



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
INGENIERIA FORESTAL

**ESTIMACIÓN DEL STOCK DE CARBONO EN RODALES
PRECOSECHA DE *Pinus radiata* D. Don EN SUELOS DE
TRUMAO DE LA REGIÓN DE ÑUBLE Y BIOBÍO**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de
Concepción para otorgar al título profesional de Ingeniero Forestal

POR: Johan Valdes

Profesor Guía: Rafael Rubilar Pons

Abril, 2024

Concepción, Chile

© 2024, Johan Marcelo Valdes Cabezas

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

ESTIMACIÓN DEL STOCK DE CARBONO EN RODALES PRECOSECHA DE
Pinus radiata D. Don EN SUELOS DE TRUMAO DE LA REGIÓN DE ÑUBLE Y
BIOBÍO



Profesor Guía

Rafael Alejandro Rubilar Pons
Profesor Titular
Ingeniero Forestal, PhD.



Profesora Co-Guía

Rosa María Alzamora Mallea
Profesora Asociada
Ingeniera Forestal, PhD.

DEDICATORIA

A mi querida hermana Amanda, a mamá y papá, por sus incontables esfuerzos y sacrificios, por ser mi guía y mi inspiración.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi familia por estar siempre a mi lado, brindándome su apoyo incondicional y su compañía en cada momento. En especial a mi querida hermanita Amanda, gracias por ser mi fuente de inspiración y por iluminar mi vida con tu presencia.

A mi amiga Isidora, por su invaluable ayuda durante el proceso de análisis de datos. Su colaboración fue fundamental para alcanzar mis objetivos.

A mis queridos compañeros y futuros colegas Martín, Víctor, Dariel, Sebastián, Carlos y Belén, les agradezco de todo corazón por las innumerables experiencias compartidas durante nuestra etapa universitaria. Las risas, las anécdotas, las dificultades, todo eso hizo que este camino fuera más llevadero y significativo.

Finalmente quiero agradecer a mis profesores Rafael Rubilar y Rosa Alzamora por el apoyo, las sugerencias, las críticas constructivas y el conocimiento que me aportaron en el desarrollo de mi proyecto de título.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	7
2.1 Objetivo general.....	7
2.2 Objetivos específicos.....	7
III. METODOLOGÍA	8
3.1 Áreas de estudio.....	8
3.1.1 Geomorfología y ubicación de las áreas de estudio	9
3.1.2 Descripción de los suelos de las áreas de estudio	10
3.1.3 Variables climáticas de las áreas de estudio	14
3.2 Diseño de muestreo y distribución de parcelas.	17
3.2.1 Muestreo mediante inventario forestal.....	19
3.2.2 Muestreo del suelo mineral	23
3.2.3 Muestreo del piso forestal	25
3.3 Estimaciones de carbono de cada componente	27
3.3.1 Estimación de carbono de la biomasa aérea.....	27
3.3.2 Estimación de carbono de la biomasa subterránea (raíces).....	28
3.3.3 Estimación de carbono del suelo mineral	29
3.3.4 Estimación de carbono del piso forestal	30
3.4 Análisis estadístico	31
IV. RESULTADOS.....	32
4.1 Análisis descriptivo de los sitios.....	32
4.2 Carbono de la biomasa a nivel de sitio	33
4.2.1 Carbono de la biomasa aérea	33
4.2.2 Carbono de la biomasa subterránea (raíces)	35
4.2.3 Carbono de la biomasa total (aérea y subterránea)	36

4.2.4	Relación entre el volumen precosecha y el stock de carbono de la biomasa total.....	37
4.2.5	Relación entre el stock de carbono de la biomasa total observado y estimado.....	39
4.3	Carbono del suelo mineral a nivel de sitio	40
4.3.1	Relación entre el volumen precosecha y el carbono del suelo mineral	43
4.3.2	Relación entre el carbono del suelo mineral observado y estimado..	44
4.4	Carbono del piso forestal a nivel de sitio	45
4.4.1	Relación entre el volumen precosecha y el carbono del piso forestal	47
4.5	Stock del carbono total a nivel de sitio.....	48
4.5.1	Relación entre el volumen precosecha y el stock de carbono total ...	51
4.5.2	Relación entre el stock de carbono total observado y estimado.....	53
V.	DISCUSIÓN	55
VI.	CONCLUSIONES	60
VII.	BIBLIOGRAFÍA	62
VIII.	APÉNDICE	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de características de las cinco áreas de estudio.	8
Tabla 2. Resumen de variables climáticas de las áreas de estudio.....	16
Tabla 3. Funciones alométricas utilizadas para estimar la biomasa aérea en plantaciones de <i>Pinus radiata</i> (Sandoval et al., 2021).	20
Tabla 4. Relación ente la biomasa aérea total y la biomasa subterránea para la especie <i>Pinus radiata</i>	22
Tabla 5. Resumen de las estadísticas descriptivas para las variables medidas en los diferentes sitios de estudiados.	33

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Localización de las cinco áreas de estudio (en rojo) donde se representa, A) Mapa geomorfológico de las regiones del centro-sur de Chile, B) Mapa satelital de la región de interés con la localización de las áreas de estudio.	9
Figura 2. Perfil de suelo obtenido en el Fundo Ramadilla.....	11
Figura 3. Perfiles de suelo donde se representa, A) Fundo Hijueta de San Luis, B) Fundo Santa Teresa, C) Fundo Montpellier.	12
Figura 4. Perfil de suelo obtenido en el Fundo Santa Lidia.....	13
Figura 5. Diseño de muestreo donde se representa, A) Los cinco sitios asignados en una condición de sitio, B) Las tres parcelas localizadas en cada sitio y C) puntos de muestreo dentro una parcela, los puntos negros representan el muestreo con barreno y los puntos amarillos representan el muestreo del piso forestal.	18
Figura 6. Esquema resumen del muestreo de suelo mineral mediante barrenos.	24
Figura 7. Muestreo de densidad aparente de suelo con cilindro de volumen de 100 cm ³ a diferentes profundidades (0-20 cm, 20-40 cm, y 40-100 cm).....	25
Figura 8. Cilindro donde se recolectaron las muestras del horizonte orgánico.	26
Figura 9. Representación gráfica del stock de carbono de la biomasa aérea en diferentes sitios representados por abreviaturas y volumen precosecha (m ³ ha ⁻¹). La línea punteada indica la media del carbono en biomasa aérea de los sitios.	34
Figura 10. Representación gráfica del stock de carbono de la biomasa subterránea en diferentes sitios representados por abreviaturas y volumen precosecha (m ³ ha ⁻¹). La línea punteada indica la media del carbono en biomasa subterránea de los sitios.	35
Figura 11. Representación gráfica del stock de carbono de la biomasa total en diferentes sitios representados por abreviaturas y volumen precosecha (m ³ ha ⁻¹). La línea punteada indica la media del carbono en biomasa total de los sitios.	37
Figura 12. Relación entre volumen precosecha y stock de carbono acumulado en la biomasa total (aérea y subterránea) de los sitios.	38
Figura 13. Relación entre carbono de biomasa total observado y carbono de biomasa total estimado.	40
Figura 14. Representación gráfica del stock de carbono del suelo mineral a profundidad de 1 metro en diferentes sitios representados por abreviaturas y volumen precosecha (m ³ ha ⁻¹). La línea punteada indica la media del carbono en el suelo mineral de los sitios.	42

Figura 15. Representación gráfica de las proporciones de carbono del suelo mineral en distintas profundidades en los diferentes sitios estudiados.	42
Figura 16. Relación entre volumen precosecha y stock de carbono acumulado en el suelo mineral a una profundidad de 1 metro en los sitios evaluados.	43
Figura 17. Relación entre carbono del suelo mineral observado y carbono del suelo mineral estimado.	45
Figura 18. Representación gráfica del stock de carbono del piso forestal en diferentes sitios representados por abreviaturas y volumen precosecha ($m^3 ha^{-1}$). La línea punteada indica la media del carbono en el piso forestal de los sitios.	46
Figura 19. Relación entre volumen precosecha y stock de carbono acumulado en el piso forestal en los sitios evaluados.	47
Figura 20. Representación gráfica del stock total de carbono en los diferentes sitios representados por abreviaturas y volumen precosecha ($m^3 ha^{-1}$). La línea punteada indica la media del stock total de carbono de los sitios.	49
Figura 21. Representación gráfica de las proporciones de carbono total de los distintos componentes en los cinco sitios estudiados.	51
Figura 22. Relación entre volumen precosecha y stock total de carbono acumulado en los sitios evaluados.	52
Figura 23. Relación entre el stock total de carbono observado y stock total de carbono estimado.	54

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se enfocó en determinar la relación del gradiente de productividad con el stock carbono almacenado en la biomasa (aérea y subterránea), en el suelo mineral y en el piso forestal en plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don) en edad de precosecha de cinco sitios con suelos de cenizas volcánicas recientes, ubicados en las Regiones de Ñuble y Biobío. Se emplearon funciones alométricas para estimar la biomasa y se tomaron muestras de suelo (hasta 100 cm de profundidad) y de piso forestal para análisis de carbono. Los resultados mostraron relaciones lineales significativas en el almacenamiento de carbono entre sitios, con una mayor cantidad en sitios de mayor productividad. El suelo mineral fue el componente más significativo en el almacenamiento de carbono con un valor de 285 Mg ha⁻¹, seguido por la biomasa aérea con 137 Mg ha⁻¹ y la biomasa subterránea (raíces) con 35 Mg ha⁻¹. En menor proporción se encontró el piso forestal con 14 Mg ha⁻¹. A niveles de stock total de carbono los sitios presentaron una media de 471 Mg ha⁻¹. Estos resultados son útiles para reconocer que la productividad de las plantaciones de *Pinus radiata* tiene un impacto directo en su capacidad de almacenamiento de carbono, sugiriendo que la gestión forestal enfocada en aumentar la productividad puede ser una estrategia efectiva para mitigar el cambio climático.

ABSTRACT

This research aimed to explore the correlation between productivity gradients and carbon stock levels in *Pinus radiata* (D. Don) plantations at pre-harvest stages across five sites in the Ñuble and Biobío Regions, characterized by recent volcanic ash soils. Allometric functions were employed to estimate biomass, while soil samples (up to 100 cm depth) were collected for organic carbon and forest floor analyses. Results unveiled significant variations in carbon storage across sites, with higher productivity sites exhibiting greater carbon accumulation. Mineral soil emerged as the primary carbon reservoir, storing 285 Mg ha⁻¹, followed by aboveground biomass at 137 Mg ha⁻¹, belowground biomass at 35 Mg ha⁻¹, and forest floor at 14 Mg ha⁻¹. Collectively, the sites averaged a total carbon stock of 471 Mg ha⁻¹. These findings underscore the direct influence of *Pinus radiata* plantation productivity on carbon storage capacity. They suggest that forest management strategies aimed at enhancing productivity could effectively mitigate climate change by bolstering carbon sequestration efforts.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático se define como la variación a largo plazo en los patrones climáticos de la Tierra como resultado de las actividades humanas y los procesos naturales. Durante los últimos 60 años, el aumento de los gases de efecto invernadero (GEI) ha sido la causa principal del cambio climático inducido por el hombre, que ha causado un aumento en la temperatura global generando una serie de impactos ambientales, económicos y sociales (Canadell *et al.*, 2021). Inicialmente el aumento de gases como el dióxido de carbono (CO₂), por encima de los niveles preindustriales, se debió principalmente a la liberación de carbono a través de la deforestación y otras actividades relacionadas con el cambio de uso de la tierra (Ciais *et al.*, 2013). No obstante, desde aproximadamente 1950 las emisiones de combustibles fósiles se han convertido en la principal fuente antropogénica de emisiones, y su proporción continúa aumentando (Friedlingstein *et al.*, 2020).

Bajo este contexto, 195 países se reunieron en el año 1992 en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés) a fin de reforzar la conciencia pública de los problemas que el cambio climático trae consigo. De esta convención surgió en 1997 el Protocolo de Kyoto, que se considera el acuerdo internacional más relevante en el ámbito ambiental y del desarrollo sostenible (Listoffsky *et al.*, 2010). Posteriormente, en

diciembre de 2015, durante la vigésima primera Conferencia de Partes (COP 21), se estableció el Acuerdo de París como otro hito en la lucha contra el cambio climático y sus impactos. El objetivo principal de este acuerdo es limitar el calentamiento global por debajo de 1.5°C respecto a los niveles preindustriales, controlando las emisiones de GEI para lograr la neutralidad de carbono hacia el año 2050 (UNFCCC, 2015).

Chile, en cumplimiento del Protocolo de Kyoto y la Convención Marco de las Naciones Unidas, tiene la obligación de reportar las emisiones de carbono (C) y los sumideros provenientes de las tierras forestales y aquellas sujetas a actividades de forestación, reforestación y deforestación (MMA, 2021). Recientemente, el país ha llevado a cabo una iniciativa llamada Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales (ENCCRV), que tiene como objetivo principal mitigar el cambio climático (CONAF, 2019). Estudios indican que las medidas de acción contempladas en esta estrategia podrían contribuir con una reducción del 28.8% en el potencial de emisiones, lo que la convierte en las acciones más costo-eficientes en comparación con otros sectores (CONAF, 2018).

Las reservas actuales de carbono en los bosques del mundo se estiman en 44% en el suelo (hasta 1 m de profundidad), 42% en biomasa viva (por encima y por debajo del suelo), 8% en madera muerta, 6% en hojarasca (Pan *et al.*, 2011). La

importancia de estos reservorios es crucial en el contexto del cambio climático, ya que actúan como importantes sumideros de carbono. Geográficamente, a nivel de ecosistemas mundiales el 55% del carbono se almacena en bosques tropicales, 32% en bosques boreales, y 14% en bosques templados, lo que destaca la relevancia de la gestión forestal en la mitigación del cambio climático.

En este sentido, el suelo desempeña un papel crucial en el cambio climático global al actuar como un reservorio importante de carbono y como sumidero de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico (Llorente, 2004). Las reservas de carbono del suelo superficial son sensibles a factores como el clima, la topografía, la gestión del suelo y otras condiciones antropogénicas (Hontoria *et al.*, 1999). Por ende, este recurso natural puede ser una espada de doble filo en términos de flujos de carbono, dado que los impactos antropogénicos en el suelo pueden llevarlo a convertirse de un sumidero a una fuente neta de gases de efecto invernadero (FAO, 2017).

Los suelos presentes en este estudio son los denominados Trumaos, que son suelos de origen volcánico, clasificados como Andosoles, los cuales se forman a partir de materiales volcánicos como cenizas holocénicas (Suelos Volcánicos de Chile, 1985). La formación de los suelos trumaos se deriva generalmente de ceniza volcánica transportada por el viento (Sanhueza, 1999), y está subordinada a la existencia de vidrio volcánico, además de una condición de libre drenaje, un

nivel mínimo de precipitación anual que en Chile supera los 800 mm y un periodo de tiempo que normalmente no excede los 25,000 años (González, 2012). De acuerdo con estudios realizados por Mella y Kühne en 1983, se estima que la extensión de los suelos Trumaos comprendidos entre Santiago y Puerto Montt abarca aproximadamente 3,334,000 hectáreas (Mella y Kühne, 1983, citado en Suelos Volcánicos de Chile, 1985).

Con respecto a su composición mineralógica, estos suelos poseen un importante porcentaje de arcilla alofánica e imogolita, por lo que son denominados suelos alofánicos. La variación de carbono en los suelos alofánicos no es explicada por el contenido de limo y arcilla, más bien por el alofán, el pH del suelo en agua y el contenido de aluminio que explican la mayor variación de carbono del suelo (Garrido-Ramírez *et al.*, 2012). Esto demuestra que los minerales no cristalinos, como alofán e imogolita, controlan el almacenamiento y el movimiento del carbono orgánico del suelo (Yu *et al.*, 2012).

