomeratus* D. Don fue determinado por el método volumétrico.

### 3.5 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

#### 3.5.1 Objetivo específico 1

##### A. Establecimiento del tamaño de parcela

De acuerdo a la Guía de inventario de la flora y vegetación del Ministerio del Ambiente se establecieron las dimensiones de las parcelas, tomando como referencia determinadas formaciones vegetales, siendo la formación vegetal para este estudio, bosques de la región andina relictos, meso andino y alto andino. Esta guía establece que la superficie mínima a evaluar para este tipo de bosques, es de 0,1 hectáreas cuyas dimensiones de la parcela de forma rectangular se fijaron en 20m x 50m (Figura 5).

## Figura 5

### *Dimensiones de las parcelas establecidas*



*Nota.* La figura muestra las dimensiones de las parcelas, en cuya área delimitada se realizará el inventario forestal.

## B. Inventario forestal

Tomando en cuenta la Guía de inventario de la flora y vegetación aprobado por Resolución Ministerial N° 059-2015-MINAM, se trabajaron 10 parcelas no permanentes (Figura 6). Antes de iniciar con el inventario forestal, se georreferenciaron cada uno de los vértices de las parcelas (tabla 2), en cada vértice de las parcelas se fijaron estacas, estas se delimitaron con cinta rafia de color rojo llamativo y visible. Luego de establecidas las parcelas, se identificaron las especies en estudio para luego hacer el conteo de cada individuo, en el inventario forestal solo fueron incluidos aquellos árboles cuyo Diámetro altura de pecho (DAP) fue  $\geq$  a 5 cm, tal como señala la Guía de inventario de flora y vegetación.

**Tabla 2**

*Ubicación de las parcelas*

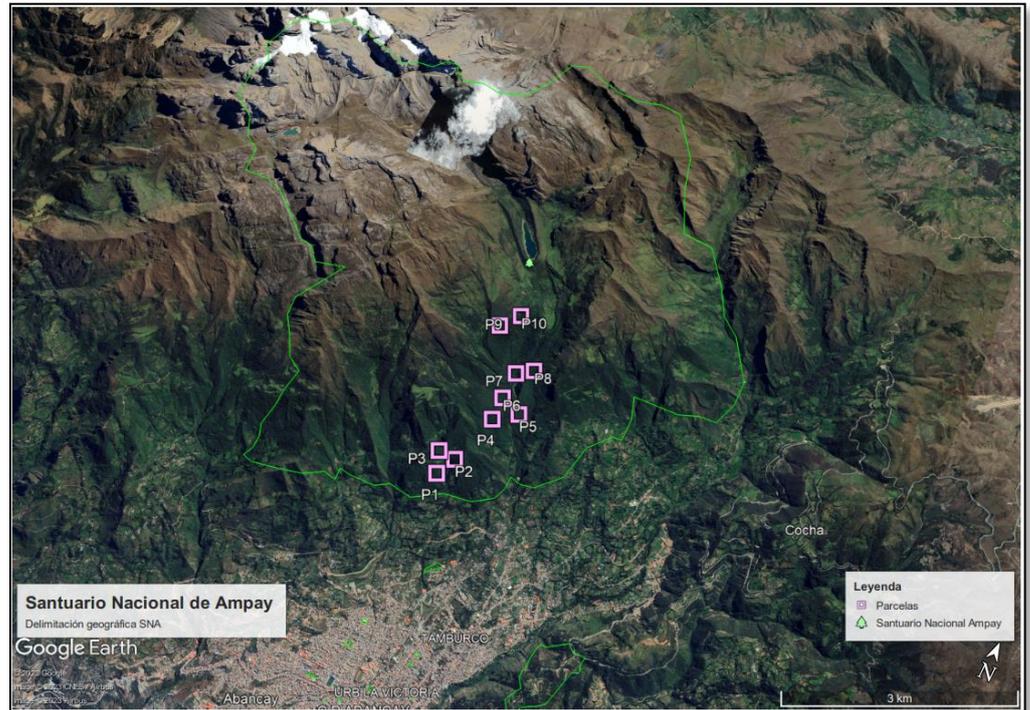
Parcelas	Coordenadas UTM	Altitud (msnm)	Pendiente (%)
P1	18 L 728789,00 m E 8494530,00 m S	3087	12,28
P2	18 L 728949,00 m E 8494989,00 m S	3230	173,21
P3	18 L 728706,00 m E 8495008,00 m S	3272	173,21
P4	18 L 729167,00 m E 8495703,00 m S	3314	160,03
P5	18 L 729469,00 m E 8495915,00 m S	3265	166,43
P6	18 L 729167,00 m E 8496033,00 m S	3350	142,81
P7	18 L 729185,00 m E 8496425,00 m S	3344	142,81
P8	18 L 729395,00 m E 8496563,00 m S	3403	142,81
P9	18 L 728683,00 m E 8496961,00 m S	3656	173,21
P10	18 L 728892,00 m E 8497213,00 m S	3614	173,21

*Nota.* Registro de coordenadas UTM, altitud y pendiente de las 10 parcelas de estudio.

Para una mejor evaluación de la captura de carbono en el bosque de *Podocarpus glomeratus* D. Don, se agruparon en función de tipo de bosque, siendo estos: Bosque de tipo I, que corresponde a bosques sin intervención antrópica; Bosque tipo II, que corresponde a bosque intervenido por el hombre, ya sea por presencia de caminos o senderos turísticos, zona de camping o que presentan alguna actividad del hombre y el Bosque Tipo III, que corresponde a la zona de límite entre el bosque de Intimpa y otras zonas de vida (tabla 3).

### Figura 6

#### *Establecimiento de parcelas*



*Nota:* La figura muestra ubicación de 10 parcelas de estudio, dentro del SNA.

### Tabla 3

#### *Agrupación de parcelas en función del tipo de bosque*

Parcela	Tipo de Bosque
P2	Bosque Tipo I (sin intervención)
P3	
P4	
P6	
P8	Bosque Tipo II (presencia de caminos)
P5	
P7	
P1	Bosque Tipo III (zona limite)
P9	
P10	

*Nota.* Agrupación de 10 parcelas en función del tipo de bosque.

Luego de haber determinado las variables posicionales y agrupación de las parcelas en función del tipo de bosque, se registraron

datos de cantidad de individuos por parcela, datos del DAP y alturas de cada árbol.

### C. Determinación de variables dasométricas

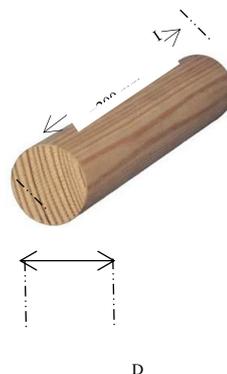
Utilizando cinta métrica, se registró datos del DAP que de acuerdo a la norma internacional se mide a 1,3 m de altura del fuste con respecto al suelo (Neyra, 2021). En esta etapa también se registraron datos de altura total de cada árbol.

### D. Extracción de muestras

Para la extracción de muestras de *Podocarpus glomeratus* D. Don, se seleccionaron 3 árboles al azar por parcela y luego con ayuda del taladro de pressler, se extrajeron muestras (tarugos) por árbol cuyas medidas son: 200 mm de longitud por 5.15 mm de diámetro (Figura 3), recolectando en total 60 muestras en las 10 parcelas. Posteriormente fueron transportados en bolsas de polietileno para evitar pérdida de humedad.

### Figura 7

*Dimensiones de la muestra*



*Nota.* La figura muestra las dimensiones de los tarugos extraídos de los árboles muestreados para análisis.

### **E. Determinación de la densidad básica**

Para la determinación de densidad básica, se realizó según lo establecido en la NTP 251,011 (INACAL, 2018), que establece que la densidad básica se mide como el peso de un bloque de madera secado al horno dividido entre el volumen húmedo de la muestra. El procedimiento que se siguió es el siguiente: Primero se determinó el volumen húmedo de la muestra, luego se mantuvo la muestra durante 12 horas en una estufa a 110 °C para obtener el peso seco al horno en gramos, seguidamente se determinó el peso seco de la muestral y finalmente con la ecuación (1) se calculó la densidad básica del *Podocarpus glomeratus* D. Don.

$$Db = \frac{Psm}{Vhm} \quad (1)$$

Dónde los parámetros Db: representa Densidad básica (g/cm<sup>3</sup>), Psm: representa Peso seco de la muestra (g) y Vhm: indica el Volumen húmedo de la muestra (cm<sup>3</sup>).

### **F. Secado de muestra**

Luego de extraídas las muestras del árbol se pesaron para obtener el peso inicial (Pi), seguidamente se colocarán en una estufa a una temperatura máxima de 105 °C hasta que se obtenga peso constante, para registrar el peso seco al horno o peso final (Pf).

#### **3.5.2 Objetivo específico 2**

Se estimó la biomasa aérea por el método indirecto, que es a través de ecuaciones y modelos matemáticos. La biomasa aérea se calculó para cada árbol en función de: Diámetro (D) y la altura evaluada en campo (H) siguiendo siete modelos alométricos (Tabla 4), establecidos por diferentes investigadores para bosques que tienen similitud al SNA. La densidad ( $\rho$ ) para cada árbol se estimó en laboratorio, determinándose como densidad básica.

**Tabla 4**

*Ecuaciones alométricas seleccionadas para determinación de biomasa*

N°	Autor	Ecuación	Tipo de bosque
1	Cuenca et al., 2014	$AGB = \exp(-2,29 + 2,28 \times \ln(DAP) - 0,05 \times H)$	Bosque de tierras bajas
2	Chave, Réjou-Méchain, et al., 2014	$AGB = 0,0673x(\rho x DAP^2 x H)^{0,976}$	Bosques tropicales
3	Fernando et al., 2014	$AGB = 0,013 DAP^{3,0462}$	bosques de la Sierra de pinos
4	Návar Cháidez et al., 2004	$AGB = 0,0199 DAP^{2,5488}$	Bosque de coníferas de la sierra
5	Chave et al., 2005	$AGB = \exp(-2,187 + 0,916 \times \ln(\rho x DAP^2 x H))$	Bosques tropicales
6	Vásquez et al., 2014	$AGB = -16,51 + 40,26xH(\log_{10}) + 9,30xDAP(\log_{10})$	Bosque de <i>Polylepis</i> a gran altitud en los andes peruanos
7	Chave et al., 2005	$AGB = \rho \times \exp(-1,499 + 2,148 \ln(DAP) + 0,207(\ln(DAP))^2 - 0,0281(\ln(DAP))^3)$	Bosques tropicales

*Nota.* Ecuaciones alométricas presentados en diversas investigaciones.

### 3.5.3 Objetivo específico 3

Para la determinación la fracción de carbono se empleó el Método de Walkley y Black (1934), el procedimiento que se tomo fue sugerido por Kalra y Maynard (1991), y es el siguiente: Primero se obtuvo muestras en peso seco de la especie nativa, luego se molieron las muestras, posteriormente se pesó 0,1 g de muestra y se trasladó a un frasco de Erlenmeyer de 125 ml, luego se agregó a las muestras 5 ml de solución Dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) 4N, en seguida se agregó 5 ml de Ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ ), se mezcló para homogeneizar la solución, durante esta reacción se genera calor, las muestras se llevaron a reposo en un tiempo de 24 horas como dice la metodología, para que ocurra reacción completa y pueda enfriarse, luego se adicionó 50 ml con agua desionizada (previamente se preparó un blanco), finalmente se tituló con solución Sulfato ferroso Amoniacal 0,2N, agregando gotas de indicador difenil amina sulfúrica 1% (3 gotas/20 ml).

Se procedió a determinar el carbono en la estructura vegetal del *Podocarpus glomeratus* D. Don, con la finalidad de estimar su captura y almacenamiento mediante el siguiente procedimiento. La materia orgánica es oxidada con una mezcla de  $K_2CrO_7$  más  $H_2SO_4$ . La dilución concentrada se calienta con  $H_2SO_4$  y  $K_2CrO_7$  es la fuente exclusiva de calor. El exceso de  $K_2CrO_7$

es determinado por titulación con  $\text{FeSO}_4$  o con  $(\text{NH}_4\text{Fe})_2(\text{SO}_4)_3$ . Este método proporciona una estimación fácilmente oxidable de carbono orgánico y es usado como una medida de carbono orgánico total. El porcentaje de materia orgánica es igual al porcentaje de carbono orgánico multiplicado por el factor de 1,724 porque la materia orgánica contiene el 58% de carbono. La fracción de carbono será calculada en base a la ecuación (2) para la obtención de la fracción de carbono:

$$C (\%) = M \times \frac{V_1 - V_2}{P} \times 0,39 \quad (2)$$

Donde las variables M representa molaridad de la solución de  $\text{FeSO}_4(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , V1 representa el volumen de la solución de  $\text{FeSO}_4(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  requerida en el blanco (ml), V2 representa el volumen de la solución de  $\text{FeSO}_4(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  requerida en la muestra (ml), P representa el peso de la muestra de madera (g) y el valor de  $0,39 = 3 \times 10^{-3} \times 100 \times 1,3$  está en función de 3 que es el peso equivalente del C y 1,3 se basa en que se asume que hay un 77 % de recuperación.

