

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA DE POSGRADO



**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIENCIAS
PECUARIAS CIENCIAS POLÍTICAS
PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS**

TESIS:

**CAPTURA Y ACUMULACIÓN DE CARBONO EN DOS SISTEMAS
GANADEROS CON Y SIN COBERTURA ARBÓREA Y SU RELACIÓN
CON SU PRODUCTIVIDAD EN LA CAMPIÑA DE CAJAMARCA 2024**

Para optar el Grado Académico de

DOCTOR EN CIENCIAS

MENCIÓN: PRODUCCIÓN ANIMAL

Presentado por:

M.Cs. WILLIAM LEONCIO CARRASCO CHILÓN

Asesor:

Dr. LUIS ALBERTO VILELA CACHO



Cajamarca, Perú

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
William Leoncio Carrasco Chilón
DNI: 26604406
Escuela Profesional/Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Pecuarias
Programa de Doctorado en Ciencias, Mención: Producción Animal.
2. Asesor: Luis Alberto Vilela Cacho
3. Grado académico o título profesional
☐ Bachiller ☐ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☒ Doctor
4. Tipo de Investigación:
☒ Tesis ☐ Trabajo de Investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:
Captura y acumulación de carbono en dos sistemas ganaderos con y sin cobertura arbórea y su relación con su productividad en la campiña de Cajamarca 2024.
6. Fecha de evaluación: **12/01/2026**
7. Software antiplagio: ☒ TURNITIN ☐ URKUND (ORIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: **7%**
9. Código Documento: **3117:545577953**
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
☒ **APROBADO** ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: **15/01/2026**

<i>Firma y/o Sello Emissor Constancia</i>	
 Dr. Ángel Davila Rojas DNI: 26600059	 Dr. Luis Alberto Vilela Cacho DNI: 26719501

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023

COPYRIGHT © 2025 by
WILLIAM LEONCIO CARRASCO CHILÓN
Todos los derechos reservados



Universidad Nacional de Cajamarca
LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 080-2018-SUNEDU/CD
Escuela de Posgrado
CAJAMARCA - PERU



PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

MENCIÓN: PRODUCCIÓN ANIMAL

Siendo las 4:12 horas, del día 24 de octubre del año dos mil veinticinco, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por el Ph.D. LUIS ASUNCIÓN VALLEJOS FERNÁNDEZ, Dr. JORGE PIEDRA FLORES, Dr. GILBERTO FERNÁNDEZ IDROGO y en calidad de Asesor, el Dr. LUIS ALBERTO VILELA CACHO. Actuando de conformidad con el Reglamento Interno de la Escuela de Posgrado y el Reglamento del Programa de Doctorado de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se inició la SUSTENTACIÓN de la tesis titulada: **CAPTURA Y ACUMULACIÓN DE CARBONO EN DOS SISTEMAS GANADEROS CON Y SIN COBERTURA ARBÓREA Y SU RELACIÓN CON SU PRODUCTIVIDAD EN LA CAMPIÑA DE CAJAMARCA 2024**; presentado por el Maestro en Ciencias Mención: Desarrollo y Medio Ambiente **WILLIAM LEONCIO CARRASCO CHILÓN**.

Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó APROBAR con la calificación de Dieciocho (18) la mencionada Tesis; en tal virtud, el Maestro en Ciencias Mención: Desarrollo y Medio Ambiente **WILLIAM LEONCIO CARRASCO CHILÓN**, está apto para recibir en ceremonia especial el Diploma que lo acredita como **DOCTOR EN CIENCIAS**, de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Pecuarias, Mención **PRODUCCIÓN ANIMAL**.

Siendo las 5:47 horas del mismo día, se dio por concluido el acto.


.....
Dr. Luis Alberto Vilela Cacho
Asesor


.....
Ph.D. Luis Asunción Vallejos Fernández
Presidente-Jurado Evaluador


.....
Dr. Jorge Piedra Flores
Jurado Evaluador


.....
Dr. Gilberto Fernández Idrogo
Jurado Evaluador

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a Dios, quien guía mis pasos en el caminar de mi vida, bendiciéndome y dándome fuerzas para continuar con mis metas trazadas sin desfallecer.

A mis padres Leoncio que desde el cielo me cuida y guía mis pasos y Alicia por su incondicional apoyo, ser mi inspiración y fortaleza; a mis hermanos Edwin, Lilian, Martha y Haydee, mi hermosa familia por siempre estar conmigo.

A mis hijas Carolina y Cristina por apoyarme en todo proyecto emprendido, brindarme ese inmenso amor y ser el motor para seguir adelante.

A Marieta mi compañera de vida por el apoyo incondicional en el logro de mis objetivos y metas cumplidas, y juntos poder cumplir nuestros proyectos de vida.

AGRADECIMIENTO

A mi hermosa familia padres, hijas, esposa, hermanos y todos los que me rodean por creer en mí, apoyarme en todo momento y sobre todo las expresiones de cariño que me brindan.

A la Universidad Nacional de Cajamarca, los docentes y mis compañeros de estudios por las enseñanzas impartidas y en especial a mi asesor por su apoyo constante.

Al Instituto Nacional de Innovación Agraria por los conocimientos adquiridos, experiencia y por apoyarme en la ejecución de mi tesis; a mis compañeros de trabajo que fueron parte de la ejecución de mi trabajo.

A mis compañeros de trabajo, Pedro Mantilla Rudas, Esther Cueva Limay, Fátima Guerra López, Elizabeth León Minchán y Mayeli Núñez Hernández.

A los dueños de los fundos Señor César Flores (Fundo Santa Margarita) y Señora Adriana, por brindarme la información y facilidades para el trabajo y sobre todo por la fuerza y coraje con la que luchan todos los días para sacar adelante a su familia y al país.

EPÍGRAFE

“Un sistema ganadero es sostenible cuando asegura el bienestar animal, la conservación del suelo y la regeneración de los recursos naturales.”

— FAO (2010), *La ganadería frente a los retos ambientales*

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
EPÍGRAFE	vii
TABLA DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiii
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	4
MARCO TEÓRICO	4
2.1. Antecedentes de la investigación.	4
2.2. Bases teóricas	8
2.2.1. Marco conceptual	11
Carbono almacenado	11
El carbono en los sistemas agroforestales	11
Fuentes de Captura de carbono	12
2.2.2. Definición de términos básicos.	13
El Carbono.	13
Captura de Carbono en el suelo	13
Captura de Carbono en la biomasa arbórea	14
El ciclo del carbono.	14
Papel de los suelos en el ciclo del carbono	15
Captura de Carbono en el suelo	15
Captura de Carbono en la biomasa arbórea	16

<i>Biomasa forestal</i>	16
<i>Valorización económica de la captura de carbono</i>	16
CAPÍTULO III	18
MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
3.2. Localización del estudio.	18
3.3. Método de investigación.....	19
3.4. Diseño de la Investigación.....	19
3.5. Población, muestra, unidad de análisis y unidades de observación Población:.....	19
3.6. Técnicas e instrumentos de recopilación de información	20
3.7. Técnicas para el procesamiento y análisis de la información.....	20
3.8. Métodos:	22
CAPÍTULO IV	26
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
4.1. Contenido de carbono en los distintos componentes del sistema.	26
4.1.1. Carbono en arboles (solo en sistema con cobertura arbórea).	26
4.1.2. Carbono en pasturas.	31
4.2. ACUMULACIÓN DE CARBONO:.....	48
CAPITULO V.....	59
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	59
Conclusiones.....	59
Recomendación.....	60
CAPITULO VI	61
CAPÍTULO VIII.....	67
ANEXOS.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contenido de carbono orgánico en biomasa arbórea (Salix Humboldtiana – Sauce) en un sistema de producción ganadera con cobertura Arborea fundo Santa Margarita.....	26
Tabla 2. Carbono orgánico en la raíz de árboles Salix Humboldtiana (Sauce) en un sistema de producción ganadera con cobertura Arborea fundo Santa Margarita.....	28
Tabla 3. Producción promedio de biomasa (t/ha) y materia seca (t/ha) de pasturas ryegrass + Trébol blanco a 3 distancias del árbol en el fundo Santa Margarita	31
Tabla 4. Comparación de medias de dos tratamientos experimentales para la producción de biomasa forrajera /ha., en dos sistemas ganaderos en la región Cajamarca	34
Tabla 5. Producción promedio de Carbono orgánico en biomasa forrajera (F.V.) en pasturas de ryegrass trébol en sistemas ganaderos con y sin cobertura arbórea	37
Tabla 6. Resultados estadísticos de la comparación de medias con y sin cobertura arbórea.....	38
Tabla 7. Análisis estadístico de la Producción de Carbono Orgánico de Mantillo en pasturas de ryegrass-trébol a distintas distancias del árbol - Fundo Santa Margarita	42
Tabla 8. Producción promedio de Carbono orgánico de Mantillo en pasturas de ryegrass trébol en sistemas sin cobertura arbórea - fundo Tres Molinos.....	44
Tabla 9. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) bifactorial para el carbono orgánico del suelo en función de la distancia al árbol y la profundidad	48
Tabla 10. Determinación de la cantidad de carbono orgánico a tres profundidades de suelo en un sistema ganadero sin cobertura arbórea Fundo Tres Molinos	51
Tabla 11. Cantidad de Carbono orgánico en concentrado para vacas en producción, sistema con cobertura arbórea. Huayrapongo.....	52
Tabla 12. Cantidad de Carbono orgánico en concentrado para vacas en producción, sistema con cobertura arbórea Tres molinos	53
Tabla 13. Determinación de la cantidad de carbono orgánico en promedio contenido en el estiércol de ganado vacuno sin cobertura arbórea. Fundo Huayrapongo	54
Tabla 14. Determinación de la cantidad de carbono orgánico en promedio contenido en el	

estiércol de ganado vacuno sin cobertura arbórea. Tres Molinos	55
Tabla 15. Producción de Carbono orgánico (t/año) en leche en sistemas productivos sin cobertura arbórea. Fundo Tres Molinos	56
Tabla 16. Producción de Carbono orgánico (t/año) en leche en sistemas productivos con cobertura arbórea. Fundo Santa Margarita	57
Tabla 17. Producción de Carbono orgánico total (C t.) de los dos sistemas ganaderos con y sin cobertura arbórea en la región Cajamarca	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.....	18
Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.....	18
Figura 3. Producción promedio de Carbono orgánico en Mantillo (t.C/ha) en sistemas con y sin cobertura arbórea con pasturas de ryegrass trébol. Sin cobertura arbórea	46
Figura 3. Producción promedio de Carbono orgánico en Mantillo (t.C/ha) en sistemas con y sin cobertura arbórea con pasturas de ryegrass trébol.	46

RESUMEN

Con el objetivo de caracterizar y comparar la dinámica del carbono en sistemas ganaderos con cobertura arbórea y sin cobertura arbórea, se en donde los resultados obtenidos mostraron diferencias significativas entre ambos. En primer lugar, en los sistemas con árboles, la biomasa aérea de *Salix humboldtiana* almacenó 1.753 t C/ha y sus raíces 0.115 t C/ha, mientras que en las pasturas la captura fue de 7.64 t C/ha/corte frente a 5.62 t C/ha en sistemas sin árboles. Asimismo, el suelo acumuló 24.19 t C/ha frente a 23.26 t C/ha en sistemas abiertos, lo cual evidenció una mayor capacidad de almacenamiento bajo cobertura arbórea. Por otro lado, en cuanto a la producción animal, la leche presentó un mayor contenido de carbono en sistemas con árboles (3.09 t C/vaca/año) en comparación con los sin cobertura (2.03 t C/vaca/año); sin embargo, el estiércol fue superior en ausencia de árboles (5.10 frente a 4.73 t C/ha/año). En consecuencia, el balance total indicó que los sistemas con cobertura arbórea alcanzaron 43.798 t de carbono, superando las 38.590 t registradas en sistemas sin árboles. En síntesis, se concluye que los sistemas silvopastoriles resultan más eficientes y sostenibles, además de aportar beneficios tanto productivos como ambientales en la región de Cajamarca.

Palabras clave: silvopastoreo, carbono, biomasa, suelo, leche.

ABSTRACT

With the aim of characterizing and comparing carbon dynamics in livestock systems with and without tree cover, the results obtained showed significant differences between the two. First, in systems with trees, the aboveground biomass of *Salix humboldtiana* stored 1.753 t C/ha and its roots 0.115 t C/ha, while in pastures the capture was 7.64 t C/ha/cut compared to 5.62 t C/ha in systems without trees. Likewise, the soil accumulated 24.19 t C/ha compared to 23.26 t C/ha in open systems, which evidenced a greater storage capacity under tree cover. Regarding animal production, milk had a higher carbon content in systems with trees (3.09 t C/cow/year) compared to those without (2.03 t C/cow/year); however, manure was higher in the absence of trees (5.10 versus 4.73 t C/ha/year). Consequently, the total balance indicated that systems with tree cover achieved 43,798 t of carbon, exceeding the 38,590-t recorded in systems without trees. In summary, it is concluded that silvopastoral systems are more efficient and sustainable, providing both productive and environmental benefits in the Cajamarca region.

Keywords: silvopastoralism, carbon, biomass, soil, milk.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se enmarca en la problemática ambiental y productiva de la ganadería en la región Cajamarca, donde la creciente demanda de alimentos de origen animal contrasta con la necesidad urgente de mitigar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En este escenario, los sistemas ganaderos tradicionales sin cobertura arbórea han demostrado limitaciones en la captura y retención de carbono, lo que los convierte en modelos productivos menos sostenibles. Por ello, se planteó como tema de estudio la comparación entre sistemas ganaderos con cobertura arbórea y sistemas abiertos, con el fin de comprender su eficiencia en la captura y acumulación de carbono, así como su relación con los niveles de productividad en biomasa vegetal y producción de leche.

El problema se delimitó a la campiña de Cajamarca, donde se seleccionaron dos fundos representativos, uno con presencia de árboles (*Salix humboldtiana*) y otro sin ellos, lo que permitió establecer condiciones comparables en cuanto a manejo, raza de ganado y tipo de forraje. La justificación del estudio radica en la necesidad de generar evidencias científicas que respalden la implementación de sistemas silvopastoriles como una alternativa productiva sostenible, capaz de conciliar la eficiencia ganadera con la conservación ambiental y la mitigación del cambio climático (Contreras et al., 2022; Muñoz et al., 2022).

El objetivo general de la investigación fue caracterizar y comparar la dinámica del carbono en sistemas con y sin cobertura arbórea. A partir de este propósito, se formuló la hipótesis de que los sistemas ganaderos con cobertura arbórea son más eficientes tanto en la captura y almacenamiento de carbono como en la productividad animal, en

comparación con aquellos sin árboles. La pregunta central que orientó el estudio fue: ¿qué diferencias existen en la captura y acumulación de carbono entre sistemas ganaderos con cobertura arbórea y sin ella, y cómo se relacionan con la productividad de biomasa y leche?

El marco teórico se sustentó en antecedentes de investigaciones recientes que destacan el rol de los sistemas silvopastoriles como alternativa estratégica para aumentar la productividad y reducir la huella de carbono. Contreras et al. (2022) evidencian que la integración de árboles incrementa la acumulación de biomasa aérea, subterránea y suelo, reforzando la función de estos sistemas como sumideros de carbono. De igual manera, Ronald (2022) mostró que las pasturas mejoradas presentan mayores reservas de carbono que las naturales, subrayando la importancia del manejo y la inclusión de especies arbóreas. Por su parte, Muñoz et al. (2022) documentaron el alto potencial de captura de especies como *Salix humboldtiana*, respaldando la pertinencia de evaluarla en los sistemas de Cajamarca. Finalmente, Chará et al. (2019) subrayan que la inclusión de árboles en sistemas ganaderos no solo mejora el microclima y el bienestar animal, sino que también potencia la eficiencia ecológica y reduce la huella de carbono.

En cuanto al enfoque metodológico, la investigación se diseñó como un estudio no experimental, descriptivo y de carácter transversal. Se aplicaron métodos analíticos y deductivos, con recolección de datos en campo y laboratorio. Se utilizaron técnicas como el muestreo destructivo para estimar la biomasa arbórea, el método del metro cuadrado para la biomasa forrajera, y análisis de laboratorio para determinar el carbono en suelo, estiércol, concentrados y leche. El procesamiento estadístico incluyó medidas de tendencia central y comparaciones de medias entre los dos sistemas.

La estructura del documento se organizó en seis capítulos. El primero presenta la introducción, los objetivos e hipótesis; el segundo desarrolla el marco teórico con antecedentes y bases conceptuales; el tercero describe los materiales y métodos empleados; el cuarto expone los resultados y discusión, destacando las diferencias de carbono acumulado y productivo entre ambos sistemas; el quinto contiene las conclusiones y recomendaciones, donde se reafirma la ventaja de los sistemas silvopastoriles; finalmente, el sexto recoge las referencias bibliográficas y anexos técnicos que complementan la investigación.

En síntesis, este trabajo aporta evidencias recientes de que la integración de árboles en los sistemas ganaderos de Cajamarca no solo incrementa la eficiencia en la captura y almacenamiento de carbono, sino que también mejora la productividad, constituyéndose en una vía viable para transitar hacia una ganadería más sostenible y resiliente.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación.

