

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



ESCUELA DE POSGRADO

**TESIS PARA OBTENER EL
GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
GERENCIA EN AGRONEGOCIOS**

**CAPTURA DE CARBONO Y EVALUACIÓN ECONÓMICA
DE SISTEMAS AGROFORESTALES DE CACAO FINO DE
AROMA DE LA COOPERATIVA APROCAM, AMAZONAS,
PERÚ**

**Autor : Bach. Malluri Goñas Goñas
Asesor : Dr. Segundo Manuel Oliva Cruz
Co – Asesor : M. Sc. Elí Pariente Mondragón**

Registro N°:

CHACHAPOYAS – PERÚ

2022

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 6-H

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS DE MAESTRÍA (X)/DOCTORADO () EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM

1. Datos de autor 1

Apellidos y nombres (tener en cuenta las tildes): GOÑAS GOÑAS MALLURI
DNI N°: 70117311
Correo electrónico: malluri.gonas@untrm.edu.pe
Nombre de la Maestría (X) / Doctorado (): Gerencia en Agronegocios

Datos de autor 2

Apellidos y nombres (tener en cuenta las tildes): _____
DNI N°: _____
Correo electrónico: _____
Nombre de la Maestría () / Doctorado (): _____

2. Título de la tesis para obtener el grado académico de Maestro (X) / Doctor ()

Captura de carbono y evaluación económica de sistemas agroforestales de cacao fino de aroma de la cooperativa APROCAM, Amazonas, Perú

3. Datos de asesor 1

Apellidos y nombres: Olivia Cruz Segundo Manuel
DNI, Pasaporte, C.E N°: 05379749
Open Research and Contributor-ORCID (<https://orcid.org/0000-0002-9670-0970>) 0000-0002-9670-0970

Datos de asesor 2

Apellidos y nombres: Pariente Mondragón Eli
DNI, Pasaporte, C.E N°: 43670572
Open Research and Contributor-ORCID (<https://orcid.org/0000-0002-9670-0970>) 0000-0002-9197-0218

4. Campo del conocimiento según Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos- OCDE (ejemplo: Ciencias médicas, Ciencias de la Salud-Medicina básica- Inmunología)

https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html
Ciencias Agrícolas

5. Originalidad del Trabajo

Con la presentación de esta ficha, el(la) autor(a) o autores(as) señalan expresamente que la obra es original, ya que sus contenidos son producto de su directa contribución intelectual. Se reconoce también que todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal.

6. Autorización de publicación

El(los) titular(es) de los derechos de autor otorga a la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de A mazonas (UNTRM), la autorización para la publicación del documento indicado en el punto 2, bajo la *Licencia creative commons* de tipo BY-NC: Licencia que permite distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial por lo que la Universidad deberá publicar la obra poniéndola en acceso libre en el repositorio institucional de la UNTRM y a su vez en el Registro Nacional de Trabajos de Investigación -RENATI, dejando constancia que el archivo digital que se está entregando, contiene la versión final del documento sustentado y aprobado por el Jurado Evaluador.

Chachapoyas, 03 / enero / 2023


Firma del autor 1


Firma del Asesor 1

Firma del autor 2


Firma del Asesor 2

DEDICATORIA

A mi Familia

A mis padres, Pedro C. Goñas y Omelia Goñas; mis hermanos, Leonel, Wilman y Janet. Por su apoyo incondicional del día a día y han hecho posible mi formación profesional.

A mis amigos y amigas

A todas las personas que formaron parte de mi desarrollo profesional y personal.

AGRADECIMIENTO

A Dios, que con su inmenso amor me ha dado salud, vida y las fuerzas necesarias para seguir adelante.

Al Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT) por el apoyo en el desarrollo de esta investigación a través del Proyecto con Contrato N° 026-2016-FONDECYT "Círculo de Investigación para la Innovación y el fortalecimiento de la cadena de valor del cacao nativo fino de aroma en la zona nor oriental del Perú" – CINCA CAO, ejecutado por el Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES CES), y al Proyecto SNIP N ° 352650 "Construcción del centro de investigación en forestería y agrosilvopastura del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES)"—CEINFOR, de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNITRM).