Por otro lado, el carbono almacenado en la superficie del suelo de los ecosistemas boscosos corresponde al piso forestal, este comprende todo el material vegetal muerto situado por encima del suelo mineral (Harmon *et al.*, 1986). Este componente es significativo no solo por su función como depósito de nutrientes para el suelo, sino también porque protege activamente el suelo mineral. La medición del piso forestal puede ser un reto debido a la dificultad que

entraña separarla del suelo mineral. Además, estimar y destacar la contribución a las reservas de carbono también puede resultar difícil debido a la gran variabilidad que depende de las distintas especies arbóreas presentes, el clima, las características de la masa, los tipos de suelo e incluso las perturbaciones forestales (López-Senespieda *et al.*, 2021).

Si bien se ha resaltado la importancia del suelo y el piso forestal en el almacenamiento de carbono, es importante destacar que, junto con los bosques, estos elementos contribuyen a la captura de más de un tercio del carbono terrestre (FAO, 2020). El volumen de absorción de emisiones de un ecosistema forestal a largo plazo está estrechamente relacionado con la capacidad del sitio y el tipo de especies presentes. En especial las plantaciones de rápido crecimiento, como *Pinus radiata* son las que capturan más carbono y liberan mayor cantidad de oxígeno a la atmósfera (CONAF, 2019). Estas especies pueden alcanzar su máxima capacidad de captura entre 12 y 60 años.

El objetivo de esta investigación fue determinar y cuantificar el carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea, en el piso forestal y en el suelo mineral en plantaciones de *Pinus radiata* en edad de precosecha ubicados en suelos de origen volcánico en un gradiente productividad y evaluar si existe una relación positiva entre la productividad de estas plantaciones y su capacidad de secuestrar carbono en los distintos reservorios de carbono del sitio. La finalidad

de esta información es profundizar la comprensión sobre el rol de las plantaciones forestales en el almacenamiento de carbono, como una estrategia de mitigación frente a los impactos del cambio climático y para contribuir al cumplimiento de los compromisos nacionales relacionados con esta materia.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Determinar la relación entre el gradiente de productividad y los stocks de carbono en plantaciones de *Pinus radiata* en edad de precosecha, ubicados en suelos de cenizas volcánicas de la región de Ñuble y Biobío.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar y cuantificar el carbono almacenado en la biomasa, en el piso forestal y en el suelo mineral en un gradiente de productividad en suelos de cenizas volcánicas en plantaciones de *Pinus radiata* con edad de precosecha.
- Evaluar y modelar la relación entre el carbono almacenado en la biomasa, piso forestal, suelo mineral con la productividad del sitio y variables dasométricas de rodales de *Pinus radiata* en edad de precosecha establecidos en suelos de cenizas volcánicas recientes.

III. METODOLOGÍA

3.1 Áreas de estudio

El estudio se llevó a cabo en plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don), en edades de precosecha, ubicadas en suelos de cenizas volcánicas las cuales fueron seleccionadas en función de su productividad. El muestreo abarco cinco fundos pertenecientes a la empresa Forestal Mininco S.A., distribuidos en tres comunas de la Región del Biobío y una comuna de la Región de Ñuble. Estas localidades se encuentran insertas en una zona caracterizada por sus paisajes de montañas, volcanes y valles fluviales, que albergan tanto vegetación nativa como plantaciones forestales. Las características de los rodales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de características de las cinco áreas de estudio.

Fundo	Comuna	Edad (años)	Densidad (árbol ha ⁻¹)	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	IMA (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)
Hijuela San Luis	Quilaco	21	353	356.4	17.0
Santa Lidia	Pemuco	21	417	430.3	20.5
Montpellier	Mulchén	20	420	511.6	25.6
Ramadilla	Quilleco	22	442	549.4	25.0
Santa Teresa	Mulchén	23	457	643.8	28.0

3.1.1 Geomorfología y ubicación de las áreas de estudio

Las áreas de estudio se sitúan en la región de la precordillera, entre el llano central y la cordillera andina. Esta zona se caracteriza por su origen volcánico y tectónico, y presenta valles con laderas propensas a la erosión que han sido modificadas por procesos glaciales, fluviales y pluviales. Hacia el sur, se extiende el cordón precordillerano, caracterizado por la presencia de numerosos volcanes que distinguen al paisaje andino (Figura 1).

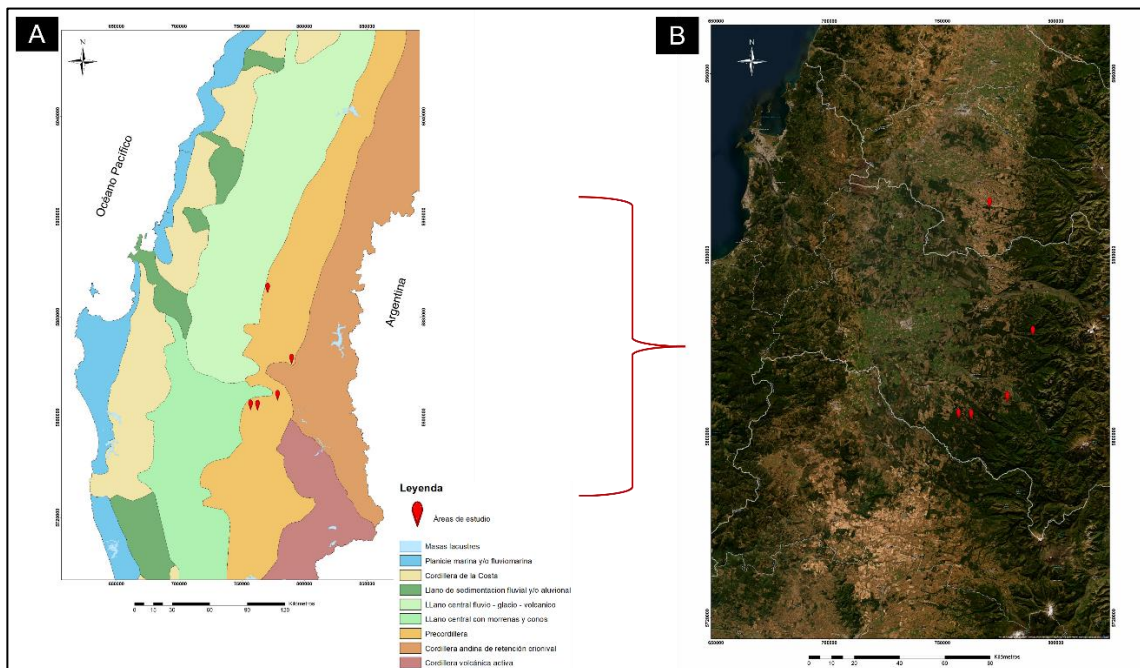


Figura 1. Localización de las cinco áreas de estudio (en rojo) donde se representa, A) Mapa geomorfológico de las regiones del centro-sur de Chile, B) Mapa satelital de la región de interés con la localización de las áreas de estudio.

3.1.2 Descripción de los suelos de las áreas de estudio

Los cinco sitios seleccionados presentan suelos de origen volcánico clasificados como Andisoles, denominados trumaos (Clasificación USCS MH). Estos suelos están formados a partir de materiales derivados de cenizas volcánicas jóvenes (holocénicas) que han sufrido procesos de meteorización bajo condiciones ácidas en climas húmedos (FAO, 2014). Las condiciones ambientales, topográficas y el tiempo de formación (menor a 25,000 años) han sido factores determinantes en la formación de estos suelos. Es importante destacar que los suelos Trumaos presentan una notable heterogeneidad a lo largo del país, siendo esta variabilidad directamente dependiente de la región geográfica o climática en la que se encuentren (Suelos Volcánicos de Chile, 1985).

Según González (2012), los suelos trumaos se distinguen por su elevada porosidad, así como por un alto contenido de materia orgánica y aluminio libre. Estos suelos suelen hallarse en áreas con pendientes pronunciadas, situación que mejora el drenaje. Respecto al contenido de humedad, varía entre un 80% y un 160%, lo cual se atribuye a la gran capacidad de retención de agua de las partículas de alofán e imogolita. A continuación, se detallan las condiciones específicas del suelo para cada sitio evaluado:

Fundo Ramadilla: El sitio posee suelos de la serie Arrayán (Figura 2), perteneciente a la familia medial térmica de los Typic Melanoxerands (Andosol), estos suelos están formados a partir de ceniza volcánica reciente, constituidos por tobas, materiales fluviales, y materiales fluvioglaciales, que se presentan compactados, pero no cementados, y que son lentamente permeables (Martínez, 2004). Son suelos muy profundos, bien drenados y de alta fertilidad, de la clase textural franco limosa (Dirección General de Aguas, 2004). Se ubica en topografía plana o casi plana, tiene una permeabilidad moderada y una escorrentía superficial lenta.



Figura 2. Perfil de suelo obtenido en el Fundo Ramadilla.

Fundos Hijueta de San Luis, Santa Teresa y Montpellier: Estos tres sitios poseen suelos de la serie Santa Barbara (Figura 3), perteneciente a la familia mediana de los Typic Haploxerands (Andosol), estos suelos están formados a partir de ceniza volcánica reciente, depositadas sobre substratos fluvioglaciales o materiales fluviales difícilmente detectables por la profundidad a la que se presentan (Martínez, 2004). Son suelos profundos a muy profundos, bien drenados, de texturas medias, generalmente franca o franco limosa. Se ubica en lomas y cerros, mostrando una superficie reducida de suelos ligeramente ondulados y ocasionalmente suelos de topografía casi plana.



Figura 3. Perfiles de suelo donde se representa, A) Fundo Hijueta de San Luis, B) Fundo Santa Teresa, C) Fundo Montpellier.

Fundo Santa Lidia: El sitio posee suelos de la serie Diguillín (Figura 4), perteneciente a la familia medial térmica de los Humic Haploxerands (Andosol), estos suelos están formados a partir de ceniza volcánica reciente, depositadas sobre un substratum constituido por tobas volcánicas, y que son lentamente permeables (Stolpe, 2006). Son suelos profundos, de drenaje bueno a moderado y de buena fertilidad, de la clase textural franco limosa (Hirzel, 2020). Se ubica en topografía plana y suavemente ondulada, tiene una permeabilidad moderada y una escorrentía superficial lenta.



Figura 4. Perfil de suelo obtenido en el Fundo Santa Lidia.

3.1.3 Variables climáticas de las áreas de estudio

La zona de los sitios estudiados se considera precordillerana, esta se caracteriza por tener un clima de transición entre el clima mediterráneo y clima de montaña. Esta área presenta algunas variaciones en función de la altitud y la ubicación geográfica específica, pero en general se puede describir como un clima mediterráneo de montaña (BCN, s.f). Este tipo de clima se caracteriza por veranos secos y cálidos, e inviernos frescos y húmedos. Es importante tener en cuenta que las condiciones climáticas pueden variar en función de la altitud y la ubicación geográfica exacta dentro de la zona precordillerana de la Región del Biobío y la Región de Ñuble. A continuación, se presenta un detalle de las condiciones climáticas de los sitios evaluados:

Fundo Ramadilla: La comuna de Quilleco, donde se encuentra el fundo Ramadilla, presenta un clima templado cálido lluvioso con influencia mediterránea (Cfsb) y en una pequeña fracción es posible encontrar un clima templado cálido con lluvias invernales (Csb), esto según la clasificación climática de Köppen (CIREN, 2021). La zona experimenta fluctuaciones térmicas anuales, las temperaturas promedio alcanzan un máximo de 28.7°C en enero y un mínimo de 3.4°C en julio (Municipalidad de Quilleco, 2018). En cuanto a las precipitaciones, la comuna recibe una media anual de 1,962 mm (Figura A.1) y cuenta con un periodo sin heladas de aproximadamente 4 a 5 meses (Tabla 2).

Fundos Santa Teresa y Montpellier: La comuna de Mulchén, donde se encuentran los fundos Santa Teresa y Montpellier, estos presentan un clima templado lluvioso con influencia mediterránea (Csb), según la clasificación climática de Köppen. La zona se caracteriza por tener veranos suaves y lluviosos, mientras que los inviernos son frescos y también presentan precipitaciones. Las temperaturas promedio alcanzan un máximo de 25.9°C en enero y un mínimo de 3.1°C en julio (Figura A.2). En cuanto a las precipitaciones, la zona recibe una media anual de 2,362 mm y cuenta con un periodo sin heladas de 5 a 6 meses (Tabla 2).

Fundo Santa Lidia: La comuna de Pemuco, donde se encuentra el fundo Santa Lidia, presenta un clima templado cálido con lluvias invernales (Cbs) y en una pequeña fracción es posible encontrar un clima templado cálido lluvioso con influencia mediterránea (Cfsb), esto según la clasificación climática de Köppen (Municipalidad de Pemuco, 2010). La zona se caracteriza por veranos calurosos y secos, con inviernos fríos y lluviosos. Las temperaturas promedio alcanzan un máximo de 28.7°C en enero y un mínimo de 2.8°C en julio (Figura A.3). En cuanto a las precipitaciones, la comuna recibe una media anual de 1,185 mm y cuenta con un periodo sin heladas de aproximadamente 5 a 6 meses, estos meses libres de heladas generalmente ocurren durante los meses más cálidos, desde la primavera hasta el otoño (Tabla 2).

Fundo Hijueta de San Luis: La comuna de Quilaco, donde se encuentra el fundo Hijueta de San Luis, presenta en su área poniente un clima templado cálido lluvioso con influencia mediterránea (Cfsb), esto según la clasificación climática de Köppen (CIREN, 2021). La zona experimenta inviernos suaves con lluvias y veranos agradables con menos precipitaciones. Las temperaturas promedio alcanzan un máximo de 28.3°C en enero y un mínimo de 3.0°C en julio (Figura A.4). En cuanto a las precipitaciones, la comuna recibe una media anual de 1,500 mm aproximadamente (Municipalidad de Quilaco, 2020) y cuenta con un periodo sin heladas de 6 a 7 meses debido a la influencia del río Biobío (Tabla 2).

Tabla 2. Resumen de variables climáticas de las áreas de estudio.

Fundo	PMA ^c (mm) ^a	TMA ^d (°C) ^b	Meses sin heladas	m.s.n.m.
Ramadilla	1962.2 ¹	13.3 ⁵	4 – 5	730
Santa Teresa	2362.4 ²	12.1 ⁶	5 – 6	353
Montpellier	2362.4 ²	12.1 ⁶	5 – 6	480
Santa Lidia	1185.1 ³	12.7 ⁷	5 – 6	351
Hijueta San Luis	1477.9 ⁴	12.9 ⁴	6 – 7	412

^aCR² Explorador climático, en las siguientes estaciones climáticas: ¹ estación meteorológica San Lorenzo, Quilleco, ² estación meteorológica Poco a Poco, Mulchén, ³ estación meteorológica Pemuco, Pemuco. ⁴ estación meteorológica Cerro el Padre, Quilaco.

^bAgrometeorología INIA, en las siguientes estaciones: ⁵ estación meteorológica Human, Los Ángeles, ⁶ estación meteorológica Surco y Semilla, Collipulli, ⁷ estación meteorológica Navidad, El Carmen.

^cPrecipitación media anual.

^dTemperatura media anual.

3.2 Diseño de muestreo y distribución de parcelas.

La metodología empleada en este estudio se centró en la cuantificación del stock de carbono presente en plantaciones de *Pinus radiata* en edades de precosecha distribuidas en cinco sitios específicos. Estas plantaciones fueron clasificadas según la condición del suelo (suelos volcánicos recientes) y el nivel de productividad forestal, determinado por el volumen de crecimiento registrado en los inventarios de la empresa Forestal Mininco S.A.