La ganadería en América Latina enfrenta el desafío de incrementar la productividad y al mismo tiempo reducir su impacto ambiental, particularmente en lo relacionado con la captura y emisiones de carbono. En este contexto, los sistemas silvopastoriles se han consolidado como una alternativa estratégica para avanzar hacia una ganadería más sostenible.

Murgueitio et al (2011), en su estudio destaca que los sistemas silvopastoriles intensivos integran árboles, arbustos y pasturas en un mismo espacio productivo, generando múltiples beneficios. Estos van desde la provisión de sombra y forraje adicional para el ganado, hasta la mejora del microclima, la recuperación de la biodiversidad y, de manera fundamental, el incremento de la captura de carbono en suelo y biomasa aérea. sostiene que la presencia de árboles en los sistemas ganaderos no solo incrementa la eficiencia productiva, sino que también representa una vía para mitigar los efectos del cambio climático mediante el almacenamiento de carbono orgánico.

Contreras et al (2020), reportó resultados significativos respecto a la acumulación de carbono en suelos bajo sistemas silvopastoriles. Según este trabajo, los suelos con árboles presentaron entre 58 % y 69 % más carbono acumulado en comparación con sistemas ganaderos sin cobertura arbórea. Este incremento se atribuye al mayor aporte de materia orgánica proveniente de la hojarasca y raíces, así como a la mejora en la estructura del suelo, lo que favorece la retención de carbono a largo plazo.

Según Rojas et al. (2017) en un trabajo experimental evaluaron a nivel global los impactos del cambio climático sobre la ganadería y destacan la necesidad de adoptar sistemas productivos resilientes y de mínima huella de carbono. En este sentido, los sistemas silvopastoriles surgen como una alternativa que combina productividad con mitigación y adaptación, lo cual refuerza su relevancia como estrategia de manejo sostenible.

Huamán et al. (2021), en su estudio orientado a identificar la asociación entre la variación altitudinal y la capacidad de retención de carbono orgánico del suelo (CO_2) en pasturas naturales, así como su vínculo con las propiedades edáficas, recolectaron 73 muestras de suelo a una profundidad de 0,2 m, dentro del rango altitudinal de 4000 a 4410 m s.n.m.. Para el análisis, emplearon la técnica de oxidación húmeda; Los autores evidenciaron la ausencia de diferencias estadísticamente significativas en la retención de CO_2 entre las especies nativas analizadas, registrándose una media consolidada de $364,33 \pm 48,80 \text{ t ha}^{-1}$. Asimismo, los índices de correlación entre el almacenamiento de CO_2 y las variables altitud, fracción arenosa, fracción limosa, fracción arcillosa, temperatura y contenido de materia orgánica fueron 0,84; 0,72; -0,30; -0,56; -0,82 y 0,91, en ese mismo orden.

Se concluye que, conforme aumenta la altitud, el contenido de CO_2 también se eleva; además, las variaciones en las proporciones de arena y arcilla dentro de la estructura del suelo inciden en este comportamiento. Del mismo modo, las temperaturas reducidas favorecen la acumulación de carbono en función de la disponibilidad de materia orgánica.

Según Yerena y colegas (2020), en su investigación estableció la proporción de Carbono (C) en tallos y raíces en 21 variedades de pastos, hallando que la proporción promedio de C en las variedades analizadas fluctúa desde 32.5 % hasta 39.9 %, con una mediana global de 36.4 %. La proporción de C en la raíza fue de 36.0 % y en los tallos de 36.9 %. Para

la cuantificación de C, se empleó el equipo Analizador de Carbono Orgánico Total (TOC) para Sólidos.

Iglesias et al. (2011) según su investigación cuyo propósito fue detallar el empleo de los esquemas agrosilvopastoriles en diversas zonas subtropicales.

Por su parte, Ronald (2022), en su estudio acerca de la retención de carbono en dos modelos distintos: uno con pastizales optimizados y otro con pastizales naturales, halló una cantidad de carbono en la biomasa herbácea de $3,50 \text{ t t}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, carbono en la capa de hojarasca de $5,09 \text{ t t}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ y carbono superficial $8,59 \text{ t t}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ de C.O, respectivamente. En contraste, el modelo con pastura natural mostro una cantidad de carbono en la presente, carbono herbáceo de $3,25 \text{ t t}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, carbono hojarasca de $0,16 \text{ t t}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ y carbono sobre el suelo de $3,42 \text{ t t}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ C.O, respectivamente. Así mismo encontró que la cantidad de carbono radicular y carbono superficial, en pastura mejorada y natural existe diferencia entre ambos sistemas. La cantidad de carbono aéreo y bajo el suelo acumulado en pastura mejorada fue de $54,75 \text{ t. C. ha}^{-1}$ y en pastura natural de $53,39 \text{ t.C. ha}^{-1}$.

Zuloaga, (2020), en su investigación sobre la acumulación de carbono almacenado en el suelo y en la biomasa aérea, encontró que estadísticamente los sistemas silvopastoriles - SSP, son superiores a los sistemas sin árboles - SSA, lo cual demuestra que estos son sistemas capaces de fijar mayor contenido de CO_2 . Además, indica que los SSP son una alternativa tecnológica importante para mitigar las emisiones de GEI generadas por los cambios de cobertura asociados con los sistemas de producción bovina. Contreras et al (2022). en su investigación relacionada a determinar la biomasa aérea en sistemas silvopastoriles y gramíneas sin arboles; encontrando valores superiores en los SSP ($2,18 \pm 1,13, 4,51 \pm 3,76 \text{ t ha}^{-1} \text{ C}$) que en gramíneas sin arboles ($0,19 \pm 0,09 \text{ t ha}^{-1} \text{ C}$). Así mismo en SSP alcanzo una mayor acumulación de biomasa subterránea ($1,16 \pm 3,76 \text{ t}$

ha⁻¹ C) y en hojarascas (3,09±2,45 t ha⁻¹ C. Los valores de carbono orgánico acumulado en el suelo mostraron mayor acumulación en el SSP. Mientras que el carbono acumulado en el suelo representó en los tres sistemas más del 70 % del aporte total en carbono acumulado. Llegando a concluir que bajo las condiciones ambientales de bosque seco tropical húmedo, los sistemas silvopastoriles aumentaron la reserva de carbono atmosférico en el suelo y en la biomasa por lo tanto el uso de SSP es una estrategia en la mitigación de gases de efecto invernadero en el sistema productivo ganadero.

Oliva et al. (2018) en un trabajo de investigación cuyo objetivo fue evaluar la influencia de los sistemas silvopastoriles (SSP) con especies arbóreas nativas como *Eritryna edulis* (Pajuro), *Alnus acuminata* (Aliso) y *Salix babylonica* (Sauce) sobre el rendimiento y valor nutricional de *Lolium multiflorum* (Rye grass) y *Trifolium repens* (Trébol). Evaluó la producción de forraje verde y materia seca, encontrando resultados que le permitieron concluir que, en el rendimiento de biomasa y materia seca para ambas especies de pastos existen diferencias estadísticas ($p < 0,05$) entre los sistemas evaluados; por otro lado, aunque los niveles de proteína son superiores en los sistemas silvopastoriles, estos no representan diferencias estadísticas entre sistemas.

Muñoz et al. (2022) en su investigación para determinar las estimaciones del potencial de captura de carbono de especies arbóreas en un área de 64,51 ha. La metodología fue realizar un inventario forestal, que le permitió determinar las características de la población total obteniendo datos como: altura total del árbol, nombre común, nombre científico y familia de cada especie. Utilizo el método indirecto o no destructivo para determinar el potencial de captura de carbono. Encontrando que las especies que capturaron más CO₂ fueron *Eucalyptus Sp* (9.928.696 kg), *Salix humboldtiana* (607.305,42 kg), *Cupressus sempervirens* (141.361,18 kg), *Fraxinus excelsior L.* (139.964,29 kg), *Araucaria*

araucana (130.134,51 kg) y *Alnus acuminata* (12.355,66 kg).

2.2. Bases teóricas.

En un trabajo sobre caracterización de un sotobosque el timbozal representa el 25% de la biomasa aérea mientras que en los bosques de sauce representa el 5%. La biomasa aérea (componente leñoso y sotobosque) del bosque de sauce fue de 225 Mg MS ha⁻¹, valor que se encuentra sobre el límite inferior del rango de biomasa de los bosques tropicales húmedos (de 200 a 500 Mg MS ha⁻¹), aunque es menor al valor para la Amazonía brasileña (298 Mg MS ha⁻¹; Menéndez et al. 2005). Por otro lado, el contenido de C de la biomasa del componente leñoso es del 50% en bosques de albardón marginal dominados por sauce criollo y aliso (Aceñolaza et al. 2001), sus resultados (Campos et al 1998) son similares (49%) en bosques de llanura e inundación en Río Negro (Uruguay). En cuanto a las variables biomasa aérea, mantillo y suelo el porcentaje de Carbono Orgánico respecto al C total de los ecosistemas representa el 32% del bosque de sauce, el 38% en el de aliso y el 73% en el timbó blanco. Los valores de COS indican la existencia de un gradiente de C desde los albardones marginales (sauce y aliso), con suelos más arenosos y sujetos a mayor energía. En relación al contenido total de C en cada ecosistema, si bien los valores de biomasa son mayores en los bosques de albardones marginales (sauce y aliso), el COS es mayor en el bosque de timbó blanco, por lo que al considerar la sumatoria del C almacenado arriba y debajo del suelo, el bosque de timbó se convierte en el sistema que más C orgánico (190 Mg MS ha⁻¹) captura.

Pintado y Astudillo (2021). En su investigación considero una área verde total de 12,247 hectáreas, en donde determinó el cálculo de los parámetros en área basal, volumen del árbol en pie, biomasa forestal, carbono total y CO₂ determino un total de 2957 individuos arbóreos clasificados en 28 familias y 53 especies, en los cuales determino 557,392 toneladas de carbono y 2082,331 toneladas de CO₂.

M., Vásquez & Portilla, F. (2022). Hoy en día, los efectos adversos del calentamiento global son evidentes debido al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo las zonas urbanas una de las zonas que emite grandes cantidades de CO₂, sin embargo, los árboles urbanos actúan como un importante sumidero de carbono (no se relaciona con tu trabajo). La introducción de especies maderables o frutales en los sistemas de pasturas tradicionales (sistemas a campo abierto), tienen múltiples beneficios en la calidad del pasto y consecuentemente en la nutrición del ganado; no obstante, el componente arbóreo no solo permiten obtener un forraje de mejor calidad, sino también favorecen en la reducción de la erosión y mejoran la fertilidad de los suelos y, adicionalmente ofrecen productos como leña, madera y frutos que le brindan al productor ganadero una mejor estabilidad económica (Sánchez, 2017); adicional a ello, pueden mitigar los efectos del cambio climático originados por los gases de efecto invernadero (Cuartas et al., 2014). En este tipo de sistemas se da origen a numerosas interacciones, que estarán en función de las especies, su densidad de siembra, arreglo espacial y manejo (Iglesias et al., 2011). La velocidad de descomposición del mantillo del bosque de sauce es menor $K_m = 0.6 \text{ año}^{-1}$ que la del aliso de río $K_m = 1,1 \text{ año}^{-1}$) y la de timbó blanco ($K_m = 1,32 \text{ año}^{-1}$), el cual prácticamente la necromasa desaparece al final de cada ciclo. El tratamiento de Manejo Regenerativo (TMRm) es mayor en el bosque de sauce criollo (1,6 años), seguido por el del aliso (por 0,90 años), favorecido por el contenido de N (proveniente de la fijación de N) y, por último, el del timbó (0,76 años); ello indica que el C almacenado en la necromasa permanece más de un ciclo en el bosque de sauce criollo, apareciendo necromasa todo el año, al contrario que en las otras dos especies (necromasa temporal).

Bolín et al. (1996), indica que la vegetación terrestre a través de sus procesos fisiológicos tales como la fotosíntesis, y los océanos se consideran que conservan grandes cantidades

de carbono. Se (FONAM 2006), menciona que los bosques, tierras agrícolas y otros ecosistemas terrestres ofrecen un potencial de almacenamiento de carbono.

Márquez (2000), afirma que los ecosistemas terrestres juegan un papel importante en el ciclo global del carbono, en tanto el manejo forestal puede hacer una contribución sustancial a controlar los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera.

Otras actividades de uso de la tierra y bosques que pueden contribuir son: la conservación de bosques en peligro de deforestación, rehabilitación de bosques, forestación, reforestación o promoción de la agroforestería. En el sector de uso de la tierra y bosques se han identificado estrategias principales para acumular el carbono: La primera es aumentar la fijación de carbono al crear o mejorar los sumideros; y la segunda es prevenir o reducir la tasa de liberación del carbono ya fijado en sumideros existentes. Estas estrategias se denominan fijación de carbono y no emisión de carbono. Así mismo las actividades de fijación incluyen tratamientos silviculturales para aumentar el crecimiento, agroforestería, forestación, reforestación y restauración de áreas degradadas; la no emisión incluye actividades de conservación de biomasa y suelo en áreas protegidas, manejo forestal sostenible, protección contra fuegos y promoción de quemas controladas. Además, el (Instituto Peruano de Cambio Climático, 2001), estima que, a nivel mundial, la retención de carbono derivada de la forestación, la regeneración forestal, el incremento de las plantaciones y el desarrollo de la agrosilvicultura entre 1995 y 2050 será entre el 12 y el 15 % de las emisiones de carbono originadas por los combustibles fósiles en el mismo periodo.

2.2.1. Marco conceptual.

Carbono almacenado

Jair et al (2014). La mineralización de la materia orgánica del suelo puede ser acelerado por actividades productivas como el pastoreo y manejo de pastos. El objetivo del estudio fue evaluar el impacto del pastoreo en Carbono orgánico del suelo (COS). El almacenamiento COS se estimó utilizando la concentración de carbono orgánico y densidad aparente a una profundidad de 0-30 cm. sobre el suelo También se estimó la biomasa (AB) de plantas forrajeras. Los análisis se realizaron entre COS y el tiempo. de uso, período de ocupación y carga ganadera.

Loguercio (2005) y Depledge (2002), afirman que la vegetación, en particular los bosques, almacenan grandes cantidades de carbono en su biomasa como en el tronco, ramas, corteza, hojas y raíces y en el suelo mediante su aporte orgánico. Además, (Márquez, 2000), menciona que los ecosistemas forestales almacenan carbono en cuatro fuentes: biomasa arriba del suelo, biomasa abajo del suelo, hojarasca, otra materia vegetal muerta y en el suelo.

la dinámica y almacenamiento del carbono en la necro masa y el suelo de ecosistemas forestales representa un reservorio importante de carbono y nutrientes, esenciales para el crecimiento de nueva vegetación. Zaninovich, (2017).

CONICET (2025) resaltó que la necro masa es esencial para el funcionamiento de los ecosistemas, ya que estos desechos se transforman en nutrientes que nutren a los organismos y plantas vivas.

El carbono en los sistemas agroforestales

Sánchez et al. (1999), manifiestan que la tasa de absorción de carbono en los sistemas agroforestales puede ser muy alta ya que la captura de carbono se efectúa tanto por los árboles como por los cultivos: de 2 a 9 t C ha⁻¹ , dependiendo de la duración de 15 a 40

años. Schroeder (1994), menciona que, en las áreas tropicales, se puede obtener un almacenamiento de 21 a 50 t C ha⁻¹ en zonas subhúmedas y húmedas respectivamente. Las raíces por si solas podrían incrementar esos valores en 10 %. La conversión de tierras de cultivos improductivas con bajos niveles de materia orgánica y nutrientes en sistemas agroforestales podrían triplicar las existencias de carbono, de 23 a 70 t C ha⁻¹ en un período de 25 años. Por otro lado, la incorporación de cultivos con cobertura viva resulta ser efectivos; donde el valor de captura de carbono depende de la cantidad y del tipo de cobertura de 1 a 6 t t C ha⁻¹, en este caso, hay materia orgánica tanto por encima como por debajo del suelo, ya que además se agrega la proporcionada por las raíces (Language et al 1999).

Bajo las condiciones de labranza convencional, la pérdida de carbono será considerable al 40 a 50 % en unas pocas docenas de años, con un alto nivel de liberación de este durante los primeros cinco años (FAO, 2000). Si se establecen pasturas, las pérdidas son mucho menores y es probable que en pocos años haya una cierta recuperación de carbono gracias a la materia orgánica de los pastos (De Morales y col. 1996). Sin embargo, en los sistemas agrícolas o ganaderos, los sumideros de carbono en el suelo son considerablemente pequeños, mientras que en sistemas agroforestales aumenta. Los sumideros superficiales de carbono en sistemas agroforestales son similares a aquellos encontrados en bosques secundarios (Brown y Lugo, 1992).

Fuentes de Captura de carbono

Según el IPCC (2000), las fuentes y sumideros de Gases Efecto Invernadero, se clasifican en siete categorías: Energía, procesos industriales, uso de solventes, agricultura, cambio en el uso del suelo y actividades forestales, residuos y otros. El carbono en forma de CO₂ se mueve a través de la atmosfera, los océanos y la biosfera. Los depósitos se dividen en

fuentes y sumideros; los primeros vierten carbono a la atmosfera y los segundos lo absorben. . La vegetación y los suelos contienen aproximadamente tres veces y medio más carbono que la atmosfera, sin embargo, la cantidad de carbono almacenado globalmente en los suelos es mucho mayor que en la vegetación. el sector de cambio de uso de las actividades forestales presenta una ambigüedad en el sentido de que las mismas fuentes cumplen con un el papel de sumideros; es decir, las plantas, el océano y el suelo puede tanto liberar como absorber CO₂ (Santa Cruz, 2004).