#### 3.5.4 Objetivo específico 4

Una vez obtenidos los valores de biomasa aérea y fracción de carbono, se determinó el carbono almacenado en cada una de las parcelas para ello se multiplicó la biomasa por la fracción de carbono, utilizando la ecuación (4).

$$CA = B \times FC \quad (4)$$

Donde CA representa el carbono almacenado total por hectárea (tC/ha), B representa Biomasa (t/ha) y FC representa la fracción de carbono promedio (%).

#### 3.5.5 Objetivo específico 5

Se realizó la comparación de los modelos estadísticos a través del coeficiente de determinación  $R^2$ . Si el  $R^2 \geq 70\%$ , entonces la bondad de ajuste es buena, por consiguiente, se puede realizar la predicción del modelo, y se puede recomendar para otros trabajos similares. Si el  $R^2$ , es menor a 70%, la bondad de ajuste, no es confiable para la predicción del modelo (Gutiérrez Pulido y De la vara Salazar, 2008).

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

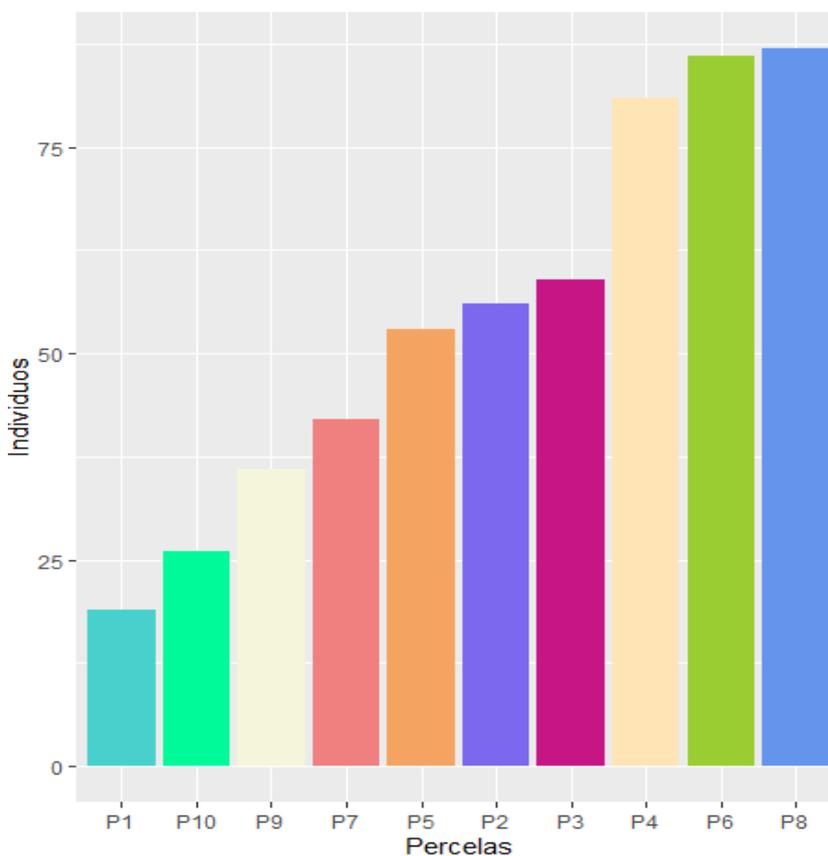
#### 4.1 Resultados

##### 4.1.1 Cantidad de individuos

En este estudio se contabilizaron un total de 545 individuos de *Podocarpus glomeratus* D. Don, de las cuales las parcelas P8 y P6 albergaron la mayor cantidad con 87 y 86 individuos respectivamente; en la parcela P1 se encontró el menor número, verificándose 19 individuos en total (figura 8).

#### Figura 8

*Cantidad de individuos encontrados en cada parcela*



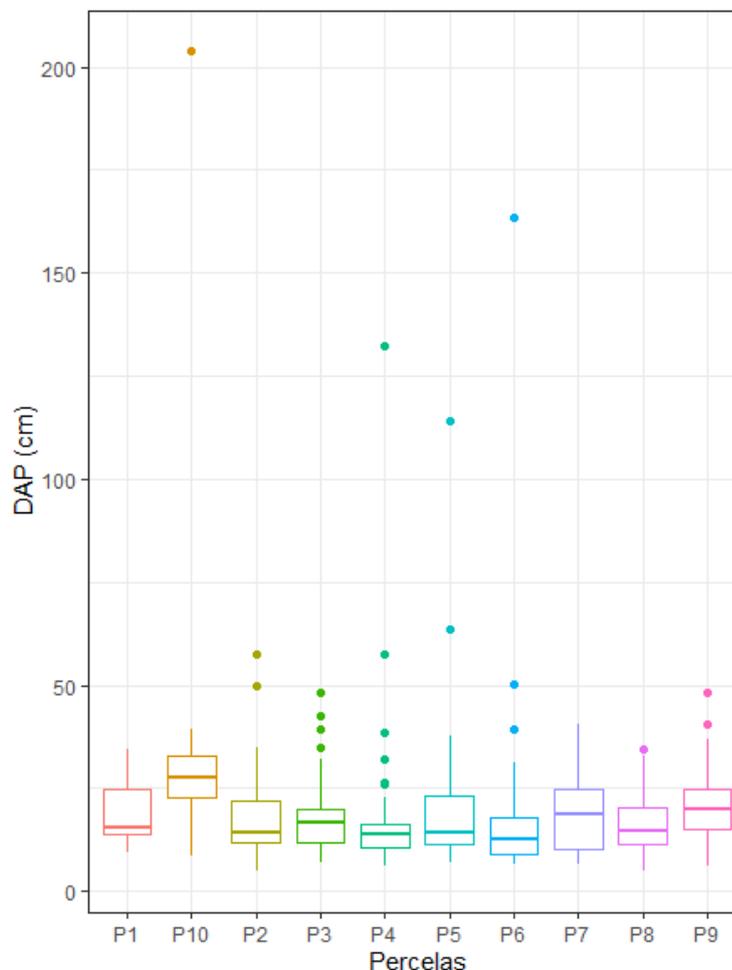
*Nota. La figura muestra la cantidad de individuos encontrados en cada parcela de estudio*

#### 4.1.2 Registro de diámetro altura de pecho (DAP)

De las 10 parcelas de estudio se verificó, que el mayor valor de la mediana en cuanto al DAP se encuentra en la parcela P10, aquí se identificó al individuo con mayor diámetro llegando a registrar 203,72 cm siendo el mayor valor en cuanto al DAP, estas medidas están relacionados a la madurez de los árboles, es en esta parcela donde se identificó arboles maduros los cuales tienen mayores diámetros Jimenez Ortega (2022); del mismo modo en la parcela P6 se registraron los menores valores de DAP encontrándose una mediana de 12,51 cm de DAP (figura 9).

**Figura 9**

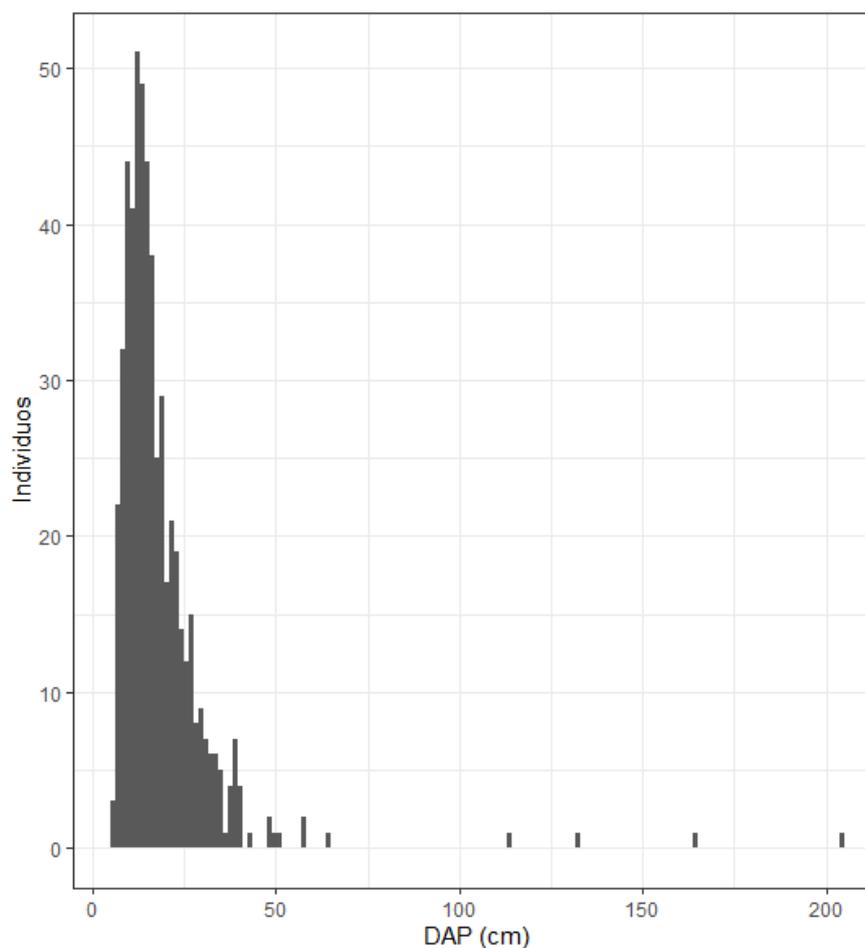
*Distribución de los individuos según las clases de DAP en las 10 parcelas*



*Nota. La figura muestra los diámetros a altura del pecho (DAP) en cm, de las 10 parcelas de estudio.*

**Figura 10**

*Distribución de clases diamétricas*



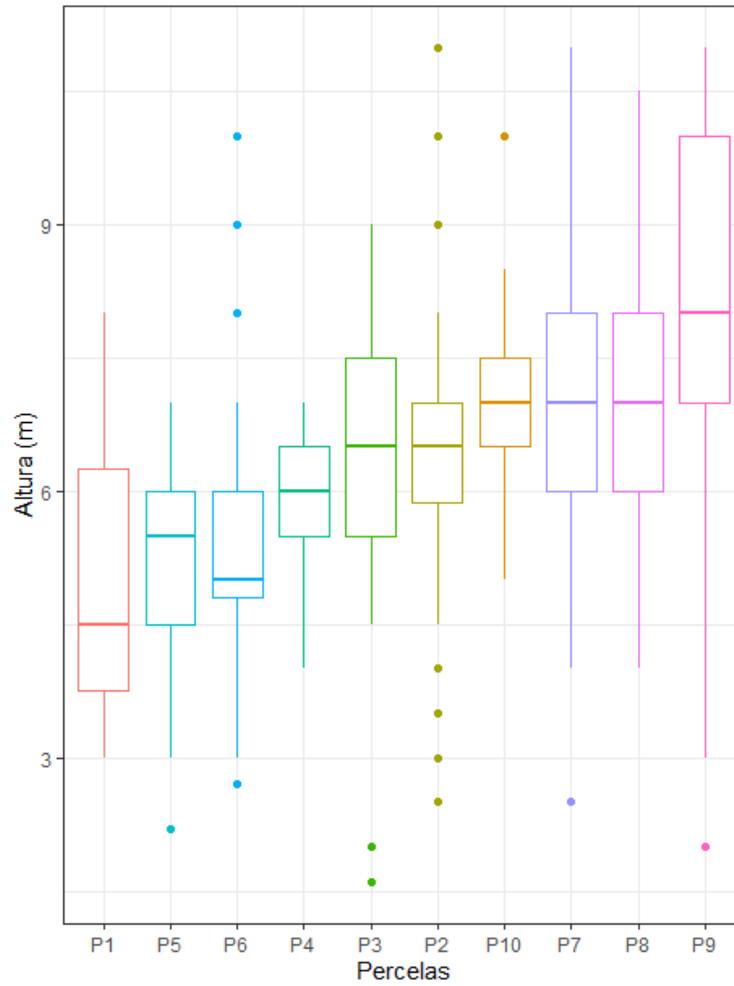
*Nota. La figura muestra los diámetros a altura del pecho (DAP) en cm, de las 10 parcelas de estudio.*

#### **4.1.3 Registro de altura**

En las 10 parcelas de estudio se verificó (figura 11), que las mayores alturas se registraron en la parcela P9 con una mediana de 8 m; del mismo modo en la parcela P1 se registraron los menores valores de altura de los árboles encontrándose una mediana de 4,50 m de altura.