Aunque inicialmente se dispuso de datos volumétricos generales para cada localización, se optó por desarrollar un inventario forestal con el propósito de obtener mediciones más precisas, asociado al muestreo de suelos de cada sitio. La realización del inventario implicó la selección de tres parcelas cuadradas, cada una con una extensión de 1000 m² de superficie, dispuestas sistemáticamente dentro de cada rodal. Estas parcelas se organizaron siguiendo un patrón triangular, con una separación equidistante de 300 metros entre los centros de cada una, esto se realizó para maximizar la representatividad de los datos recogidos.

Para complementar el inventario forestal, se establecieron puntos específicos para el muestreo de barrenos y piso forestal dentro de cada parcela, distribuidos siguiendo un patrón zigzagueante (Figura 5). Este diseño buscó asegurar una

representatividad del área de estudio. Durante el muestreo, se tomaron precauciones para evitar áreas problemáticas, como zonas pedregosas, proximidades a raíces grandes o micrositios particulares, como huellas de caminos o sectores con perturbaciones extremas anómalas en comparación con las condiciones generales del bosque.

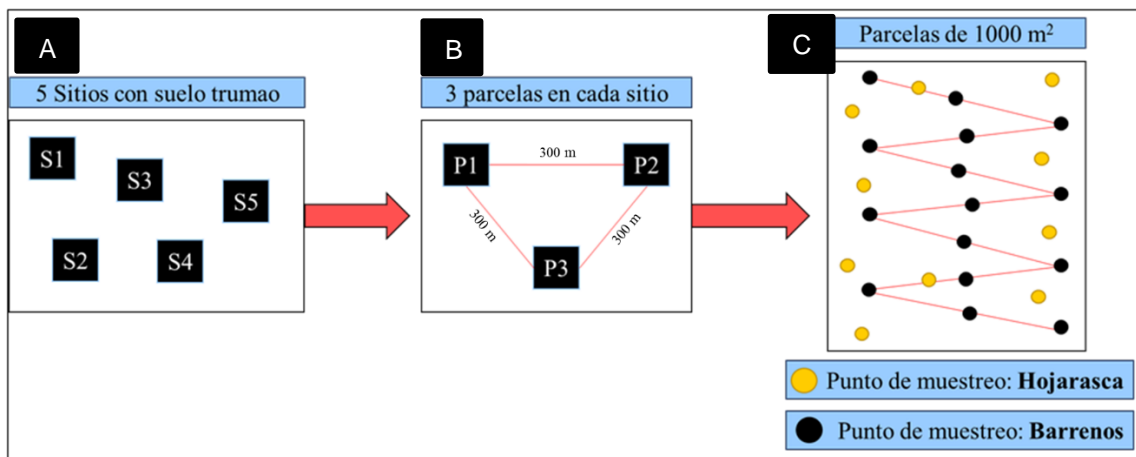


Figura 5. Diseño de muestreo donde se representa, A) Los cinco sitios asignados en una condición de sitio, B) Las tres parcelas localizadas en cada sitio y C) puntos de muestreo dentro una parcela, los puntos negros representan el muestreo con barreno y los puntos amarillos representan el muestreo del piso forestal.

3.2.1 Muestreo mediante inventario forestal

En cada parcela seleccionada para el inventario, se procedió a realizar mediciones de diámetro a la altura del pecho (dap), la altura total de los árboles (ht), la altura hasta la base de la copa viva (hcv), y la altura a la que inicia la copa (hcc). Además, se llevó a cabo una evaluación de la posición social, condición sanitaria y de forma de cada árbol, prestando especial atención a la identificación de ejemplares muertos. De esta forma, se logró obtener una base de datos de las 15 parcelas con mediciones más precisas, destinadas a estimar los datos volumétricos de los sitios y su nivel de productividad forestal, la cual se infiere a partir de dichos volúmenes. De acuerdo a revisión bibliográfica, el volumen se estimó utilizando la función de Mininco (1995):

$$V = (-0.00214 + 0.0000295 * D^2 + 0.001349 * H + 0.00002486 * D^2 * H) \quad (1)$$

Donde, V es el volumen en $m^3 \text{ árbol}^{-1}$, D es dap (cm), y H es altura total (m).

Después, los volúmenes calculados por árbol, expresados en $m^3 \text{ árbol}^{-1}$, se convirtieron a m^3 por parcela, y posteriormente a nivel de hectárea a través del factor de expansión, para evaluar la productividad forestal de los sitios y clasificarlos por gradientes.

3.2.1.1 Estimación de biomasa aérea mediante el inventario forestal

Adicionalmente, se procedió a calcular la biomasa aérea de cada árbol utilizando funciones alométricas. Este paso implicó estimar la biomasa de cada árbol de forma individual, dividiendo el análisis en componentes clave como la biomasa del fuste, la corteza, las ramas y las hojas. A partir de una revisión bibliográfica se seleccionaron cuatro funciones de biomasa aérea para plantaciones de *Pinus radiata* (Tabla 3). Dichas funciones utilizaron como variables predictoras el diámetro a la altura del pecho y la altura total.

Tabla 3. Funciones alométricas utilizadas para estimar la biomasa aérea en plantaciones de *Pinus radiata* (Sandoval et al., 2021).

Componente	Función de Biomasa (kg)
B_{Ft}	$0.02389 * (D^2 * H)^{0.93216}$
B_{Bk}	$0.00127 * (D^2 * H)^{0.99646}$
B_{Br}	$0.00431 * (D^2 * H)^{0.92709}$
B_{Lv}	$0.19428 * (D^2 * H)^{0.48666}$

B_{Ft} es biomasa del fuste en kg árbol⁻¹, B_{Bk} es biomasa de la corteza en kg árbol⁻¹, B_{Br} es biomasa de las ramas en kg árbol⁻¹, B_{Lv} es biomasa de las hojas en kg árbol⁻¹, D es dap, y H es altura total.

De esta manera, la ecuación final para la biomasa aérea total se estableció considerando todos los componentes de la biomasa, abarcando tanto el material leñoso como el foliar, agrupándolos en un solo conjunto:

$$B_{At} = B_{Ft} + B_{Bk} + B_{Br} + B_{Lv} \quad (2)$$

Donde, B_{At} es la biomasa aérea total en kg árbol⁻¹.

Luego, los datos obtenidos de la biomasa aérea se expandieron de kilogramos por árbol (kg árbol⁻¹) a megagramos por hectárea (Mg ha⁻¹) para obtener una medida estandarizada que permitiera comparaciones y análisis a gran escala. Para esto, se siguió un proceso de extrapolación basado en la densidad de árboles por parcela y la equivalencia entre las unidades de medida (área y peso). Primeramente, se tomó la biomasa individual de cada uno de los árboles en una parcela y se sumó para obtener la biomasa total de la parcela en kg. Con la suma total de la biomasa en kg de la parcela, se realizó la conversión a hectáreas mediante el factor de expansión proporcionando la biomasa en kg ha⁻¹. Finalmente, para convertir kg a Mg (donde 1 Mg = 1,000 kg), se dividió el total de la biomasa en kg ha⁻¹ por 1,000, obteniendo así la biomasa en Mg ha⁻¹.

3.2.1.2 Estimación de biomasa subterránea (raíces) mediante el inventario forestal

La biomasa subterránea, correspondiente a las raíces, se estimó a nivel de parcela, tomando como base una proporción de la biomasa aérea total. Este cálculo se basó en el método propuesto por Aalde et al. (2006), que utiliza un coeficiente que relaciona la cantidad entre la biomasa aérea y subterránea, ambas medidas en Mg ha^{-1} , para la especie *Pinus radiata* (Tabla 4).

Tabla 4. Relación ente la biomasa aérea total y la biomasa subterránea para la especie *Pinus radiata*.

	Biomasa aérea (Mg ha^{-1})		
	<50	50-150	>150
Relación biomasa subterránea	0.40	0.29	0.20

A continuación, se presenta la ecuación para estimar la biomasa subterránea (raíces) a nivel de parcela:

$$B_{St} = B_{At} * R \quad (3)$$

Donde, B_{St} es la biomasa subterránea a nivel de parcela en $Mg\ ha^{-1}$, B_{At} es la biomasa aérea total a nivel de parcela en $Mg\ ha^{-1}$, R es la relación entre biomasa subterránea y aérea.

3.2.2 Muestreo del suelo mineral

3.2.2.1 Muestreo compuesto mediante uso de barrenos

Para el muestreo del suelo mineral en cada parcela, se realizaron 20 puntos de muestreo mediante el uso de barrenos, donde se tomaron submuestras a tres profundidades distintas (0-20 cm, 20-40 cm, y 40-100 cm) siguiendo un patrón imaginario en forma de zigzag. Estas submuestras fueron incorporadas y mezcladas en un depósito con el fin de obtener una muestra compuesta de aproximadamente 250 gramos de cada profundidad por parcela (Figura 6). Posteriormente, estas muestras compuestas fueron trasladadas al Laboratorio de Suelos (LISAB), donde se sometieron inicialmente a secado al aire a $25^{\circ}C$, se tamizaron ($<2mm$) eliminando todos los restos vegetales y se secaron en un horno a una temperatura de $105^{\circ}C$ durante 24 horas. Luego, las muestras compuestas fueron sometidas a un segundo proceso de tamizado y molienda con mortero, donde se extrajeron alícuotas de 5 gramos de cada muestra compuesta para determinar el contenido de carbono elemental en las distintas profundidades utilizando el equipo IRMS (espectrómetro de masas).

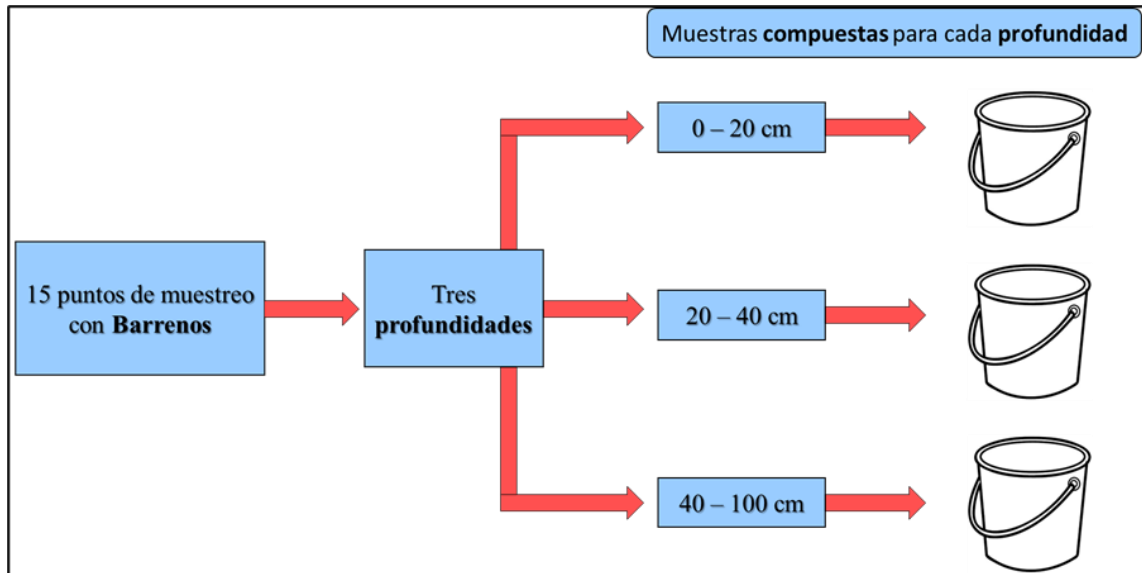


Figura 6. Esquema resumen del muestreo de suelo mineral mediante barrenos.

3.2.2.2 Muestreo compuesto derivado de calicatas

En cada predio se realizó una calicata de 1 metro de profundidad con el propósito de describir cada horizonte del suelo y recolectar muestras para obtener las propiedades físicas y densidad aparente del suelo (Figura 7) a diferentes profundidades (0-20 cm, 20-40 cm, y 40-100 cm) y para cada uno de los horizontes del suelo determinados por medio de una descripción general del perfil de suelos representativo (Figuras 2-4).



Figura 7. Muestreo de densidad aparente de suelo con cilindro de volumen de 100 cm^3 a diferentes profundidades (0-20 cm, 20-40 cm, y 40-100 cm).

3.2.3 Muestreo del piso forestal

En cada parcela, se recolectaron muestras del piso forestal que consideraron el muestreo del horizonte orgánico en 10 puntos (submuestras) utilizando un cilindro metálico de 25 cm de diámetro (Figura 8). En cada punto de muestreo del piso forestal se separó la hojarasca, que incluye acículas de pino en todos los estados de descomposición, y los residuos gruesos más grandes, como ramas y madera muerta.



Figura 8. Cilindro donde se recolectaron las muestras del horizonte orgánico.

Las 10 muestras recolectadas de cada parcela fueron trasladadas al Laboratorio de Suelos (LISAB), donde inicialmente se sometieron a un secado en horno a una temperatura de 65°C por 48 horas. Seguidamente, se cuantificó y registró individualmente el peso seco de cada muestra (10 registros por cada parcela de 1000 m² muestreada). Las muestras secas, posteriormente, se mezclaron y homogeneizaron para formar una muestra compuesta representativa de la parcela. Esta muestra compuesta fue sometida a un proceso de molienda utilizando un molino de hojas, para luego ser tamizada empleando una malla de 200 µm. A partir de esta muestra procesada, se extrajeron alícuotas con un rango de peso de 1 a 3 gramos, que posteriormente se depositaron en un crisol. Este procedimiento tuvo como finalidad evaluar la contaminación del suelo mediante calcinación a una temperatura de 500°C durante 8 horas. El propósito de este

proceso era la eliminación de los componentes orgánicos, conservando únicamente las cenizas, considerando el método DAFB (Dry Ash Free Basis) para determinar el peso de las cenizas, permitiendo así obtener la cantidad de materia orgánica presente. Adicionalmente, se extrajo y molió una alícuota de 5 gramos de la muestra compuesta para el análisis de carbono elemental, utilizando un equipo IRMS (espectrómetro de masas), con el objetivo de determinar la composición de carbono presente en la muestra.

3.3 Estimaciones de carbono de cada componente

3.3.1 Estimación de carbono de la biomasa aérea

Después de obtener la biomasa aérea total de cada parcela, se procedió a calcular el contenido de carbono. Este cálculo se realizó multiplicando la biomasa aérea total por una fracción de carbono de 0.47 (McGroddy et al., 2004):

$$CBA = B_{At} * CF \quad (4)$$

Donde, CBA es el carbono de la biomasa aérea de cada parcela, B_{At} es la biomasa aérea total en $Mg\ ha^{-1}$, CF es la fracción de carbono de 0.47

Luego, se calculó el promedio del contenido de carbono en la biomasa aérea de las tres parcelas evaluadas, lo que permitió estimar el nivel de carbono presente en la biomasa aérea de cada sitio.

3.3.2 Estimación de carbono de la biomasa subterránea (raíces)

Después de obtener la biomasa subterránea de cada parcela, se procedió a calcular el contenido de carbono. Este cálculo se realizó siguiendo los mismos pasos que en la estimación de carbono de biomasa aérea:

$$CBS = B_{St} * CF \quad (5)$$

Donde, CBS es el carbono de la biomasa subterránea de cada parcela, B_{St} es la biomasa subterránea en $Mg\ ha^{-1}$, CF es la fracción de carbono de 0.47

Luego, se calculó el promedio del contenido de carbono en la biomasa subterránea de las tres parcelas evaluadas, lo que permitió estimar el nivel de carbono presente en la biomasa subterránea de cada sitio.

3.3.3 Estimación de carbono del suelo mineral

Para estimar el carbono almacenado en las diferentes profundidades del suelo mineral (0-20 cm, 20-40 cm, y 40-100 cm) en cada parcela, se utilizó la ecuación:

$$C_{SM} = \sum_{i=1}^3 \frac{C_i}{100} * BD_i * \frac{SLT_i}{100} \quad (6)$$

Donde, C_{SM} es el carbono del suelo mineral en $Mg\ m^{-2}$, C_i representa la concentración de carbono en % en un determinado espesor asociado a la profundidad i del suelo, BD_i es la densidad aparente del espesor asociado a la profundidad i del suelo ($Mg\ m^{-3}$), SLT_i es el espesor asociado a la profundidad i de suelo (cm).