Definición de términos básicos.

El Carbono.

El carbono es considerado un elemento químico clave en los compuestos orgánicos, este circula entre los océanos, el suelo, la atmósfera y el subsuelo, siendo este último donde se encuentran la gran mayoría de almacenes de carbono. Es producto de procesos naturales de intercambio terrestre y atmosférico, tales como la respiración vegetal, la fotosíntesis y las emisiones de gases antrópicos (Rügnitz et al., 2008).

Captura de Carbono en el suelo

Se interrelaciona con los procesos fisicoquímicos y biológicos del planeta a través del ciclo de carbono. Los procesos de captura y emisión de carbono son parte de un sistema de cuatro reservorios de carbono vegetación aérea y radical, materia en descomposición y suelos productos forestales con tiempos de residencia y flujos asociados muy diferentes y estrechamente interrelacionados. (Olguín 2001), ~~así como~~ los contenidos de carbono en el suelo dependen de los principales factores a largo plazo relacionados con la formación del suelo y pueden ser fuertemente modificados, degradados o mejorados por el cambio en el uso y el manejo de la tierra (Oliva y García, 1998). En informes de la (FAO 2000), se han analizado la distribución del total de las existencias de carbono del suelo según las

principales zonas ecológicas que muestran grandes diferencias en el almacenamiento del carbono orgánico sobre todo en relación a la temperatura y a la lluvia. Las existencias de carbono en el suelo hasta un metro de profundidad varían entre 4 kg m^{-2} en las zonas áridas y $21\text{-}24 \text{ kg m}^{-2}$ en las regiones polares o boreales, con valores intermedios de 8 a 10 kg m^{-2} en las zonas tropicales. Las tierras de pastoreo FAO (2000) , ocupan 3.200 millones de hectareas y se ha estimado que almacenan 70 t/ha del carbono del suelo , cifra similar a las cantidades almacenadas en los suelos forestales (Trumbmore y col., 1995).

Captura de Carbono en la biomasa arbórea

El ciclo del carbono.

Ordoñez (1999) menciona que, este ciclo gira especialmente alrededor del bióxido de carbono, ya que constituye la especie química predominante en la atmósfera; Este ciclo funciona básicamente a través de la fotosíntesis, la respiración, las emisiones de gases por quema de combustibles fósiles y fenómenos naturales como las erupciones volcánicas, así mismo afirma que, el ciclo del carbono es el responsable de la cantidad de CO_2 contenido en la atmósfera, ya que es el mecanismo que equilibra las cantidades de carbono presentes en los diferentes reservorios o almacenes de carbono en el planeta. Como consecuencia se establece todo un balance de carbono a través de procesos fijadores o almacenadores de carbono y otros que a su vez lo emiten.

Oliva y García (1998), mencionan que la incorporación de carbono en el ciclo biológico se da por medio de la fotosíntesis que produce energía bioquímica para los procesos fisiológicos y de formación de materia biológica como la biomasa a partir del CO_2 , es tomado directamente de la atmósfera y su asimilación por la planta es conocida como fotosíntesis gruesa. Pero no todo el CO_2 asimilado es transformado a biomasa, sino que una parte es regresada a la atmósfera por medio de la respiración que se lleva a cabo durante los procesos fisiológicos.

Papel de los suelos en el ciclo del carbono

El suelo almacena cantidades considerables de carbono; las prácticas que promueven un aumento del carbono orgánico en el suelo también pueden tener un efecto positivo de fijación de carbono (Márquez, 2000). (Catriona 1998), manifiesta que en los bosques tropicales los sumideros de carbono en el suelo varían entre 60 y 115 t C ha⁻¹. El IPCC (2000), indica que el carbono del suelo por sí solo representa más que el carbono de la biomasa forestal. Tales proporciones de carbono en el suelo dependen de la zona climática; con el máximo de carbono del suelo en las áreas frías boreales y templadas, y mínimo en las áreas tropicales (IPCC, 2000); (Márquez 2000) y (FONAM, 2006); la causa principal de esta diferencia es la influencia de la temperatura en los índices relativos de producción y descomposición de la materia orgánica (FAO, 2000). Los bosques cubren el 29 % de la tierra y contienen el 60 % del carbono de la vegetación terrestre. El carbono almacenado en los suelos forestales representa el 36 % del total a un metro de profundidad. El carbono del suelo en pasturas es estimado en 70 t C/ha, cifra similar a las cantidades almacenadas en los suelos forestales; por lo que muchas áreas de tierras de pastoreo en las zonas tropicales y áridas ofrecen variadas posibilidades de secuestro de carbono (Trumbmore et al 1995).

Captura de Carbono en el suelo

Se interrelaciona con los procesos fisicoquímicos y biológicos del planeta a través del ciclo de carbono. Los procesos de captura y emisión de carbono son parte de un sistema de cuatro reservorios de carbono vegetación aérea y radical, materia en descomposición y suelos productos forestales con tiempos de residencia y flujos asociados muy diferentes y estrechamente interrelacionados. (Olguín, 2001), los contenidos de carbono en el suelo dependen de los principales factores a largo plazo relacionados con la formación del suelo y pueden ser fuertemente modificados, degradados o mejorados por el cambio en el uso

y el manejo de la tierra (Oliva y García, 1998). la (FAO 2000), se han analizado la distribución del total de las existencias de carbono del suelo según las principales zonas ecológicas que muestran grandes diferencias en el almacenamiento del carbono orgánico sobre todo con relación a la temperatura y a la lluvia. Las existencias de carbono en el suelo hasta un metro de profundidad varían entre 4 kg m^{-2} en las zonas áridas y 21-24 kg m^{-2} en las regiones polares o boreales, con valores intermedios de 8 a 10 kg m^{-2} en las zonas tropicales. (Trumbmore y col., 1995).

Captura de Carbono en la biomasa arbórea

El almacenamiento de carbono en árboles es un servicio ambiental que valoriza la incorporación de especies arbóreas en sistemas agroforestales, y se suma así a posibles beneficios para el productor que adopta estos sistemas alternativos, beneficios hídricos en relación con el incremento productivo de pastizal y bosque, y beneficios al nivel de fijación de carbono por medio de “bonos verdes” o “de carbono” o su equivalente en impuestos, etc. (IPCC, 2000). En las estimaciones de la cantidad de carbono almacenado para biomasa aérea se asume generalmente el valor de la fracción de carbono en materia seca en un 50 % sin diferenciar especies (Brown y Lugo, 1992); (IPCC, 2000).

Biomasa forestal

La biomasa forestal es definida como el peso de materia orgánica que existe en un determinado sistema forestal, tanto por encima como por debajo de la superficie del suelo (Muñoz y Vásquez, 2020).

Valorización económica de la captura de carbono

El precio al carbono ha sido por mucho tiempo aclamado por los economistas como el modo costo eficiente de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, el precio al carbono es más que solo una teoría que se promueve en los círculos académicos. Cada vez más países prestan atención a las recomendaciones de

los investigadores, al implementar precios al carbono por medio de impuestos a las emisiones o esquemas de permisos negociables. Alrededor del mundo, existen 57 iniciativas de precio al carbono, que cubren alrededor del 20 % de las emisiones globales. (Trinidad y Ortiz, 2019).

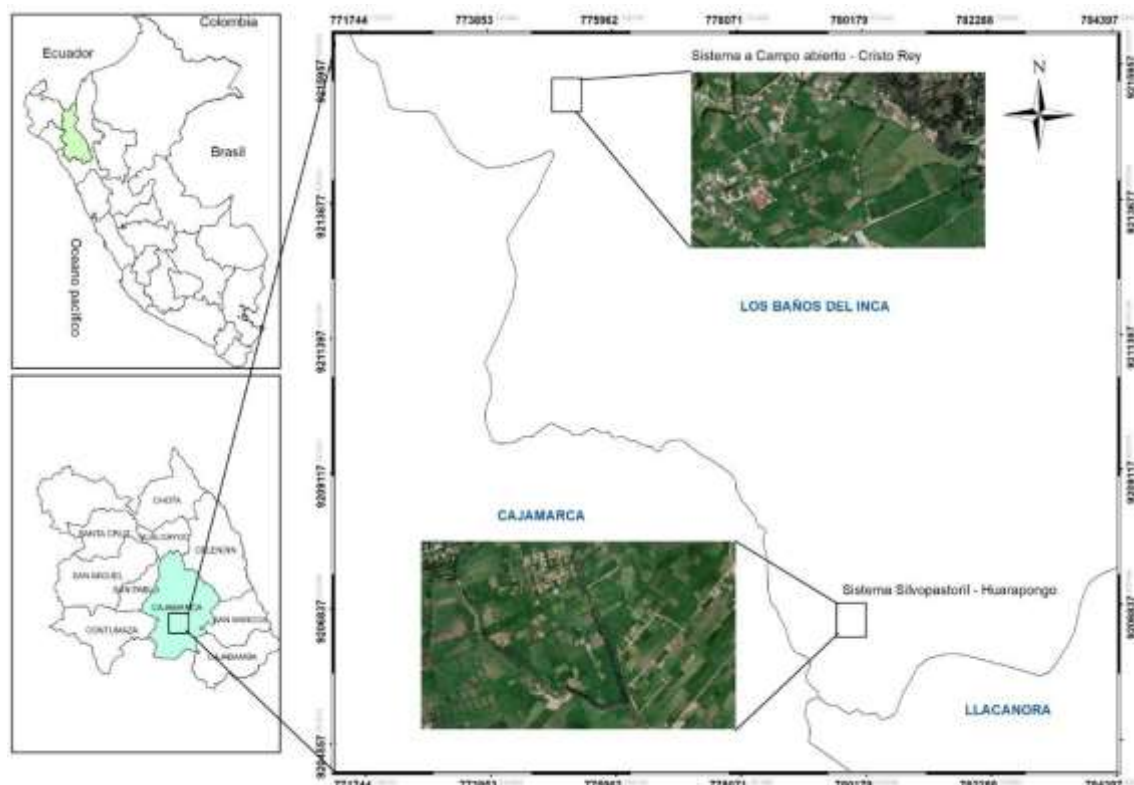
Incrementar tus conceptos, mantillo, hojarasca etc. que estes utilizando en tu trabajo

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS.

3.2. Localización del estudio.

Figura 1. *Ubicación de la zona de estudio.*



3.3. Método de investigación.

La investigación se enmarcó en un enfoque cuantitativo, ya que se fundamenta en la medición directa de variables como el contenido de carbono, la biomasa y la materia orgánica, con el fin de comparar los resultados obtenidos en los dos sistemas ganaderos distintos. Su carácter es aplicado, pues busca dar respuesta a un problema práctico al evaluar cómo la cobertura arbórea influye en la captura de carbono; además, es de tipo explicativo y comparativo, al pretender establecer la relación causal entre la presencia de árboles y la mayor o menor fijación de carbono.

3.4. Diseño de la Investigación.

Es no experimental de corte transeccional comparativo en el que no se manipularon las variables, sino que se observó y se midió en un momento determinado la diferencia entre ambos sistemas. Finalmente, se empleó un método experimental de campo indirecto, que incluye la medición destructiva y no destructiva de biomasa, el cálculo del carbono almacenado en la parte aérea y subterránea de los árboles, así como el análisis del carbono presente en el suelo.

3.5. Población, muestra, unidad de análisis y unidades de observación Población:

Sistemas ganaderos con y sin cobertura arbórea.

Muestra: dos fundos ganaderos con dos sistemas distintos uno con cobertura y otro sin cobertura arbórea.

Unidad de análisis: Un sistema con y sin cobertura arbórea.

Unidad de observación: Informes de análisis de laboratorio, registros de producción de leche, de pastos.

3.6. Técnicas e instrumentos de recopilación de información

Las técnicas que se utilizaron fueron del tipo cuantitativo.

3.7. Técnicas para el procesamiento y análisis de la información.

Los datos se procesarán mediante el análisis descriptivo y el software Microsoft Excel para realizar cálculos de medias para las diferentes muestras obtenidas.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico con medidas de tendencia central, el cual nos proporciona el método para comparar las medias de las muestras; para realizar las comparaciones de la determinación de captura de carbono de los dos sistemas ganaderos.

Aplicación de instrumentos de recolección de datos o el diseño experimental.

El experimento se desarrolló en base a la siguiente metodología:

Arboles.

- Para determinar la captura de carbono se utilizó el método destructivo. Se optó por este método ya que el Fundo Santa Margarita se encontró en un proceso de reestructuración de potreros.
- Para la determinación de la biomasa aérea arbórea, se procedió a cortar el árbol para determinar el peso; luego se separaron los troncos, las ramas primarias, ramas secundarias y luego las raíces.

En el árbol.

Cálculo de la biomasa aérea arbórea y sus raíces.

Cobertura arbórea.

Se talaron 3 árboles considerando la edad de los mismos. Los árboles se cortaron al ras del suelo, para luego tomar las muestras del tronco, ramas y hojas (1,000

g/muestra).

Las raíces fueron extraídas manualmente para determinar el peso de estas.

Las muestras tomadas se llevaron al laboratorio para su análisis correspondiente y determinar la cantidad de carbono orgánico.

Biomasa forrajera.

La biomasa forrajera disponible en el sistema con cobertura arbórea se tomaron las muestras a 3m, 6m y 9 m del árbol.

Cálculo carbono total

Para calcular el carbono total se suma el carbono aéreo total y el carbono radicular como se indica en la siguiente ecuación:

$$CT = CAT + CR$$

donde:

- CT = carbono total.
- CAT = carbono aéreo total.
- CR = carbono radicular t.

Carbono en el suelo.

Para la obtención de las muestras de suelo, se establecieron tres niveles de tomar las muestras se consideró tres profundidades 0:20, 20:40 y 40:60 cm de profundidad y distanciamientos de 3, 6 y 9 m., del árbol.

Para calcular las existencias de carbono edáfico por hectárea (C t ha.), se utilizó la fórmula:

Ecuación 1

$$\text{Cálculo de carbono orgánico } C = A * D \text{ (t/m}^3\text{)} * P_m * f_c \text{ (1)}$$

Dónde:

A = área (ha).

D = densidad aparente del suelo en (ton. de suelo/m³).

Pm = profundidad de muestreo cm.

fc = la fracción de carbono (% C/100) en cada profundidad.

La cantidad de carbono almacenado en los tejidos vegetales se asumió como 50% de la materia seca (Brown 1997).

3.8. Métodos:

Fase preliminar

Se recolecto información bibliográfica de investigaciones desarrolladas en diferentes zonas geográficas, así como también de información referida al área de estudio tales como mapas, planos y otros.

En esta fase se determinó la población en estudio, la cual estuvo representada por un sistema productivo ganadero con cobertura arbórea y otro sistema sin cobertura arbórea y ambas con las características de manejo, raza de ganado y sistema de alimentación similares, así como del tipo de pasto y/o forraje.

La muestra estuvo representada por una parcela de aproximadamente una hectárea, siendo representativa de todos los sistemas del sector. Como componentes del sistema se tuvo árboles de sauce (*Salix Humboldtiana*).

Fase de campo.

Para determinar carbono de la biomasa aérea.

La recolección de datos se realizó en forma directa en campo y se consideró un mínimo de tres árboles de sauce (*Salix humoldtiana*). Mediante el método destructivo.

Luego se extrajo la parte aérea de los 3 árboles, para lo cual se secciono el fuste cada 2 metros extrayéndose rodajas de 5 cm de espesor; así mismo se cortaron las ramas primarias, ramas secundarias, para ser pesadas y tomar las muestras respectivas para ser llevadas al laboratorio.

Para determinar la biomasa de la hojarasca y/o mantillo.

Mediante un cuadrante 0.50 x 0.50 m., se colecto la muestra de mantillo, luego se pesó para determinar el peso fresco total y luego ser llevadas al laboratorio para su análisis correspondiente.

Para determinar la biomasa forrajera.

Para determinar la biomasa forrajera, utilizamos el método del metro cuadrado (1.00 x 1.00 m.) y una vez delimitado el cuadrante, se cortó el forraje a una altura de 5 cm., esto considerando que el pastoreo con ganado es a una altura similar. Luego, se tomaron muestras para determinar la producción de biomasa forrajera por hectárea y luego ser llevadas al laboratorio para determinar el porcentaje de materia seca.

Para el análisis de carbono en el suelo.

Las muestras fueron extraídas en un radio de 3 y 6 metros, al pie de cada uno de los ejemplares de sauce; las muestras fueron colectadas en tres profundidades diferentes (0 a 20 cm, de 20 a 40 cm y de 40 a 60 cm de profundidad).

Para el análisis de carbono en el estiércol.

Las muestras de heces fueron tomadas de 6 vacas en forma directa y mezcladas para ser llevadas al laboratorio.

Para el análisis de carbono en el concentrado.