Al asesor, Dr. Segundo Manuel Oliva Cruz y al M.Sc. Elí Pariente Mondragón, por su confianza, amistad, tiempo y apoyo con sus conocimientos técnicos científicos para ejecutar esta tesis.

A los productores cacaoteros por brindarnos información básica y permitirnos ingresar a sus fincas para la recolección de información básica para el desarrollo de esta tesis.

A los docentes miembros del jurado evaluador.

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ
DE MENDOZA DE AMAZONAS**

Jorge Luis Maicelo Quintana Ph.D
Rector

Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres
Vicerrector Académico

Dra. María Nelly Luján Espinoza
Vicerrectora de Investigación

Dr. Efraín Manuelito Castro Alayo
Director de la Escuela de Posgrado

VISTO BUENO DEL ASESOR DE LA TESIS 1



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 6-L

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO (X) / DOCTOR ()

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM (X) / Profesional externo (), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Captura de carbono y evaluación económica de sistemas agroforestales de cacao fino de aroma de la cooperativa APROCAM, Amazonas, Perú; cuyo autor Malluri Goñas Goñas es estudiante del ciclo/egresado (X) de la Escuela de Posgrado, Maestría (X) / Doctorado () en Gerencia en Agronegocios, con correo electrónico institucional mallurigoñas@untrm.edu.pe.



El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 22 de septiembre de 2022

Firma y nombre completo del Asesor

Segundo Manuel Oliva Cruz
DNI 08374749.

VISTO BUENO DEL ASESOR DE LA TESIS 2



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 6-L

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO (X) / DOCTOR ()

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM (X) / Profesional externo (), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Captura de carbono y evaluación económica de sistemas agroforestales de cacao fino de aroma de la cooperativa APROCAM, Amazonas, Perú; cuyo autor Mallvi Goñas Goñas es estudiante del _____ ciclo/egresado (X) de la Escuela de Posgrado, Maestría (X) / Doctorado () en Gerencia en Agronegocios con correo electrónico institucional mallvi.gonas@untrm.edu.pe

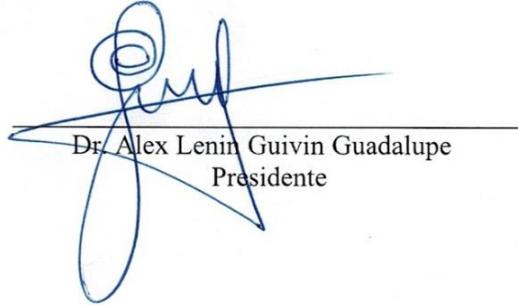
El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 22 de setiembre de 2022

Firma y nombre completo del Asesor
Eli Pariente Mondragón



JURADO EVALUADOR DE LA TESIS



Dr. Alex Lenin Guivin Guadalupe
Presidente



Ligia Magali García Rosero, PhD
Secretario



Dr. Carlos Eduardo Millones Chanamé
Vocal

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS



ANEXO 6-Q

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO (X) / DOCTOR ()

Los suscritos, miembros del Jurado Evaluador de la Tesis titulada:

Captura de carbono y evaluación económica de sistemas agroforestales de cacao tipo de anoma de la cooperativa APROCAM, Amances, Peru

presentada por el estudiante () / egresado (X) Malluri Geñas Geñas

de la Escuela de Posgrado, Maestría (X) / Doctorado () en Gerencia en

Agronegocios

con correo electrónico institucional malluri.geñas@untrm.edu.pe

después de revisar con el software Turnitin el contenido de la citada Tesis, acordamos:

- a) La citada Tesis tiene 18 % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es menor (X) / igual () al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM.
- b) La citada Tesis tiene _____ % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es mayor al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM, por lo que el aspirante debe revisar su Tesis para corregir la redacción de acuerdo al Informe Turnitin que se adjunta a la presente. Debe presentar al Presidente del Jurado Evaluador su Tesis corregida para nueva revisión con el software Turnitin.

Chachapoyas, 05 de diciembre del 2022



[Signature]
SECRETARIO

[Signature]
VOCAL

[Signature]
PRESIDENTE

OBSERVACIONES:

.....
.....