**Figura 11**

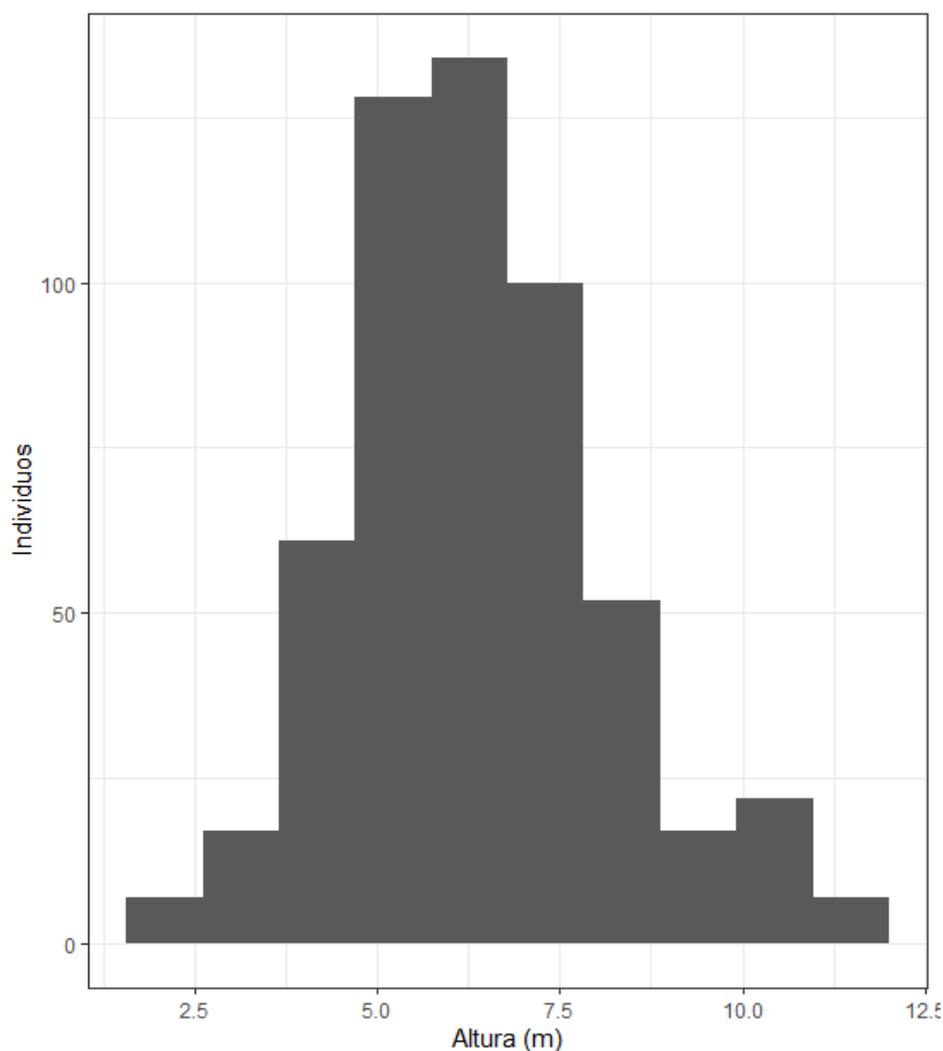
*Distribución de clases de altura*



*Nota. La figura muestra las alturas registradas en las 10 parcelas*

**Figura 12**

*Histograma de datos de altura*



*Nota.* La figura muestra histograma de clases de altura de las 10 parcelas de estudio

#### **4.1.4 Biomasa aérea del bosque de *Podocarpus glomeratus* D. Don**

En la (tabla 5) se muestran los resultados de biomasa obtenidos mediante siete ecuaciones alométricas en diez parcelas de estudio, como se puede verificar los promedios son diferentes para cada ecuación alométrica, el promedio del mayor valor de biomasa es  $358,27 \pm 468,45$  t/Ha el cual fue obtenido con la ecuación alométrica tres (AGB3), y el menor valor del promedio de biomasa fue  $14,21 \pm 6,06$  t/Ha obtenido con la ecuación alométrica seis (AGB6), estas diferencias se atribuyen a que cada modelo matemático para estimar biomasa considera diferentes variables Oberle et al. (2023), por ejemplo en la AGB3 tiene como única variable el DAP; en cambio la AGB6 incluye variables como

altura total del árbol y DAP; si se compararan dos ecuaciones alométricas que consideran las mismas variables, sus promedios de biomasa también serían similares por ejemplo la AGB 2 y AGB 5 tienen promedios de:  $61,88 \pm 31,96$  y  $60,56 \pm 27,29$  t/Ha respectivamente, esta similitud se asocia a que ambas ecuaciones consideran densidad básicas, DAP y altura total en el modelo alométrico (Mada et al., 2022b).

**Tabla 5**

*Estimación de valores de parámetros de biomasa obtenido mediante ecuaciones alométricas*

Parcela	AGB 1 (t/Ha)	AGB 2 (t/Ha)	AGB 3 (t/Ha)	AGB 4 (t/Ha)	AGB 5 (t/Ha)	AGB 6 (t/Ha)	AGB 7 (t/Ha)
P_1	14,38	13,25	28,70	8,84	14,12	4,26	48,95
P_2	41,45	42,27	101,56	27,42	44,53	14,95	151,17
P_3	41,82	48,29	97,00	28,01	50,64	15,62	155,01
P_4	89,83	71,18	461,36	75,40	70,03	19,85	363,73
P_5	76,89	54,16	336,50	60,35	53,44	12,19	306,36
P_6	109,44	114,85	803,77	112,67	104,66	19,92	498,86
P_7	32,08	46,16	81,60	23,23	47,42	11,90	129,53
P_8	42,49	60,99	85,33	27,80	64,95	24,50	153,27
P_9	32,61	51,44	88,83	24,72	52,26	10,86	137,67
P_10	170,41	116,21	1498,01	178,31	103,52	8,00	703,48
Prom. + D.E	<b>65,14±47,30</b>	<b>61,88±31,96</b>	<b>358,27±468,45</b>	<b>56,68±52,95</b>	<b>60,56±27,29</b>	<b>14,21±6,06</b>	<b>264,80±204,72</b>

*Nota.* La tabla muestra los valores promedio de biomasa obtenidos por siete ecuaciones alométricas

**Tabla 6**

*Estadísticos de valores promedio para biomasa*

Parcela	Biomasa (t/Ha) Prom. + D.E
P_1	18,93±15,22
P_2	60,48±48,35
P_3	62,34±48,14
P_4	164,48±173,15
P_5	128,56±133,48
P_6	252,02±288,53
P_7	53,13±40,34
P_8	65,62±44,25
P_9	56,91±43,47
P_10	396,85±535,66

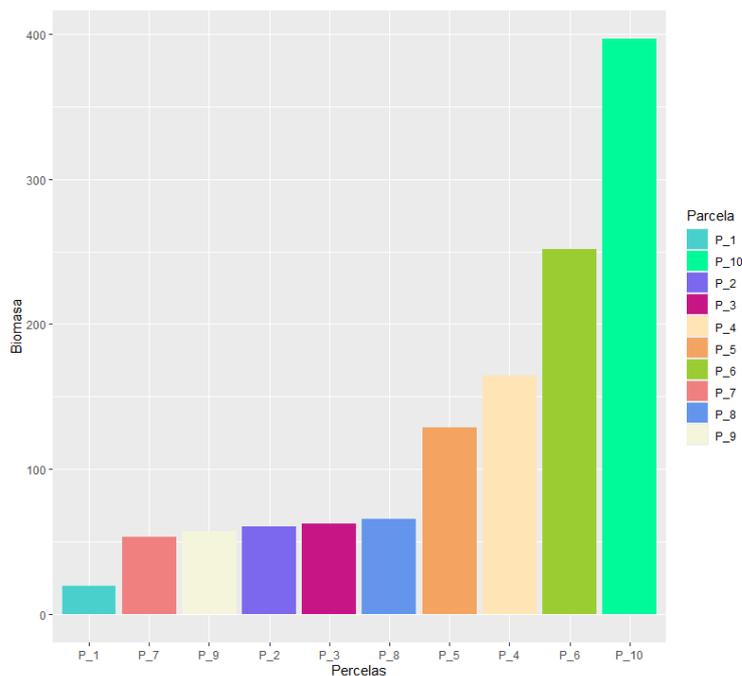
*Nota.* La tabla muestra los valores promedio de biomasa en las diez parcelas de estudio

En base a los datos de la (tabla 6) se construyó la (figura 13), que muestra los valores de biomasa promedio en diez parcelas de estudio, donde se puede observar que la

parcela P\_10 contiene el mayor promedio con un valor de  $396,85 \pm 535,66$  (t/Ha), por otro lado, la parcela que menor valor promedio presentó fue la parcela P\_1 con un valor de  $18,93 \pm 15,22$  (t/Ha).

### Figura 13

*Promedio de valores de biomasa por parcela*



*Nota.* La figura muestra los valores promedios de biomasa

#### 4.1.5 Fracción de carbono mediante el método volumétrico

Numerosos estudios han empleado un factor de conversión de 0,5 para calcular el contenido de carbono a partir de la biomasa seca, lo que podría inducir a un error considerable en la estimación total del carbono presente en los bosques (Ma et al., 2018). En este estudio, encontramos que el contenido de carbono fue de  $47,46 \pm 1,21$  % con un rango que varía entre 44,46 % a 49,53 %, valores similares a lo reportado por el el IPCC (2006) que sugiere usar el valor del 50% para convertir biomasa a carbono, dado que el 50% de la materia seca de la biomasa total es carbono. Sin embargo, cada especie forestal tiene valores diferentes de fracción de carbono, es por eso que en esta investigación se determinó la fracción de carbono por método volumétrico para obtener valores más exactos respecto a la captura de carbono para la intimpa.

#### 4.1.6 Carbono almacenado en la biomasa arbórea

En la (tabla 7) se muestran los promedios de captura de carbono almacenado por el *Podocarpus glomeratus* D. Don, obteniéndose un valor promedio global de  $59,77 \pm 105,98$  tC/Ha. El mayor valor de toneladas de carbono por hectárea fue obtenido con la AGB3 siendo  $170,04 \pm 222,34$  tC/Ha y el menor valor fue obtenido con la AGB 6 registrándose  $6,74 \pm 2,88$  tC/Ha, estos resultados guardan relación con los resultados de biomasa ya que existe una relación directa entre biomasa y carbono.

**Tabla 7**

*Estimación de valores de parámetros de captura de carbono almacenado, obtenidos por siete ecuaciones alométricas*

Parcela	AGB 1_CAR (tC/Ha)	AGB 2_CAR (tC/Ha)	AGB 3_CAR (tC/Ha)	AGB 4_CAR (tC/Ha)	AGB 5_CAR (tC/Ha)	AGB6_CAR (tC/Ha)	AGB 7_CAR (tC/Ha)
P1	6,83	6,29	13,62	4,20	6,70	2,02	23,23
P2	19,67	20,06	48,20	13,01	21,14	7,10	71,75
P3	19,85	22,92	46,04	13,29	24,04	7,41	73,57
P4	42,64	33,78	218,98	35,79	33,24	9,42	172,64
P5	36,49	25,71	159,71	28,64	25,36	5,79	145,41
P6	51,94	54,51	381,49	53,48	49,67	9,45	236,77
P7	15,23	21,91	38,73	11,03	22,51	5,65	61,48
P8	20,17	28,95	40,50	13,19	30,83	11,63	72,75
P9	15,48	24,41	42,16	11,73	24,80	5,15	65,34
P10	80,88	55,16	711,00	84,63	49,13	3,80	333,89
<b>Prom. + D.E</b>	<b>30,92±22,45</b>	<b>29,37±15,17</b>	<b>170,04±222,34</b>	<b>26,90±25,13</b>	<b>28,74±12,95</b>	<b>6,74±2,88</b>	<b>125,68±97,17</b>

*Nota.* La tabla muestra los valores de captura de carbono, obtenido por las siete ecuaciones alométricas.

La evaluación de carbono en las diez parcelas de estudio, presenta los siguientes resultados, en la parcela P10 se encontró la mayor cantidad de carbono almacenado con un valor promedio de  $188,36 \pm 254,24$  tC/Ha y es en la parcela P1 donde se encontró el menor valor de carbono almacenado con un valor de  $8,98 \pm 7,22$  tC/Ha (tabla 8).

**Tabla 8**

*Valores de los parámetros de captura de carbono almacenado obtenida en cada parcela*

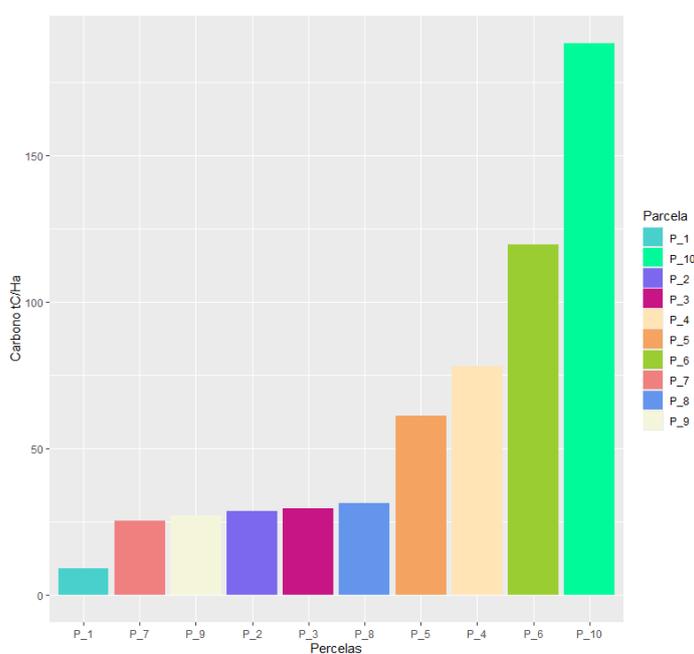
Parcelas	Carbono almacenado Prom. + D.E
P1	8,98±7,22
P2	28,70±22,95
P3	29,59±22,85
P4	78,07±82,18
P5	61,02±63,35
P6	119,62±136,95
P7	25,22±19,15
P8	31,14±21,00
P9	27,01±20,63
P10	188,36±254,24

*Nota.* La tabla muestra los valores de captura de carbono en las diez parcelas de estudio

La (figura 14) se obtuvo mediante datos de la (tabla 8), aquí se muestran los resultados de captura de carbono, siendo la parcela P\_10 la que más carbono almacenó con un valor de 188,36±254,24 tC/Ha, por otro lado la parcela P\_1 fue la que menos carbono almacenó con un valor de 8,98±7,22 tC/Ha.