Posteriormente, se extrapolo el contenido de carbono a diferentes profundidades del suelo de $Mg\ m^{-2}$ a $Mg\ ha^{-1}$ para estandarizar las medidas y facilitar las comparaciones y análisis a mayor escala. Considerando que una hectárea equivale a 10,000 m^2 , se multiplicó el contenido de carbono por 10,000, proyectando así los datos a una escala de hectárea. Este procedimiento permitió expresar el contenido de carbono del suelo en términos de $Mg\ ha^{-1}$.

Finalmente, se calculó el promedio del contenido de carbono en el suelo mineral de las tres parcelas evaluadas para cada nivel de profundidad, lo que permitió

determinar el contenido de carbono específico por profundidad en cada sitio. Sumando estos contenidos de carbono por cada profundidad en cada predio, se obtuvo el total de carbono almacenado en el suelo mineral a nivel de cada sitio.

3.3.4 Estimación de carbono del piso forestal

Para la estimación del carbono almacenado en el piso forestal (hojarasca y residuos) en cada parcela, se utilizó la siguiente ecuación:

$$C_{PF} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{100} * PS_i \quad (7)$$

Donde, C_{PF} es el carbono del piso forestal a nivel de parcela en $Mg \text{ ha}^{-1}$, C_i representa la concentración de carbono en % del piso forestal (hojarasca y residuos), PS_i Peso seco es el promedio del peso de las submuestras del piso forestal de la parcela (hojarasca y residuos) en $Mg \text{ ha}^{-1}$.

Luego, se calculó el promedio del contenido de carbono en el piso forestal de las tres parcelas evaluadas, lo que permitió estimar el nivel de carbono presente en piso forestal de cada sitio.

3.4 Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos recopilados se realizó mediante el software RStudio (4.2.2). Inicialmente, se efectuó un análisis de estadística descriptiva, que proporcionó un resumen para explorar las variables de interés, incluyendo el diámetro a la altura del pecho (dap) y la altura total de los árboles. Este análisis descriptivo incluyó la media, desviación estándar, y los valores mínimos y máximos, ofreciendo una visión general de la distribución y variabilidad de los datos en cada sitio de estudio.

Para comparar los stocks de carbono entre distintos sitios, se empleó el análisis de varianza (ANOVA), con un nivel de confianza del 95% y un umbral de significancia de $p < 0.05$. Además, se realizaron análisis de correlación y regresión para evaluar las relaciones entre la productividad de las plantaciones y el carbono almacenado en la biomasa aérea, subterránea, suelo mineral y piso forestal. Los coeficientes de correlación ayudaron a cuantificar la fuerza y dirección de estas relaciones, seguidos de análisis de regresión lineal para modelar y predecir el stock de carbono basado en variables predictoras.

IV. RESULTADOS

4.1 Análisis descriptivo de los sitios

En la Tabla 5 se presentan los parámetros descriptivos de los árboles, donde se observó que el sitio Ramadilla presentaba el mayor DAP medio de 41.07 cm, mientras que el sitio Montpellier destacaba por tener la altura total media más elevada, con 36.85 metros. En cuanto a la variabilidad, medida por la desviación estándar, Ramadilla mostró mayor dispersión tanto en DAP como en altura total, lo que indica una mayor heterogeneidad en el tamaño de los árboles en comparación con los otros sitios. El rango de medidas, identificado por los valores mínimos y máximos, reflejan la diversidad dimensional de los árboles dentro de cada sitio. Los predios Santa Lidia y Ramadilla muestran los valores máximos más altos para DAP y altura total, respectivamente, sugiriendo la presencia de árboles particularmente grandes en estos sitios.

Tabla 5. Resumen de las estadísticas descriptivas para las variables medidas en los diferentes sitios de estudiados.

	Variables	H. San Luis	Sta. Lidia	Montpellier	Ramadilla	Sta. Teresa
DAP (cm)	N	105	125	126	96	137
	Media	35.57	33.75	34.77	41.07	38.15
	Des. Estándar	6.19	7.12	6.15	8.69	6.93
	Mínimo	19.90	18.30	19.60	17.60	22.80
	Máximo	49.80	53.70	51.40	58.10	53.20
Altura Total (m)	N	105	125	126	96	137
	Media	29.21	32.05	36.85	30.04	35.62
	Des. Estándar	5.25	5.69	5.49	5.61	4.13
	Mínimo	18.20	17.60	22.30	14.10	25.00
	Máximo	38.70	46.60	47.50	38.30	45.00

4.2 Carbono de la biomasa a nivel de sitio

4.2.1 Carbono de la biomasa aérea

El análisis, realizado con un nivel de significancia de $p < 0.05$, reveló que el predio Santa Teresa (ST), con una productividad de $644 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, registró el mayor stock de carbono en la biomasa aérea, alcanzando 178.1 Mg ha^{-1} , sobrepasando ampliamente la media de 137 Mg ha^{-1} marcada por la línea discontinua roja (Figura 9). En contraste, el sitio Hijueta de San Luis (HI), con una productividad de $356 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, mostró el stock de carbono más bajo en biomasa aérea con 99.5 Mg ha^{-1} , seguido por Santa Lidia (SL), con una productividad de $430 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, que presentó un valor de stock de carbono de 120.7 Mg ha^{-1} . Los sitios Montpellier

(MO) y Ramadilla (RA), con productividades de $512 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $549 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, presentaron stocks de carbono cercanos a la media los cuales fueron de 150 Mg ha^{-1} y 175 Mg ha^{-1} respectivamente.

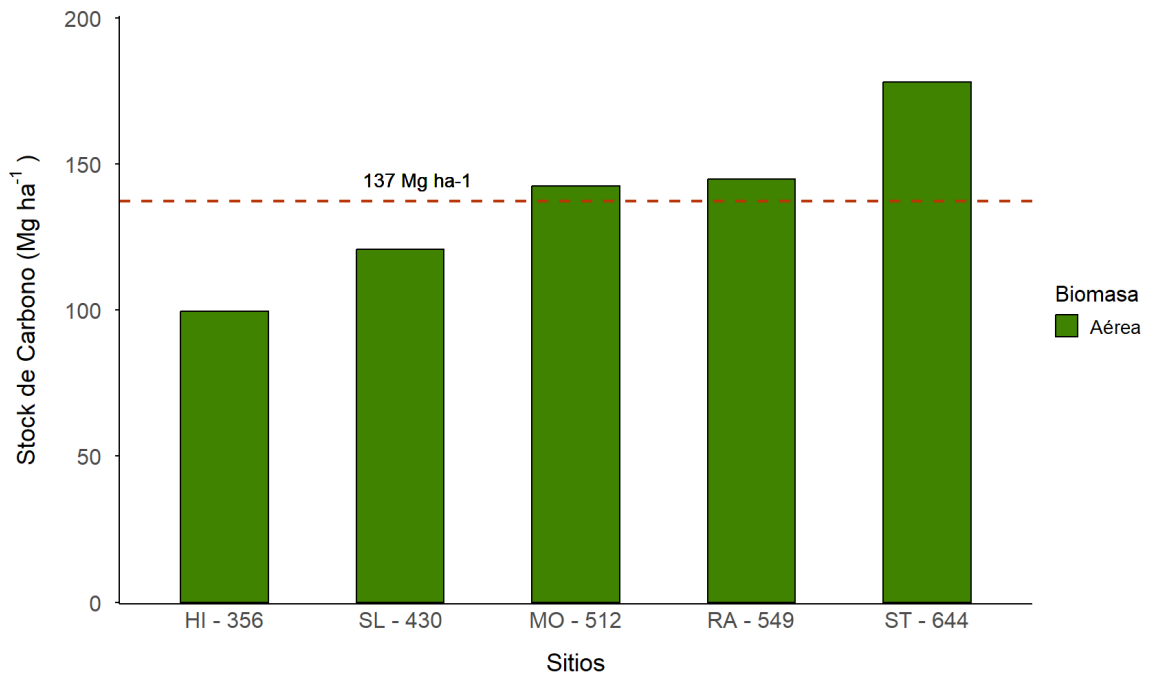


Figura 9. Representación gráfica del stock de carbono de la biomasa aérea en diferentes sitios representados por abreviaturas y volumen precosecha ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$). La línea punteada indica la media del carbono en biomasa aérea de los sitios.

4.2.2 Carbono de la biomasa subterránea (raíces)

Para el análisis del carbono contenido en la biomasa subterránea realizado con un nivel de significancia de $p < 0.05$, se observó que los contenidos de carbono son relativamente similares entre los sitios (Figura 10).

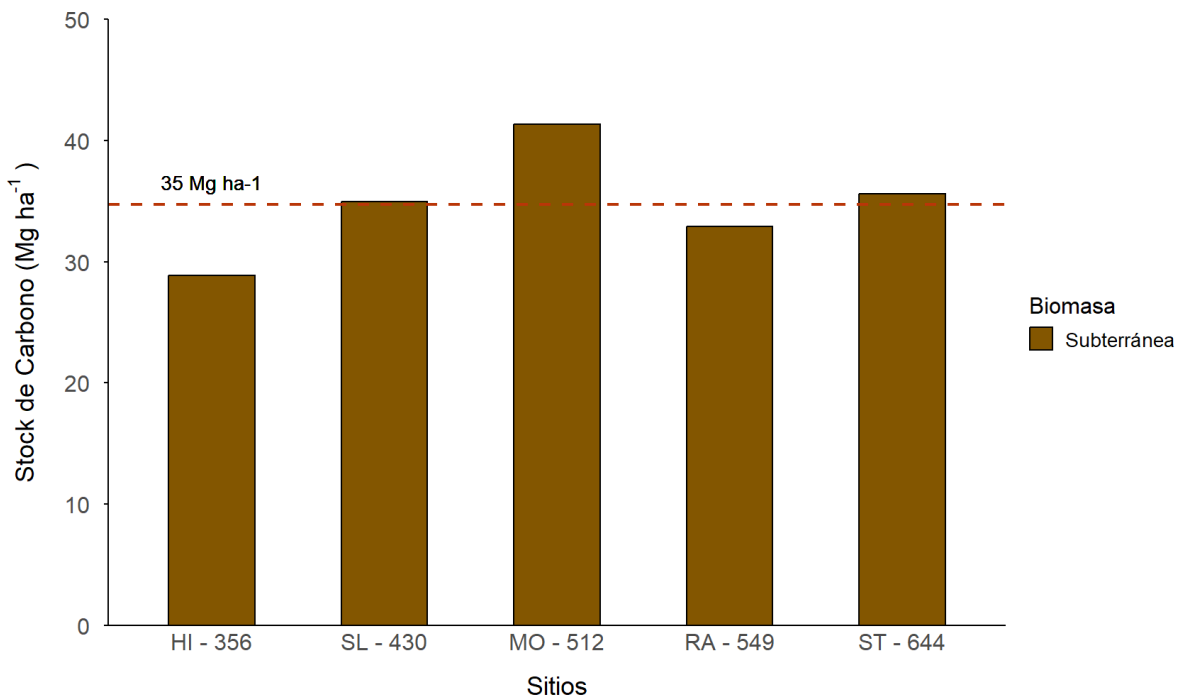


Figura 10. Representación gráfica del stock de carbono de la biomasa subterránea en diferentes sitios representados por abreviaturas y volumen precosecha ($m^3 ha^{-1}$). La línea punteada indica la media del carbono en biomasa subterránea de los sitios.

Los valores específicos de carbono almacenado por sitio fueron los siguientes: Hijueta de San Luis registró 28.9 Mg ha⁻¹, Santa Lidia obtuvo 35.1 Mg ha⁻¹, Montpellier alcanzó 41.3 Mg ha⁻¹, Ramadilla tuvo 32.9 Mg ha⁻¹ y Santa Teresa reportó 35.6 Mg ha⁻¹. La media del carbono en la biomasa subterránea, representada por la línea discontinua roja en el gráfico, fue establecida en 35 Mg ha⁻¹, donde los sitios Santa Lidia, Montpellier y Santa Teresa excedieron este promedio.

4.2.3 Carbono de la biomasa total (aérea y subterránea)

Para el carbono de la biomasa total, los resultados mostraron que el sitio Santa Teresa, registró el mayor stock de carbono en la biomasa total, alcanzando 213.7 Mg ha⁻¹, lo que excedía significativamente la media de 172 Mg ha⁻¹, indicado por la línea discontinua roja (Figura 11). En contraste, el sitio Hijueta de San Luis, mostró el stock de carbono más bajo en biomasa total con 128.4 Mg ha⁻¹, seguido por Santa Lidia que presentó un valor de stock de carbono de 155.7 Mg ha⁻¹. Los sitios Montpellier y Ramadilla, presentaron stocks de carbono superiores a la media los cuales fueron de 183.9 Mg ha⁻¹ y 177.8 Mg ha⁻¹ respectivamente.

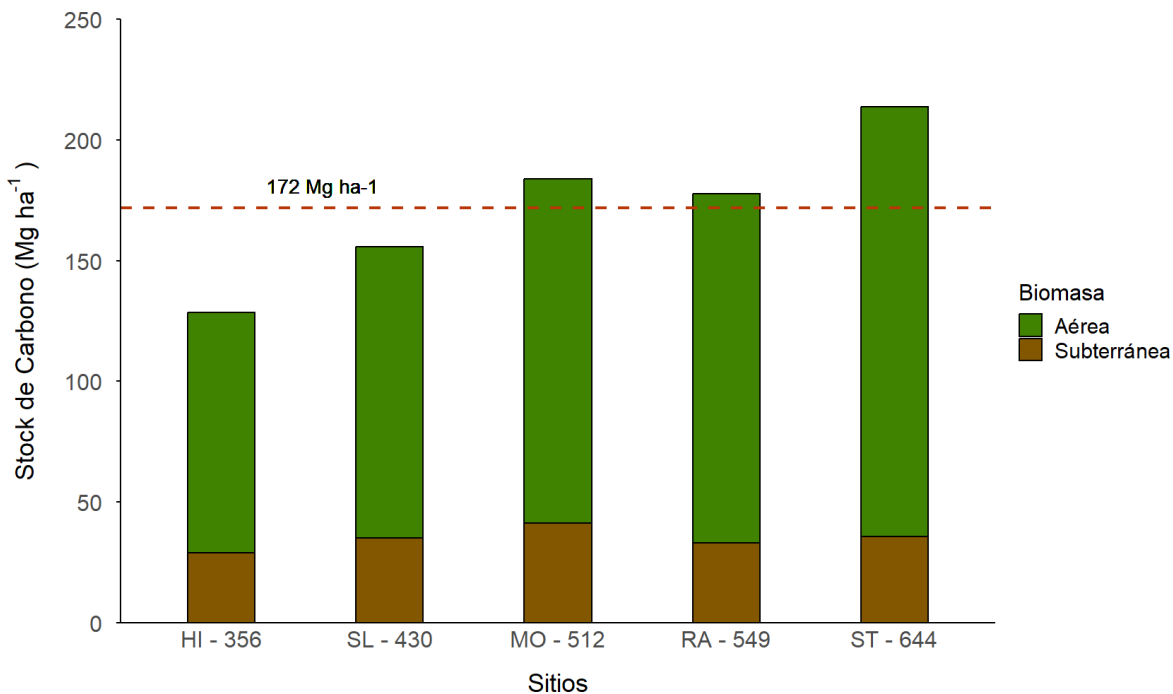


Figura 11. Representación gráfica del stock de carbono de la biomasa total en diferentes sitios representados por abreviaturas y volumen precosecha (m³ ha⁻¹). La línea punteada indica la media del carbono en biomasa total de los sitios.