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 6-5

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO (✓) / DOCTOR ()

En la ciudad de Chachapoyas, el día 25 de Octubre del año 2022, siendo las 16:30 horas, el aspirante Malluri Goñin Goñas, Asesorado por Dr. Manuel Oliva Cruz y Msc. Eli Pomante M., defiende en sesión pública presencial (✓) / a distancia () la Tesis titulada: Captura de carbono y evaluación económica de sistemas agroforestales de cacao fino de aroma de la cooperativa IPROCAM, Amazonas, Perú, para obtener el Grado Académico de Maestro (✓) / Doctor () en Gerencia en Agribnegocios, a ser otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas; ante el Jurado Evaluador, conformado por:

Presidente: Dr. Alex Lemín Guisvin Guadalupe

Secretario: PhD Ligia Mayali García Rosero

Vocal: Dr. Carlos Edmundo Millones Charomé

Procedió el aspirante a hacer la exposición de la Introducción, Material y método, Resultados, Discusión y Conclusiones, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el aspirante.

Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los presentes en el acto de sustentación, para que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis de Maestría (✓) / Doctorado (), en términos de:

A probado (✓) por Unanimidad (✓) / Mayoría ()

Desaprobado ()

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en esta misma sesión pública. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 17:54 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Grado Académico de Maestro (✓) / Doctor ().

SECRETARIO

VOCAL

PRESIDENTE

OBSERVACIONES:

INDICE DE CONTENIDO GENERAL

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS	v
VISTO BUENO DEL ASESOR DE LA TESIS 1	vi
VISTO BUENO DEL ASESOR DE LA TESIS 2	vii
JURADO EVALUADOR DE LA TESIS	viii
CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS	ix
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
I. INTRODUCCIÓN	19
II. MATERIAL Y MÉTODOS	24
2.1 Ubicación del Estudio	24
2.2 Selección de fincas cacaoteras	24
2.3 Descripción de la diversidad de árboles en sistemas agroforestales de cacao fino de aroma, Amazonas, Perú.....	26
2.3.1 Métodos de recolección de datos.....	26
2.3.2 Procesamiento y análisis de los datos.....	27
2.4 Estimación de los reservorios de carbono de sistemas agroforestales de cacao fino de aroma 28	
2.4.1 Recolección de datos para el cálculo de la Biomasa del material vegetal y del suelo. 28	
2.4.2 Medición de la biomasa aérea total (BAT) sobre el suelo y cálculo del carbono total de los sistemas agroforestales de cacao.....	29
2.4.3 Análisis estadístico.....	31
2.5 Importancia de la captación de carbono en sistemas agroforestales de cacao fino de aroma mediante una evaluación económica.	31
2.5.1 Recolección de datos de campo.	32
2.5.2 Características generales de los sistemas agroforestales evaluados.....	34