**Figura 14**

*Promedio de valores de captura de carbono almacenado*



*Nota.* La figura muestra los valores promedio de carbono almacenado

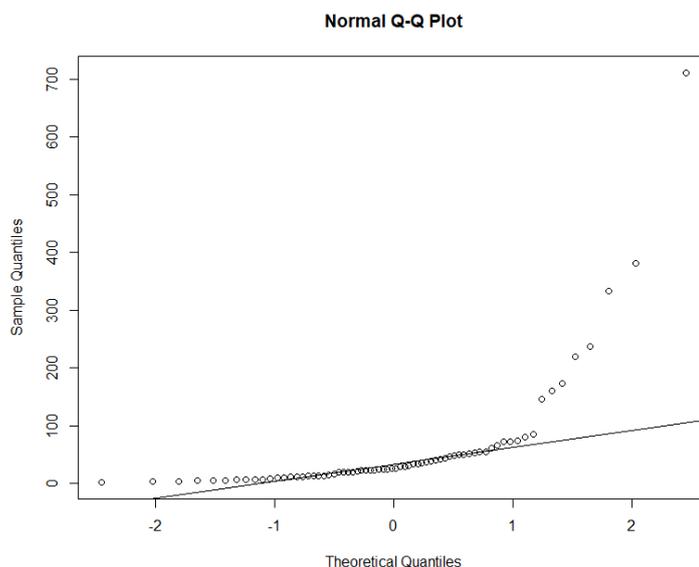
#### 4.1.7 Comparación de las metodologías de evaluación de carbono almacenado por la especie *Podocarpus glomeratus* D. Don

Al tener más de 50 muestras en la evaluación de carbono almacenado por el *Podocarpus glomeratus* D. Don, se utilizó prueba de Kolmogórov-Smirnov para determinar la distribución normal de los datos Machava et al. (2022). Por lo tanto, las diferencias entre tres o más grupos independientes se evaluaron mediante la prueba de suma de rangos ANOVA de Kruskal-Wallis, este análisis estadístico se realizó con el software R 4.3.0.

Para verificar la normalidad de los datos se elaboró el gráfico de normalidad, en la cual se evidenció que los datos no se encuentran cerca a la recta normal (figura 13), para corroborar si efectivamente existe una distribución normal de los datos se utilizó prueba de Kolmogórov-Smirnov en la que se determinó que, los datos de captura de carbono mediante siete ecuaciones alométricas y datos de captura de carbono en las diez parcelas de estudio presentaron valores de  $p= 0,00$  en ambos casos, valores que son  $< a 0,05$ , evidenciándose de esta manera que los datos no poseen una distribución normal.

**Figura 15**

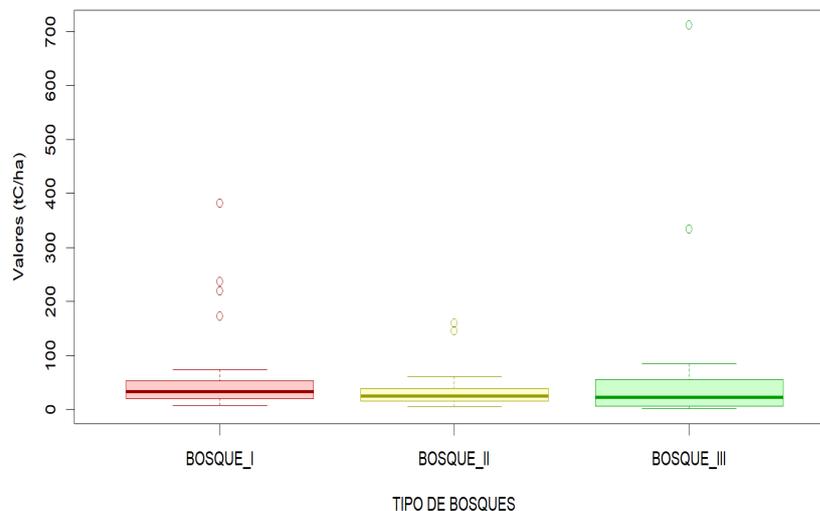
*Grafico de normalidad*



*Nota.* La figura muestra distribución de normalidad de datos de captura de carbono, evaluado a nivel de ecuaciones alométricas.

## Figura 16

*Comparaciones de captura de carbono entre tres tipos de bosques*



*Nota.* La figura muestra comparación de valores de captura de carbono en tres tipos de bosque

## 4.2 Discusión

### 4.2.1 Discusión de resultados para cantidad de individuos

El área del SNA se caracteriza por su alta diversidad (Huamantupa, 2019), es por ello que en las 10 parcelas instaladas se encontraron valores diferentes en número de individuos, esta variabilidad de resultados está asociado a diversos factores, como los suelos, eventos históricos, el rango altitudinal y la topografía (Blickensdörfer et al., 2024; McNellis et al., 2021). La distribución actual del *Podocarpus glomeratus* D. Don están en parte relacionadas con esas condiciones ambientales, por ejemplo, las parcelas instaladas por encima de los 3600 m.s.n.m presentaron menor cantidad de individuos, esto se explica en que el crecimiento de esta especie arbórea está condicionado por el piso altitudinal siendo su rango óptimo de crecimiento entre los 1800 y 3600 m.s.n.m (Duque et al., 2021; Young, 2009). Muy a parte de las condiciones ambientales, la actividad antropogénica también influye sobre el crecimiento y presencia de individuos de *Podocarpus glomeratus* D. Don, por ejemplo, las parcelas P5 y P7 considerados como bosque de Tipo II (tabla 3), se encontraron presencia de caminos y son en estas parcelas donde se registraron menor cantidad de individuos de la especie en estudio.

#### 4.2.2 Discusión de resultados para diámetro altura de pecho (DAP)

Los diámetros registrados en las parcelas de estudio, tendrán influencia en el cálculo de biomasa, debido a que las ecuaciones alométricas consideran como variable el DAP (Moore et al., 2018), de ello se infiere que las parcelas que presentan mayores valores de DAP como es el caso de la parcela P10, presenta mayor valor de biomasa.

De acuerdo al actual estudio, las especies que mostraron altos niveles de carbono almacenado también tenían un DAP promedio alto (John et al., 2021). Esto sugiere que el DAP de los árboles tiene un impacto significativo en la capacidad de un bosque para capturar y retener carbono a lo largo del tiempo (Siraj, 2019). El crecimiento de *Podocarpus glomeratus* D. Don predominan en las zonas más altas y no perturbadas del bosque. Sin embargo, la deforestación causada por la agricultura y la degradación de los bosques, especialmente en las áreas más bajas en la zona límite del SNA, obstaculiza el crecimiento de los árboles y su capacidad para alcanzar un mayor DAP (Dibaba et al., 2019).

Las clases diamétricas tuvieron una distribución semejante a una Jota invertida, indicador de mayor número de individuos en las categorías menores de clase diamétrica, mientras las categorías diamétricas mayores se encontró individuos en menor cantidad Mada et al. (2022a), se observa mayor cantidad de individuos en la clase diamétrica 4,77 cm a 50 cm y menor cantidad de individuos con DAP > a 100 cm (figura 10).

#### 4.2.3 Discusión de resultados para registro de altura

Referido a la estructura vertical, se presentó una vegetación en constante crecimiento, la mayor concentración de alturas de las 10 parcelas inventariadas se presenta en un rango de 5,0 a 7,5 m (figura 12).

La baja estatura de los árboles en este estudio se debe a condiciones como el clima y el estrés hídrico que experimentan (Birungi et al., 2023a). En condiciones óptimas de crecimiento, estos árboles podrían alcanzar más de 30 metros de altura (Hosting & Palomino, 1997). El cambio climático ha provocado

una notable disminución en el volumen del nevado de Ampay, lo que, a su vez, afecta la disponibilidad de agua dentro del SNA, siendo esta la principal fuente hídrica.

Las elevadas reservas de carbono de las especies forestales se deben en gran medida a la altura de los árboles, ya que los modelos alométricos incorporan la altura como variable (Litton & Boone Kauffman, 2008; Usman et al., 2024). En este estudio, se ha podido constatar que no siempre las parcelas con mayor altura exhibieron una mayor captura de carbono, ello confirma que el (DAP) es una variable complementaria en los modelos alométricos (Adinugroho et al., 2023; Birungi et al., 2023b; Mulatu et al., 2024). Es decir, es necesario considerar las variables altura y el DAP para evaluar adecuadamente la captura de carbono.

#### **4.2.4 Discusión de resultados para biomasa aérea del bosque de *Podocarpus glomeratus* D. Don**

El promedio general de biomasa obtenidos mediante siete ecuaciones alométricas en diez parcelas de estudio representaron un valor de  $125,93 \pm 223,28$  t/Ha, este valor es superior a 102,59 t/Ha registrado por Huamantupa (2019) quien realizó determinación de biomasa para la misma especie de estudio dentro del SNA obtenido mediante dos ecuaciones alométricas, esta diferencia puede atribuirse a los modelos matemáticos que se utilizaron para determinar biomasa. El SNA corresponde a un área de estudio conocido como ecosistema de bosque relicto meso andino MINAM (2022), donde se tiene población considerable de árboles *Podocarpus glomeratus* D. Don y es en este tipo de ecosistema que Phillips et al. (2011) obtuvo una biomasa de 125,55 t/Ha para *P. glomeratus* D. Don valor semejante a lo obtenido en la presente investigación, como se puede evidenciar los resultados de biomasa para el *P. glomeratus* D. Don presenta valores muy similares a las reportadas por otros investigadores, esta similitud puede atribuirse a que los lugares donde se han realizado las investigaciones presentan las mismas características orográficas.

De acuerdo al reporte presentado por Arce Baca (2018), señala que el programa bosques manejados de la Región Apurímac – Sacha Tarpuy, las especies arbóreas consideradas para plantaciones forestales fueron: *Pinus radiata* con un total (64,7%), *Eucalyptus globulus* (14,8 %), estos porcentajes hacen referencia a la cantidad total de especies arbóreas utilizadas para el programa, siendo estas las predominantes, dentro de informe se considera también al *Podocarpus glomeratus* D, Don con porcentaje minoritario de 0,8 % del total, la preferencia de los comuneros por utilizar el pino y eucalipto se debe al rápido crecimiento y calidad de sus maderas que estos tienen, sin embargo diversos estudios dan a conocer que estas especies tienen impacto negativos sobre los ecosistemas, por ejemplo consumen elevada cantidad de agua más que las especies nativas CONDESAN (2014), Gyenge et al. ( 2011), Little et al. (2015), es por ello que el presente trabajo de investigación hace una comparación de resultados enfocados a las especies exóticas pino y eucalipto.

A nivel mundial y regional se han realizado diversas investigaciones para cuantificar biomasa aérea para el *Eucalyptus globulus*, por ejemplo Jiang et al. (2023) realizaron un estudio en regiones subtropicales de China y reportaron un valor promedio de biomasa muy debajo de lo encontrado por nosotros, siendo este 52,60 t/Ha, por otro lado Mada et al. (2022a) investigaron al sur de Etiopia y cuantificaron un valor de biomasa de 64,22 t/Ha, estos dos autores son los únicos que reportaron valores inferiores de biomasa. En otras investigaciones realizadas en Perú se han reportado resultados de biomasa para el *Eucalyptus globulus*, estos valores son superiores a lo encontrado en la presente investigación, así Marcelo Bazán et al. (2022) evaluaron en un sistema silvopastoril de Perú y obtuvieron un valor de biomasa de 127,64 t/ha, Cárdenas (2022) investigó en Huancayo - Perú y el valor de biomasa fue de 151,29 t/Ha, Alzamora y Tapia (2020) investigaron en Ancach – Perú y reportaron un valor de biomasa de 359,76 t/Ha, Yantas (2022) investigó en Pasco - Perú y reportó 287,26 t/Ha de biomasa, finalmente Barnechea (2019) investigó en Huánuco - Perú y reportó un valor de 299,74 t/Ha de biomasa.

Son pocas las investigaciones realizadas para especies nativas, sin embargo, se han reportado valor de biomasa para *Polylepis sp.* de 9,83 t/Ha Ginez

Quispe (2019), valor inferior en comparación al *P. glomeratus* D. Don, para el Aliso se reportó 241 t/Ha de biomasa Spracklen y Righelato (2014) siendo un valor de casi el doble de lo encontrado para el *P. glomeratus* D. Don.

Las investigaciones realizadas para conocer la biomasa aérea del pino (*Pinus radiata*) fueron los siguientes: Alzamora y Tapia (2020) encontraron un valor de biomasa de 77,88 tC/Ha, mientras que Yantas (2022) obtuvo un valor de biomasa de 86,06 tC/Ha y Barnechea (2019) reportó 298,51 t/Ha, todos los valores de biomasa para *Pinus radiata* fueron superiores a lo encontrado por nosotros.