4.2.4 Relación entre el volumen precosecha y el stock de carbono de la biomasa total

La regresión lineal realizada para explicar la relación entre el volumen precosecha y el carbono almacenado en la biomasa total del sitio evidenció una asociación significativa y fuerte. El modelo ajustado, representado por la ecuación $CBT = 26.82 + 0.29 * VOL$, donde CBT es el carbono de la biomasa total en Mg ha⁻¹ y VOL es el volumen en m³ ha⁻¹, demostró que por cada aumento

unitario en el volumen precosecha, se espera un incremento de 0.29 Mg ha⁻¹ en el carbono de la biomasa total (Figura 12).

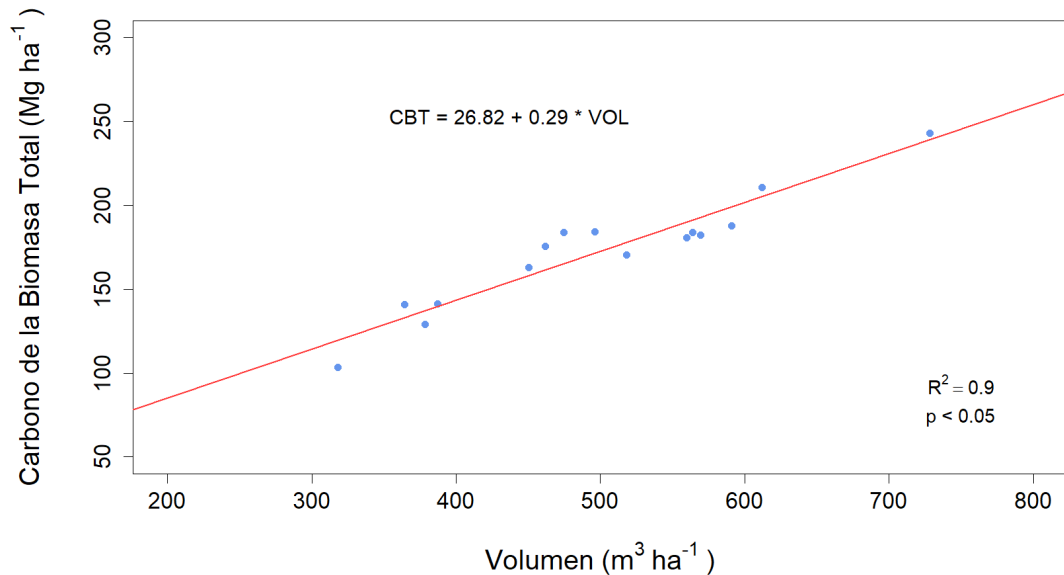


Figura 12. Relación entre volumen precosecha y stock de carbono acumulado en la biomasa total (aérea y subterránea) de los sitios.

Este modelo mostró un R² de 0.90, indicando que aproximadamente el 90% de la variabilidad en el carbono de la biomasa total se puede explicar por la variabilidad en el volumen precosecha. Además, el nivel de significancia de $p < 0.05$ confirma la significancia estadística de la relación. La pendiente positiva de la regresión implica que a medida que el volumen precosecha aumenta, también lo hace el stock de carbono de la biomasa total.

4.2.5 Relación entre el stock de carbono de la biomasa total observado y estimado

Se procedió a validar la precisión del modelo de regresión empleado para estimar el carbono de la biomasa total mediante la comparación con los valores observados. La regresión lineal resultante mostró una ecuación de $y = 17.25 + 0.9x$, donde “y” representa el carbono de la biomasa total estimado y “x” el carbono de la biomasa total observado, ambos en Mg ha^{-1} .

El análisis reveló una correlación relevante entre los valores estimados y observados, con un R^2 de 0.90, lo que indica que el 90% de la variabilidad en los datos observados fue capturada por el modelo estimado. El nivel de significancia $p < 0.05$ confirma que la relación es estadísticamente significativa. La pendiente de la regresión cercana a 1 (0.9), indica que por cada unidad de incremento en el carbono observado de la biomasa total, se espera un aumento casi proporcional en el carbono estimado por el modelo (Figura 13). Este fuerte grado de correlación valida la eficacia del modelo de regresión utilizado en la estimación del carbono de la biomasa total en los sitios.

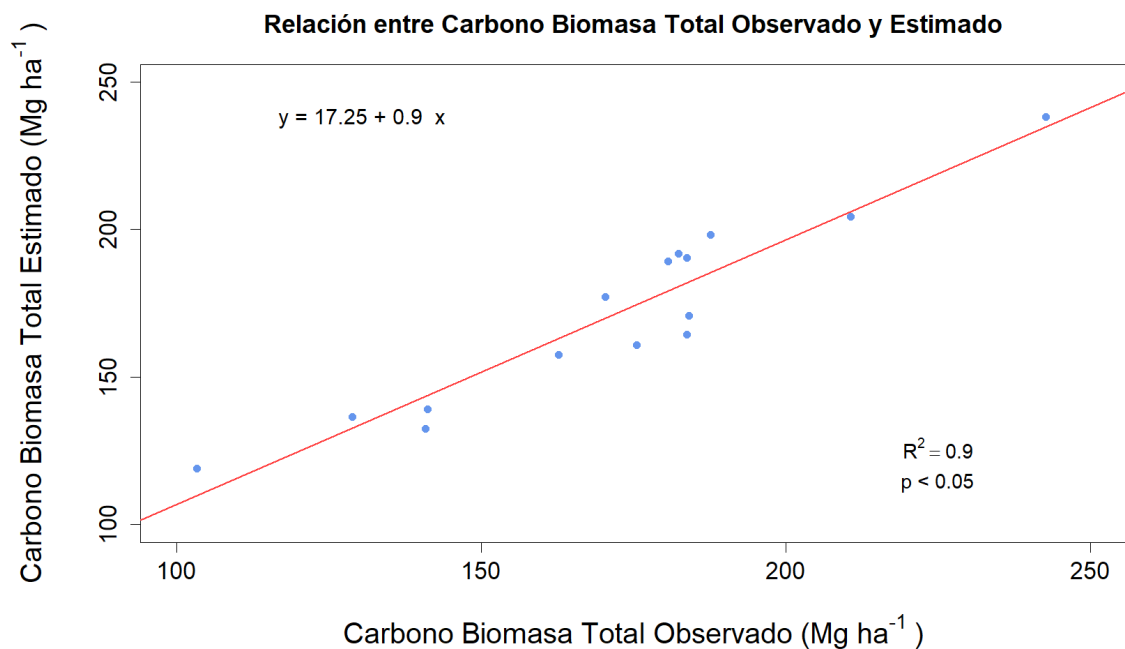


Figura 13. Relación entre carbono de biomasa total observado y carbono de biomasa total estimado.

4.3 Carbono del suelo mineral a nivel de sitio

El análisis realizado sobre el carbono en suelos minerales a una profundidad de 1 metro, y con un nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$), reveló que los sitios con volúmenes precosecha más elevados, como Montpellier ($512 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), Ramadilla ($549 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) y Santa Teresa ($644 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), mostraron niveles de carbono en el suelo superiores a la media establecida de 285 Mg ha^{-1} . En detalle, Ramadilla presentó la concentración más alta con 315.0 Mg ha^{-1} , seguido de Montpellier con 304.7 Mg ha^{-1} y Santa Teresa con 302.1 Mg ha^{-1} , destacando su capacidad

en el secuestro de carbono (Figura 14). Por otro lado, los sitios Hijueta de San Luis ($356 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) y Santa Lidia ($430 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), registraron los valores más bajos, con 241.9 Mg ha^{-1} y 259.7 Mg ha^{-1} respectivamente, no alcanzando el promedio mencionado.

La Figura 15 proporciona una representación visual de la distribución porcentual del carbono en el suelo mineral a distintas profundidades en cada uno de los sitios estudiados. En todos los sitios, se observa que la mayor proporción de carbono se encuentra en la capa superficial del suelo (0-20 cm), seguida por la capa intermedia (20-40 cm), y la capa más profunda (40-100 cm) contiene la menor proporción de carbono. En el sitio Hijueta de San Luis la concentración de carbono en la capa superficial fue del 29.3%, mientras que en las profundidades de 20-40 cm y 40-100 cm las proporciones fueron del 20.9% y 49.8%, respectivamente. En Santa Lidia los porcentajes correspondientes fueron del 30.9%, 23.2% y 45.9%. En Montpellier la distribución de carbono fue del 28.4% en la capa superficial, 22.1% en la intermedia y 49.5% en la más profunda. Ramadilla presentó 27.3% en la capa de 0-20 cm, 24.1% en la de 20-40 cm y 48.6% en la de 40-100 cm. Finalmente, en Santa Teresa se registraron porcentajes de 26.9%, 20.8% y 52.3% en las capas de 0-20 cm, 20-40 cm y 40-100 cm, respectivamente.

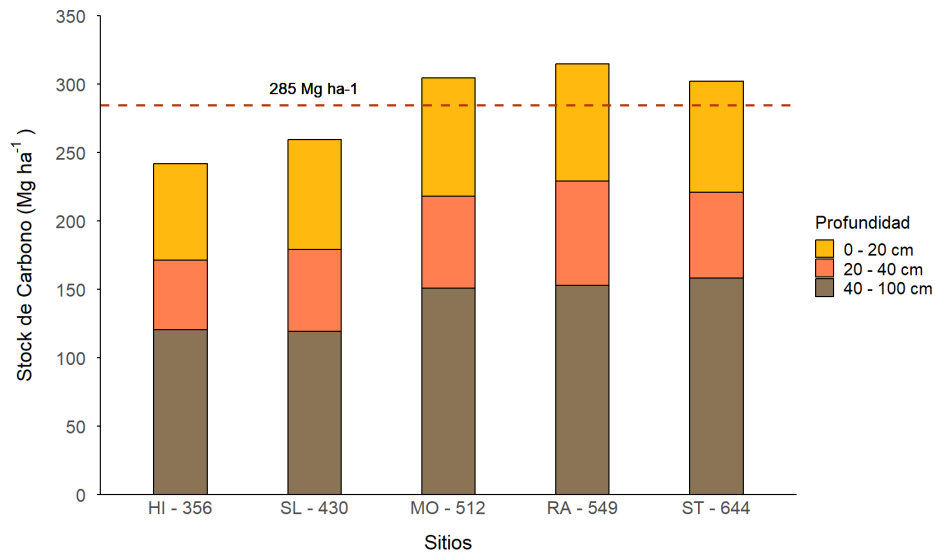


Figura 14. Representación gráfica del stock de carbono del suelo mineral a profundidad de 1 metro en diferentes sitios representados por abreviaturas y volumen precosecha (m³ ha⁻¹). La línea punteada indica la media del carbono en el suelo mineral de los sitios.

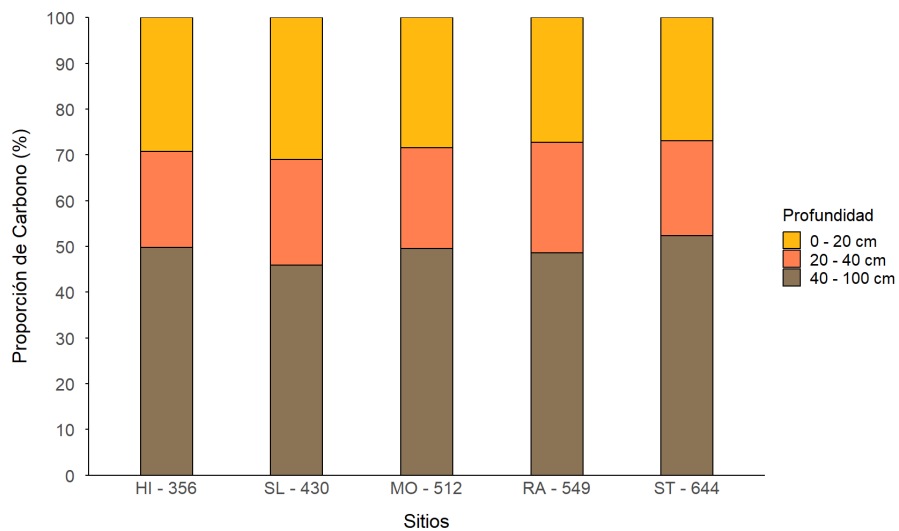


Figura 15. Representación gráfica de las proporciones de carbono del suelo mineral en distintas profundidades en los diferentes sitios estudiados.

4.3.1 Relación entre el volumen precosecha y el carbono del suelo mineral

La correlación entre el volumen precosecha y el contenido de carbono en el suelo mineral se cuantificó mediante un análisis de regresión lineal, el cual demostró una asociación estadísticamente significativa entre estas variables. La ecuación derivada del modelo, $CSM = 163.42 + 0.24 * VOL$, explica que por cada metro cúbico adicional en el volumen precosecha, el carbono del suelo mineral (CSM) aumenta 0.24 Mg ha^{-1} (Figura 16).

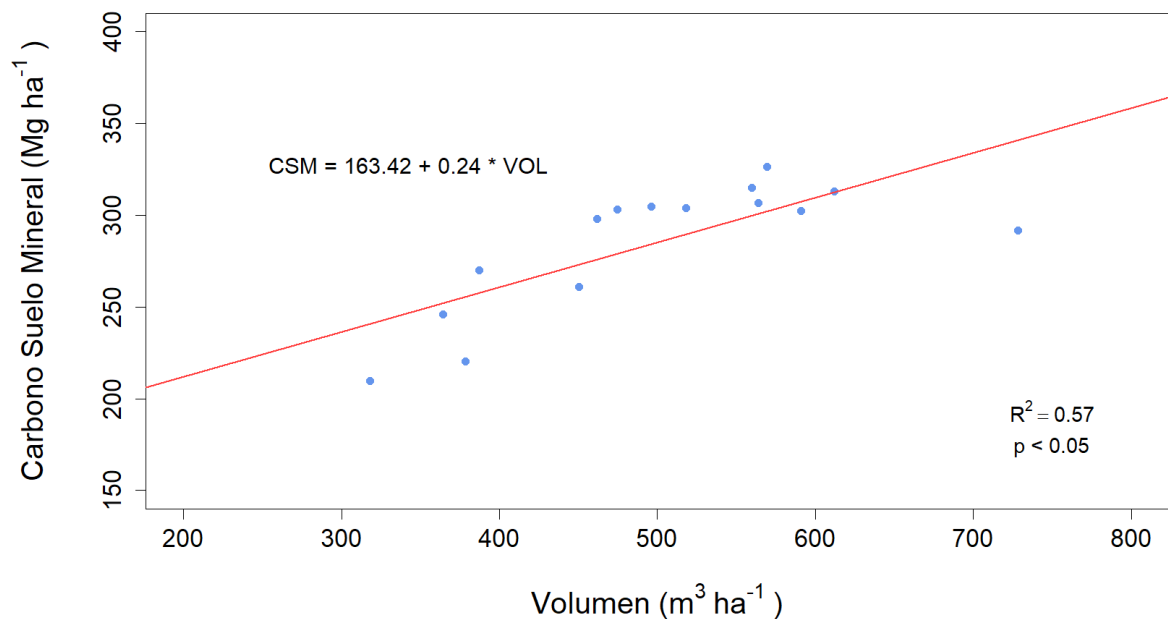


Figura 16. Relación entre volumen precosecha y stock de carbono acumulado en el suelo mineral a una profundidad de 1 metro en los sitios evaluados.

El R^2 de 0.57 sugiere que aproximadamente el 57% de la variabilidad del CSM se puede atribuir a las diferencias observadas en el volumen precosecha. Este resultado es estadísticamente significativo, como lo evidencia un valor de $p < 0.05$. La pendiente positiva de la ecuación refleja una tendencia al incremento del CSM con el aumento del volumen precosecha.