2.5.3	Producción total de cacao en kg por año.....	34
2.5.4	Retención de CO ₂ de los sistemas agroforestales de cacao (t/ha/año).....	34
2.5.5	Costos de inversión para la producción del cacao.....	35
2.5.6	Costos directos de producción y mantenimiento del cacao	35
2.5.7	Costos indirectos – herramientas y maquinarias	35
2.5.8	Costos administrativos de la producción del cacao	35
2.5.9	Costos para la implementación del proyecto de servicio ambiental – venta de bonos de carbono.....	35
2.5.10	Flujo de caja con proyección a 5 años	36
III.	RESULTADOS.....	38
3.1	Diversidad de árboles en sistemas agroforestales de cacao fino de aroma.....	38
3.2	Estimación de los reservorios de carbono de sistemas agroforestales de cacao fino de aroma 43	
3.3	Importancia de la captación de carbono en sistemas agroforestales de cacao fino de aroma mediante una evaluación económica	50
IV.	DISCUSIÓN.....	63
V.	CONCLUSIONES.....	69
VI.	RECOMENDACIONES.....	70
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXOS		86
Anexo 1.	Base de datos de campo para el análisis de diversidad, abundancia y valor de importancia de especies dentro de los SAF cacao.....	86
Anexo 2.	Base de datos de campo, para calcular la composición y distribución espacial de árboles en el SAF de cacao	87
Anexo 3.	Cálculo de la retención de carbono total, en función de la r retención aérea y del suelo.	88
Anexo 4.	Datos de campo para realizar la evaluación económica	89
Anexo 05.	Resultados del análisis estadístico de los datos de campo.....	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ecuaciones para estimar la biomasa vegetal (kg/árbol)	29
Tabla 2. Densidad aparente en función a la textura del suelo	31
Tabla 3. Componentes de la encuesta para la recolección de datos de campo.....	32
Tabla 4. Distribución de encuestas por distrito	34
Tabla 5. Número de especies y abundancia de individuos por familia botánica en cada rango de edad de plantaciones y en total.	38
Tabla 6. Índices de diversidad por rango altitudinal y en general.....	39
Tabla 7. Especies y abundancia según edad de las plantaciones y total. Adicionalmente se indica si la especie es nativa o exótica y los productos potenciales (P.P) que pueden aprovecharse de ellas. (E=Exótico; N=Nativo; F=Forestal; Med=Medicinal; M=Maderable).....	39
Tabla 8. Especies más importantes (IVI>10) según edad de la plantación y en total. (Ar=Abundancia relativa; Fr= Frecuencia relativa; Dor= Dominancia relativa; IVI= Índice de Valor de Importancia).....	40
Tabla 9. Biomasa aérea de los sistemas agroforestales (Media ± desviación estándar).....	45
Tabla 10. Carbono en la biomasa aérea de los sistemas agroforestales (Media ± desviación estándar).....	47
Tabla 11. Carbono orgánico del suelo a 30 cm de profundidad.....	48
Tabla 12. Datos de campo: Características generales los sistemas agroforestales de cacao evaluados (n=número de sistemas agroforestales intervenidos)	50
Tabla 13. Producción de cacao desde el año base y los próximos 5 años.....	51
Tabla 14. Proyección del secuestro de CO ₂ por año de los sistemas agroforestales	52
Tabla 15. Costo de inversión de la producción de cacao	53
Tabla 16. Costos de producción y mantenimiento del cacao	53
Tabla 17. Costos indirectos – herramientas y maquinarias para el cultivo de cacao	54
Tabla 18. Costos administrativos de la producción del cacao.....	55
Tabla 19. Costos para la implementación del servicio ambiental – venta de bonos de carbono*	56

Tabla 20. Supuesto para la implementación del proyecto	58
Tabla 21. Egresos e ingresos con y sin implementación de ventas de bonos de carbono	59
Tabla 22. Flujo De caja.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de intervención del estudio.....	25
Figura 2. Ubicación de los 15 sistemas agroforestales de cacao evaluados.	26
Figura 3. Metodología para muestrear el material vegetal y suelos, en sistemas agroforestales de cacao nativo fino de aroma de la cooperativa APROCAM, adaptado de (Cerda-Bustillos et al., 2013).	29
Figura 4. Área basal de cacao, árboles de sombra, total y área basal de cacao y árboles de sombra en porcentaje del total. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) (Joven=SAF de cacao joven; Madura=SAF de cacao de mediana edad; Adulta: SAF de cacao viejo)	42
Figura 5. Número de especies por cada nivel de edad de las plantaciones de cacao.	42
Figura 6. Disimilaridad de especies entre parcelas de cacao según grupos etarios.....	43
Figura 7. Carbono total almacenado en las SAF de cacao viejo, de mediana edad y jóvenes	49
Figura 8. CO ₂ retenido en los sistemas agroforestales de cacao de 8-15 años, 16-29 años y de 30-40años.	49
Figura 9. Secuestro de CO ₂ según la edad de los sistemas agroforestales de cacao.	51
Figura 10. Tendencia lineal del aumento del secuestro de carbono por año (1 = 12 años, 2=16 años, 3=17 año, 4= 20 años).....	52
Figura 11. Costos de producción e ingresos con o sin venta de bonos de carbono (con y sin proyecto).....	62