#### **4.2.5 Discusión de resultados para Fracción de carbono mediante el método volumétrico**

Alrededor del 50% de la biomasa seca de los árboles se considera carbono, los árboles almacenan la mayor cantidad de carbono debido a su gran volumen y almacenamiento de larga duración, este carbono se almacena en toda la estructura vegetal como; los troncos de los árboles, las hojas, la madera, las raíces, así como el suelo en el que crece la planta, a menos que sean descompuestos o quemados donde se liberaría carbono a la atmosfera (Tooichi, 2018).

La mayoría de investigadores internacionales han utilizado generalmente un contenido de carbono del 45 % o 50 % al analizar las reservas de carbono, valores similares a lo reportado por nosotros, y unos pocos investigadores han utilizado valores específicos personalizados para diferentes tipos de bosques, sin considerar la posibilidad de tener en cuenta los parámetros utilizados para estimar las reservas de carbono en varias estructuras vegetales y niveles comunitarios (Zhang et al., 2022a , Zhou et al., 2022 ). Otros estudios utilizaron comúnmente valores del 45 %, 47 % y 50 % como fracción de carbono, para calcular las reservas de carbono forestal; por lo tanto, puede no ser apropiado utilizar un valor genérico fijo para calcular las reservas de carbono, ya que esto podría dar lugar a errores de cálculo y mayores incertidumbres (Adinugroho et al., 2023; Rozendaal et al., 2022; Widagdo et al., 2020).

El uso de valores de porcentaje de carbono específicos de especies y tejidos aumenta la validez de la estimación de las reservas de carbono y también ayuda a identificar las pérdidas de carbono de diferentes órganos de las plantas, en nuestro caso, solo tomamos muestras del tronco por que las ecuaciones alométricas están en función del DAP, tendríamos resultados más exactos si consideramos la fracción de carbono para cada parte de la intimpa (Birungi et al., 2023b; Tooichi, 2018).

#### **4.2.6 Discusión de resultados para carbono almacenado en la biomasa arbórea**

Las áreas naturales protegidas desempeñan un papel clave en muchos servicios ecosistémicos, siendo uno de los más importantes el secuestro de carbono Chiesura (2004). El presente trabajo de investigación se enfocó a describir este servicio ecosistémico, donde se evidenció que el secuestro de carbono depende principalmente de la altura (H) y el diámetro a la altura de pecho (DAP) de los árboles Shimamoto et al. (2014). Los resultados muestran que los árboles con mayor DAP tuvieron mayor biomasa y por ende mayor capacidad de secuestro de carbono.

En general, los bosques andinos representan sumideros de carbono de gran importancia a nivel mundial y tienen el potencial de servir como importantes refugios de carbono en el futuro. Por lo tanto, es fundamental detener y revertir la pérdida de bosques andinos no solo para la conservación de la biodiversidad, sino también para proteger y mejorar el almacenamiento de carbono en el futuro (Aide et al., 2019; Duque et al., 2021).

En el Perú los sistemas agroforestales han sido reconocidos por sus beneficios económicos y de conservación de suelo, agua y biodiversidad, extendido principalmente en la región amazónica, estos sistemas ofrecen un servicio ecosistémico importante el cual está relacionado a la captura de carbono, el resultado de captura de carbono promedio almacenado por este sistema

agroforestal es de 316,61 tC/Ha Clemente (2021), superior a lo reportado en el presente trabajo de investigación.

La estimación del carbono almacenado tiene relación con la biomasa, diversos autores consideran que el 50 % del valor de biomasa representa el carbono almacenado por cada especie forestal, en ese sentido las estimaciones de reserva de carbono reportados en trabajos de investigación para *Podocarpus glomeratus* D. Don registran diversos valores, por ejemplo Dilas Jiménez y Huamán Jiménez (2020), Huamantupa (2019) reportaron datos de captura de carbono 51,30 tC/Ha y Phillips et al. (2011) obtuvieron un valor de 62,78 tC/Ha, en el primer caso el valor es inferior y en el segundo caso superior a lo encontrado por nosotros, sin embargo los resultados obtenidos no difieren ampliamente y esto podría atribuirse a que los estudios realizados se desarrollaron dentro del SNA lo que representa las mismas condiciones orográficas.

Diversas investigaciones se centraron en estimar el carbono almacenado por el *Eucalyptus globulus* cuyos valores reportados fueron 26,30 tC/ha, 32,11 tC/ha, 61,15 tC/ha, 75,64 tC/Ha, 143,63 tC/Ha, 142,34 tC/Ha, 179,88 tC/Ha; estos valores de captura de carbono fueron obtenidos por Jiang et al. (2023), Mada et al. (2022a), Marcelo Bazán et al. (2022), Cárdenas (2022), Yantas (2022), Barnechea (2019) y Alzamora y Tapia (2020) respectivamente.

Para el caso del pino (*Pinus radiata*) se reportaron datos de captura de carbono, siendo estos valores 141,80 tC/Ha, 86,06 tC/Ha, 77,88 tC/Ha y 14,69 tC/Ha; que fueron reportados por Barnechea (2019), Yantas (2022), Alzamora y Tapia (2020), Cargua et al. (2014) respectivamente.

De manera general al analizar los valores de captura de carbono para las especies forestales *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata*, fueron superiores a lo reportado por nosotros, esta diferencia en los valores se explica que las especies mencionadas son de rápido crecimiento, presentan mayor altura y los DAP son mayores en comparación al *Podocarpus glomeratus* Mohan et al. (2020), sin embargo, las diferencia en cuanto a captura de carbono no son amplias, teniendo estos resultados alentadores de captura de carbono por parte de la Intimpa, se

podría considerar como especie arbórea para plantaciones forestales en la Región Apurímac, siendo una especie nativa cuyos impactos en los ecosistemas donde se realicen las plantaciones son casi nulos, contrariamente a las especies exóticas *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* que tienen impactos negativos sobre los ecosistemas.

#### **4.2.7 Discusión de resultados para comparación de las metodologías de evaluación de carbono almacenado por la especie *Podocarpus glomeratus* D. Don**

##### **A. Hipótesis planteadas para captura de carbono**

***H<sub>0</sub> Hipotesis Nula:*** El contenido medio de carbono por el *Podocarpus glomeratus* D. Don mediante las siete ecuaciones alométricas son iguales

***H<sub>a</sub> Hipotesis Alterna:*** Al menos una de las ecuaciones alométricas tiene carbono medio diferente a las demás

Luego de comprobar la normalidad de los datos, se procedió a comprobar la hipótesis mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov respecto a la captura de carbono por medio de siete ecuaciones alométricas en diez parcelas de estudio. Posteriormente se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para el grupo de ecuación alométrica donde se obtuvo un valor  $p=0,00606$  (tabla 9) lo que representa un valor  $< 0,05$ , de aquí se infiere que hay diferencias significativas, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que al menos una de las ecuaciones alométricas tiene carbono medio diferente a las demás, para evaluar las comparaciones entre las ecuaciones alométricas, se realizó la prueba exacta de suma de rangos de Wilcoxon encontrándose diferencias significativas entre las parcelas (tabla 10): (AGB\_1\_CAR y AGB\_6\_CAR), (AGB\_1\_CAR y AGB\_7\_CAR), (AGB\_2\_CAR y AGB\_6\_CAR), (AGB\_3\_CAR y AGB\_6\_CAR), (AGB\_4\_CAR y AGB\_6\_CAR), (AGB\_4\_CAR y AGB\_7\_CAR), (AGB\_5\_CAR y AGB\_6\_CAR), (AGB\_5\_CAR y AGB\_7\_CAR), (AGB\_6\_CAR y AGB\_7\_CAR), en las demás comparaciones no se observó diferencias significativas.

**Tabla 9**

*Análisis de varianza de captura de carbono en niveles de ecuación alométrica y parcelas mediante la prueba de Kruskal-Wallis*

Nivel	Chi-cuadrado	d.f	Valor p
<b>Ecuación alométrica</b>	23,061	9	0,00
<b>Parcelas</b>	39,246	6	0,00

*Nota.* La tabla muestra el Análisis de varianza de captura de carbono en niveles de ecuación alométrica y parcelas

**Tabla 10**

*Comparaciones de captura de carbono entre ecuaciones alométricas mediante la prueba de Kruskal-Wallis*

	AGB_1 _CAR	AGB_2 _CAR	AGB_3 _CAR	AGB_4 _CAR	AGB_5 _CAR	AGB_6 _CAR
AGB_2_CAR	1,00000 n.s					
AGB_3_CAR	0,28370 n.s	0,18543 n.s				
AGB_4_CAR	1,00000 n.s	1,00000 n.s	0,05716 n.s			
AGB_5_CAR	1,00000 n.s	1,00000 n.s	0,18543 n.s	1,00000 n.s		
AGB_6_CAR	0,00391 **	0,00391 **	0,00023 **	0,01470 *	0,00391 **	
AGB_7_CAR	0,01470 *	0,00520 **	1,00000 n.s	0,01470 *	0,00731 **	0,00023 **

*Nota.* La tabla muestra las comparaciones de carbono entre ecuaciones alométricas mediante la prueba exacta de suma de rangos de Wilcoxon.

## B. Hipótesis planteadas para captura de carbono por parcela

**$H_0$  Hipotesis Nula:** El contenido medio de carbono por el *Podocarpus glomeratus* D. Don en las siete parcelas son iguales

**$H_a$  Hipotesis Alterna:** Al menos una de las parcelas tiene carbono medio diferente a las demás

Para el grupo de parcelas mediante la prueba de Kruskal-Wallis se obtuvo un valor  $p=0,00$  (tabla 9) lo que representa un valor  $< 0,05$ , se infiere entonces que hay diferencias significativas, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que al menos una de las parcelas tiene carbono medio diferente a las demás, para evaluar que parcelas presentan

diferencias significativas se realizó *la prueba exacta de suma de rangos de Wilcoxon*, la comparación de carbono almacenado entre las parcelas no muestra diferencias significativas en las diez parcelas de estudio.

### C. Hipótesis planteadas para captura de carbono por tipo de bosque

***H<sub>0</sub> Hipotesis Nula:*** El contenido medio de carbono por el *Podocarpus glomeratus* D. Don en los tres tipos de bosque son iguales

***H<sub>a</sub> Hipotesis Alterna:*** Al menos una de los tipos de bosques posee carbono medio diferente a las demás

Para el grupo tipo de bosque, mediante la prueba de Kruskal-Wallis se obtuvo un valor  $p=0,4428$  lo que representa un valor  $> 0,05$ , se infiere entonces que no hay diferencias significativas, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, concluyendo que no existe diferencias significativas entre los tres bosques en estudio.

Se muestra resultados de captura de carbono (tabla 11) de acuerdo al tipo de bosque, donde el Bosque Tipo III presenta el mayor promedio de captura de carbono  $74,78 \pm 162,36$  tC/Ha, seguido de un valor de  $57,43 \pm 78,23$  tC/Ha para el bosque tipo I y finalmente el bosque tipo II presentó el menor promedio de carbono capturado con un valor de  $43,12 \pm 48,65$  tC/Ha, ello demuestra que los bosques que presentan alteración por presencia de caminos o áreas de cultivo disminuyen en población por ende en los servicios ecosistémicos que ofrecen; las zonas límite son protegidos mediante hitos establecidos en todo el perímetro del área geográfico que corresponde al SNA, es por ello que los árboles de *Intimpa* en esta zona presentaron valores muy altos de captura de carbono.

**Tabla 11**

*Carbono almacenado de acuerdo al tipo de bosque*

Parcela	Tipo de Bosque	tC/Ha Prom. + D.E
P2		
P3		
P4	Bosque Tipo I (Sin intervención)	57,43±78,23
P6		
P8		
P5	Bosque Tipo II (Presencia de caminos)	43,12±48,65
P7		
P1	Bosque Tipo III (Zona limite)	74,78±162,36
P9		
P10		

*Nota.* La tabla muestra datos de carbono almacenado en la biomasa del *Podocarpus glomeratus* D. Don, según el tipo de bosque caracterizado.

Las medianas de los valores de captura de carbono para los bosques Tipo I, Tipo II y Tipo III fueron 33,4 tC/Ha, 25,54 tC/Ha y 23,23 tC/Ha respectivamente (figura16).

## CONCLUSIONES

En el inventario forestal dentro del SNA, se establecieron en total diez parcelas y se registraron 545 de individuos de Intimpa, esta actividad fue importante porque a partir de él se pudieron obtener variables como son: DAP, altura del árbol, cantidad de árboles y las coordenadas UTM de las parcelas, datos necesarios para obtener biomasa y carbono almacenado por el *Podocarpus glomeratus* D. Don.

La biomasa aérea calculada mediante 7 modelos alométricos para el *Podocarpus glomeratus* D. Don, muestran valores inferiores a los reportados para *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata*, no obstante, al comparar con especies nativas como el *Polylepis sp.* los valores de biomasa son superiores. El promedio del mayor valor de biomasa calculado para el *Podocarpus glomeratus* D. Don mediante AGB3 es  $358,27 \pm 468,45$  t/Ha y el menor valor calculado  $14,21 \pm 6,06$  t/Ha obtenido mediante AGB6. La estimación de biomasa en 10 parcelas de estudio revela que la parcela P\_10 registra el mayor valor de biomasa con un valor de  $396,85 \pm 535,66$  t/Ha.