4.3.2 Relación entre el carbono del suelo mineral observado y estimado

Se procedió a validar la precisión del modelo de regresión empleado para estimar el carbono del suelo mineral mediante la comparación con los valores observados. La regresión lineal resultante presentó la ecuación $y = 122.74 + 0.56x$, donde 'y' representa el carbono del suelo estimado y 'x' el observado, ambos Mg ha^{-1} . Este modelo evidenció una correlación moderada, con un R^2 de 0.57 y un valor de $p < 0.05$, lo indica que la relación entre las mediciones observadas y estimadas es estadísticamente significativa. La pendiente de la regresión (0.56) sugiere que, por cada Mg adicional de carbono en el suelo observado, el modelo estima un aumento de más de la mitad de un Mg en el carbono del suelo (Figura 17). Aunque el modelo refleja una relación positiva, la pendiente inferior a 1 indica que el modelo tiende a subestimar el carbono del suelo mineral en comparación con las mediciones observadas.

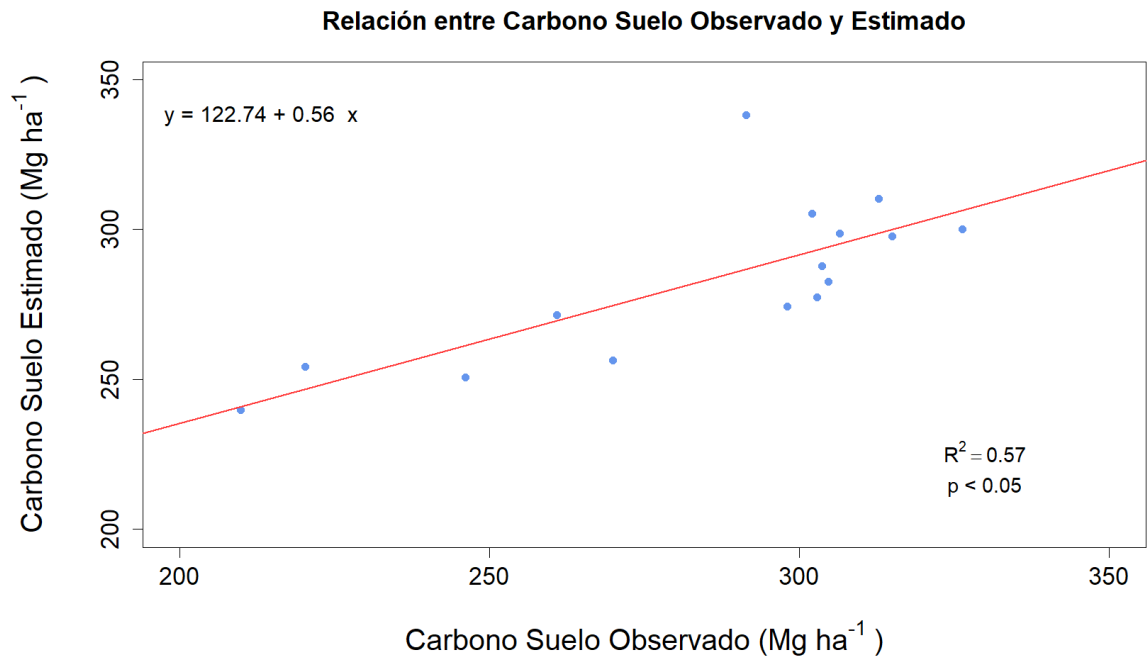


Figura 17. Relación entre carbono del suelo mineral observado y carbono del suelo mineral estimado.

4.4 Carbono del piso forestal a nivel de sitio

En la evaluación del carbono contenido en el piso forestal se analizó su distribución en cinco sitios con distintos niveles de productividad, los datos recopilados indicaron que no existían diferencias significativas en el carbono almacenado entre los sitios con menor y mayor productividad de volumen precosecha (Figura 18). Se estableció que el sitio Hijueta de San Luis tenía un menor contenido de carbono en piso forestal de 10.7 Mg ha⁻¹, mientras que Santa Lidia registró la mayor concentración con 18.4 Mg ha⁻¹. Montpellier y Ramadilla

presentaron contenidos intermedios de 14.5 Mg ha^{-1} y 12.2 Mg ha^{-1} respectivamente, y Santa Teresa mostró un valor cercano al promedio con 13.8 Mg ha^{-1} . Esto sugiere que la capacidad de secuestro de carbono en el piso forestal no se correlaciona directamente con el volumen precosecha de los sitios.

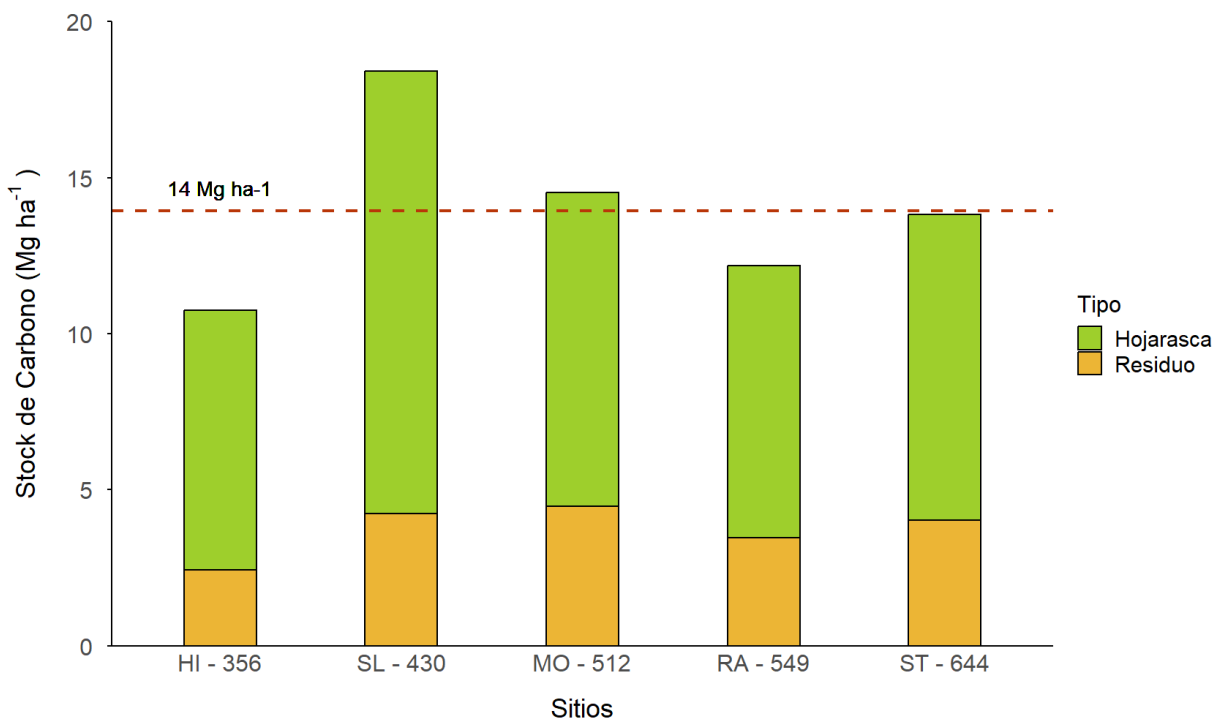


Figura 18. Representación gráfica del stock de carbono del piso forestal en diferentes sitios representados por abreviaturas y volumen precosecha ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$). La línea punteada indica la media del carbono en el piso forestal de los sitios.

4.4.1 Relación entre el volumen precosecha y el carbono del piso forestal

La correlación entre el volumen precosecha y el contenido de carbono en el piso forestal se cuantificó mediante un análisis de regresión lineal. La ecuación de regresión, $CPF = 13.14 + 0.0016 * VOL$, con CPF representando el carbono del piso forestal en $Mg\ ha^{-1}$ y VOL el volumen precosecha en $m^3\ ha^{-1}$, sugiere un incremento irrelevante en el carbono del piso forestal por cada unidad de aumento en el volumen precosecha (Figura 19).

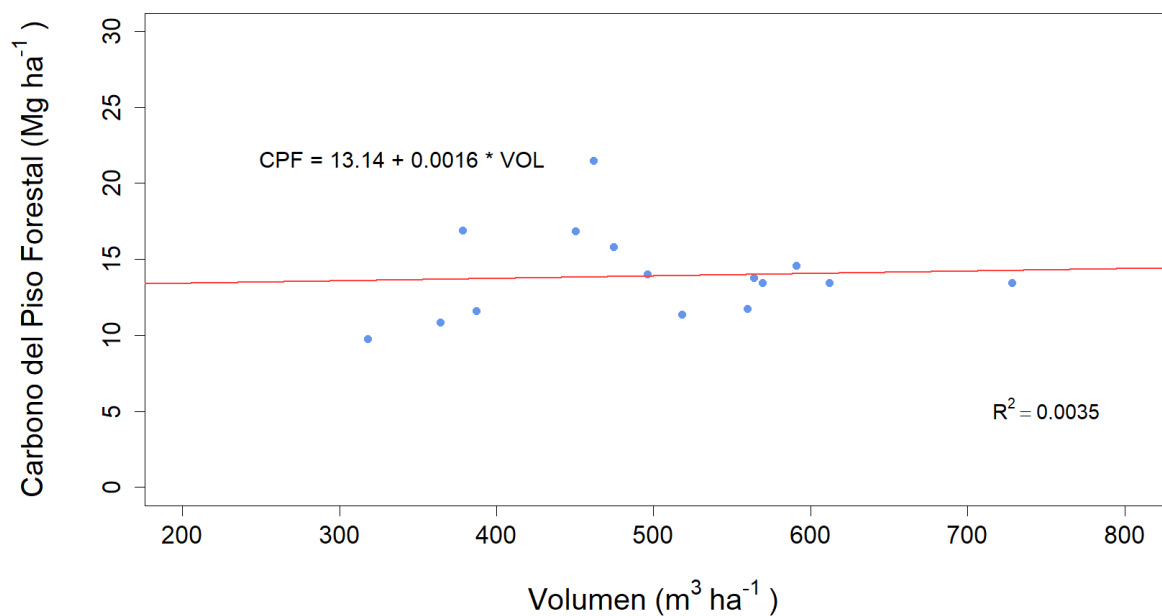


Figura 19. Relación entre volumen precosecha y stock de carbono acumulado en el piso forestal en los sitios evaluados.

El R^2 de 0.0035 indica una relación muy débil entre las variables, con menos del 1% de la variabilidad en el carbono del piso forestal explicada por el volumen precosecha. Este resultado es corroborado por un nivel de significancia inusualmente alto de 7.71, lo que indica que la relación no es estadísticamente significativa. La pendiente nula de la regresión (0.0016) refleja la debilidad de la relación entre el volumen precosecha y el carbono almacenado en el piso forestal. Esto quiere decir que el volumen precosecha no es un predictor confiable del carbono del piso forestal.

4.5 Stock del carbono total a nivel de sitio

Finalmente, se cuantificó el stock total de carbono en los distintos sitios, incorporando el carbono en la biomasa aérea (CBA), subterránea (CBS), en el suelo mineral (CSM) y en el piso forestal (CPF). Los resultados revelaron una considerable variabilidad en el almacenamiento total de carbono entre los sitios, con el sitio Santa Teresa que presentó una acumulación total de carbono de 529.6 Mg ha^{-1} , alcanzando el stock más alto, superando ampliamente la media de 471 Mg ha^{-1} . Los sitios Ramadilla y Montpellier, con stocks de carbono de 504.9 Mg ha^{-1} y 503.1 Mg ha^{-1} respectivamente, también superaron la media, destacando la correlación entre la productividad dado por el volumen precosecha y el potencial de secuestro de carbono (Figura 20). Por otro lado, los sitios Hijuela de San Luis y Santa Lidia, con productividades menores, almacenaron

cantidades de carbono inferiores a la media, con stocks de 381.1 Mg ha⁻¹ y 433.8 Mg ha⁻¹, demostrando cómo la variación en el crecimiento de la plantación puede influir en la capacidad de almacenamiento de carbono. Los componentes de este almacenamiento total indicaron que, mientras el suelo mineral es una de las fuentes principales de carbono, una porción sustancial también se acumula en la biomasa aérea y subterránea, y en menor medida en el piso forestal.

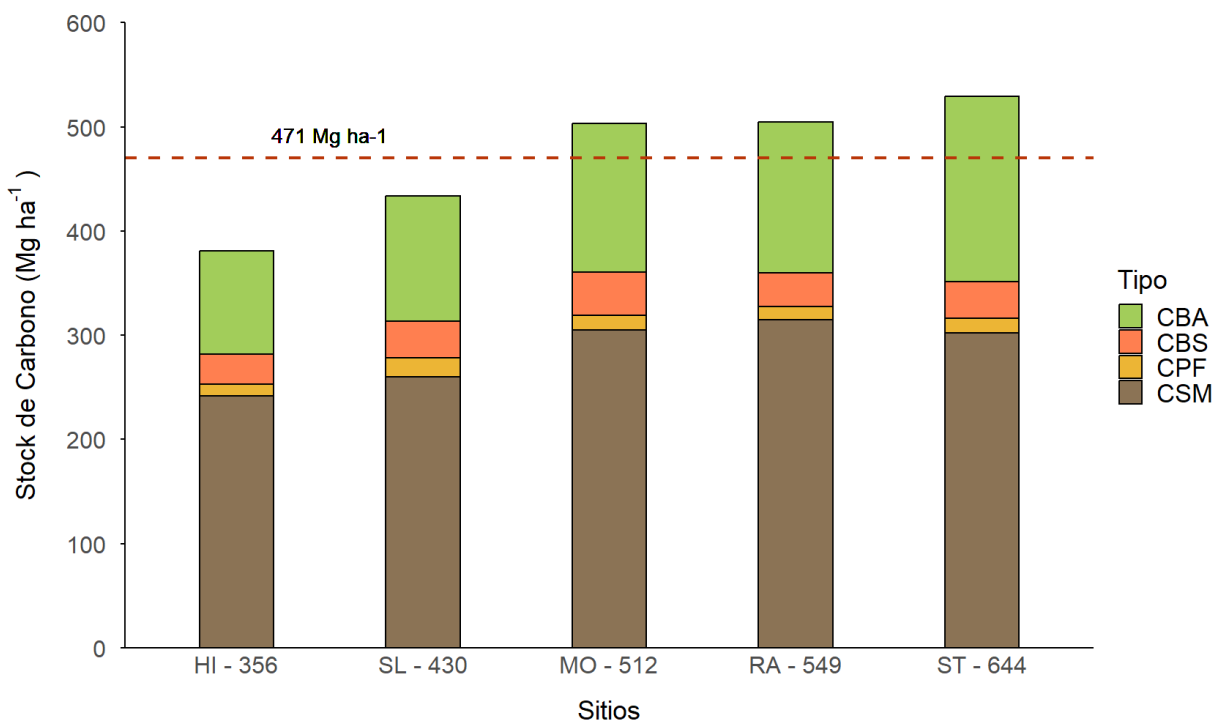


Figura 20. Representación gráfica del stock total de carbono en los diferentes sitios representados por abreviaturas y volumen precosecha (m³ ha⁻¹). La línea punteada indica la media del stock total de carbono de los sitios.

En cuanto a la composición del stock de carbono total a nivel de sitio, se determinaron los porcentajes de los diferentes componentes del carbono (Figura 21). En el sitio Hijuela de San Luis, el CSM constituyó la mayor proporción con un 63.5%, seguido por el CBA con un 26.1%, el CBS con un 7.6%, y el CPF con un 2.8%. En Santa Lidia, el CSM representó un 59.9%, el CBA un 27.8%, el CBS un 8.1%, y el CPF un 4.2%. En Montpellier se mostró una distribución similar, con el CSM formando un 60.6% del stock, el CBA un 28.3%, el CBS un 8.2%, y el CPF un 2.9%. El sitio Ramadilla presentó un 62.4% de CSM, un 28.7% de CBA, un 6.5% de CBS y un 2.4% de CPF. Finalmente, en Santa Teresa el CSM fue el 57.0%, el CBA el 33.6%, el CBS el 6.7%, y el CPF el 2.6%. Estos resultados indican que el carbono en suelo mineral constituye la mayor parte del stock de carbono en todos los sitios, mientras que el carbono en piso forestal representa la menor proporción. La biomasa aérea y subterránea también contribuyen significativamente al almacenamiento de carbono, con porcentajes que reflejan la estructura dasométrica de cada sitio.