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo, determinar la importancia de la captura de carbono y su evaluación económica de sistemas agroforestales de cacao fino de aroma de la cooperativa APROCAM, Amazonas. Para ello, se evaluaron 15 SAF de cacao que tenían una superficie mínima de 1,5 ha y estaban distribuidas en tres grupos de edad; 5 parcelas de cacao jóvenes entre 8 y 15 años, 5 parcelas de cacao de mediana edad entre 16 y 29 años, y parcelas de cacao viejos entre 30 y 40 años. Aquí se cuantificaron el número de especies por parcela, se tomaron datos de diámetro de la altura de pecho de los árboles, peso fresco de la hojarasca y se recolectaron muestras de suelo para calcular el carbono orgánico. En total se registraron 17 especies en toda el área de estudio. La familia botánica más abundante estuvo representada por una sola especie de *Musa* sp. Los índices de disimilitud muestran una moderada similitud entre los rangos de edad evaluados (más del 62%). Las existencias totales de carbono sobre el suelo en los sistemas de cacao jóvenes (13,64 t/ha) fueron inferiores a las de los sistemas de cacao de mediana edad (20,50 t/ha), y al de los sistemas de cacao viejos (24,86 t/ha). Además, las reservas de carbono en el suelo oscilaron entre 119,96 t/ha y 131,96 t/ha y la implementación de un proyecto de servicio ambientales por venta de bonos de carbono puede generar un VANE de S/. 1 454 547,8 y una TIRE de 44%.

Palabras clave: *Theborma cacao*, *Cordia* sp., CO₂, VANE, TIRE

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the importance of carbon sequestration and its economic evaluation of agroforestry systems of fine aroma cocoa of the APROCAM cooperative, Amazonas. For this purpose, 15 cocoa agroforestry systems were evaluated, which had a minimum area of 1.5 ha and were distributed in three age groups; 5 plots of young cocoa between 8 and 15 years, 5 plots of middle-aged cocoa between 16 and 29 years, and plots of old cocoa between 30 and 40 years. Here the number of species per plot was quantified, data were taken on tree breast height diameter, fresh weight of leaf litter and soil samples were collected to calculate organic carbon. A total of 17 species were recorded throughout the study area. The most abundant botanical family was represented by a single species of *Musa* sp. The dissimilarity indices show moderate similarity between the age ranges assessed (over 62%). Total aboveground carbon stocks in young cocoa systems (13.64 Mg ha⁻¹) were lower than those in middle-aged cocoa systems (20.50 Mg ha⁻¹), and in adult cocoa systems (24.86 Mg ha⁻¹). In addition, soil carbon stocks ranged from 119.96 Mg ha⁻¹ to 131.96 Mg ha⁻¹ and the implementation of an environmental service project by selling carbon credits can generate an NPV of S/ 1 454 547.8 and an IRR of 44%.

Keywords: *Theborma cacao*, *Cordia* sp., CO₂, NPV, IRR

I. INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es uno de los principales cultivos en sistemas agroforestales (SAF) por parte de pequeños agricultores en los trópicos húmedos (Vaast & Somarriba, 2014). La instalación de explotaciones de cacao se produce principalmente mediante la tala parcial de bosques; los árboles retenidos proporcionan sombra al cacao y canales de coproducción a los agricultores, mientras que el mantillo de hojas de los árboles de sombra y los nutrientes almacenados en el suelo del bosque aseguran la productividad (Tondoh et al., 2015; Wessel & Quist-Wessel, 2015).

El SAF del cacao es un sistema socioeconómicamente viable en el que los agricultores integran intencionadamente árboles de sombra, cacao y cultivos alimentarios en la misma parcela (Asigbaase et al., 2019). El SAF del cacao ecológico utiliza una variedad de árboles de sombra tanto para suprimir el crecimiento de malezas como los brotes de plagas de insectos (Tschardt et al., 2011; Vanhove et al., 2016) y compensar la pérdida de nutrientes debida a la absorción de nutrientes por parte de los árboles de cacao mediante la fijación de nitrógeno, la reducción de la fuga de nutrientes y la descomposición de la hojarasca de los árboles de sombra (Vanhove et al., 2016).