Se estimó la fracción de carbono de la intimpa, los valores de fracción de carbono muestran rangos de 44,46 % a 49,53 % con una media de  $47,46 \pm 1,21$  %, este resultado permitió una estimación más precisa de las existencias de carbono en el SNA.

El carbono almacenado en la biomasa arbórea del bosque de *Podocarpus glomeratus* D. Don, presenta valores inferiores a especies exóticas como el *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata*. La evaluación de carbono mediante ecuaciones alométricas, registran valores de  $170,04 \pm 222,34$  tC/Ha que representa el mayor valor de toneladas de carbono por hectárea obtenido con la AGB3 y el menor valor  $6,74 \pm 2,88$  tC/Ha obtenido con la AGB 6. En la parcela P10 es donde se encontró la mayor cantidad de carbono almacenado con un valor promedio de  $188,36 \pm 254,24$  tC/Ha, la parcela P1 fue el que menos carbono almacenó con un valor de  $8,98 \pm 7,22$  tC/Ha. El Bosque Tipo III presenta el mayor promedio de captura de carbono con un valor de  $74,78 \pm 162,36$  tC/Ha.

Se comparó las diferentes metodologías de evaluación de carbono almacenado por la especie *Podocarpus glomeratus* D. Don, al realizar el análisis estadístico de los datos,



se verificó que los datos no tuvieron una distribución normal, para realizar la comparación de captura de carbono entre ecuaciones alométricas y parcelas se pudo verificar que los valores de  $p$  fueron  $< 0.05$ , concluyendo que al menos una parcela y una ecuación alométrica tienen carbono medio diferente a las demás. En cuanto al tipo de bosque se verifica que no existe diferencia significativa de captura de carbono.



## RECOMENDACIONES

Para los programas de plantaciones forestales en la región Apurímac, se recomienda utilizar especies nativas como el *Podocarpus glomeratus* D. Don debido a que tienen un potencial en cuanto a el servicio ecosistémico de captura de carbono.

Para una aproximación más exacta de los valores de captura de carbono se recomienda establecer parcelas de mayor extensión, mayores a 0,1 ha.

Evaluar técnicas de propagación para las especies de *Podocarpus glomeratus* D. Don en la región Apurímac y para las próximas actividades de reforestación emplear plantones de Intimpa.

Se debe estudiar otras especies nativas del SNA para evaluar su potencial en captura de carbono.

Concientizar o sensibilizar a los habitantes a preservar las plantaciones forestales de *Podocarpus glomeratus* D. Don, por los beneficios de los servicios ecosistémicos que nos proporciona.

## BIBLIOGRAFÍA

- Adinugroho, W. C., Krisnawati, H., Imanuddin, R., Siregar, C. A., Weston, C. J., & Volkova, L. (2023). Developing biomass allometric equations for small trees in mixed-species forests of tropical rainforest ecozone. *Trees, Forests and People*, 13, 100425. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100425>
- Aide, T. M., Grau, H. R., Graesser, J., Andrade-Nuñez, M. J., Aráoz, E., Barros, A. P., Campos-Cerqueira, M., Chacon-Moreno, E., Cuesta, F., Espinoza, R., Peralvo, M., Polk, M. H., Rueda, X., Sanchez, A., Young, K. R., Zarbá, L., & Zimmerer, K. S. (2019). Woody vegetation dynamics in the tropical and subtropical Andes from 2001 to 2014: Satellite image interpretation and expert validation. *Global Change Biology*, 25(6), 2112–2126. <https://doi.org/10.1111/gcb.14618>
- Álvarez-Yépez, J. C., & Dovčiak, M. (2015). Enhancing Ecosystem Function through Conservation: Threatened Plants Increase Local Carbon Storage in Tropical Dry Forests. *Tropical Conservation Science*, 8(4), 999–1008. <https://doi.org/10.1177/194008291500800410>
- Al-Yaari, A., Zhao, Y., Cheruy, F., & Thiery, W. (2023). Heatwave Characteristics in the Recent Climate and at Different Global Warming Levels: A Multimodel Analysis at the Global Scale. *Earth's Future*, 11(9). <https://doi.org/10.1029/2022EF003301>
- Alzamora, J. M., & Tapia, J. W. (2020). Determinación del potencial de captura de carbono en plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulos*) y pino (*Pinus radiata*) Sihuas-Ancash, 2019. Universidad Cesar Vallejo.
- Andean Forest. (2018). Santuario Nacional de Ampay. <https://www.andeanforests.org/peru/santuario-nacional-de-ampay/>

- Anderson, T. R., Hawkins, E., & Jones, P. D. (2016). CO<sub>2</sub>, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. *Endeavour*, 40(3), 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2016.07.002>
- Aragón, S., Salinas, N., Nina-Quispe, A., Qquellon, V. H., Paucar, G. R., Huaman, W., Porroa, P. C., Olarte, J. C., Cruz, R., Muñiz, J. G., Yupayccana, C. S., Espinoza, T. E. B., Tito, R., Cosio, E. G., & Roman-Cuesta, R. M. (2021). Aboveground biomass in secondary montane forests in Peru: Slow carbon recovery in agroforestry legacies. *Global Ecology and Conservation*, 28, e01696. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01696>
- Arce Baca, J. (2018). Programa bosques manejados de la Región Apurímac - Sacha Tarpuy (p. 89).
- Baidoo, R., & Obeng, K. (2023). Evaluating the impact of land use and land cover changes on forest ecosystem service values using landsat dataset in the Atwima Nwabiagya North, Ghana. *Heliyon*, e21736. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21736>
- Barnechea, N. (2019). “Valoración económica y secuestro de CO<sub>2</sub> en bosques plantados de eucalipto (*Eucalyptus globulus labil*) y pino (*Pinus radiata*) de 11 años de edad en cochatama, distrito Huacar, provincia Ambo departamento Huánuco – setiembre, 2018 –febrero, 2019.” Universidad de Huanuco.
- Barriopedro, D., Fischer, E. M., Luterbacher, J., Trigo, R. M., & García-Herrera, R. (2011). The Hot Summer of 2010: Redrawing the Temperature Record Map of Europe. *Science*, 332(6026), 220–224. <https://doi.org/10.1126/science.1201224>

- Başkent, E. Z. (2021). Assessment and valuation of key ecosystem services provided by two forest ecosystems in Turkey. *Journal of Environmental Management*, 285, 112135. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112135>
- Basuki, T. M., van Laake, P. E., Skidmore, A. K., & Hussin, Y. A. (2009). Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *Forest Ecology and Management*, 257(8), 1684–1694. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.027>
- Besar, N., Suardi, H., Phua, M., James, D., Mokhtar, M., & Ahmed, M. (2020). Carbon stock and sequestration potential of an agroforestry system in Sabah, Malaysia. *Forests*, 2010, 1–16.
- Birungi, V., Dejene, S. W., Mbogga, M. S., & Dumas-Johansen, M. (2023a). Carbon stock of Agoro Agu Central Forest reserve, in Lamwo district, Northern Uganda. *Heliyon*, 9(3), e14252. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14252>
- Birungi, V., Dejene, S. W., Mbogga, M. S., & Dumas-Johansen, M. (2023b). Carbon stock of Agoro Agu Central Forest reserve, in Lamwo district, Northern Uganda. *Heliyon*, 9(3), e14252. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14252>
- Blickensdörfer, L., Oehmichen, K., Pflugmacher, D., Kleinschmit, B., & Hostert, P. (2024). National tree species mapping using Sentinel-1/2 time series and German National Forest Inventory data. *Remote Sensing of Environment*, 304, 114069. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114069>
- Bluffstone, R., Coulston, J., Haight, R. G., Kline, J., Polasky, S., D.N, Wear., & Zook, K. (2017). Estimated values of carbon sequestration resulting from forest management scenarios. *Forest Service*, 3.

- Bojinski, S., Verstraete, M., Peterson, T. C., Richter, C., Simmons, A., & Zemp, M. (2014). The concept of essential climate variables in support of climate research, applications, and policy. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(9), 1431–1443.
- Bosques Andinos. (s.f.). Bosques Andinos y Cambio Climático. <https://www.bosquesandinos.org/los-bosques-andinos/#:~:text=Los bosques Andinos cumplen un rol clave en,la permanencia a largo plazo de la biodiversidad.>
- Calderón-Balcázar, A., Cárdenas, C. D., Díaz-Vasco, O., Fandiño, E., Márquez, T., & Pizano, C. (2023). Biomass and carbon stocks of four vegetation types in the Llanos Orientales of Colombia (Mapiripán, Meta). *Trees, Forests and People*, 12, 100380. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100380>
- Cárdenas, H. (2022). Potencial de captura de carbono en una plantación de *Eucalyptus globulus* Labill en la cc. de Uñas, Huancayo. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.-P., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87–99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- Chave, J., Réjou, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>

- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Cheruy, F., Ducharne, A., Hourdin, F., Musat, I., Vignon, É., Gastineau, G., Bastrikov, V., Vuichard, N., Diallo, B., Dufresne, J., Ghattas, J., Grandpeix, J., Idelkadi, A., Mellul, L., Maignan, F., Ménégoz, M., Ottlé, C., Peylin, P., Servonnat, J., ... Zhao, Y. (2020). Improved Near-Surface Continental Climate in IPSL-CM6A-LR by Combined Evolutions of Atmospheric and Land Surface Physics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(10). <https://doi.org/10.1029/2019MS002005>
- Chiesura, A. (2004). The role of urban parks for the sustainable city. *Landscape and Urban Planning*, 68(1), 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2003.08.003>
- Chimdessa, T. (2023). Forest carbon stock variation with altitude in bolale natural forest, Western Ethiopia. *Global Ecology and Conservation*, 45, e02537. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02537>
- Chmura, D. J., Guzicka, M., & Rożkowski, R. (2021). Accumulation of standing aboveground biomass carbon in Scots pine and Norway spruce stands affected by genetic variation. *Forest Ecology and Management*, 496, 119476. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119476>
- Chopra, N., Tewari, L. M., Tewari, A., Wani, Z. A., Asgher, M., Pant, S., Siddiqui, S., & Siddiqua, A. (2023). Estimation of Biomass and Carbon Sequestration Potential of *Dalbergia latifolia* Roxb. and *Melia composita* Willd. Plantations

- in the Tarai Region (India). *Forests*, 14(3), 646.  
<https://doi.org/10.3390/f14030646>
- Ci, M., Ye, L., Liao, C., Yao, L., Tu, Z., Xing, Q., Tang, X., & Ding, Z. (2023). Long-Term Dynamics of Ecosystem Services and Their Influencing Factors in Ecologically Fragile Southwest China. *Sustainability*, 15(16), 12331.  
<https://doi.org/10.3390/su151612331>
- Clark, D. A., Brown, S., Kicklighter, D. W., Chambers, J. Q., Thomlinson, J. R., Ni, J., & Holland, E. A. (2001). Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications*, 11(2), 371–384.
- Clemente, E. R. (2021). Captura de carbono en sistemas agroforestales en el Perú. *Revista Forestal Del Perú*, 36(2), 180–196.  
<https://doi.org/10.21704/rfp.v36i2.1797>
- CONDESAN. (2014). Informe del DHR en la microcuenca del río Mariño.  
[http://www.sunass.gob.pe/MRSE/2dhr\\_info\\_%0Amarino\\_vs11.pdf](http://www.sunass.gob.pe/MRSE/2dhr_info_%0Amarino_vs11.pdf)
- Cuenca, M. E., Jadán, O., Cueva, K., & Aguirre, C. (2014). Carbono y ecuaciones alométricas para grupos de especies y bosque de tierras bajas, Amazonía Ecuatoriana. *CEDAMAZ*, 4, 21–31.
- Debastiani, A. B., Sanquetta, C. R., Dalla Corte, A. P., Pinto, N. S., & Rex, F. E. (2009). Evaluating SAR-optical sensor fusion for aboveground biomass estimation in a Brazilian tropical forest. *Annals of Forest Research*, 109–122.
- Debie, E., & Anteneh, M. (2022). Changes in Ecosystem Service Values in Response to the Planting of Eucalyptus and Acacia Species in the Gilgel Abay Watershed, Northwest Ethiopia. *Tropical Conservation Science*, 15, 194008292211089. <https://doi.org/10.1177/19400829221108928>

- de Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., Christie, M., Crossman, N., Ghermandi, A., Hein, L., Hussain, S., Kumar, P., McVittie, A., Portela, R., Rodriguez, L. C., ten Brink, P., & van Beukering, P. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 1(1), 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005>
- Diaz, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*, XXXVII, 227–240. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87024179004>
- Dibaba, A., Soromessa, T., & Workineh, B. (2019). Carbon stock of the various carbon pools in Gerba-Dima moist Afromontane forest, South-western Ethiopia. *Carbon Balance and Management*, 14(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0116-x>
- Didenko, N. I., Skripnuk, D. F., & Mirolyubova, O. V. (2017). Urbanization and Greenhouse Gas Emissions from Industry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 72(1), 12014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/72/1/012014>
- Dilas-Jiménez, J. O., & Huamán Jiménez, A. O. (2020). Captura de carbono por un bosque montano de neblina del Perú. *Alpha Centauri*, 1(3), 13–25. <https://doi.org/10.47422/ac.v1i3.16>
- Duque, A., Peña, M. A., Cuesta, F., González-Caro, S., Kennedy, P., Phillips, O. L., Calderón-Loor, M., Blundo, C., Carilla, J., Cayola, L., Farfán-Ríos, W., Fuentes, A., Grau, R., Homeier, J., Loza-Rivera, M. I., Malhi, Y., Malizia, A., Malizia, L., Martínez-Villa, J. A., ... Feeley, K. J. (2021). Mature Andean forests as globally important carbon sinks and future carbon refuges. *Nature Communications*, 12(1), 2138. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22459-8>