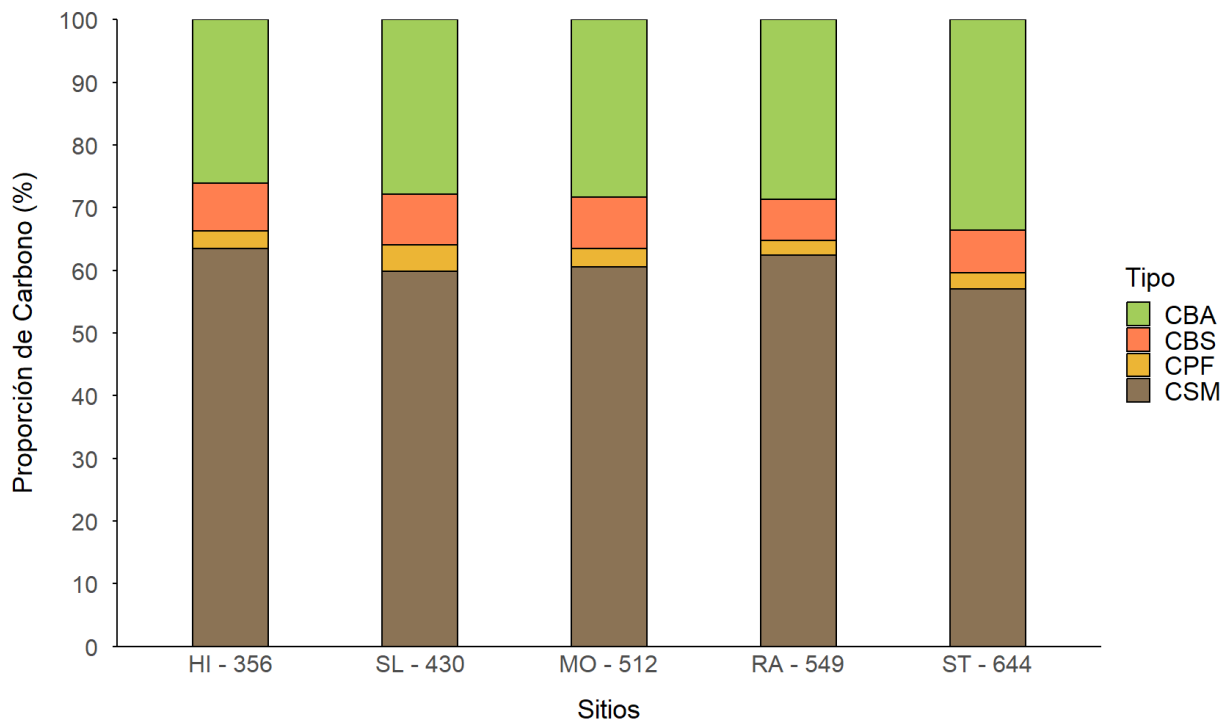


Figura 21. Representación gráfica de las proporciones de carbono total de los distintos componentes en los cinco sitios estudiados.

4.5.1 Relación entre el volumen precosecha y el stock de carbono total

El análisis estadístico implementado para evaluar la relación entre el volumen precosecha y el stock total de carbono se realizó mediante un modelo de regresión lineal. La ecuación resultante, $STC = 203.38 + 0.54 * VOL$, indica que el stock de total de carbono (SCT) aumenta en 0.54 Mg por cada metro cúbico adicional de volumen precosecha (Figura 22).

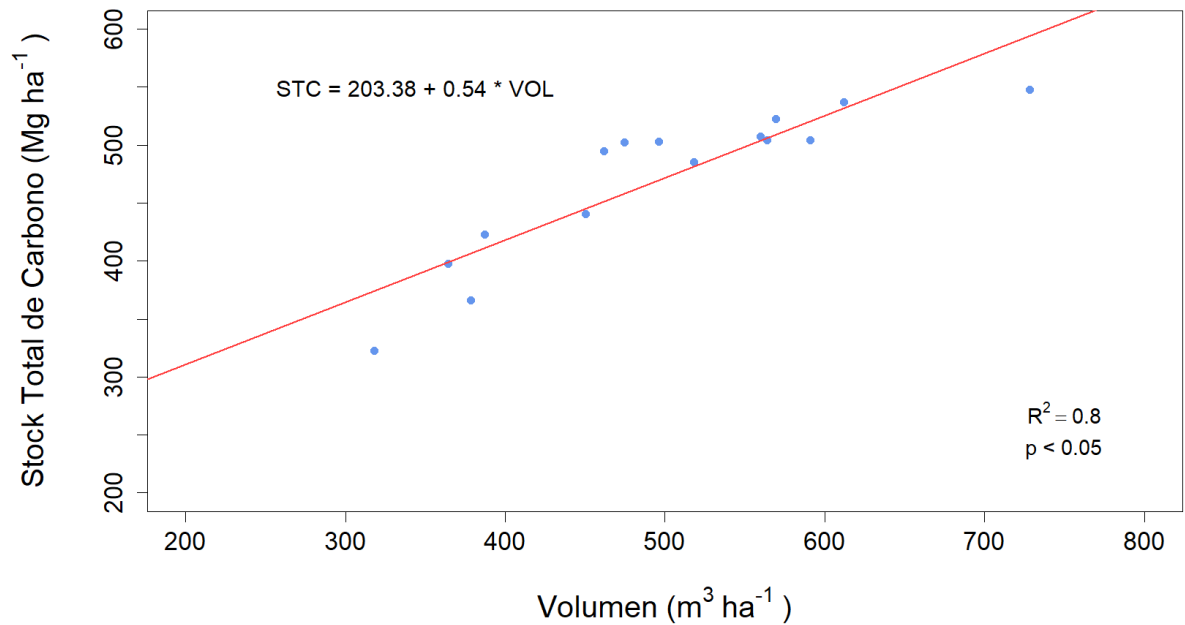


Figura 22. Relación entre volumen precosecha y stock total de carbono acumulado en los sitios evaluados.

Este modelo demostró una fuerte correlación, con un R^2 de 0.80, evidenciando que la variabilidad en el stock total de carbono puede ser explicada por las variaciones en el volumen precosecha. La significancia estadística de la relación se confirmó con un valor de $p < 0.05$. La pendiente de la regresión, 0.54, es indicativa de una relación directa y proporcional, a medida que aumenta el volumen precosecha, se espera un incremento correspondiente en el stock de carbono total.

4.5.2 Relación entre el stock de carbono total observado y estimado

La validación del modelo de regresión para el stock total de carbono se llevó a cabo a través de una regresión lineal que comparó los valores observados con los estimados por el modelo anterior. La ecuación resultante de esta regresión es $y = 93.43 + 0.8x$, donde 'y' es el stock de carbono total estimado y 'x' es el observado, ambos expresados en Mg ha^{-1} (Figura 23). Este modelo demostró una fuerte correlación entre las medidas observadas y las estimadas, con un R^2 de 0.80 y un valor de $p < 0.05$, lo que confirma la significancia estadística de esta relación. La pendiente de la regresión (0.8) sugiere que el modelo tiene una capacidad considerable para predecir el stock de carbono total basado en las mediciones observadas.

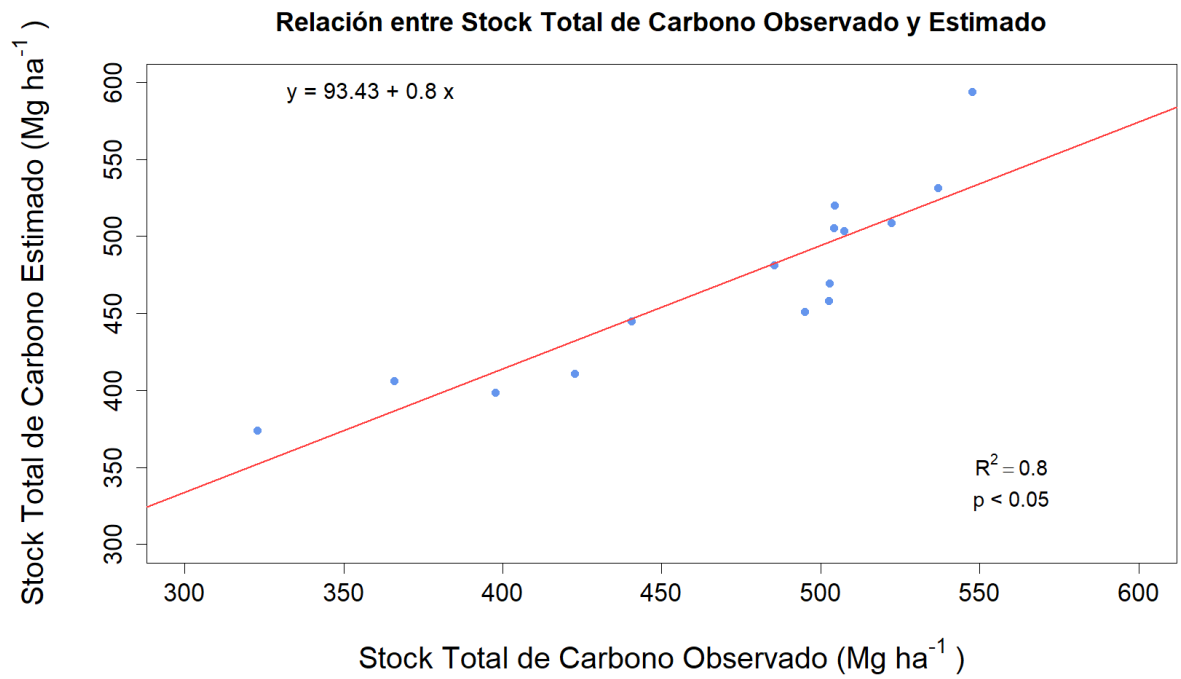


Figura 23. Relación entre el stock total de carbono observado y stock total de carbono estimado.

V. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos sobre la biomasa aérea mostraron que los sitios con un mayor volumen precosecha presentaron igualmente una mayor capacidad de captura de carbono en la biomasa aérea. El sitio de Santa Teresa, caracterizado por tener la productividad más alta con $644 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, destacó con el valor más alto, alcanzando los 178.1 Mg ha^{-1} , mientras que el valor más bajo se identificó en el sitio de Hijueta de San Luis con 99.6 Mg ha^{-1} . Además, es importante señalar que, en plantaciones intensivas, la acumulación de carbono en *Pinus radiata* puede disminuir debido a prácticas de manejo como las podas y raleos, que reducen la oferta fotosintética en el rodal, afectando negativamente su tasa de acumulación de carbono aéreo (Houghton, 2005).

Por otro lado, los valores de carbono almacenado en la biomasa subterránea variaron desde 28.9 Mg ha^{-1} en Hijueta de San Luis hasta 41.3 Mg ha^{-1} en Montpellier. La distribución del carbono en la biomasa subterránea se asocia al bajo nivel de biomasa radicular observado en estos sitios, lo que concuerda con investigaciones previas que indican que la proporción de la biomasa radicular respecto al total del árbol apenas alcanza un 20% (Snowdon et al., 2001). Además, estudios como el de Creighton et al. (2003) sugieren que suelos con mayores limitaciones promueven un incremento en la proporción de biomasa radicular en relación a la biomasa aérea. No obstante, en condiciones de óptima

disponibilidad nutricional, esta tendencia no se mantiene, permitiendo así una mayor distribución de energía hacia el crecimiento de la biomasa aérea. Esto podría ser la razón por la cual sitios de alta productividad, como Ramadilla y Santa Teresa, muestran una menor proporción de biomasa radicular y, consecuentemente, un menor almacenamiento de carbono subterráneo. Estos resultados resaltan la importancia de considerar ambos componentes de la biomasa, aérea y subterránea, para una evaluación completa del potencial de secuestro de carbono de las plantaciones forestales.

Los resultados relacionados con el carbono en suelos trumaos destacan la importancia de tomar en cuenta la profundidad del suelo al investigar el secuestro de carbono. Se ha observado que una proporción significativa del carbono se encuentra en las capas más superficiales del suelo. Cabe mencionar, que estos suelos originados de materiales volcánicos, albergan una mayor cantidad de carbono en comparación con otros tipos de suelos, especialmente en profundidades menores a 1 metro (James et al., 2014). La capacidad de los suelos para almacenar carbono en sus estratos más profundos es igualmente importante, ya que constituye un depósito de carbono de largo plazo que desempeña un papel fundamental en la mitigación del cambio climático. En términos de contribución al stock de carbono en el sitio, se encontró que los suelos minerales representan la mayor parte, con más de un 57% del total en todos los sitios evaluados. Esto concuerda con investigaciones como la de

Olmedo et al. (2020), que destacan que una fracción importante del stock total de carbono se encuentra en el suelo.

En relación con el análisis del carbono presente en el piso forestal, no se detectaron diferencias significativas entre los sitios de menor y mayor productividad, lo que indica que la capacidad de secuestro de carbono en este componente no tiene una correlación directa con el volumen precosecha. Los niveles de carbono medidos en el piso forestal mostraron una contribución menor al stock total de carbono en comparación con otros componentes del ecosistema forestal, representando solo un 4.2% en el sitio de Santa Lidia, el cual registró el mayor contenido de carbono en el piso forestal. Investigaciones anteriores realizadas por Olmedo (2020) revelan que el carbono contenido en el piso forestal fue significativamente menor al encontrado en otros componentes de carbono, con valores que oscilan entre el 3% y el 5% del total de carbono.

El stock total de carbono presentó una considerable variación entre los distintos sitios estudiados, con Santa Teresa registrando el valor más elevado, alcanzando los 529.6 Mg ha⁻¹. Al desglosar la composición del stock total de carbono, se observó que el carbono contenido en el suelo mineral representa la mayor proporción, seguido de cerca por la biomasa aérea y subterránea, y en una medida mucho menor, el carbono del piso forestal. Estos resultados resaltan la importancia de incorporar todos los componentes del sitio en el análisis para

determinar de manera precisa el potencial de secuestro de carbono de las plantaciones forestales.

En el contexto chileno, las investigaciones enfocadas en el contenido de carbono dentro de las plantaciones forestales han sido limitadas. Entre los estudios existentes, Espinosa et al. (2005) calcularon que el contenido promedio de carbono en los fustes de *Pinus radiata* sería de aproximadamente 55 Mg ha⁻¹. Por otro lado, Acuña et al. (2017) reportaron valores que oscilan entre 6.1 y 6.9 Mg ha⁻¹ para los residuos de cosecha de *Pinus radiata*, incluyendo hojas, ramillas, ramas y tallos no comerciales. Adicionalmente, un estudio de Bioenercel (2013) dedicado a estimar el contenido de carbono de la biomasa aérea de *Pinus radiata* a través de muestreos destructivos en las regiones de Ñuble y Biobío, arrojó un total de carbono en la biomasa aérea de 139.6 Mg ha⁻¹ en suelos de cenizas volcánicas recientes para rodales de entre 15 y 31 años. Estos resultados se asimilan con los valores obtenidos en los sitios estudiados, como es el caso de Montpellier con 142.5 Mg ha⁻¹ o Ramadilla con 144.9 Mg ha⁻¹.