Se tomaron muestras del concentrado y se registró el consumo diario de concentrado por vaca que están utilizando en los predios y luego llevados al laboratorio para determinar

la producción de carbono.

Para el análisis de carbono en la leche.

Se tomaron muestras de leche de 6 vacas por cada sistema ganadero las cuales se mezclaron y luego fueron llevadas al laboratorio para su análisis.

Para la estimación de la cantidad total de carbono en el sistema, se consideró:

- Carbono de los árboles y raíces
- Carbono de la biomasa forrajera.
- Carbono del mantillo y/o hojarasca.
- Carbono en el suelo.
- Carbono en el estiércol.
- Carbono en el concentrado.
- Carbono en la leche.

Fase de laboratorio

Las muestras recolectadas fueron secadas en estufa a 75 °C, hasta obtener un peso constante (Cañellas y San Miguel, 2000).

La determinación el porcentaje de la materia seca se realizó mediante una regla de tres simple en donde se multiplico el peso de la muestra seca por 100 y dividido entre peso de la muestra fresca.

La determinación del carbono en la biomasa vegetal total se realizó multiplicando la biomasa seca por el factor 0,5, método utilizado por Valenzuela (2001) en varias especies vegetales.

Para la estimación del carbono orgánico en el suelo, se calculó el peso del suelo, para lo cual se multiplicó el área por la profundidad y la densidad aparente que fueron calculados

en el laboratorio. Posteriormente, el peso obtenido se multiplicó por el porcentaje de carbono, dando como resultado el carbono orgánico en t/ha (Eyherabide et al., 2014).

Para la variable producción de leche: Se tomaron muestras de leche para ser analizadas en cuanto a la cantidad de carbono; así como se determinó la producción total de litros de leche producida en el sistema. Se consideró la soportabilidad de las pasturas y esta información será procesada para determinar litros de leche por hectárea.

Para determinar la producción de forraje verde. Se tomaron los registros de biomasa forrajera en cada pastoreo la cual está entre los 35 a 45 días. La altura de corte será entre 5 a 10 cm., considerando que eso es lo que pasta el ganado.

Para determinar la cantidad de materia seca/ha. Se tomaron la muestra fresca y luego se llevó al laboratorio para determinar el porcentaje de materia seca y luego transformado a materia seca/ha.

Calidad de los suelos. Se tomaron muestras de suelo para determinar los niveles de fosforo, potasio, materia orgánica, aluminio, Ph., y textura.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Contenido de carbono en los distintos componentes del sistema.

4.1.1. Carbono en arboles (solo en sistema con cobertura arbórea).

En las tablas 01, se muestran los resultados de Carbono orgánico (C.O) de los árboles *Salix Humboltianan* (Sauce), del fundo ganadero Santa Margarita.

Tabla 1. Contenido de carbono orgánico en biomasa arbórea (*Salix Humboldtiana* – Sauce) en un sistema de producción ganadera con cobertura Arborea fundo Santa Margarita

N° Árbol	Peso Árbol (Kg)	CO. Árbol (%)	CO. t/árbol
Árbol 01	4340.51	53.83	2.336
Árbol 02	2950.59	50.79	1.498
Árbol 03	2715.80	52.54	1426
PROMEDIO	3335.63	52.38	1.753
C.V. (%)	26.3	2.9	28.8

La variable peso del árbol: presentó un promedio de **3335.63 kg** con un coeficiente de variación (CV) de **26.3 %**, lo que indica una alta heterogeneidad en el tamaño de los árboles muestreados. Mientras que para la variable contenido de carbono (%), fue bastante estable, con un promedio de 52.39 % o 52.38 y un CV de apenas 2.9 %, reflejando que la especie mantiene una proporción constante de carbono independientemente de su peso. Sin embargo, la variable carbono total por árbol (t),

alcanzó en promedio 1.75 t/árbol, pero con una dispersión elevada (CV de 28.9 %), lo que sugiere que las diferencias de biomasa influyen directamente en la variabilidad del carbono fijado.

En el sistema ganadero con cobertura arbórea, se estimó una biomasa aérea en promedio de 3335.63 kg/árbol, con un contenido promedio de carbono del 52.38%, lo que representa una captura de 1.753 t C/ha. Este valor con cobertura arbórea de *Salix humboldtiana* representa una contribución relevante sobre captura de carbono en paisajes productivos. Aunque este valor se encuentra por debajo de los reportados por otros autores en diferentes contextos ecológicos, como los obtenidos por Contreras et al. (2022) quienes estimaron entre 2.18 ± 1.13 y 4.51 ± 3.76 t ha⁻¹ de carbono en biomasa aérea en sistemas silvopastoriles, es importante considerar que dichos valores provienen de sistemas más complejos, con múltiples especies arbóreas y condiciones de manejo distintas.

Por otra parte, Ronald (2022) reporta capturas de carbono en pasturas mejoradas y naturales que oscilan entre 3.42 y 8.59 t ha⁻¹, lo cual sugiere un mayor rango de variabilidad. Sin embargo, estos sistemas se caracterizan por una menor densidad arbórea o ausencia de especies leñosas, por lo que su potencial de captura de carbono puede ser limitado en comparación con sistemas silvopastoriles o forestales que incorporan árboles como *S. humboldtiana*.

En relación con estimaciones individuales, Cajilema (2023) reporta valores promedio de 1.3 t CO₂ árbol⁻¹, mientras que Pintado y Astudillo (2021) informan una captura de 1.208 t CO₂ árbol⁻¹. Estos datos respaldan la relevancia de las especies nativas leñosas en estrategias de mitigación climática y coinciden con el rendimiento observado en este trabajo.

Zuloaga (2020) concluye que la presencia de árboles incrementa significativamente en cuanto la fijación de carbono. Los resultados obtenidos para *Salix humboldtiana*

confirman esta tendencia, posicionándola como una especie con alto potencial para su incorporación en sistemas productivos sostenibles, con beneficios tanto ambientales como económicos.

Asimismo, los valores obtenidos en este estudio se alinean con el principio básico del ciclo del carbono (Lapeyre et al., 2004; Taiz y Zeiger, 1998), donde los árboles capturan CO₂ atmosférico mediante la fotosíntesis y lo almacenan en sus tejidos, tanto aéreos como subterráneos. De hecho, Apps et al. (1993) y Brown et al. (1993) afirman que los ecosistemas forestales participan con más del **90 %** del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo, lo cual corrobora la relevancia de incluir el componente arbóreo en los sistemas de producción animal.

Además, el mayor contenido de carbono observado en el sistema con árboles es coherente con las estimaciones derivadas de ecuaciones alométricas (Chávez et al., 2013), que muestran que la biomasa arbórea representa una fracción significativa del carbono total almacenado. Esto también se evidencia en el estudio de Muñoz et al. (2022), donde se encontraron altos niveles de captura de CO₂ en especies arbóreas como *Eucalyptus sp.* y *Alnus acuminata*.

Tabla 2. Carbono orgánico en la raíz de árboles *Salix Humboltiana* (Sauce) en un sistema de producción ganadera con cobertura Arborea fundo Santa Margarita

N° Árbol	Peso raíz (Kg)	C.O. Raíz (%)	C.O. t/árbol
Árbol 01	231	51.60	0.119
Árbol 02	218	53.54	0.117
Árbol 03	196	55.62	0.109
PROMEDIO	215.00	53.59	0.115
CV (%)	8.23	3.75	4.60

En la **Tabla 2** se presentan los resultados obtenidos para la variable raíz. El **peso de las raíces** muestra un coeficiente de variación (CV) de **8.23 %**, lo que refleja una heterogeneidad moderada entre los árboles evaluados. Esta variación puede estar asociada a diferencias individuales en el crecimiento, la absorción de nutrientes o las condiciones edáficas del sitio.

Por otro lado, el **contenido porcentual de carbono** en las raíces presenta un CV de **3.75 %**, considerado bajo, lo que indica una composición química bastante homogénea entre los árboles. Este resultado es relevante, ya que una menor dispersión en el porcentaje de carbono facilita una evaluación más precisa del carbono almacenado.

Finalmente, la **estimación de carbono acumulado en las raíces** alcanza un CV de **4.60 %**, también bajo, lo que evidencia que, a pesar de las diferencias en el peso de las raíces, la cantidad de carbono almacenado se mantiene relativamente consistente entre los individuos analizados.

En el presente estudio, se encontró que la raíz del árbol *Salix humboldtiana* tiene un peso promedio de 215 kg., con un porcentaje de 53.59 % de carbono en promedio y almacena un total de 0.115 toneladas de carbono orgánico, lo que representa un valor significativo en términos de captura de carbono subterráneo. Este resultado cobra especial relevancia al ser contrastado con lo reportado por (Taiz y Zeiger 1998), la vegetación es uno de los mecanismos más prometedores para la mitigación del efecto invernadero, y es precisamente a través del proceso de fotosíntesis que el carbono es capturado y almacenado tanto en la biomasa aérea como en las raíces. Esta afirmación respalda el valor del carbono subterráneo encontrado en *Salix humboldtiana*, ya que confirma que no solo las copas y tallos son reservorios de carbono, sino que también las raíces juegan un papel sustancial en el ciclo del carbono.

Chávez et al. (2013) sostienen que los estudios del carbono deben considerar cada componente del árbol, incluyendo los radicales, ya que son fundamentales para comprender la dinámica del ecosistema. En este sentido, la cifra de 0.115 toneladas hallada en las raíces de *Salix humboldtiana* subraya la necesidad de incluir la biomasa subterránea en las estimaciones de carbono, dado que representa una porción relevante del almacenamiento total.

Asimismo, en investigaciones como la de Zuloaga (2020), se evidencia que los sistemas silvopastoriles superan a los sistemas sin árboles en términos de fijación de carbono, y se indica que el suelo y la biomasa radical son los principales depósitos. El hallazgo en *Salix humboldtiana* coincide con esta premisa, al aportar una cifra concreta que reafirma el papel estratégico de los sistemas con cobertura arbórea en la mitigación del cambio climático.

Por otro lado, Contreras et al. (2022) mencionan que más del 70% del carbono total almacenado en los ecosistemas silvopastoriles se encuentra en el suelo y raíces, lo cual armoniza con los 0.115 t C registrados en este estudio. Esta coincidencia refuerza el argumento de que la biomasa subterránea debe ser priorizada en planes de secuestro de carbono, especialmente en contextos ganaderos con sistemas silvopastoriles.

En cuanto al estudio de Muñoz et al. (2022), se identifica a *Salix humboldtiana* como una de las especies que mayor cantidad de dióxido de carbono captura (más de 607,000 kg en un área extensa). Sin embargo, dicho estudio no desagrega cuánto de ese carbono corresponde específicamente a las raíces. Por tanto, el presente resultado aporta información novedosa y concreta, al aislar y cuantificar el contenido radicular, con lo cual se profundiza en el conocimiento del rol específico de esta especie dentro del ciclo del carbono.

Finalmente, al comparar con los hallazgos de Yerena et al. (2020), quienes indican que las raíces de pastos almacenan un 36% de carbono respecto a su biomasa, se puede inferir

que los árboles, por su estructura más desarrollada, tienen un potencial aún mayor para fijar carbono en sus raíces. Así, la cifra de 0.115 toneladas de carbono en *Salix humboldtiana* contribuye a consolidar la idea de que la inclusión de árboles en sistemas productivos ganaderos no solo mejora la sostenibilidad del sistema, sino que ofrece un aporte clave en la lucha contra el cambio climático.

Carbono en pasturas.

Tabla 3. *Producción promedio de biomasa (t/ha) y materia seca (t/ha) de pasturas ryegrass + Trébol blanco a 3 distancias del árbol en el fundo Santa Margarita*

N°	Distancia entre muestras (m).	Rendimiento Biomasa t/ha.	Rendimiento M.S. t/ha.
1	3.00	11.52	1.77
2	6.00	26.84	4.05
3	9.00	18.92	3.15
TOTAL		19.09	2.99

En el presente estudio, los sistemas ganaderos con cobertura arbórea mostraron una producción de materia seca de 2.99 toneladas por hectárea. Aunque esta cantidad puede parecer modesta frente a sistemas forrajeros más intensivos, adquiere una relevancia significativa cuando se analiza en conjunto con la capacidad de captura y almacenamiento de carbono, particularmente en las raíces.

Diversos autores han resaltado la eficiencia de los sistemas silvopastoriles en la acumulación de carbono orgánico en el suelo. Zuloaga (2020) afirma que la integración de árboles en pasturas no solo mejora la biodiversidad y la estructura del suelo, sino que también aumenta su capacidad de retención de carbono, incluso cuando la productividad primaria neta (como la materia seca) no alcanza niveles elevados. En este sentido, la cifra

de 2.99 t MS/ha observada en este sistema se alinea con un perfil ecológicamente funcional, donde la materia seca, aunque limitada, contribuye activamente al ciclo del carbono.

Además, el trabajo de Contreras et al. (2022) respalda este hallazgo al señalar que más del 70% del carbono almacenado en sistemas con árboles se encuentra en el suelo y en las raíces, lo que coincide con los resultados de este estudio, donde *Salix humboldtiana* mostró un almacenamiento de carbono en raíces de 11.49 toneladas por hectárea. Esta cantidad supera ampliamente la biomasa aérea registrada, lo que confirma que, aun en condiciones de baja producción de materia seca, los árboles desempeñan un rol crucial como sumideros de carbono, especialmente a través de sus raíces profundas y activas.

Finalmente, considerando que la materia seca es un resultado directo de la fotosíntesis tal como lo plantean Taiz y Zeiger (1998), puede inferirse que incluso una producción moderada refleja una actividad metabólica vegetal suficiente para sustentar procesos ecológicos relevantes, como la fijación de carbono. Así, la combinación entre árboles como *Salix humboldtiana* y pasturas en este sistema se presenta como una estrategia viable no solo para la producción ganadera sostenible, sino también para la mitigación del cambio climático mediante la captura de carbono orgánico.

Chávez et al. (2013) también destacan la importancia de la hojarasca, residuos leñosos y raíces en la formación de carbono orgánico del suelo. Bajo esta perspectiva, los aportes de materia seca en el sistema evaluado, aunque no sean excesivos, generan un flujo constante de carbono hacia el subsuelo, lo que contribuye al secuestro de carbono a largo plazo. Esta dinámica subterránea, frecuentemente subestimada en sistemas ganaderos tradicionales, cobra particular importancia en modelos productivos con cobertura arbórea. En los sistemas ganaderos con cobertura arbórea, la captura de carbono presenta un comportamiento significativamente más eficiente en comparación con los sistemas sin

árboles, debido principalmente a la integración funcional de la vegetación leñosa con las especies forrajeras. Este efecto se manifiesta claramente en la producción de biomasa vegetal, la cual alcanza los 19.04 t/ha en estos sistemas, superando los valores reportados para sistemas de pasturas naturales o mejoradas sin cobertura arbórea. La mayor producción de biomasa implica una mayor tasa de fotosíntesis y, por ende, una mayor fijación de carbono atmosférico en los tejidos vegetales, contribuyendo al almacenamiento de carbono tanto en la biomasa aérea como en el suelo a través del aporte de raíces, hojarasca y exudados radicales. Esto concuerda con lo señalado por Zuloaga (2020) y Contreras et al. (2022), quienes demostraron que los sistemas silvopastoriles no solo incrementan la biomasa aérea, sino también el carbono orgánico del suelo (COS), favoreciendo un balance positivo de carbono en el ecosistema. En contraste, los sistemas ganaderos sin cobertura arbórea presentan una menor capacidad de fijación de carbono, no solo por su menor producción de biomasa, sino también por la pérdida de materia orgánica asociada a la menor cobertura del suelo y mayor exposición a procesos de erosión y mineralización rápida del carbono. De esta forma, el rendimiento de biomasa forrajera de 19.04 t/ha en los sistemas con árboles no solo refleja un beneficio en términos productivos, sino que constituye también un indicador del potencial de estos sistemas para mitigar el cambio climático a través del secuestro eficiente del CO₂ atmosférico.

Tabla 4. Comparación de medias de dos tratamientos experimentales para la producción de biomasa forrajera /ha., en dos sistemas ganaderos en la región Cajamarca

Variable	T1 (con cobertura arbórea)	T2 (sin cobertura arbórea)	Significancia
F.V. (kg)	13.22 ± 0.54 (a)	11.80 ± 0.38 (b)	(*) (p < 0.05)
M.S. (kg)	2.57 ± 0.08 (a)	2.46 ± 0.05 (a)	NS (p > 0.05)
% M.S.	19.52 ± 0.38 (b)	20.90 ± 0.26 (a)	(**) (p < 0.01)

Letras distintas en la misma fila indican diferencias estadísticas entre tratamientos.

En la tabla 4 se muestra los resultados del efecto de la cobertura arbórea sobre la producción de forraje, considerando tres variables claves como forraje verde (F.V.), materia seca (M.S.) y el porcentaje de materia seca (% M.S.). Para ello, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) complementado con una comparación de medias, lo que permitió identificar diferencias estadísticas entre los tratamientos con cobertura arbórea (T1) y sin cobertura arbórea (T2).