- Fernando, C. A., Eulogio, F. A., Eunice, B. P., Eliud, J. B. J., & Miguel, A. M. (2014). Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5, 779–793. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342014000500005&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014000500005&lng=es&tlng=es)
- Ferrere, P., & Lupi, A. M. (2023). How much carbon do Argentine Pampas *Pinus radiata* plantations store? *Forest Systems*, 32(1), e005. <https://doi.org/10.5424/fs/2023321-19703>
- Fistola, R. (2023). Ecosystem Services for the City as a Complex System: A Methodological Proposal. *Sustainability*, 15(12), 9318. <https://doi.org/10.3390/su15129318>
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O’Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Le Quéré, C., Peters, G. P., Peters, W., & Pongratz, J. (2021). Global carbon budget 2021. (No Title).
- Ganamé, M., Bayen, P., Ouédraogo, I., Balima, L. H., & Thiombiano, A. (2021). Allometric models for improving aboveground biomass estimates in West African savanna ecosystems. *Trees, Forests and People*, 4, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100077>
- Ginez Quispe, A. K. (2019). Estimación del carbono total almacenado en los bosques altoandinos (*Polylepis* sp.) del distrito de Capaso mediante modelo InVEST. UNAJ.
- González, P. F., Presno, M. J., & Landajo, M. (2024). Tracking the change in Spanish greenhouse gas emissions through an LMDI decomposition model: A global and sectoral approach. *Journal of Environmental Sciences*, 139, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.08.027>

- Gutiérrez Pulido, H., & De la vara Salazar, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos (Segunda). The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Gyenge, J. E., Fernández, M. E., Licata, J., Weigandt, M., J. Bond, B., & Schlichter, T. M. (2011). Uso del agua y productividad de los bosques nativos e implantados en el NO de la Patagonia: Aproximaciones desde la ecohidrología y la ecofisiología. *Ecología Austral*, 21, N°. 23. [https://doi.org/article/e7c43c09dc2a40fab98402bcd6ef6baa#:~:text=Debido a ello%2C se han realizado estudios de,llevó a cabo mediante aproximaciones ecohidrológicas y ecofisiológicas.](https://doi.org/article/e7c43c09dc2a40fab98402bcd6ef6baa#:~:text=Debido%20a%20ello%20se%20han%20realizado%20estudios%20de%20llev%C3%B3%20a%20cabo%20mediante%20aproximaciones%20ecohidrol%C3%B3gicas%20y%20ecofisiol%C3%B3gicas.)
- Haq, S. M., Rashid, I., Waheed, M., & Khuroo, A. A. (2023). From forest floor to tree top: Partitioning of biomass and carbon stock in multiple strata of forest vegetation in Western Himalaya. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(7), 812. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11376-6>
- Helbling, M., & Meierrieks, D. (2023). Global warming and urbanization. *Journal of Population Economics*, 36(3), 1187–1223. <https://doi.org/10.1007/s00148-022-00924-y>
- Hosting, R., & Palomino, C. (1997). El Santuario Nacional Ampay: refugio de la intimidad en Apurímac, Perú : una guía ecológica y cultural con anexo sobre el departamento de Apurímac. R. Hostnig. <https://books.google.com.pe/books?id=l2xgzwEACAAJ>
- Huamantupa, I. (2019). Diversidad y Biomasa Arbórea en los Bosques Andinos del Santuario Nacional del Ampay, Apurímac – Perú. *Q'EUÑA*, 8(1), 7–26. <https://doi.org/10.51343/rq.v8i1.104>
- INRENA. (2006). Diagnóstico y Plan Maestro del Santuario Nacional de Ampay (p. Pp. 86.).

- IPCC. (2006). IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). (2006). Directrices para el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero: Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (Vol. 4). Programa de Investigación sobre la Conserv. <https://scholar.google.com/scholar?hl=en&q=+IPCC+%28Intergovernmental+Panel+on+Climate+Change%29.+%282006%29.+Guidelines+for+National+Greenhouse+Gas+Inventory%3A+Agriculture%2C+Forestry+and+Other+Land+Uses+%28Vol.+4%29.+Soil+Conservation+Research+Programm>
- IPCC. (2021). Cambio climático 2021: la base de la ciencia física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. <https://ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>
- Jiang, X., Li, D., Li, G., & Lu, D. (2023). Eucalyptus carbon stock estimation in subtropical regions with the modeling strategy of sample plots – airborne LiDAR – Landsat time series data. *Forest Ecosystems*, 10, 100149. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100149>
- Jimenez Ortega, D. (2022). “Evaluación de la captura de carbono y respiración foliar del bosque de intimpa (*Podocarpus glomeratus* D. Don), en el Dantuario Nacional de Ampay - Abancay - Apurímac.” UNSAAC.
- John, B. L. O., Sylvano, A., Grace, N., & James, K. (2021). Tree species composition and diversity in Agoro-Agu Central Forest Reserve, Lamwo District, Northern Uganda. *International Journal of Biodiversity and Conservation*, 13(3), 127–143. <https://doi.org/10.5897/IJBC2021.1487>
- Justine, M., Yang, W., Wu, F., Tan, B., Khan, M., & Zhao, Y. (2015). Biomass stock and carbon sequestration in a chronosequence of *Pinus massoniana* plantations in the upper reaches of the Yangtze River. *Forests*, 6, 3665–3682.

- Keenan, R. J., Reams, G. A., Achard, F., de Freitas, J. V., Grainger, A., & Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 352, 9–20.
- Kutchartt, E., Gayoso, J., Pirotti, F., Bucarey, A., Guerra, J., Hernández, J., Corvalán, P., Drápela, K., Olson, M., & Zwanzig, M. (2021). Aboveground tree biomass of *Araucaria araucana* in southern Chile: measurements and multi-objective optimization of biomass models. *IForest - Biogeosciences and Forestry*, 14(1), 61–70. <https://doi.org/10.3832/ifor3492-013>
- Little, C., Cuevas, J. G., Lara, A., Pino, M., & Schoenholtz, S. (2015). Buffer effects of streamside native forests on water provision in watersheds dominated by exotic forest plantations. *Ecohydrology*, 8(7), 1205–1217. <https://doi.org/10.1002/eco.1575>
- Litton, C. M., & Boone Kauffman, J. (2008). Allometric Models for Predicting Aboveground Biomass in Two Widespread Woody Plants in Hawaii. *Biotropica*, 40(3), 313–320. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2007.00383.x>
- Machava-António, V., Fernando, A., Cravo, M., Massingue, M., Lima, H., Macamo, C., Bandeira, S., & Paula, J. (2022). A Comparison of Mangrove Forest Structure and Ecosystem Services in Maputo Bay (Eastern Africa) and Príncipe Island (Western Africa). *Forests*, 13(9), 1466. <https://doi.org/10.3390/f13091466>
- Mada, G., Anjulo, A., & Gelaw, A. (2022a). Estimation of biomass and carbon sequestration capacity of the Surra mountain <scp>plantation forest</scp> in Gamo Highlands, Southern Ethiopia. *Food and Energy Security*, 11(4). <https://doi.org/10.1002/fes3.399>

- Mada, G., Anjulo, A., & Gelaw, A. (2022b). Estimation of biomass and carbon sequestration capacity of the Surra mountain <scp>plantation forest</scp> in Gamo Highlands, Southern Ethiopia. *Food and Energy Security*, 11(4). <https://doi.org/10.1002/fes3.399>
- Mankou, G. S., Ligot, G., Loubota Panzou, G. J., Boyemba, F., Loumeto, J. J., Ngomanda, A., Obiang, D., Rossi, V., Sonke, B., Yongo, O. D., & Fayolle, A. (2021). Tropical tree allometry and crown allocation, and their relationship with species traits in central Africa. *Forest Ecology and Management*, 493, 119262. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119262>
- Maquera, D. (2017). Determinación del contenido de carbono por especie forestal en el bosque del CIP Camacani-UNA-PUNO por titulación [Universidad Nacional del Altiplano]. [http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6183/Maquera\\_Maquera\\_D%0Aelia.pdf?sequence=1&isAllowed=](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6183/Maquera_Maquera_D%0Aelia.pdf?sequence=1&isAllowed=)
- Marcelo Bazán, F. E., Mantilla Chávez, W., Baselly Villanueva, J. R., Vargas Aldave, J. C., & Pajares Gallardo, U. (2022). Uso potencial de *Eucalyptus viminalis* Labill. para la captura de carbono en un sistema silvopastoril, Perú. *Colombia Forestal*, 26(1), 64–78. <https://doi.org/10.14483/2256201X.19043>
- Ma, S., He, F., Tian, D., Zou, D., Yan, Z., Yang, Y., Zhou, T., Huang, K., Shen, H., & Fang, J. (2018). Variations and determinants of carbon content in plants: a global synthesis. *Biogeosciences*, 15(3), 693–702. <https://doi.org/10.5194/bg-15-693-2018>
- Maslin, M. (2004). *Global Warming : A Very Short Introduction* (Issue Vol. 118). Oxford University Press. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,sso&db=e000xww&AN=186582&lang=es&site=ehost-live&scope=site&custid=s9226804>



- McNellis, B. E., Smith, A. M. S., Hudak, A. T., & Strand, E. K. (2021). Tree mortality in western U.S. forests forecasted using forest inventory and Random Forest classification. *Ecosphere*, 12(3). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3419>
- MEA. (2005). Millennium Ecosystem Assessment. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Mekuria, W., Diyasa, M., Tengberg, A., & Haileslassie, A. (2021). Effects of Long-Term Land Use and Land Cover Changes on Ecosystem Service Values: An Example from the Central Rift Valley, Ethiopia. *Land*, 10(12), 1373. <https://doi.org/10.3390/land10121373>
- Mendoza-Ponce, A., Corona-Núñez, R., Kraxner, F., Leduc, S., & Patrizio, P. (2018). Identifying effects of land use cover changes and climate change on terrestrial ecosystems and carbon stocks in Mexico. *Global Environmental Change*, 53, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.08.004>
- MINAM. (2022). Guía de evaluación del estado de los ecosistemas de bosques relictos altoandino y mesoandino (1st ed.). <https://repositoriodigital.minam.gob.pe/handle/123456789/1109>
- Mohan, K., Mason, E. G., & Bown, H. E. (2020). Linking above-ground biomass production to below-ground carbon fluxes across stocking, clone, fertilization, and understory elimination in *Pinus radiata* D. Don plantations, New Zealand. *Forest Ecology and Management*, 477, 118469. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118469>
- Moore, S., Adu-Bredu, S., Duah-Gyamfi, A., Addo-Danso, S. D., Ibrahim, F., Mbou, A. T., De Grandcourt, A., Valentini, R., Nicolini, G., & Djangbletey, G. (2018). Forest biomass, productivity and carbon cycling along a rainfall gradient in West Africa. *Global Change Biology*, 24(2), e496–e510.