Estudios internacionales también destacan una composición similar en cuanto al contenido de carbono en las plantaciones forestales, resaltando bajos niveles en el piso forestal y altos valores en la biomasa y en el suelo mineral. Por ejemplo, un estudio en Mozambique realizado por Guedes et al. (2018) mostró resultados para plantaciones de *Pinus radiata* de 34 años, con 162.1 Mg ha⁻¹ de carbono en

la biomasa aérea, 53.3 Mg ha⁻¹ en la biomasa subterránea, 12.1 Mg ha⁻¹ en el carbono del piso forestal, y 135.2 Mg ha⁻¹ en el carbono orgánico del suelo. Por otro lado, Guo et al. (2008) en Australia, para una plantación de *Pinus radiata* de 16 años, informaron de 71.6 Mg ha⁻¹ de carbono orgánico en el suelo hasta una profundidad de 1 metro, 8.0 Mg ha⁻¹ en el piso forestal, y 95.0 Mg ha⁻¹ en la biomasa aérea. Estos estudios destacan la consistencia en los patrones de distribución de los diferentes componentes de carbono en las plantaciones forestales.

VI. CONCLUSIONES

La implementación de modelos de carbono demostraron ser una herramienta eficaz para la estimación del carbono presente en la biomasa total, el suelo mineral y el stock total de carbono a nivel de sitio. Estos modelos evidenciaron una correlación directa y significativa entre la cantidad de carbono estimado y la productividad del sitio, sugiriendo que, a mayor productividad, mayor fue la capacidad de secuestro de carbono.

En la distribución del carbono acumulado en los diferentes sitios, se observó que el suelo mineral constituyó el principal reservorio de carbono. Este fue seguido por la biomasa aérea y en una menor medida por la biomasa subterránea, por lo que es importante considerar los distintos componentes para una mejor comprensión del stock de carbono acumulado en el sitio.

El piso forestal, compuesto por la hojarasca y madera muerta, representó la menor fracción del carbono acumulado en los sitios evaluados. Además, su contribución no pareció estar influenciada de manera significativa por la productividad del sitio, indicando que otros factores más allá de la productividad forestal podrían determinar la acumulación de carbono de este componente.

El manejo intensivo en plantaciones de *Pinus radiata* se asocia con una buena capacidad de almacenamiento de carbono. Si bien el manejo intensivo puede disminuir temporalmente la cantidad de biomasa aérea debido a las podas y raleos, este efecto es a menudo compensado por una aceleración en el crecimiento de los árboles y un aumento en la acumulación de carbono en el suelo y en la biomasa subterránea.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Aalde, H., Gonzalez, P., Gytarsky, M., Krug, T., Kurz, W.A., Ogle, S., Raison, J., Schoene, D., Ravindranath, N.H., & Elhassan, N.G. (2006). Forest land. IPCC Guidel. Natl. Greenh. Gas Invent. 4, 1–83.
2. Acuña, E., Cancino, J., Rubilar, R., & Sandoval, S. (2017). Aboveground biomass growth and yield of first rotation cutting cycle of Acacia and Eucalyptus short rotation dendroenergy crops. 41.
3. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (s.f.). Clima y vegetación Región del Biobío. <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region8/clima.htm>
4. Bioenercel (2013). Aprovechamiento Sustentable de Residuos de Cosecha Forestal e Industrial Para Producción de Biocombustibles de Segunda Generación.
5. Canadell, J. (2021). Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks. pp. 673-815. En *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom.
6. Ciais, P. (2013). Carbon and Other Biogeochemical Cycles. pp. 465–570. En: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom.

7. CIREN (2021a). Recursos naturales comuna de Quilaco. Recuperado de https://www.sitrural.cl/wp-content/uploads/2021/08/Quilaco_rec_nat.pdf
8. CIREN (2021b). Recursos naturales comuna de Quilleco. Recuperado de https://www.sitrural.cl/wp-content/uploads/2021/09/Quilleco_rec_nat-1.pdf
9. CONAF (2018). Programa de Reducción de Emisiones (PRE) y de Pagos Basados en Resultados en el marco de la Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales (ENCCRV). Santiago. Chile. 37 pp.
10. CONAF (2019). Revista Chile Forestal. Cambio climático: Los Bosques, Clave en la Captura de Carbono. Edición N°390, 5–14.
11. Creighton, M. (2003). Belowground and aboveground biomass in young postfire lodgepole pine forests of contrasting tree density. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 33, N° 2, p. 351.
12. Dirección General de Aguas (2004). Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad Cuenca del Río Biobío.
13. Espinosa, M., Acuña, E., Cancino, J., Muñoz, F., & Perry, D.A. (2005). Carbon sink potential of radiata pine plantations in Chile. 78, 11–19.
14. FAO (2014). Atlas de suelos de América Latina y el Caribe. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.

15. FAO (2017). Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, Italia.
16. FAO & UNEP (2020). The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people. Rome.
17. Friedlingstein, P. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4): 3269–3340.
18. Garrido-Ramírez, E. (2012). Catalytic wet peroxide oxidation of phenol over iron or copper oxide-supported allophane clay materials: Influence of catalyst SiO₂/Al₂O₃ ratio. *Microporous and mesoporous materials* 162, 189-198.
19. González C. (2012). Propiedades geomecánicas de dos suelos de origen volcánico. Universidad de Chile (UCH). Ciencias Físicas y Matemáticas. Chile. Tesis Magister 223 p.
20. Guedes, B.S., Olsson, B.A., Egnell, G., Siteo, A.A., & Karlton, E. (2018). Plantations of Pinus and Eucalyptus replacing degraded mountain miombo woodlands in Mozambique significantly increase carbon sequestration. *Glob. Ecol. 14*
21. Guo, L.B., Cowie, A.L., Montagu, K.D., & Gifford, R.M. (2008). Carbon and nitrogen stocks in a native pasture and an adjacent 16-year-old Pinus radiata D. Don. plantation in Australia. *Agric. Ecosyst. Environ*, 124, 205–218.
22. Harmon, M. E., Franklin, J. F., Swanson, F. J., Sollins, P., Gregory, S. V., Lattin, J. D., & Cummins, K. W. (1986). Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in ecological research*, 15, 133-302.

23. Hirzel, C. (2020). Suelos de la Región de Ñuble: caracterización general.
24. Hontoria, C., Saa, A. & Rodríguez-Murillo, J.C. (1999). Relationships Between Soil Organic Carbon and Site Characteristics in Peninsular Spain. *Soil Science Society of America Journal*, 63: 614-621.
25. Houghton, R. (2005) Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Glob. Chang. Biol*, 11, 945–958.
26. INIA & Tosso, J. (1985). Suelos Volcánicos de Chile. Santiago, Chile.
27. James, J., Devine, W., Harrison, R., Terry, & T. (2014). Deep soil carbon: Quantification and modeling in subsurface layers. *Soil Sci.* 78, S1–S10.
28. Listoffsky A., & Medina L. (2010). Percepción del cambio climático. Cuaderno de derecho ambiental N°1, Cambio Climático. Academia Nacional de Derecho y Ciencias Sociales de Córdoba.
29. Llorente, M. (2004). Caracterización física y química de vertisoles del noreste de México sometidos a distintas formas de manejo. Tesis Maestría en Ciencias Forestales. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, NL., México. 98 p.
30. López-Senespleda, E., Calama, R., & Ruiz-Peinado, R. 2021. Estimating forest floor carbon stocks in woodland formations in Spain. *Science of The Total Environment*, 788, 147734.

31. Martínez, R. (2004). Mapa de reconocimiento de suelos de la VIII región Del bío-bío (sector sur). Universidad de Chile. Facultad de ciencias agronómicas escuela de agronomía. Santiago-Chile. Tesis de pregrado 173 p.

32. McGroddy, M.E., Daufresne, T. & Hedin, L.O. (2004). Scaling of C: N:P stoichiometry in forests worldwide: Implications of terrestrial Redfield-type ratios. *Ecology* 85: 2390-2401.

33. Mininco (1995). Compendio de funciones para especies de interés de Forestal Mininco S.A. Compendium of functions for species of interest to Forestal Mininco S.A., Publisher is Forestal Mininco. Concepción, Chile.

34. Ministerio del Medio Ambiente (2021). Estrategia de Cambio Climático y Ley de Protección del Clima: Compendio Liviano.

35. Municipalidad de Pemuco (2010). Plan de Desarrollo Comunal Pemuco 2011-2012.

36. Municipalidad de Quilaco (2020). Actualización Plan de Desarrollo Comunal PLADECO Quilaco. 2020-2025. Informe final. 348 páginas.

37. Municipalidad de Quilleco (2018). Plan de desarrollo Comunal de Quilleco. 2018-2023.

38. Olmedo, G. F., Guevara, M., Gilabert, H., Montes, C. R., Arellano, E. C., Barría-Knopf, B., ... & Ryan, M. G. (2020). Baseline of carbon stocks in *Pinus radiata* and *Eucalyptus* spp. plantations of Chile. *Forests*, 11(10), 1063.
39. Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333, 988–993.
40. Sandoval, S., Montes, C., Olmedo, G., Acuña, E., & Mena-Quijada, P. (2021). Modelling above-ground biomass of *Pinus radiata* trees with explicit multivariate uncertainty. *An International Journal of Forest Research*, 380-390.
41. Sanhueza, E. (1999). Caracterización Geomecánica de los Limos de la Zona Sur de Chile. Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile, Santiago, Chile.
42. Snowdon, P., D. Eamus, P. Gibbons, P. Khanna, H. Keith, R. Raison, & M. Kirschbaum. (2001). National Carbon Accounting System: Synthesis of allometrics, review of root biomass and design of future woody biomass sampling strategies. NCAS Technical Report N° 17, Australian Greenhouse Office, Canberra, 114 p.
43. Stolpe, N. (2006). Descripciones de los principales suelos de la VIII Región de Chile. Departamento de Suelos y Recursos Naturales. Universidad de Concepción, Chillán, Chile, p. 84.
44. UNFCCC (2015). Acuerdo de París. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). París, Francia. 29 p.

45. Yu, G. (2012). Binding of organic ligands with Al (III) in dissolved organic matter from soil: implications for soil organic carbon storage. *Environmental science & technology* 46.11, 6102-6109.

VIII. APÉNDICE

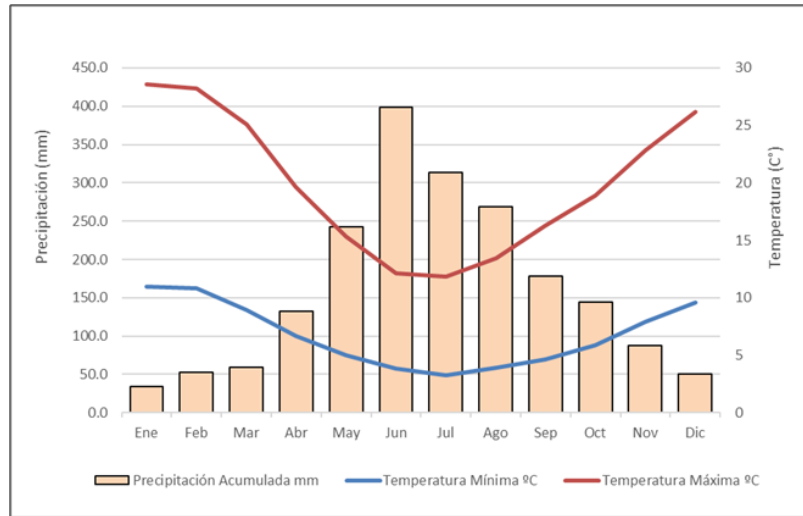


Figura A. 1. Diagrama ombrotermico de las variables climáticas del Predio Ramadilla.

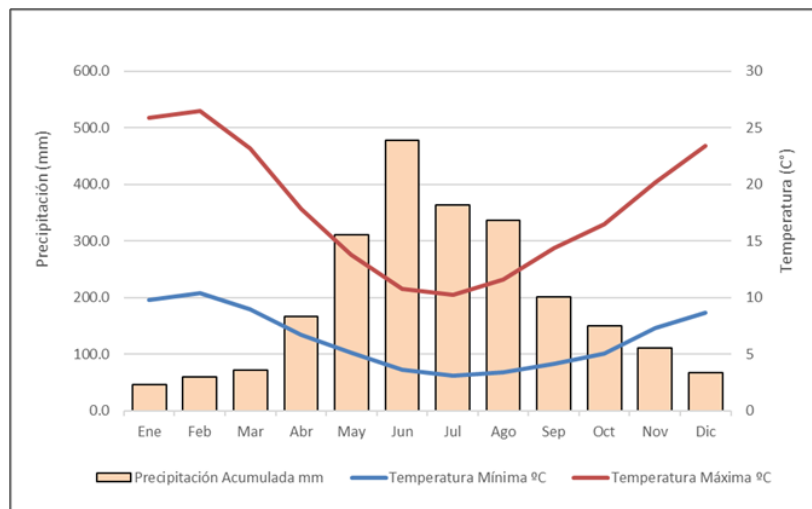


Figura A. 2. Diagrama ombrotermico de las variables climáticas de los Predios Santa Teresa y Montpellier.

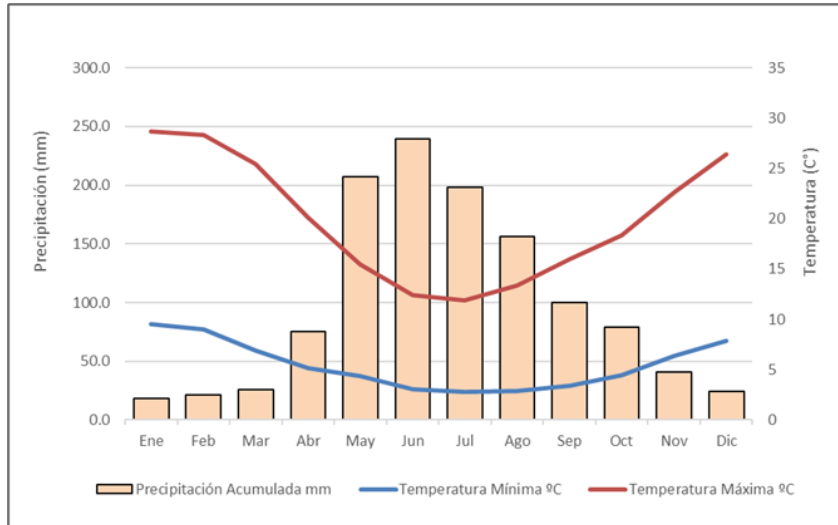


Figura A. 3. Diagrama ombrotermico de las variables climáticas del Predio Santa Lidia.

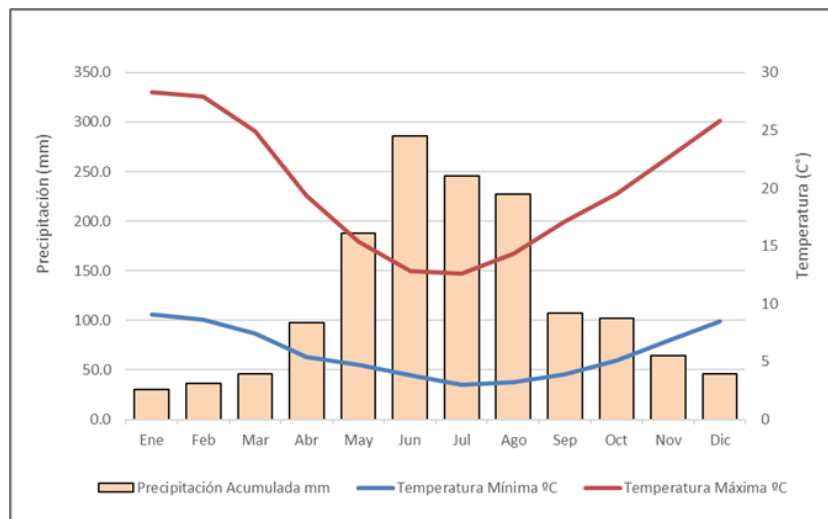


Figura A. 4. Diagrama ombrotermico de las variables climáticas del Predio Hijuela de San Luis.