Los resultados mostraron que en el caso del **(F.V.)** se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (p < 0.05), evidenciando que la presencia de árboles favorece una mayor producción de biomasa fresca en comparación con las parcelas sin cobertura. En relación con la **(M.S.)**, no se observaron diferencias relevantes (p > 0.05), lo que indica que ambos tratamientos mantienen un comportamiento similar en la cantidad total de materia seca obtenida. Finalmente, el **(% M.S.)** mostró diferencias altamente significativas (p < 0.01), siendo superior en las parcelas sin cobertura arbórea, lo que refleja una mayor concentración nutritiva del forraje en estas condiciones.

En conjunto, los resultados sugieren que la cobertura arbórea influye de manera diferenciada en la producción de forraje: mientras que T1 promueve un mayor volumen

de biomasa fresca, T2 ofrece un forraje de mejor calidad en términos de concentración de materia seca.

Si bien el sistema con árboles presentó ligeramente mayor producción de materia seca (2.57 vs. 2.46 t/ha), el porcentaje de materia seca fue mayor en el sistema sin árboles (20.90% frente a 19.52%). Esto podría deberse a las condiciones micro climáticas generadas por la sombra y mayor humedad relativa en los sistemas silvopastoriles, lo cual favorece la producción de biomasa total pero también puede implicar un mayor contenido de agua en el forraje.

Estos resultados pueden interpretarse a la luz de las afirmaciones de Taiz y Zeiger (1998), quienes señalan que la vegetación, especialmente los árboles, juega un rol crucial en la captura de carbono a través de la fotosíntesis, contribuyendo también a la mejora de la productividad vegetal. Además, J. Alonso (2011) subraya que la producción total de biomasa en sistemas silvopastoriles depende del tipo y densidad de árboles, el arreglo espacial y el manejo; lo cual concuerda con la ligera superioridad observada en la producción con cobertura arbórea.

Asimismo, la producción de materia seca constituye un parámetro clave en la estimación del carbono capturado en biomasa vegetal, como indican Chávez et al. (2013), ya que está directamente relacionada con el potencial de almacenamiento de carbono en la vegetación. En ese sentido, la mayor producción de M.S. en sistemas con árboles, aunque modesta, podría representar una ventaja acumulativa en la fijación de carbono a largo plazo.

Cabe señalar que si bien la diferencia en materia seca no es drástica (0.11 t/ha), su relevancia se amplifica al considerar la multifuncionalidad del sistema silvopastoril, que, además de aportar forraje, proporciona sombra, madera, regulación hídrica y servicios ecosistémicos. Así lo argumentan Lapeyre et al. (2004) y Fonseca et al. (2008), quienes resaltan el rol de estos sistemas como herramientas para la adaptación y mitigación del cambio climático, con potenciar incluso para la comercialización del carbono capturado.

Aunque las diferencias en producción de biomasa vegetal entre sistemas con y sin cobertura arbórea no son extremadamente marcadas, el sistema silvopastoril muestra una ligera ventaja en la producción total de materia seca, además de sus beneficios ecológicos asociados, lo cual lo

posiciona como una opción más sostenible. Este resultado respalda la hipótesis de que los sistemas con árboles son más eficientes tanto en productividad como en almacenamiento de carbono.

Medir el carbono en los pastos es esencial para comprender su papel en el equilibrio ecológico, promover prácticas sostenibles y combatir el cambio climático. Así mismo los pastos cumplen un papel fundamental en la mitigación de las emisiones de los gases de efecto invernadero, y el CO₂ es uno de esos gases. Las plantas a través de la fotosíntesis fijan en la biomasa estos gases, de este modo se crea un reservorio importante para almacenar CO₂ y otros gases de invernadero por un periodo de tiempo prolongado, por ello es preciso cuantificar el carbono almacenado en los pastos para paliar el cambio climático global (Lapeyre et al., 2004). En la tala 05 y 06 se muestran los resultados de la producción de biomasa forrajera y materia seca de dos sistemas ganaderos uno con cobertura arbórea y otro sin cobertura arbórea. en donde la producción de biomasa forrajera es superior al reportado por (Oliva Et.Al. 2018) en 10.79 y 5.9 t/ha/corte respectivamente.

Oliva et.al. (2018), indica que los resultados obtenidos para la producción de forraje verde en sistemas con cobertura arbórea son significativos frente al sistema de sin cobertura arborea. Estos resultados se confirman con los encontrados en el presente trabajo tal y como se muestran en la figura 01 donde la diferencia que existe entre los dos sistemas ganaderos en producción de materia seca t/ha., el sistema ganadero con cobertura arbórea supera en 0.57 t/ha/corte. Esta diferencia se debe probablemente a que la mineralización de la materia orgánica del suelo puede estar determinada por actividades productivas como el pastoreo y manejo de la pastura (**Jair A. et al Espinoza L, 2014**). no obstante, **Villarreal (2014)** citado por (**Oliva et.al. 2018**), menciona que el rendimiento también está condicionado por factores como clima, frecuencia e intensidad de pastoreo y época de corte. Por otro lado, se puede evidenciar que la producción de forraje en sistemas silvopastoriles en la investigación realizada por (**Sánchez. 2013**) quien obtuvo rendimientos superiores a los reportados en el presente trabajo con 2,95 kg/m² en rye grass y 0,98 kg/m² en trébol; diferencia que se presume este más influenciada por el tipo de manejo. Los resultados encontrados y los reportados por los autores mencionados nos permiten reafirmar que los sistemas silvopastoriles pueden incrementar el rendimiento de los pastos.

La mineralización de la materia orgánica del suelo puede ser acelerado por actividades productivas como el pastoreo y manejo de pastos.

Tabla 5. *Producción promedio de Carbono orgánico en biomasa forrajera (F.V.) en pasturas de ryegrass trébol en sistemas ganaderos con y sin cobertura arbórea*

N°	CON COBERTURA ARBOREA			SIN COBERTURA ARBOREA		
	CO. (%)	Producción de Biomasa forrajera t/ha	Producción de Carbono t/ha.	CO. (%)	Producción de Biomasa forrajera t/ha	Producción de Carbono t/ha.
1	56.79	13.56	7.7	44.72	11.52	6.06
2	49.13	14.2	6.98	38.46	26.84	5.46
3	55.51	14.84	8.24	35.9	18.92	5.33
	53.81	14.2	7.64	39.69	14.2	5.62

Los resultados que se muestran en la tabla 5 fueron sometidos a una prueba de análisis de varianza (ANOVA) y a la prueba de t. en la cual se realizó la comparación de los sistemas con cobertura arbórea versus sin cobertura arbórea, esto con la finalidad de evaluar si existen diferencias estadísticas significativas entre dos sistemas de producción. Para las variables contenido de carbono orgánico (CO, %), producción de biomasa forrajera (t/ha) y Producción de carbono (t/ha).

Para ello se aplicó un ANOVA de un factor con dos niveles (equivalente a una prueba t de Student para muestras independientes), utilizando 3 réplicas por tratamiento.

Tabla 6. *Resultados estadísticos de la comparación de medias con y sin cobertura arbórea*

Variable	Media con cobertura	Media sin cobertura	F	p-valor
CO (%)	53.81	39.69	15.97	0.016 *
Biomasa (t/ha)	14.20	19.09	1.21	0.332 NS
Carbono (t/ha)	7.64	5.62	22.28	0.009 *

Los resultados que se presentan en la tabla 6 se evidencian que el contenido de carbono orgánico (CO %) y la producción de carbono (t/ha) fueron significativamente superiores en el sistema con cobertura en comparación con el sistema sin cobertura. Este hallazgo pone de manifiesto el rol fundamental de la cobertura en los procesos de acumulación y fijación de carbono en los ecosistemas productivos.

Asimismo, el análisis de la producción de biomasa forrajera (t/ha) no mostró diferencias estadísticamente significativas entre ambos tratamientos. Ello indica que la cobertura no ejerce una influencia determinante sobre la cantidad de biomasa generada. No obstante, sí se reconoce su aporte en la calidad de dicha biomasa, particularmente en relación con su contenido y capacidad de captura de carbono.

En conjunto, estos resultados permiten concluir que la cobertura constituye un factor esencial para promover la fijación y el almacenamiento de carbono tanto en el suelo como en la biomasa.

También hay diferencias claras en la capacidad de captura de carbono entre los sistemas evaluados: el sistema ganadero con cobertura arbórea alcanzó 7.64 t C/ha/corte, mientras que el sistema sin árboles acumuló 5.62 t C/ha. Esta diferencia de 2.02 t C/ha/corte, confirma el papel clave de la cobertura leñosa en el secuestro de carbono.

En términos funcionales, la mayor captura de carbono en el sistema con árboles se explica por la acumulación en la biomasa aérea, subterránea y el enriquecimiento del suelo con materia orgánica. Taiz y Zeiger (1998) señalan que los árboles fijan CO₂ atmosférico a través de la fotosíntesis, almacenándolo en tejidos leñosos y raíces, mientras que Chávez et al. (2013) destacan el aporte de biomasa estructural y de carbono orgánico del suelo (COS). De manera similar, Zuloaga (2020) y Contreras et al. (2022) evidenciaron que los sistemas silvopastoriles duplican o más la capacidad de almacenamiento de carbono respecto a los sistemas sin árboles, alcanzando hasta 4.51 t/ha C frente a valores mínimos de 0.19 t/ha C en pasturas puras.

Estos hallazgos también coinciden con Ronald (2022), quien reportó mayores reservas de carbono en pasturas mejoradas con árboles en comparación con pastizales naturales, y con Oliva et al. (2018), quienes concluyeron que la mayor producción de biomasa en sistemas silvopastoriles está directamente correlacionada con la fijación de carbono. De hecho, (Lapeyre et al. 2004) y (Melillo et al. 1989) señalan que los suelos enriquecidos con hojarasca y raíces actúan como sumideros de carbono de larga duración, lo que coincide con el efecto positivo de la cobertura arbórea encontrado en este estudio.

A escala global, (Apps et al. 1993) y (Brown et al. 1993) subrayan que los ecosistemas forestales y agroforestales son responsables de hasta el 90 % del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo, reforzando la idea de que la inclusión de árboles en sistemas productivos contribuye significativamente a la mitigación climática. Asimismo, Márquez (2000) y FONAM (2006) destacan a los ecosistemas forestales y agroforestales como sumideros estratégicos de carbono al integrar biomasa aérea, subterránea, necromasa y suelo.

En contraste, el sistema sin cobertura arbórea, si bien retuvo 5.62 t C/ha, mostró limitaciones atribuibles a la mayor exposición del suelo, menor biomasa disponible y

ausencia de aportes leñosos. Jair et al. (2014) reportaron resultados similares al observar que el pastoreo intensivo y la reducción de la cobertura vegetal disminuyen significativamente las reservas de carbono orgánico del suelo. Sin embargo, estudios como los de Yereña et al. (2020) y Zermeño et al. (2011) indican que los pastizales, que cubren alrededor del 20 % del planeta, también cumplen un rol importante en la captura CO₂, aunque su potencial se incrementa considerablemente cuando se integran con especies arbóreas.

En el mismo sentido, el IPCC (2000, 2001) estima que la implementación de sistemas agroforestales y la reforestación podrían compensar hasta un 12–15 % de las emisiones de CO₂ derivadas del uso de combustibles fósiles, lo que reafirma la importancia de los sistemas silvopastoriles en las estrategias globales de mitigación. Finalmente, Steinfeld et al. (2006) advierten que los sistemas ganaderos convencionales, al carecer de árboles, no solo limitan la captura de carbono, sino que también contribuyen de forma significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que refuerza la urgencia de transitar hacia modelos más sostenibles.

Los resultados obtenidos confirman que los sistemas ganaderos con árboles no solo incrementan la captura de carbono, sino que también generan beneficios colaterales como la mejora en la fertilidad del suelo, regulación hídrica, provisión de sombra y biodiversidad asociada. Estos beneficios, mencionados por diversos autores, fortalecen la visión de los sistemas silvopastoriles como una opción de manejo productivo ambientalmente sostenible.

En el análisis de la cantidad de carbono orgánico presente en el forraje verde de pasturas compuestas por ryegrass y trébol, se observó una diferencia notable entre sistemas ganaderos con y sin cobertura arbórea. En los sistemas sin árboles, el contenido de carbono orgánico en el forraje alcanzó valores moderados, reflejo de condiciones de crecimiento más expuestas, con limitaciones en la regulación térmica, la humedad del suelo y la calidad de la biomasa. En contraste, en los sistemas con cobertura arbórea, el forraje de ryegrass y trébol mostró un contenido significativamente mayor de carbono orgánico por hectárea, mayor aporte de materia orgánica al sistema productivo.

Esta diferencia puede explicarse por el papel que desempeñan los árboles en la mejora de las condiciones edáficas y microclimáticas. La sombra parcial que proporcionan reduce la evaporación del agua del suelo, mejora la disponibilidad hídrica y contribuye a una mayor actividad biológica, factores que favorecen el crecimiento y la composición química del forraje. Además, la deposición de hojarasca y raíces finas de los árboles enriquece el suelo con carbono y nutrientes, lo que potencia la productividad y calidad del pasto subyacente.

Estos hallazgos son coherentes con estudios previos. Por ejemplo (Vargas et al. 2018) reportaron un aumento de hasta un 40% en el contenido de carbono orgánico en forraje de pasturas bajo sistemas silvopastoriles, en comparación con sistemas convencionales sin árboles. De manera similar (Rodríguez y López 2020), señalaron que las pasturas de ryegrass y trébol en presencia de especies arbóreas como *Erythrina poeppigiana* y *Leucaena leucocephala* mostraron no solo una mayor biomasa, sino también una mejor proporción de compuestos orgánicos, incluyendo carbono, nitrógeno y lípidos.

Estos resultados refuerzan la idea de que los sistemas con cobertura arbórea no solo promueven la sostenibilidad del ecosistema, sino que también optimizan la calidad del forraje consumido por el ganado. La mejora en el contenido de carbono orgánico en el

forraje se traduce en una dieta más rica y energética para los animales, lo que repercute directamente en su productividad y salud.

Tabla 7. *Análisis estadístico de la Producción de Carbono Orgánico de Mantillo en pasturas de ryegrass-trébol a distintas distancias del árbol - Fundo Santa Margarita*

Variable	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Biomasa (t/ha)	0.767	0.087	11.34
C.O. (%)	15.37	0.27	1.73
C.O. (t/ha)	1.54	0.031	1.99

En la tabla 7 se observa los datos de la evaluación de la producción promedio de carbono orgánico de mantillo en las pasturas de ryegrass-trébol a diferentes distancias del árbol evidencia que la biomasa (t/ha) presenta la mayor variabilidad relativa, con un coeficiente de variación cercano al 11.34%. Esto sugiere que la producción de biomasa es más sensible a los cambios de distancia con respecto al árbol. En contraste, tanto el porcentaje de carbono orgánico como su contenido expresado en toneladas por hectárea muestran una variabilidad baja, inferior al 1.99%. Este comportamiento indica que la concentración y la cantidad de carbono orgánico se mantienen estables en las tres distancias evaluadas, lo que permite concluir que la cobertura arbórea no genera diferencias significativas en la acumulación de carbono. Sin embargo, sí parece influir en la biomasa producida, la cual muestra una mayor dispersión en los resultados.

Así mismo en la tabla 7 se reporta los resultados del presente estudio en la cual se determinó que la cantidad de carbono orgánico capturado en el componente mantillo y/o

hojarascas es de 1.54 t/ha. Este valor, aunque relativamente bajo en comparación con otros componentes del ecosistema (como la biomasa aérea o el carbono del suelo), representa una fracción significativa del ciclo del carbono en los sistemas ganaderos, especialmente en aquellos con cobertura arbórea.

Diversos estudios han señalado la importancia de esta capa superficial en la dinámica de carbono. Por ejemplo, Contreras et al. (2022) reportaron valores de hasta 3.09 t/ha de carbono en hojarascas dentro de sistemas silvopastoriles, superiores a los valores observados en gramíneas sin cobertura arbórea (0.16 t/ha según Ronald, 2022). En este contexto, el valor hallado de 1.54 t en este estudio indica que, aunque en menor cantidad, el mantillo contribuye al secuestro de carbono, sobre todo en sistemas donde su presencia está limitada por la escasa densidad arbórea. Este resultado respalda la hipótesis de que los sistemas ganaderos con cobertura arbórea presentan un mayor potencial de captura y almacenamiento de carbono. La presencia de árboles genera una mayor cantidad de residuos orgánicos, lo que incrementa la acumulación de mantillo y, por ende, el carbono almacenado en este componente. Por el contrario, en sistemas ganaderos sin cobertura arbórea, esta capa orgánica es menos densa o incluso ausente, limitando la acumulación de carbono y la regeneración del suelo.

Aunque el valor de 1.54 t pueda parecer bajo en términos absolutos, su importancia radica en el rol que cumple dentro del sistema, ya que forma parte de un reservorio dinámico de carbono que participa activamente en el ciclo biogeoquímico del ecosistema. Además, la descomposición controlada de la hojarasca reduce las emisiones inmediatas de gases de efecto invernadero y favorece procesos como la formación de humus, que a su vez prolonga la permanencia del carbono en el suelo (Schlesinger, 1990).

Finalmente, estos resultados invitan a fortalecer el diseño y manejo de sistemas silvopastoriles como una estrategia integral no solo para la producción ganadera

sostenible, sino también para la mitigación del cambio climático a través del secuestro de carbono en todos los componentes del ecosistema, incluyendo aquellos comúnmente subestimados como el mantillo y/o hojarasca.