Además los SAF de cacao conservan la diversidad de plantas y animales autóctonos (Saj et al., 2017) y proporcionan productos que diversifican la dieta de los agricultores. Genera ingresos suplementarios y cierta seguridad frente a las crisis relacionadas con el cambio climático (Bandanaa et al., 2016; Jacobi et al., 2015; Vaast & Somarriba, 2014). Asimismo, los árboles de cacao se benefician de un mejor microclima y de una mayor retención de agua (Abou Rajab et al., 2016; Tschardt et al., 2011; Vaast & Somarriba, 2014). Por lo tanto, el cultivo de cacao en SAF es una alternativa para contribuir significativamente a la mitigación de la pérdida de biodiversidad y la resiliencia de los ecosistemas en las regiones tropicales (Bandanaa et al., 2016; Haggard et al., 2015), especialmente dentro de las áreas donde la cobertura forestal se ha reducido significativamente (Norris et al., 2010). Se dice que una integración de la agricultura ecológica y la agrosilvicultura mejoraría eficazmente la conservación de la biodiversidad (Bandanaa et al., 2016; Barrios et al., 2015).

Por otro lado, el calentamiento global se considera una gran preocupación en todo el mundo, debido a las emisiones masivas de gases de efecto invernadero a la atmósfera (Janiola &

Marin, 2016). En 2003 ya se advirtió que las emisiones de gases de efecto invernadero, dióxido de carbono (CO₂), metano y nitrógeno, había aumentado considerablemente en la atmósfera, provocando un calentamiento global que conduce al cambio climático (Andrade & Ibrahim, 2003). Del total de las emisiones globales, la agricultura y las emisiones relacionadas con el uso de la tierra contribuyen con el 17%, lo que significa 9,3 mil millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Gt CO₂eq); y las actividades agrícolas asociadas a los cultivos y a la ganadería liberan metano y óxido nitroso en un total de 5,3 Gt CO₂eq (FAO, 2020). En Perú, la agricultura es la tercera actividad que reporta la mayor cantidad de emisiones: 26 044 Gt CO₂eq (Ministerio del Ambiente, 2016). Por ello, la conservación y regeneración de los bosques dentro de los países ha sido una acción destacada para mitigar los efectos del cambio climático (Chou & Gutiérrez-Espeleta, 2013), ya que tiene una relevancia considerable en cuanto a los servicios ambientales debido a su capacidad de almacenar y capturar CO₂ (Jiménez-Herrera, 2019). De hecho, la agrosilvicultura también es importante como estrategia de secuestro de carbono debido al potencial de almacenamiento de sus diversas especies de plantas, así como del suelo (Montagnini & Nair, 2004), aunque su capacidad de almacenamiento puede variar según las especies y la geografía (Ramnewaj, 2008).

Dado que el cambio climático afecta directamente a la agricultura, la producción y la disponibilidad de alimentos, lo cual pone en riesgo la seguridad alimentaria y nutricional de las poblaciones más vulnerables (FAO et al., 2018), algunos estudios previos han relacionado la producción agroalimentaria y las preocupaciones medioambientales. En consecuencia, en los últimos años, los actores privados involucrados en la industria agroalimentaria han buscado cumplir con las normas ambientales para promover un suministro sostenible en términos de su entorno (Rueda et al., 2017). Las necesidades sociales, la preocupación por la protección del medio ambiente y la creciente demanda de recursos naturales, impulsan a los responsables de la toma de decisiones en este sector a enfocar los proyectos y programas hacia la sostenibilidad (Rodríguez-Guevara, 2018).