- Mulatu, A., Negash, M., & Asrat, Z. (2024). Species-specific allometric models for reducing uncertainty in estimating above ground biomass at Moist Evergreen Afromontane Forest of Ethiopia. *Scientific Reports*, 14(1), 1147. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-51002-6>
- Návar Cháidez, J. de J., Barrientos González, N., Graciano Luna, J. J., Dale, V., & Parresol, B. (2004). Additive biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, Mexico. *Madera y Bosques*, 2, 17–28. <https://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/1272/1443>
- Oberle, B., Cole, P. O., Frank, G., Gates, A., Hall, B., Harvey, D., Scott, M. E., Setterberg, C., & Bustetter, S. P. (2023). Multilevel allometric growth equations improve accuracy of carbon monitoring during forest restoration. *Trees, Forests and People*, 14, 100442. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100442>
- Omar, H., Misman, M. A., & Kassim, A. R. (2017). Synergetic of PALSAR-2 and Sentinel-1A SAR polarimetry for retrieving aboveground biomass in dipterocarp forest of Malaysia. *Applied Sciences*, 7(7), 675.
- Phillips, J. F., Duque, A., Yepes, A., Cabrera Torres, K., M.C., G., Navarrete, D., Alvarez-Davila, E., & D, C. (2011). Estimación de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia. *Estratificación, alometría y métodos analíticos*.
- Picard, N., Saint-Andre, L., & Henry, M. (2012). *Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction*.
- PNCBMCC. (2023). Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático. <https://www.gob.pe/institucion/bosques/noticias/619091-peru-posee-42-tipos-de-bosques-en-costa-sierra-y-selva>



- Pradhan, A., Ormsby, A. A., & Behera, N. (2019). A comparative assessment of tree diversity, biomass and biomass carbon stock between a protected area and a sacred forest of Western Odisha, India. *Écoscience*, 26(3), 195–204. <https://doi.org/10.1080/11956860.2019.1586118>
- Qasim, M., & Csaplovics, E. (2023). Comparative study of forest biomass and carbon stocks of Margalla Hills National Park, Pakistan. *Forest Science and Technology*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/21580103.2023.2208141>
- Raihan, A., Begum, R. A., Mohd Said, M. N., & Pereira, J. J. (2021). Assessment of carbon stock in forest biomass and emission reduction potential in Malaysia. *Forests*, 12(10), 1294.
- Riofrío, J., Herrero, C., Grijalva, J., & Bravo, F. (2015). Aboveground tree additive biomass models in Ecuadorian highland agroforestry systems. *Biomass and Bioenergy*, 80, 252–259. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.05.026>
- Rosenstock, T. S., Rufino, M. C., Butterbach-Bahl, K., & Wollenberg, E. (2013). Toward a protocol for quantifying the greenhouse gas balance and identifying mitigation options in smallholder farming systems. *Environmental Research Letters*, 8(2), 21003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/021003>
- Rozendaal, D. M. A., Requena Suarez, D., De Sy, V., Avitabile, V., Carter, S., Adou Yao, C. Y., Alvarez-Davila, E., Anderson-Teixeira, K., Araujo-Murakami, A., & Arroyo, L. (2022). Aboveground forest biomass varies across continents, ecological zones and successional stages: Refined IPCC default values for tropical and subtropical forests. *Environmental Research Letters*, 17(1), 14047.
- Salunkhe, O. R., Valvi, G. R., Singh, S., Rane, G. M., Khan, M. L., Saxena, V., & Khare, P. K. (2023). Forest carbon stock and biomass estimation in West



- Central India using two allometric models. *Carbon Research*, 2(1), 9. <https://doi.org/10.1007/s44246-023-00039-3>
- Sánchez, C. A. (2016). Evolución del concepto de cambio climático y su impacto en la salud pública del Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 33(1), 128. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2016.331.2014>
- Scheiner, S. M. (2024). Greenhouse Effect. In *Encyclopedia of Biodiversity* (pp. 307–323). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822562-2.00132-8>
- Schmidt, G. A., Ruedy, R. A., Miller, R. L., & Lacis, A. A. (2010). Attribution of the present-day total greenhouse effect. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D20). <https://doi.org/10.1029/2010JD014287>
- SERNAMP. (2022a). Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. <https://www.gob.pe/institucion/sernanp/informes-publicaciones/1928581-santuario-nacional-de-ampay>
- SERNAMP. (2022b, October 21). Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. *Science of The Total Environment*.
- Shimamoto, C. Y., Botosso, P. C., & Marques, M. C. M. (2014). How much carbon is sequestered during the restoration of tropical forests? Estimates from tree species in the Brazilian Atlantic forest. *Forest Ecology and Management*, 329, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.002>
- Siraj, M. (2019). Forest carbon stocks in woody plants of Chilimo-Gaji Forest, Ethiopia: Implications of managing forests for climate change mitigation. *South African Journal of Botany*, 127, 213–219. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.09.003>

- Spracklen, D. V., & Righelato, R. (2014). Tropical montane forests are a larger than expected global carbon store. *Biogeosciences*, 11(10), 2741–2754. <https://doi.org/10.5194/bg-11-2741-2014>
- Strasburger, E., Noll, F., Schenck, H., & Schimper, A. F. W. (1998). *Tratado de botánica* (8th ed.). Omega.
- Tanwar, S. P. S., Verma, A., Kumar, P., Alam, N. M., & Bhatt, R. K. (2020). Biomass and carbon projection models in *Hardwickia binata* Roxb. vis a vis estimation of its carbon sequestration potential under arid environment. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(14), 1925–1935. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1701659>
- Tavassoli, M., & Kamran-Pirzaman, A. (2023). Comparison of effective greenhouse gases and global warming. 2023 8th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM), 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICTEM56862.2023.10083954>
- Thompson, D. W. J., Solomon, S., Kushner, P. J., England, M. H., Grise, K. M., & Karoly, D. J. (2011). Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change. *Nature Geoscience*, 4(11), 741–749. <https://doi.org/10.1038/ngeo1296>
- Toochi, E. C. (2018). Carbon sequestration: how much can forestry sequester CO<sub>2</sub>. *Forestry Research and Engineering: International Journal*, 2(3), 148–150.
- Tucker, O. (2018). Carbon Capture and Storage. In *Carbon Capture and Storage* (pp. 1–46). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-1581-4ch1>
- Usman, N., Hussain, M., Akram, S., Majeed, M., Shah, S., Rehman, F., Yousaf, A., Shaukat, S., Shah, S. W. A., Mishr, R. S., Shrestha, S., Saddiqa, A., Room, S. A., & Ali, A. (2024). Yield, carbon stock, and price dynamics of

- agroforestry tree species in district Mardan, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Brazilian Journal of Biology*, 84. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.262662>
- Vásquez, E., Ladd, B., & Borchard, N. (2014). Carbon storage in a high-altitude *Polylepis* woodland in the Peruvian Andes. *Alpine Botany*, 124(1), 71–75. <https://doi.org/10.1007/s00035-014-0126-y>
- Widagdo, F. R. A., Li, F., Zhang, L., & Dong, L. (2020). Aggregated biomass model systems and carbon concentration variations for tree carbon quantification of natural mongolian oak in northeast China. *Forests*, 11(4), 397.
- Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M., & Herold, M. (2021). Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature Communications*, 12(1), 2501. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2>
- Yantas, K. (2022). Estimación del nivel de captura de dióxido de carbono del eucalipto (*eucalyptus globulus*), Ciprés (*cupressus macrocarpa*) y Pino (*pinus radiata*), en la localidad de Huariaca, Pasco - 2019. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
- Yan, W., Wang, W., Peng, Y., & Chen, X. (2022). Evaluation of Biomass and Carbon Stocks in Three Pine Forest Types in Karst Area of Southwestern China. *Journal of Sustainable Forestry*, 41(1), 18–32. <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1830803>
- Young, K. (2009). Andean land use and biodiversity: Humanized landscapes in a time of change (pp. 96(3):492-507).
- Zhao, M., Yang, J., Zhao, N., Liu, Y., Wang, Y., Wilson, J. P., & Yue, T. (2019). Estimation of China's forest stand biomass carbon sequestration based on the continuous biomass expansion factor model and seven forest inventories



from 1977 to 2013. *Forest Ecology and Management*, 448, 528–534.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.06.036>

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Interrogantes específicas	Hipótesis específicas	Objetivos específicos	Variables	Indicadores	Métodos	Prueba Estadística Inferencial
<p><b>a</b> ¿Es viable realizar el inventario forestal de <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don para obtener las variables de diámetro de pecho, altura total del árbol y variables posicionales como son las coordenadas de las parcelas?</p>	<p>En la realización del inventario forestal de <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don favorece positivamente para obtener las variables de diámetro de pecho, altura total del árbol y variables posicionales como son las coordenadas de las parcelas.</p>	<p>Efectuar el inventario forestal de <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don para obtener las variables de diámetro de pecho, altura total del árbol y variables posicionales como son las coordenadas de las parcelas</p>	<p>Diámetro a la altura del pecho Altura total del árbol Densidad básica del fuste</p>	<p>m m g/cm<sup>3</sup></p>	<p>Para la medición de la variable DAP se usará cinta métrica, la altura total se determinará con hipsómetro y la densidad básica se evaluará en laboratorio</p>	<p>Muestreo al azar para establecimiento de parcelas</p>
<p><b>b</b> ¿Cuál es el contenido de biomasa aérea del bosque de <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don al estimar mediante ecuaciones alométricas?</p>	<p>El contenido de biomasa aérea del bosque de <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don se aproxima mejor con la estimación mediante las ecuaciones alométricas</p>	<p>Estimar la biomasa aérea del bosque de <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don mediante ecuaciones alométricas</p>	<p>Biomasa arborea</p>	<p>t</p>	<p>La biomasa arborea se estimará utilizando siete ecuaciones alométricas</p>	<p>ANOVA para los modelos estandarizados</p>
<p><b>c</b> ¿Cómo se puede determinar la fracción de carbono del <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don, mediante el método volumétrico y colorimétrico?</p>	<p>La fracción de carbono del <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don se estima mejor mediante el método volumétrico y colorimétrico.</p>	<p>Determinar la fracción de carbono del <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don, mediante el método volumétrico y colorimétrico</p>	<p>Fracción de carbono almacenado por el <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don</p>	<p>fracción de carbono expresado en porcentaje (%)</p>	<p>Se evaluará mediante el método volumétrico y colorimétrico</p>	<p>t de student independientes</p>
<p><b>d</b> ¿Cuál es el contenido de carbono almacenado en la biomasa arborea del bosque de <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don al estimar mediante los modelos estadísticos?</p>	<p>El contenido de carbono almacenado en la biomasa arborea del bosque de <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don se aproxima mejor mediante los modelos estadísticos.</p>	<p>Estimar el contenido de carbono almacenado en la biomasa arborea del bosque de <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don</p>	<p>Cantidad de carbono almacenado</p>	<p>t C/ha</p>	<p>Para la determinación el contenido de carbono, primero se determinará la biomasa arborea, posteriormente este resultado se multiplicará por la fracción de carbono</p>	<p>Comparación de promedios</p>
<p><b>e</b> ¿Es viable comparar las diferentes metodologías de evaluación de carbono almacenado por la especie <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don?</p>	<p>Las metodologías de evaluación de carbono almacenado por la especie <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don son diferentes.</p>	<p>Comparar las diferentes metodologías de evaluación de carbono almacenado por la especie <i>Podocarpus glomeratus</i> D. Don</p>	<p>Ecuaciones alométricas, método volumétrico y colorimétrico</p>	<p>t C/ha</p>	<p>Se realizará una comparación del carbono almacenado obteniendo por siete ecuaciones alométricas y dos métodos de fracción de carbono</p>	<p>Coefficiente de determinación</p>

## Anexo 2. Delimitación de la parcela e inventario forestal



## Anexo 3. Muestras para determinación de fracción de carbono



#### Anexo 4. Oxidación de muestras para determinación de fracción de carbono



#### Anexo 5. Secado de muestras



### Anexo 6. Medición de variables dasométricas



### Anexo 7. Delimitación de parcela con cinta roja para el inventario forestal



**Anexo 8. Resultados de fracción de carbono para el *Podocarpus glomeratus* D. Don por el método volumétrico**

Código de muestra	Volumen de sulfato ferroso amoniacal requerido para el blanco V1 (ml)	Volumen sulfato ferroso amoniacal V2 (ml)	Fracción de carbono % C
P1_A	82	23,50	45,63
P1_B	82	20,50	47,97
P1_C	82	23,50	45,63
P2_A	82	22,50	46,41
P2_B	82	25,00	44,46
P2_C	82	22,50	46,41
P3_A	82	22,50	46,41
P3_B	82	22,50	46,41
P3_C	82	22,50	46,41
P4_A	82	20,00	48,36
P4_B	82	20,00	48,36
P4_C	82	21,50	47,19
P5_A	82	22,50	46,41
P5_B	82	20,00	48,36
P5_C	82	22,00	46,80
P6_A	82	20,00	48,36
P6_B	82	21,50	47,19
P6_C	82	21,50	47,19
P_7A	82	20,50	47,97
P_7B	82	20,50	47,97
P_7C	82	20,00	48,36
P_8A	82	20,00	48,36
P_8B	82	22,50	46,41
P_8C	82	20,00	48,36
P_9A	82	20,00	48,36
P_9B	82	20,50	47,97
P_9C	82	20,00	48,36
P_10A	82	19,00	49,14
P_10B	82	19,00	49,14
P_10C	82	18,50	49,53

### Anexo 9. Resultados de determinación de densidad básica para el *Podocarpus glomeratus* D, Don

Muestra	Densidad Básica (g/cm <sup>3</sup> )
P1	0,53
P2	0,54
P3	0,55
P4	0,50
P5	0,54
P6	0,57
P7	0,53
P8	0,53
P9	0,55
P10	0,52
<b>Prom. +/- D.E</b>	<b>0,54±0,02</b>

### Anexo 10. Bosque sin intervención, perteneciente al bosque Tipo I



**Anexo 11. Presencia de caminos de herradura dentro del SNA, perteneciente al bosque tipo II**



**Anexo 12. Bosque en zona límite con parcelas agrícolas, pertenecientes al bosque Tipo III**





Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Saul Moreano Carrasco,  
identificado con DNI 46358121 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Doctorado en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

"EVALUACIÓN DE CARBONO ALMACENADO EN BOSQUE NATIVO DE  
Podocarpus glomeratus D. DON EN EL SANTUARIO NACIONAL DE  
AMPAY"

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 12 de AGOSTO del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



VRI  
Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Saul Moreano Carrasco,  
identificado con DNI 46358121 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Doctorado en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente,  
informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“EVALUACIÓN DE CARBONO ALMACENADO EN BOSQUE NATIVO DE  
Podocarpus gomeranus D. DON EN EL SANTUARIO NACIONAL  
DE AMPAY”

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 12 de Agosto del 2024

  
FIRMA (obligatoria)

Huella