Tabla 8. *Producción promedio de Carbono orgánico de Mantillo en pasturas de ryegrass trébol en sistemas sin cobertura arbórea - fundo Tres Molinos*

Variable	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Biomasa (t/ha)	0.969	0.085	8.77
C.O. (%)	14.2	0.64	4.51
C.O. (t/ha)	1.94	0.074	3.81

En la tabla 8 se muestran los análisis del sistema sin cobertura arbórea, la biomasa presenta un coeficiente de variación de 8.77%, lo que indica una moderada variabilidad en la producción de mantillo. El porcentaje de carbono orgánico alcanza un promedio de 14.2%, con una variabilidad algo mayor ($CV \approx 4.5\%$) en comparación con el sistema con cobertura arbórea, lo que refleja cierta dispersión en la concentración de carbono en el material evaluado. Por su parte, el contenido de carbono orgánico en toneladas por hectárea muestra una variabilidad baja ($CV \approx 3.81\%$), lo que sugiere estabilidad relativa en la cantidad de carbono acumulado en el suelo.

También se ha determinado una captura de carbono de mantillo y/o hojarasca equivalente a 1.94 t/ha. Este valor resulta significativamente bajo en comparación con los sistemas silvopastoriles o aquellos con presencia de árboles, donde la acumulación de hojarasca contribuye de manera más sustantiva a la fijación de carbono.

Este resultado se comprende mejor al considerar que la presencia de árboles en un sistema productivo agropecuario incrementa de forma notoria la generación de biomasa aérea y subterránea, como se ha documentado en investigaciones previas (Contreras et al., 2022; Zuloaga, 2020). Los árboles no solo aportan biomasa leñosa que se convierte en material orgánico al descomponerse, sino que también promueven un microclima que favorece la acumulación y lenta descomposición de hojarascas, lo que incrementa el contenido de carbono en el suelo y en el mantillo.

En contraste, en los sistemas ganaderos sin cobertura arbórea, como el evaluado en la campiña de Cajamarca, la ausencia de árboles limita la acumulación de hojarascas, ya que el único aporte orgánico proviene del pasto y residuos animales, los cuales son fácilmente degradables o removidos por el pisoteo y manejo ganadero. Esta situación limita el aporte de carbono en la fracción del mantillo y reduce su capacidad de actuar como sumidero de carbono. Como lo señala Steinfeld et al. (2006), estos sistemas tienden a liberar más carbono del que almacenan, debido a su escasa cobertura vegetal y al impacto del pastoreo intensivo.

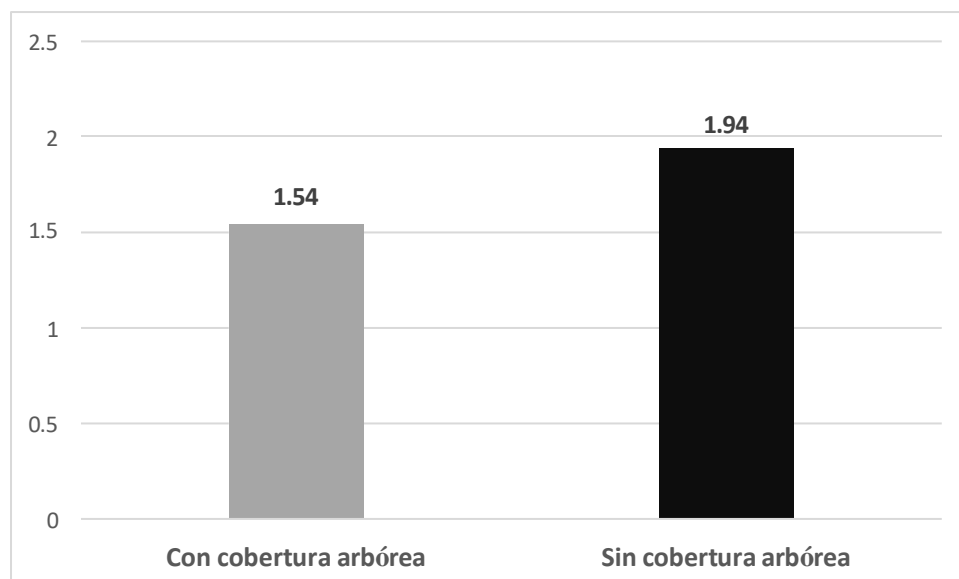
Adicionalmente, el resultado de 1.94 t C/ha refleja un mínimo flujo de carbono hacia el suelo desde la superficie, lo cual compromete la estabilidad del ecosistema y su capacidad de mitigación frente al cambio climático. Este bajo nivel de captura también pone en evidencia que, sin árboles que generen hojarascas persistentes y de lenta descomposición, se pierde un componente esencial del ciclo del carbono. El mantillo representa un reservorio transitorio pero crítico de carbono, y su escasa presencia limita tanto la fertilidad del suelo como la capacidad de este sistema para actuar como estrategia de mitigación ambiental.

El mantillo constituye la interfaz inmediata entre la vegetación viva y el suelo, actuando como una capa de transición que facilita la incorporación del carbono atmosférico

capturado por la fotosíntesis hacia las reservas edáficas. Este material vegetal en descomposición contiene residuos foliares, ramillas y otros fragmentos orgánicos que, al descomponerse, liberan nutrientes esenciales y carbono al suelo, enriqueciendo su contenido de materia orgánica y promoviendo su fertilidad a largo plazo (Melillo et al., 1989; Johnson, 1992).

Por tanto, los resultados obtenidos en este sistema ganadero sin árboles reafirman la hipótesis específica H1 del estudio: existe una diferencia significativa en el almacenamiento y captura de carbono entre sistemas ganaderos con y sin cobertura arbórea. La cifra obtenida constituye una señal clara de que la ausencia de árboles compromete seriamente la función ecológica del ecosistema ganadero como sumidero de carbono, limitando su papel en estrategias regionales de adaptación y mitigación del cambio climático.

Figura 4. *Producción promedio de Carbono orgánico en Mantillo (t.C/ha) en sistemas con y sin cobertura arbórea con pasturas de ryegrass trébol.*



En la Figura 3 se muestra la concentración de carbono orgánico, en el mantillo fue de 1.54 t/ha en el sistema ganadero con cobertura arbórea, mientras que en el sistema sin cobertura se obtuvo un valor inferior de 1.94 t/ha. Estos resultados evidencian una mayor capacidad de acumulación de carbono en los sistemas ganaderos sin cobertura arbórea, lo cual es coherente con diversos hallazgos reportados en la literatura científica.

Autores como Taiz y Zeiger (1998) destacan que la vegetación, especialmente los árboles, desempeña un rol fundamental en la captura de carbono atmosférico a través de la fotosíntesis, almacenándolo en la biomasa y en el suelo. De igual manera, Lapeyre et al. (2004) subrayan que los sistemas agroforestales, al combinar especies forrajeras con árboles, incrementan la capacidad de captura de carbono en comparación con sistemas exclusivamente herbáceos.

Chávez et al. (2013) enfatizan que la producción de mantillo es una vía importante de transferencia de carbono desde la biomasa aérea hacia el suelo, especialmente en sistemas silvopastoriles. El mayor aporte de hojarasca en estos sistemas genera una acumulación más significativa de carbono orgánico en la capa superficial del suelo, contribuyendo al mejoramiento de su fertilidad y estructura.

Los hallazgos de este trabajo también se alinean con los de Contreras et al. (2022), quienes reportaron mayores niveles de carbono acumulado en hojarasca ($3,09 \pm 2,45$ t/ha) en sistemas silvopastoriles en comparación con gramíneas sin árboles.

Además, Zuloaga (2020) sostiene que los sistemas silvopastoriles no solo incrementan la biomasa aérea y subterránea, sino que también aumentan significativamente la acumulación de carbono en el suelo y el mantillo. En ese sentido, los valores obtenidos en el presente estudio corroboran esta tendencia, aunque en menor magnitud, lo cual puede deberse a diferencias en las especies utilizadas, la edad del sistema, la densidad arbórea o las condiciones edafoclimáticas locales.

En contraste, los sistemas sin cobertura arbórea presentan limitaciones en el secuestro de carbono debido a una menor producción de hojarasca y, por tanto, una menor incorporación de materia orgánica al suelo. Esta limitación ha sido también advertida por Steinfeld et al. (2006), quienes señalan que los sistemas de pastoreo sin árboles tienden a perder carbono hacia la atmósfera, contribuyendo al cambio climático.

Finalmente, aunque la diferencia de 0.4 t C/ha de carbono entre ambos sistemas podría parecer modesta, en el sistema con cobertura arbórea representa un aporte importante cuando se proyecta a escala regional o nacional, y refuerza la importancia de promover sistemas productivos más sostenibles y resilientes como los sistemas silvopastoriles.

4.2. ACUMULACIÓN DE CARBONO:

Tabla 9. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) bifactorial para el carbono orgánico del suelo en función de la distancia al árbol y la profundidad

Fuente	Suma de cuadrados	gl	F	p-valor
Distancia (3 m vs 6 m)	1067.37	1	807.73	2.23×10^{-12} ***
Profundidad (20, 40, 60 cm)	3051.08	2	1154.44	1.91×10^{-14} ***
Distancia \times Profundidad	1319.9	2	499.41	2.80×10^{-12} ***
Residual	15.86	12		

De igual manera, la interacción entre distancia y profundidad resultó significativa ($p < 0.001$), lo que demuestra que el efecto de la distancia depende de la profundidad evaluada. En la capa de 20 cm, la diferencia entre 3 m (61.4 t/ha) y 6 m (22.6 t/ha) es muy amplia; en cambio, a 40 cm la diferencia se reduce (3 m = 23.9 t/ha frente a 6 m = 14.7 t/ha), y a 60 cm los valores son similares (3 m = 10.3 t/ha y 6 m = 12.1 t/ha).

En conclusión, el carbono orgánico depende tanto de la distancia al árbol como de la profundidad del suelo, con una interacción importante entre ambos factores. La influencia de la distancia es muy marcada en las capas superficiales, mientras que en las capas profundas el efecto tiende a diluirse.

El estudio realizado en el Fundo Huayrapongo muestra que la acumulación de carbono orgánico (tabla 09) en el suelo varía tanto con la profundidad como con la distancia al árbol. A 3 m de distancia, el carbono orgánico fue de 61.51 t/ha en los primeros 20 cm, disminuyendo a 23.92 t/ha (40 cm) y 10.33 t/ha (60 cm). A 6 m del árbol, la acumulación fue menor: 22.58 t/ha (20 cm), 14.72 t/ha (40 cm) y 12.09 t/ha (60 cm). En conjunto, el promedio general alcanzó 24.19 t/ha. Estos resultados confirman que la mayor concentración de carbono se da en los primeros 20 cm del suelo en mayor proximidad al árbol, lo que evidencia la influencia directa de la cobertura arbórea en la dinámica del carbono orgánico.

Nuestros resultados coinciden con lo reportado por (Zuloaga 2020) y (Contreras et al. (2022), demostraron que los sistemas silvopastoriles acumulan mayores cantidades de carbono en comparación con sistemas sin árboles, tanto en biomasa aérea como en el suelo. Esto se debe a los aportes de hojarasca, raíces y material leñoso, que enriquecen el contenido de materia orgánica y favorecen la formación de carbono estable.

De manera similar, (Ronald, 2022) observó que la inclusión de árboles en pasturas mejoradas incrementa tanto el carbono en el suelo como en la biomasa aérea, lo que concuerda con la mayor acumulación registrada a menor distancia del árbol en nuestro estudio. La disminución progresiva del carbono a mayor distancia también puede explicarse por la menor incorporación de residuos vegetales, tal como lo señalan (Chávez et al. 2013) al describir el papel de los árboles en la transferencia de carbono hacia el suelo circundante.

En relación con la profundidad, la tendencia decreciente de carbono orgánico en el perfil (20 > 40 > 60 cm) es consistente con lo encontrado por Huamán et al. (2021), quienes destacan que las variaciones en la textura y el contenido de materia orgánica del suelo determinan la capacidad de retención de carbono. Según sus resultados, el carbono tiende a concentrarse en las capas superficiales por el mayor aporte de residuos orgánicos y la menor mineralización bajo condiciones de menor temperatura y mayor humedad.

Iglesias y Montes (2011) resaltan que los sistemas agrosilvopastoriles permiten mantener la estabilidad ecológica del suelo mediante la acumulación de carbono en las capas superficiales, mientras que (Oliva et al. 2018) relacionan la mayor biomasa forrajera en estos sistemas con un incremento en la fijación de carbono.

Por otro lado, la importancia de los pastizales como sumideros de carbono, aunque con menor potencial que los sistemas arbóreos, ha sido señalada por (Yerena et al. 2020) y (Zermeño et al. 2011), quienes destacan que estos ecosistemas cubren grandes extensiones a nivel global y pueden contribuir significativamente a la mitigación de emisiones, especialmente cuando se integran con especies leñosas.

Desde una perspectiva más amplia, (Márquez. 2000) y (IPCC. 2001) subrayan que el manejo forestal y la agroforestería representan estrategias fundamentales para aumentar la fijación de carbono, coincidiendo con el valor de los árboles en los sistemas ganaderos evidenciado en este estudio. Finalmente, la marcada acumulación observada cerca de los árboles coincide con los hallazgos por (Muñoz et al 2022) y (Pintado y Astudillo 2021), quienes resaltan la capacidad de diferentes especies arbóreas para capturar volúmenes significativos de CO₂ y transferir parte de este al suelo.

En síntesis, los resultados obtenidos en el Fundo Huayrapongo evidencian que la acumulación de carbono orgánico en el suelo depende fuertemente de la proximidad al árbol y de la profundidad edáfica, alcanzando los valores más altos en los primeros 20 cm

y cerca de la base arbórea. La literatura revisada respalda estas tendencias, confirmando que los sistemas silvopastoriles son más eficientes que los sistemas sin árboles en la captura y almacenamiento de carbono, y que su incorporación en la ganadería constituye una estrategia viable para la mitigación del cambio climático, la conservación de suelos y la sostenibilidad productiva.

Tabla 10. Determinación de la cantidad de carbono orgánico a tres profundidades de suelo en un sistema ganadero sin cobertura arbórea Fundo Tres Molinos

Profundidad	%	Suelo		
(cm)	carbono	densidad	(t)	t/ha (CO).
20	1.16	1.53	3060	35.50
40	0.58	1.64	3280	19.02
60	0.46	1.66	3320	15.27
Total				23.26

Los resultados obtenidos muestran que las pasturas compuestas por ryegrass (*Lolium perenne*) más trébol (*Trifolium spp.*) alcanzaron una acumulación de 35,5 t C/ha a una profundidad de 0,20 m, lo que representa un valor significativo en términos de secuestro de carbono en suelos bajo cobertura forrajera mejorada.

Este resultado guarda relación con lo reportado por Espinoza et al. (2014), quienes encontraron que los pastos en proceso de pastoreo almacenaron 34,4 t C/ha, superando la capacidad de almacenamiento observada en bosques conservados (22,0 t C/ha) y especies nativas (21,6 t C/ha). Lo anterior sugiere que, bajo condiciones adecuadas de manejo, los sistemas pastoriles pueden constituir sumideros de carbono tan efectivos incluso más que ecosistemas naturales no manejados, debido al constante aporte de residuos vegetales y a la actividad biológica que estimula la formación de materia

orgánica estable.

En contraste, Huamán et al. (2021) reportaron valores significativamente más altos de carbono en el suelo, con un promedio de $364,33 \pm 48,80$ t C/ha a 0,20 m de profundidad en pasturas nativas situadas entre los 4000 y 4410 m.s.n.m. Esta diferencia considerable puede explicarse por las condiciones ecológicas particulares de alta montaña, donde las bajas temperaturas, la menor tasa de descomposición de la materia orgánica, y la presencia de suelos con alto contenido de arcilla favorecen la acumulación de carbono. Además, Huamán et al. concluyen que el aumento de altitud está positivamente correlacionado con el contenido de carbono del suelo, siendo este influenciado también por la textura edáfica. En este sentido, aunque el sistema de ryegrass y trébol evaluado en este estudio no alcanza los niveles de almacenamiento reportados en ecosistemas de alta montaña, sí demuestra una elevada eficiencia en contextos de altitud moderada y manejo agronómico, constituyéndose en una estrategia viable para contribuir a la mitigación del cambio climático mediante el secuestro de carbono en suelos agropecuarios.

Tabla 11. *Cantidad de Carbono orgánico en concentrado para vacas en producción, sistema con cobertura arbórea. Huayrapongo*

Nº	C.O. (%)	Kg. Concentrado/vaca/día	Concentrado/vaca/año	C.O/t/vaca/año
1	39.73	5	1.83	0.73
2	41.13	5	1.83	0.75
3	40.26	5	1.83	0.74
40.37				0.74

En la tabla 11 se observa una mayor concentración de carbono en el alimento podría estar asociada a las condiciones edafoclimáticas generadas por la presencia de árboles, que mejoran la fertilidad del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la calidad de los forrajes.