La demanda mundial del cacao es cada vez mayor; y a pesar de la difícil situación económica y geopolítica mundial actual en la primera mitad de la temporada 2021/2022, la demanda de cacao mantuvo una postura positiva y los precios también sostuvieron esta subida (ICCO,

2022). Esto llevaría a los agricultores a ejercer una presión aún mayor sobre los ecosistemas productores de cacao, lo que, junto con la escasa información que respalda las afirmaciones anteriores y la importancia de la diversidad de árboles en los agroecosistemas de cacao, empeoraría la conservación y la recuperación de las zonas perturbadas. Además, esta creciente demanda de cacao y la disminución de los rendimientos debido al cambio climático, han llevado a las partes interesadas en la cadena de producción de cacao a buscar múltiples estrategias en relación a este cultivo (Toledo-Hernández et al., 2020). Una de estas estrategias es el cultivo de cacao bajo sistemas agroforestales, proporcionando una variedad de alimentos para las familias campesinas locales (Anchundia et al., 2018), y mejorando la fertilidad del suelo mediante el control y la prevención de la erosión del mismo (Murthy, 2013). Sin embargo, las prácticas agroforestales requieren una formación intensiva de los productores y un trabajo colaborativo para garantizar la rentabilidad del cultivo (Sanial et al., 2020).

Las prácticas agroforestales bien diseñadas y gestionadas pueden convertir estos sistemas en eficaces sumideros de carbono (Montagnini & Nair, 2004). Además de secuestrar el carbono atmosférico en los árboles y los suelos, estos sistemas agroforestales son potencialmente sostenibles (Oelbermann et al., 2004). Al igual que en otros sistemas de uso de la tierra, la cantidad de carbono secuestrado depende de los niveles de carbono en la biomasa en pie, del carbono recalcitrante que queda en el suelo y del carbono secuestrado en los productos de madera (Montagnini & Nair, 2004). En el caso de los agroecosistemas de cacao, el secuestro de carbono es significativo cuando se planta a altas densidades (Borden et al., 2019).

El cálculo de las existencias de biomasa de carbono, se utilizan modelos de regresión, que convierten los datos del inventario en una estimación de la biomasa aérea (Chave et al., 2005). En consecuencia, la medición de la biomasa acumulada en los agroecosistemas de cacao es un paso importante para cuantificar el potencial de secuestro de carbono de los sistemas de producción de cacao (Mohammed et al., 2015).

Los sistemas agroforestales, no solo pueden conservar la biodiversidad, y servir como medios de ingresos secundarios para los productores, si no también, pueden ser una fuente para obtener pago por servicios ambientales mediante la venta de bonos de carbono. Según el acuerdo de París más de 190 países se han comprometido a mejorar sus compromisos climáticos el objetivo de limitar el calentamiento global y colaborar hacia un futuro bajo en

carbono y resiliente al clima (Fernández-Reyes, 2016). Aumentar el secuestro de carbono en el sector agrícola, la silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU) es un enfoque eficaz para reducir y eliminar las emisiones de gases de efecto invernadero (VERRA, 2013), principales causantes del calentamiento global.

El rendimiento de los sistemas cacaoteros vienen siendo afectados por la creciente incidencia de plagas y trae como consecuencia la migración de cultivos. Sin embargo, dentro de otros factores que afectan el rendimiento y por ende la rentabilidad, son los altos costos de insumos necesarios para la producción, limitado acceso al crédito y bajos precios de venta del cacao fino de aroma (Antolinez-Sandoval et al., 2020). Además, las limitaciones actuales que se vienen presentando en el mercado por la presencia de cadmio en los granos de cacao (Gramlich et al., 2018), dificultan la entrada de cacao a todos los mercados. Por tanto, la rentabilidad económica se convierte en una de las debilidades más importante de la producción de cacao (Caicedo-Vargas et al., 2022).

Según la relación costo beneficio y el rendimiento, el cultivo de cacao llega a ser rentable si se produce más de 770 kg de cacao seco por hectárea (Espinosa-García et al., 2015). Sin embargo, las fincas cacaoteras que se encuentran asociadas bajo un sistema agroforestal puede aportar hasta el 12% de los ingresos brutos (Magne et al., 2014) y pueden diversificar los ingresos económicos, esta diversificación de los ingresos también sirven como una alternativa para mitigar los impactos del cambio climático (Amfo & Ali, 2020); y busca minimizar el efecto negativo del precio de mercado y la fluctuación de la producción sobre los ingresos de los hogares (Viteri-Salazar et al., 2018).