Diversos estudios en sistemas silvopastoriles han señalado que la integración de árboles incrementa los aportes de materia orgánica y carbono en el sistema suelo-planta, favoreciendo el reciclaje de nutrientes y la acumulación de biomasa de mayor calidad (Murgueitio et al., 2011).

En términos ambientales, este hallazgo respalda la importancia de los sistemas ganaderos con árboles como estrategia de mitigación del cambio climático. No solo capturan carbono en biomasa y suelo, sino que también inciden en la calidad de la dieta animal, contribuyendo a una mayor retención de carbono en la cadena productiva láctea. Estudios recientes destacan que la inclusión de árboles en la ganadería no solo mejora el microclima y el bienestar animal, sino que también potencia la eficiencia ecológica y reduce la huella de carbono del sector (Chará et al., 2019).

En síntesis, los resultados confirman que la presencia de árboles en los sistemas de producción lechera no solo aporta beneficios ecosistémicos, sino que también se refleja en una mayor captura y disponibilidad de carbono orgánico en los alimentos, fortaleciendo la transición hacia modelos de ganadería sostenible y baja en carbono.

Tabla 12. *Cantidad de Carbono orgánico en concentrado para vacas en producción, sistema con cobertura arbórea Tres molinos*

Nº	C.O. (%)	Kg. Concentrado/vaca/día	Concentrado/vaca/año	C.O/t/vaca/año
1	35.09	5	1.83	0.64
2	32.53	5	1.83	0.60
3	37.21	5	1.83	0.68
34.94				0.64

Como se observa en la tabla 11 en el fundo Tres Molinos, los resultados obtenidos evidencian una variabilidad relativamente moderada entre las muestras analizadas.

La muestra que presentó la mayor concentración de carbono alcanzó un valor de 0.68 t/año destacándose sobre las demás como la de mayor contenido de este elemento esencial. Le siguió, con una leve diferencia, otra muestra con un valor de 0.64/año, también situada en el rango superior del espectro observado. En contraste, la muestra con la menor cantidad de carbono mostró un valor de 0.60 t/año, marcando el límite inferior dentro del conjunto de datos.

Esta variación en los niveles de carbono podría atribuirse a diferencias en la composición del concentrado, posibles variaciones en el procesamiento de los ingredientes o a factores asociados al manejo del alimento en condiciones sin cobertura arbórea, donde la exposición directa al ambiente podría influir en la estabilidad de ciertos componentes. A pesar de la ausencia de árboles, que limita el microclima protector, los valores observados indican una formulación del concentrado relativamente homogénea, adecuada para mantener el aporte energético necesario en la dieta de las vacas lecheras.

Tabla 13. *Determinación de la cantidad de carbono orgánico en promedio contenido en el estiércol de ganado vacuno sin cobertura arbórea. Fundo Huayrapongo*

N°	C.O (%)	Kg/vaca/día	Total/hato/año	C.O. Total (t/ha).
1	34.45	38.45	14.03	4.83
2	33.84	38.45	14.03	4.45
3	34.98	38.45	14.03	4.91
Promedio	34.42			4.73

Tabla 14. Determinación de la cantidad de carbono orgánico en promedio contenido en el estiércol de ganado vacuno sin cobertura arbórea. Tres Molinos.

N°	C.O (%)	Kg/vaca/día	Total/hato/año	C.O. Total (t/ha).
1	38.47	35.46	12.94	4.98
2	40.31	35.46	12.94	5.22
3	42.42	35.46	12.03	5.10
Promedio	40.40			5.10

Como se observa en las tablas 13 y 14 los resultados obtenidos entre ambos sistemas el contenido anual de carbono orgánico en estiércol fue mayor en el sistema sin cobertura arbórea (5.10 t C/ha año) que en el con cobertura arbórea (4.73 t C/ha año), es decir, 0.37 t C/ha año menos (≈ 7.3 %). Este resultado describe el carbono que permanece en el estiércol, no la captura total del sistema, y por tanto debe interpretarse con cautela.

En este contexto, la cobertura arbórea contribuye a la conservación de la humedad, la mejora de la estructura del suelo y la promoción de condiciones más estables para la descomposición y transformación del estiércol.

El valor promedio de carbono orgánico refleja una alta carga de materia orgánica que puede tener efectos beneficiosos sobre la fertilidad del suelo, favoreciendo la retención de nutrientes y mejorando la actividad biológica. Este resultado sugiere que la combinación entre producción animal y manejo del paisaje mediante sistemas silvopastoriles puede representar una estrategia efectiva para fortalecer los ciclos naturales del carbono y fomentar una ganadería más sostenible.

Tabla 15. Producción de Carbono orgánico (t/año) en leche en sistemas productivos sin cobertura arbórea. Fundo Tres Molinos.

N° muestra	% CO.	Densidad	Kg.	Kg.CO/día	t. CO/año
			Leche/día		
1	44.82	1.028	15.73	7.05	2.57
2	29.56	1.027	15.71	4.64	1.70
3	31.67	1.028	15.73	4.98	1.82
Promedio	35.35	1.028	15.72	5.56	2.03

En la tabla 15 se presenta los resultados obtenidos a lo largo de un ciclo de producción de leche anual. En el sistema ganadero con cobertura arbórea, se ha registrado un promedio de 2.03 t de C/vaca/año. Este valor refleja una estabilidad relativa en la composición de la leche, pese a las condiciones ambientales más expuestas que caracterizan a los sistemas sin árboles.

La ausencia de cobertura arbórea implica una mayor exposición del ganado a factores como la radiación solar directa, fluctuaciones térmicas y menor regulación microclimática, elementos que pueden incidir en el bienestar animal y, en consecuencia, en la calidad de los productos derivados. No obstante, el promedio obtenido sugiere que, a pesar de estas limitaciones, las vacas han mantenido una producción lechera con una concentración constante de carbono orgánico,

Este resultado también puede interpretarse como reflejo del tipo de alimentación y manejo aplicado en estos sistemas, donde el concentrado y los forrajes disponibles, aunque sin el respaldo de un entorno arbóreo, han permitido sostener una calidad nutritiva aceptable del producto final. Aun así, se deja entrever el potencial de mejora si se integraran elementos naturales, como árboles, que aporten beneficios ecosistémicos

complementarios al rendimiento animal.

Tabla 16. *Producción de Carbono orgánico (t/año) en leche en sistemas productivos con cobertura arbórea. Fundo Santa Margarita*

N° muestra	C (%)	Densidad.	Kg. leche/día	Kg. C/día	t. C/vaca/año
1	54.18	1.029	17.70	9.59	3.26
2	52.09	1.028	17.68	9.21	2.82
3	55.51	1.030	17.72	9.83	3.19
Promedio	53.93	1.029	17.70	9.54	3.09

En contraste, el fundo ganadero (tabla 16) que integran cobertura arbórea, se registró un promedio anual de 3.09 t C/año/vaca. Este resultado representa un aumento del 1.06 t C/año/vaca en comparación con los sistemas sin árboles, y sugiere que la implementación de prácticas silvopastoriles mejora no solo las condiciones ambientales del sistema, sino también la calidad composicional de los productos animales. La sombra proporcionada por los árboles, la regulación microclimática, y el mejoramiento de los suelos y del pasto consumido, inciden directamente en el bienestar de los animales y, por ende, en la calidad de la leche.

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por autores como Fajardo et al. (2019), quienes documentaron mejoras significativas en la calidad nutricional de la leche en sistemas silvopastoriles, atribuyendo estos beneficios a una mayor disponibilidad de forraje con mejor perfil nutricional y a una reducción del estrés térmico en el ganado. Asimismo, estudios como el de Montoya y Gómez (2021) han señalado que la integración de árboles en sistemas ganaderos no solo incrementa la materia orgánica del suelo, sino también favorece la estabilidad en la producción y calidad de la leche, con aumentos en

componentes sólidos como grasas y proteínas, que a su vez están asociados a un mayor contenido de carbono orgánico.

En conjunto, la comparación entre ambos sistemas muestra de forma clara cómo la cobertura arbórea puede ser un factor determinante en la eficiencia y sostenibilidad de la producción lechera. Los datos obtenidos, reforzados por evidencia científica previa, subrayan el potencial de los sistemas con árboles no solo para mitigar impactos ambientales, sino también para elevar la calidad del producto final, aportando así tanto al rendimiento económico del productor como a los objetivos de sostenibilidad agroecológica.

Tabla 17. *Producción de Carbono orgánico total (C t.) de los dos sistemas ganaderos con y sin cobertura arbórea en la región Cajamarca*

COMPONENTE DEL SISTEMA.	CON COBERTURA ARBOREA	SIN COBERTURA ARBOREA
Carbono de los árboles	1.753	0.000
Carbono en raíces	0.115	0.000
Carbono de la biomasa forrajera	7.640	5.620
Carbono del mantillo.	1.540	1.940
Carbono en el suelo	24.190	23.260
Carbono en el estiércol	0.740	0.640
Carbono en el concentrado	4.730	5.100
Carbono en la leche	3.090	2.030
TOTAL	43.798	38.590

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones

1. Los sistemas ganaderos con cobertura arbórea demostraron una mayor capacidad de captura y acumulación de carbono en biomasa, suelo y leche, alcanzando un total de 43.798 t C, superando a los sistemas sin árboles (38.590 t C), lo que evidencia su mayor sostenibilidad productiva y ambiental.
2. La integración de árboles como *Salix humboldtiana* aumentó la resiliencia de las pasturas y la estabilidad en la producción de forraje, lo que refleja un mayor contenido de carbono.
3. Aunque el estiércol mostró mayor contenido de carbono en sistemas sin árboles, ello responde a menor descomposición y reciclaje; en contraste, los sistemas con cobertura arbórea optimizan los flujos de carbono al suelo, reforzando la fertilidad y la eficiencia ecológica.

Recomendación

Se recomienda fortalecer e implementar sistemas silvopastoriles en Cajamarca, dado que constituyen una alternativa productiva más eficiente y sostenible, capaz de conciliar productividad ganadera con la mitigación del cambio climático mediante el secuestro de carbono en múltiples compartimentos del sistema.

CAPITULO VI

Referencias bibliográficas.

1. Aceñolaza, P. G., Gallardo, J. F., & Budge, M. (2001). *Biomasa aérea en fisonomías boscosas del pre-delta del Río Paraná*. **Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica**, 36(1–2), 69–74.
2. Acosta, M. M., Carrillo, A. F., & Gómez, V. R. G. (2011). Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(4), 529–543.
3. Arévalo, L. J., & Palm, C. (2003). *Manual de determinación de las reservas de carbono en los diferentes sistemas de uso de tierras en Perú*. ICRAF, CODESU, INIA, INRENA.
4. Bacab, H. M., Madera, N. B., Solorio, F. J., Vera, F., & Marrufo, D. F. (2013). Los sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala*: una opción para la ganadería tropical. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17(3), 67–81.
5. Bolin, B. (1996). *Climate Change*. In Round up. Energy for our Common World – What will the Future Ask of Us. London: World Energy Council.
6. Brown, S. (2001). Measuring carbon in forests: Current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 1(16), 363–372.
7. Brown, S., & Lugo, S. A. E. (1992). El almacenamiento y la producción de materia orgánica en los bosques tropicales y su papel en el ciclo global del carbono. *Biotropica*, 14, 161–187.
8. Buitrago -Guillén, M. E., Ospina-Daza, L. A., & Narváez-Solarte, W. (2018). Sistemas silvopastoriles: Alternativa en la mitigación y adaptación de la producción bovina al cambio climático. *Boletín Científico Centro de Museos*, 22(1), 31–42.
9. Campo, J., & Sancholuz, L. (1998). *Biogeochemical impacts of submerging forests through large dams in the Río Negro, Uruguay*. **Journal of Environmental Management**, 54(1), 59–66. <https://doi.org/10.1006/jema.1998.0223>
10. Cajilema, D. (2023). *Evaluación de captura de carbono de especies leñosas en la cuenca del río Machángara* [Trabajo de investigación, institución no especificada].
11. Chará, J., Reyes, E., Peri, P., Otte, J., Arce, E., & Schneider, F. (2019). Servicios ecosistémicos de los sistemas silvopastoriles: contribuciones a la sostenibilidad y mitigación del cambio climático. Roma: FAO.

12. Chávez, A., Pérez, J., & Rodríguez, M. (2013). Dinámica de carbono en sistemas silvopastoriles: aportes de la hojarasca y raíces al suelo. *Revista de Ciencias Ambientales*, 47(2), 55–68.
13. Chávez-Pascual, E. Y., Rodríguez-Ortiz, G., Carrillo-Rodríguez, J. C., Enríquez-del Valle, J. R., Chávez-Servia, J. L., & Campos-Ángeles, G. V. (2013). Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 1273–1284.
14. CONICET. (2025). *La necromasa como reservorio esencial de nutrientes para los ecosistemas*. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.
15. Contreras, J., Gómez, L., & Fernández, P. (2022). Almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles frente a pasturas convencionales. *Agroforestería en las Américas*, 78(3), 101–115.
16. Contreras, M., López, J., & Pérez, A. (2022). Captura de carbono en sistemas silvopastoriles bajo diferentes condiciones ecológicas. *Revista de Agroforestería*, 18(2), 45–56.
17. Contreras-Santos, J. L., Falla-Guzmán, C. K., Rodríguez, J. L., Martínez-Atencia, J., & Aguayo-Ulloa, L. (2022). Reserva de carbono en sistemas silvopastoriles: Un estudio en el Medio Sinú, Colombia. *Carbon*, 34(1). <https://doi.org/10.15517/am.v34i1.49138>
18. Cuartas, C. A., Naranjo, J. F., Tarazona, A. M., Murgueitio, E., Chará, J. D., Ku, J., Solorio, F. J., Flores, M. X., Solorio, B., & Barahona, R. (2014). Contribution of intensive silvopastoral systems to animal performance and to adaptation and mitigation of climate change. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 27(2), 76–94.
19. Depledge Joanna. (2002). *The international climate change regime: Resistance to change and path-dependency*. In F. Yamin & J. Depledge (Eds.), *The international climate change regime* (pp. 113–?). Brill.
20. FAO. (2019). *Detengamos la erosión del suelo para garantizar la seguridad alimentaria en el futuro*. FAO.
21. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2000). *Forest and the UNFCCC*. Rome, Italy: FAO. Recuperado de <https://www.fao.org/4/x4171e/x4171e.htm>
22. Fondo Nacional del Ambiente (FONAM). (2006). *Informe sobre el potencial de almacenamiento de carbono en ecosistemas terrestres del Perú*. Lima, Perú: Fondo Nacional del Ambiente.
23. Huamán, R., Torres, D., & Salazar, J. (2021). Contenido de carbono orgánico en suelos con diferente textura y cobertura vegetal en la Sierra Norte del Perú. *Revista de Ecología Aplicada*, 20(1), 45–58.
24. Huamán-Carrión, M. L., Espinoza-Montes, F., Barrial-Lujan, A. I., & Ponce-Atencio, Y. (2021). Influence of altitude and soil characteristics on organic carbon storage capacity of high Andean natural pastures. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 83–90. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2021.010>
25. Ibrahim, M., Murgueitio, E., & Andrade, H. (2016). Contribution of silvopastoral systems to animal welfare and environmental services. *Revista de Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 63(2), 76–92.

<https://doi.org/10.15446/rfmvz.v63n2.60231>

26. Iglesias, A., & Montes, C. (2011). Los sistemas agros y silvopastoriles en la mitigación del cambio climático. *Ecosistemas*, 20(2), 5–12.
27. Iglesias, J. M., Funes-Monzote, F., Toral, O. C., Simón, L., & Milera, M. (2011). Diseños agrosilvopastoriles en el contexto de desarrollo de una ganadería sustentable. *Pastos y Forrajes*, 34(3), 241–258.
28. IPCC. (2001). *Informe especial sobre cambio climático y usos de la tierra*. Cambridge University Press.
29. IPCC. (2007). *The physical sciences basis (Summary for policymakers)*. <http://www.ipcc.ch>.
30. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). (2000). *Informe especial sobre escenarios de emisiones (SRES): Informe especial del Grupo de Trabajo III del IPCC*. Cambridge University Press. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/emissions_scenarios-1.pdf
31. Jiménez, A., & Peralta, M. (2019). Carbono secuestrado en los árboles de dos parques de la ciudad de Cuenca. Universidad del Azuay.
32. Lapeyre, T., Alegre, J., & Arévalo, L. (2004). Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*, 3(1–2), 35–44.
33. Loguercio Gabriel. (2005). *Climate change: The role of forests as carbon sinks*. Academic Secretariat – CIEFAP.. (2005). *Climate change: The role of forests as carbon sinks*. Academic Secretariat – CIEFAP.
34. Márquez, C. (2000). Manejo forestal y fijación de carbono en ecosistemas tropicales. Editorial Universitaria.
35. Morales, J. F. L., Volkoff, B., Cerri, C. C., & Bernoux, M. (1996). Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma*, 70(1–2), 63–81. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00072-0)
36. Muñoz, F., Paredes, G., & Castillo, H. (2022). Captura de CO₂ en sistemas silvopastoriles de los Andes tropicales. *Revista Agroecología*, 14(2), 33–49.
37. Muñoz, M., Vásquez, E., & Portilla, F. (2022). Estimates of the carbon capture potential in urban parks and vehicle CO₂ emissions in Cuenca, Ecuador. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 252, 405–417. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4126-8_37
38. Murgueitio, E., Cuartas, C., & Naranjo, J. (2011). *Ganadería del futuro: Investigación para el desarrollo*. Fundación CIPAV.
39. Ochoa, D. K., & García, J. M. V. (2014). Caracterización y análisis de rentabilidad de los sistemas de producción ganaderos presentes en el cantón Yantzaza, Ecuador. *CEDAMAZ*, 4(1).
40. Oliva, J., Ramos, C., & Fernández, G. (2018). Relación entre la biomasa forrajera y la fijación de carbono en sistemas agrosilvopastoriles. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 31(1), 67–75.

41. Ortíz, A., & Riascos, L. (2006). Almacenamiento y fijación de carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) y laurel (*Cordia alliodora*) en la Reserva indígena de Talamanca. *Agroforestería en las Américas*, 33–62.
42. Panadero, A. N. (2010). Importancia de los sistemas silvopastoriles en la reducción del estrés calórico en sistemas de producción ganadera tropical. *Revista de Medicina Veterinaria*, (19), 113–122.
43. Pintado, D., & Astudillo, V. (2021). Potencial de árboles multipropósito en la captura de carbono en suelos ganaderos. *Revista Forestal del Perú*, 43(2), 89–102.
44. Pintado, A., & Astudillo, L. (2021). Estimación de CO₂ capturado por individuo en especies arbóreas nativas. *Boletín Científico Forestal*, 7(1), 22–30.
45. Pintado, S., & Astudillo, D. (2021). Inventario forestal y estimación de la captura del carbono en los cuatro parques urbanos y en las riberas de los ríos Santa Bárbara y San Francisco en la zona turística del cantón Gualaceo. Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21116>
46. Pretty, J. N., Ball, A., Xiaoyun, S. L., & Rauindranath, N. H. (2002). The role of sustainable agriculture and renewable resource management in reducing greenhouse- gas emissions and increasing sinks in China and India. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 360(1797), 1741–1761.
47. Rojas Solano, J., Brenes Gamboa, S., & Abarca Monge, S. (2021). Carbono en el suelo: comparación entre un área de pastos y un bosque. *InterSedes*, 23, 184–205. <https://doi.org/10.15517/isucr.v23i47.47695>
48. Rojas-Downing, M., Nejadhashemi, A. P., Harrigan, T., & Woznicki, S. A. (2017). Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management*, 16, 145–163. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001>
49. Ronald, D. la Cruz C. (2022). Universidad Nacional Agraria De La Selva. Facultad De Zootecnia. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1507>
50. Ronald, F. (2022). Captura de carbono en pasturas mejoradas y naturales de la región andina [Informe técnico].
51. Ronald, M. (2022). Efecto de árboles en pasturas mejoradas sobre el carbono en el suelo y biomasa aérea. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Agraria.
52. Romero, N. (2015). *Evaluación de la captura de carbono en sistemas agroforestales en la Amazonía peruana* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. Repositorio Institucional UNAP. <https://repositorio.unapikitos.edu.pe/>
53. Sánchez, P. A. (1999). Delivering on the Promise of Agroforestry. *Environment, Development and Sustainability*, 1(3), 275–284. <https://doi.org/10.1023/A:1010083007121>
54. Sánchez, D. M. (2013). Análisis de adaptabilidad y el rendimiento de tres variedades de pastos: ray grass inglés (*Lolium perenne*), *Brachiaria brizantha* y

- trébol blanco (*Trifolium repens*) en el distrito de Ayabaca, Perú. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja].
55. Sánchez, J. M. (2017). Beneficios de la integración de árboles maderables en sistemas ganaderos convencionales: Caso de estudio Finca Nápoles. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(4), 55–66.
 56. Schroeder, P. (1994). Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 27(1), 89-97. <https://doi.org/10.1007/BF00704837>
 57. Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & De Haan, C. (2006). *Livestock's long shadow: Environmental issues and options*. FAO.
 58. Ulloa-Delgado, G. A. (2016). *Aspectos ecológicos del bosque seco tropical en el Caribe colombiano*. Tropenbos Internacional Colombia & Fondo Patrimonio Natural.
 59. Vicari, R., Kandus, P., Protolongo, P., & Burghi, M. (2006). Alteración en el almacenaje de carbono por la intervención humana de los sistemas naturales en el Bajo delta del Río Paraná. En Brown et al. (Eds.), *La situación ambiental de la Argentina* (pp. 161– 163). Fundación Vida Silvestre Argentina.
 60. Villarreal, J. A., Hernández, A., Martínez, P. A., Guerrero, J. D., & Velasco, M. E. (2014). Rendimiento y calidad de forraje del pasto ovido (*Dactylis glomerata* L.) al variar la frecuencia e intensidad de pastoreo. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 5(2), 231–245.
 61. Yerena, E., Salazar, J., & Mora, P. (2020). Los pastizales como sumideros de carbono: retos y oportunidades en América Latina. *Revista Pastos y Forrajes*, 43(2), 120–134.
 62. Yerena-Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E., & Aguirre-Calderón, O. A. (2020). Concentración de carbono en vástagos y raíces de diferentes especies de pastos en Nuevo León, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(2), 189. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.2.189>
 63. Zermeño, J., López, A., & Ruiz, H. (2011). El papel de los pastizales en la mitigación del cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 2(3), 365–380.

64. Zermeño, G., Ríos, J., Gil, J., & Villareal, M. (2011). Dinámica del flujo de bióxido de carbono y de energía sobre el pastizal natural del norte de México. *Bioagro*, 23(1), 35–42.
65. Zaninovich, S. C. (2017). Dinámica y almacenamiento del carbono en la necromasa y el suelo de ecosistemas forestales en el noreste de Argentina [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Nordeste]. Repositorio Institucional UNNE.
66. Zuluaga Durango. (2020). Determinación de las reservas de carbono en sistemas bovinos basados en silvopastoreo y praderas sin árboles en bosque seco tropical del departamento del Huila – Colombia. *Artículo Científico*.
67. Zuloaga, C. (2020). Almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles de la Amazonía peruana. *Revista Forestal Latinoamericana*, 15(1), 25–39.
68. Zuloaga, J. (2020). El rol de los sistemas silvopastoriles en la mitigación del cambio climático. *Revista de Ciencias Ambientales*, 12(1), 89–104

CAPÍTULO VIII

ANEXOS

Tabla 1. Cálculos de carbono orgánico en tronco de árboles (Salix Humboltiana – Sauce) en un sistema de producción ganadera con cobertura Arborea fundo Santa Margarita.

N° Árbol	Peso tronco (Kg)	CO. Tronco (%)	CO. th/árbol	N° arboles	Total CO (Kg)	Total CO (Gg)
Árbol 01	2474.09	51.1	1264.26	258	326179	0.326
Árbol 02	1681.84	48.03	807.7878	258	208409	0.208
Árbol 03	1548.01	52.2	808.0612	258	208480	0.208
PROMEDIO	1901.31	50.44	960.04	258.00	247689.37	0.248

Tabla 2. Cálculos de carbono orgánico de ramas en arboles (Salix Humboltiana – Sauce) en un sistema de producción ganadera con cobertura Arborea fundo Santa Margarita.

N° Árbol	Peso ramas (Kg)	CO. Ramas (%)	CO. Th/arbol	N° arboles	Total CO (Kg)	Total CO (Gg)
Árbol 01	1866.42	56.55	1055.4605	258	272309	0.272
Árbol 02	1268.75	53.54	679.28875	258	175256	0.175
Árbol 03	1167.79	52.88	617.52735	258	159322	0.159
PROMEDIO	1434.32	54.32	784.09	258.00	202295.79	0.202

Tabla 3. Producción promedio de 9 cortes/año de biomasa forrajera, materia seca y porcentaje de materia seca de dos sistemas ganaderos con y sin cobertura arbórea en Cajamarca

Cortes	Con cobertura arbórea			Sin cobertura arbórea		
	Biomasa	M.S.	% M.S.	Biomasa	M.S.	% M.S.
C1	14.89	2.71	18.2	13.88	2.69	19.4
C2	15.34	2.88	18.8	12.64	2.63	20.8
C3	15.38	2.83	18.4	12.86	2.65	20.6
C4	13.55	2.71	20.0	11.63	2.38	20.5
C5	11.71	2.37	20.2	11.54	2.39	20.7
C6	11.13	2.15	19.3	10.44	2.23	21.4
C7	12.42	2.32	18.7	11.37	2.46	21.6
C8	12.05	2.47	20.5	11.43	2.40	21.0
C9	12.52	2.70	21.6	10.42	2.30	22.1
Promedio	13.22	2.57	19.52	11.80	2.46	20.90

Resultados del ANOVA

Variable	F	Valor-p	Interpretación
F.V. (Forraje Verde)	4.60	0.048	Diferencia significativa entre T1 y T2 ($p < 0.05$).
M.S. (Materia Seca)	1.26	0.278	No hay diferencias significativas ($p > 0.05$).
% M.S. (% de M.S.)	9.14	0.008	Diferencia altamente significativa entre T1 y T2 ($p < 0.01$).

Tabla 4. *Producción promedio de Carbono orgánico en biomasa forrajera (F.V.) en pasturas de ryegrass trébol en sistemas ganaderos con y sin cobertura arbórea*

N°	CON COBERTURA ARBÓREA				SIN COBERTURA ARBÓREA	
	CO. (%)	Producción de Biomasa forrajera t/ha	Producción de Carbono t/ha.	CO. (%)	Producción de Biomasa forrajera t/ha	Producción de Carbono t/ha.
1	56.79	13.56	7.7	44.72	11.52	6.06
2	49.13	14.2	6.98	38.46	26.84	5.46
3	55.51	14.84	8.24	35.9	18.92	5.33
	53.81	14.2	7.64	39.69	14.2	5.62

Producción promedio de Carbono orgánico de Mantillo en pasturas de ryegrass trébol a 3 distancias del árbol en un sistema con cobertura Arborea - fundo Santa Margarita

N°	Distancia			
	(m)	t/ha.	C.O (%)	C.O. (t/ha).
1	3	0.694	15.14	1.51
2	6	0.743	15.31	1.53
3	9	0.863	15.66	1.57
Promedio		0.767	15.37	1.54

Tabla 5. Acumulación de carbono orgánico (t/ha) a 3 profundidades de suelos y a dos distancias del árbol en un sistema con obertura arbórea, Fundo Huayrapongo.

Distancia del árbol. (m).	N° de muestra	Densidad aparente	Profundidad suelo (cm)	Carbono orgánico. (%).	Volumen de suelo (t/ha)	Carbono orgánico (t/ha).
3	1	1.24	20	0.0244	2480	61.51
	2	1.15	40	0.0104	2300	23.92
	3	1.26	60	0.0041	2520	10.33
6	1	1.24	20	0.0093	2480	22.58
	2	1.15	40	0.0064	2300	14.72
	3	1.26	60	0.0048	2520	12.09
						16.46
PROMEDIO GENERAL					24.16	

Metodologías de evaluación en pastura y fórmulas para cálculo de almacenamiento y captura de carbono.

Toma de Datos

1° Realizaremos el muestreo de las pasturas al momento del pastoreo (35 a 45 días) la biomasa aérea evaluara mediante el muestreo directo en cuadrantes de 1 m².



2° Cortar la pastura a nivel del suelo de cada uno de los cuadrantes y registrar el peso fresco, luego llevar al laboratorio para separar las hojarascas.



3° Las muestras de forrajes colectadas se llevarán al laboratorio para determinar el porcentaje de materia seca y porcentaje de composición de las especies en las muestras.

4° El peso seco de esta biomasa aérea, se convierte a t C/ha

5° Para obtener la cantidad de carbono en la biomasa aérea, se multiplicará el valor obtenido de la biomasa, por un factor de conversión de carbono de 0,5. Este factor, es el resultado de un gran número de estudios, que han demostrado que, en promedio la materia vegetal contiene un 50 % de carbono, una vez que se ha removido el agua (**Márquez, L. 2000**).

Cálculo de Porcentaje de materia seca (MS%)

$$MS\% = \frac{Ps}{Pf} * 100$$

Donde:

MS% = Porcentaje materia seca

Ps = Peso seco

Pf = Peso fresco

Cálculo de carbono en la biomasa aérea (BA)

$$CtBA = (C) * FC$$

Donde:

CtBA = Carbono total de biomasa aérea

C = Carbono de biomasa aérea

FC = Constante de factor de conversión de carbono

Determinación de carbono estimado en los sistemas de pastos

Se multiplicará el carbono total acumulado en cada uno de los sistemas de pastos por el factor de conversión de CO₂, que es 3,67 encontrándose la relación entre el peso de la molécula CO₂ = 44 y el peso del átomo de carbono = 12 (**Chambi, 2001**).

$$CO2_e = Ct * Kr$$

Donde:

CO2_e = Toneladas de dióxido de Carbono

Ct = Carbono total

Kr = Constante de CO₂

Determinación de carbono total (Ct) en los sistemas de pastos

$$Ct = CtBA + CtBR + CtS$$

Donde:

Ct = Carbono total

CtBA = Carbono total de biomasa aérea

CtBR = Carbono total de biomasa radicular

Kr = Constante de CO₂

CtS = Carbono en el suelo

➤ Hojarasca:

Se colectará de la superficie del suelo usando cuadrantes típicamente de 50 x 50 cm, las muestras se llevan a estufa por 48 horas a 60°C. (esta muestra deberá estar conformada por la materia orgánica muerta que está sobre la superficie del suelo inorgánico).

➤ **Hojas:**

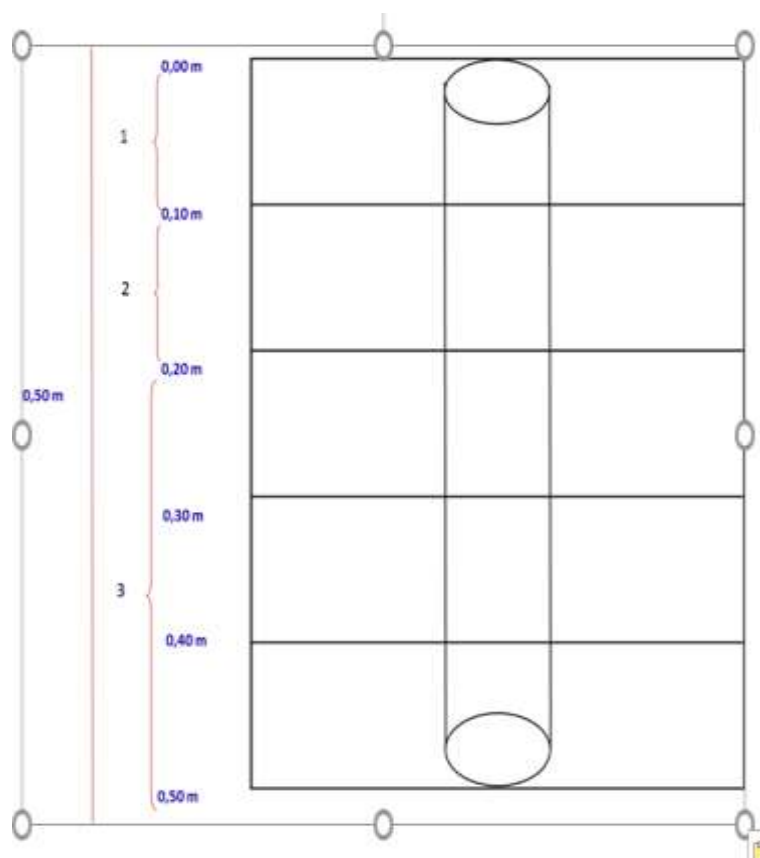
Se colectará después de cada corte y/o pastoreo mediante la captura de estos utilizando cuadrantes con malla de 50 x 50 cm, luego secar y pesar.

➤ **En el suelo.**

Determinación de carbono en el suelo (Cs)

- Se trabajarán dos calicatas de 0,5 m de profundidad en cada una de las parcelas de pastos
- Se tomarán muestras consecutivas a diferentes profundidades de perfil del suelo: 0 – 20, 20 a 40 y 40 - 60 cm, cada muestra será de 500 gramos tomándose el peso fresco.
- Calcular la densidad aparente y volumen del suelo
- El peso seco de esta biomasa se convierte a t C/ha.
- Para determinar el contenido de carbono acumulado en el suelo se aplicará el mismo proceso de la biomasa aérea y la biomasa radicular

Figura 3. Diagrama de una calicata del suelo a diferente profundidad



- **Toma de Datos**

Cálculo de la densidad aparente del suelo

Se aplicó la siguiente ecuación:

$$Da = \frac{PS}{V}$$

Donde:

Da = Densidad aparente del suelo en g/cm³

Ps = Carbono total de biomasa aérea

V = Volumen que ocupa el suelo

Cálculo del Volumen del suelo (Vs).

$$Vs = da * Pr + A$$

Donde:

VS = Volumen del suelo

Da = Densidad aparente del suelo en g/cm³

Pr = Profundidad de horizonte en cm

A = Área

Cálculo de carbono en el suelo (CS):

$$CS = V * FC$$

Donde:

CS = Carbono en el suelo

V = Volumen del suelo

FC = Factor de carbono constante (0.5)