Ante ello, las últimas tendencias muestran que las oportunidades del mercado de carbono siguen expandiéndose; por ejemplo, el valor total de los mercados mundiales ha crecido un 11%, pasando de 159 210 millones de dólares en el 2010 a 176 027 millones de dólares en 2011; el volumen ha aumentado de 8 835 a 10 189 toneladas de CO₂ equivalente al año (Seeberg-Elverfeldt & Gordes, 2013). Para el 2021, el aumento de las emisiones mundiales de más de 2 000 millones de toneladas, fue el mayor en términos absolutos en toda la historia, ya que la demanda de energía en este año se recuperó comparado al año anterior (ONU, 2022). Los ingresos mundiales derivados de la fijación del precio al carbono aumentaron casi en un 60% en el 2021 respecto a los niveles de 2020 y alcanzaron los USD 84 000 millones

aproximadamente (Bank World, 2021). Por tanto, en la actualidad, más de dos tercios de los ápices planean usar los mercados de carbono para cumplir con sus contribuciones determinadas a nivel nacional estipuladas en el acuerdo de París (Banco Mundial, 2022), esto impulsa que diversas investigaciones y programas se animen a cuantificar la cantidad de CO₂ retenido por los sistemas agroforestales de cacao.

A pesar de que existe un potencial sustancial de secuestro de carbono en los SAF de cacao, no está debidamente reconocido y sigue sin explotarse en gran medida (Montagnini & Nair, 2004). En la región del Amazonas, los estudios relacionados con el SAF del cacao son limitados. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo; determinar la importancia de la captura de carbono y su evaluación económica de sistemas agroforestales de cacao fino de aroma de la cooperativa APROCAM, Amazonas. Para ello, en primera instancia se 1) estudió la diversidad, abundancia y valor de importancia de los árboles de sombra; la composición y distribución espacial de los árboles en el SAF de cacao; 2) se realizó la cuantificación del secuestro de carbono de los SAF de cacao y 3) finalmente se evaluó la captación de carbono en SAF con cacao fino de aroma en términos de VANE y TIRE.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Ubicación del Estudio

El estudio se llevó a cabo en los sistemas agroforestales de cacao de la cooperativa de Servicio Múltiples APROCAM, la cooperativa está conformado por 235 pequeños productores de cacao distribuidos en 4 distrito de la provincia de Bagua (Aramango, Copallín, La Peca e Imaza), 2 distritos de la provincia de Utcubamba (Cajaruro y El Parco) y 1 distrito de la provincia de Santa María de Nieva (Nieva) de la región de Amazonas (Figura 1). El clima de la zona es tropical cálido, con una temperatura media de 25°C y una pluviometría anual de 500-1500 mm.

2.2 Selección de fincas cacaoteras

La selección de las fincas para el estudio de la diversidad de especies y calcular el carbono, se realizó siguiendo la metodología de Trinidad et al. (2016) con algunas modificaciones que se adecúen a las condiciones de las fincas de cacao de la zona de estudio. Para ello se seleccionaron 15 fincas de cacao (Figura 2), las fincas se agruparon en tres estratos: (SAF de cacao joven: 8 - 15 años; SAF de cacao de mediana edad: 16 - 29 años y SAF de cacao viejo: 30 - 40 años); estos tres grupos de edad se determinaron porque el cacao alcanza su pico de producción a los 8 años de edad y se estabiliza hasta los 15 años, de los 16 a los 30 años la producción de cacao se mantiene en promedio y finalmente después de los 30 años el rendimiento decae modernamente y se convierte en un cacao viejo de bajo rendimiento (de Almeida & Valle, 2007; Orozco, 2015).

Además, cada finca seleccionada tuvo una extensión mínima de 1,5 ha, lo que hace un total de 22,5 ha muestreadas; aparte de la extensión mínima, el sistema de las fincas estuvo compuesto por al menos 3 especies diferentes, pertenecieron a la cooperativa APROCAM y tuvieron facilidad de acceso para tomar los datos. En estas 15 fincas seleccionadas, se recogieron los datos necesarios, para determinar la diversidad arbórea y la captura de carbono de los sistemas agroforestales de cacao fino de aroma (CFA) en Amazonas, Perú.

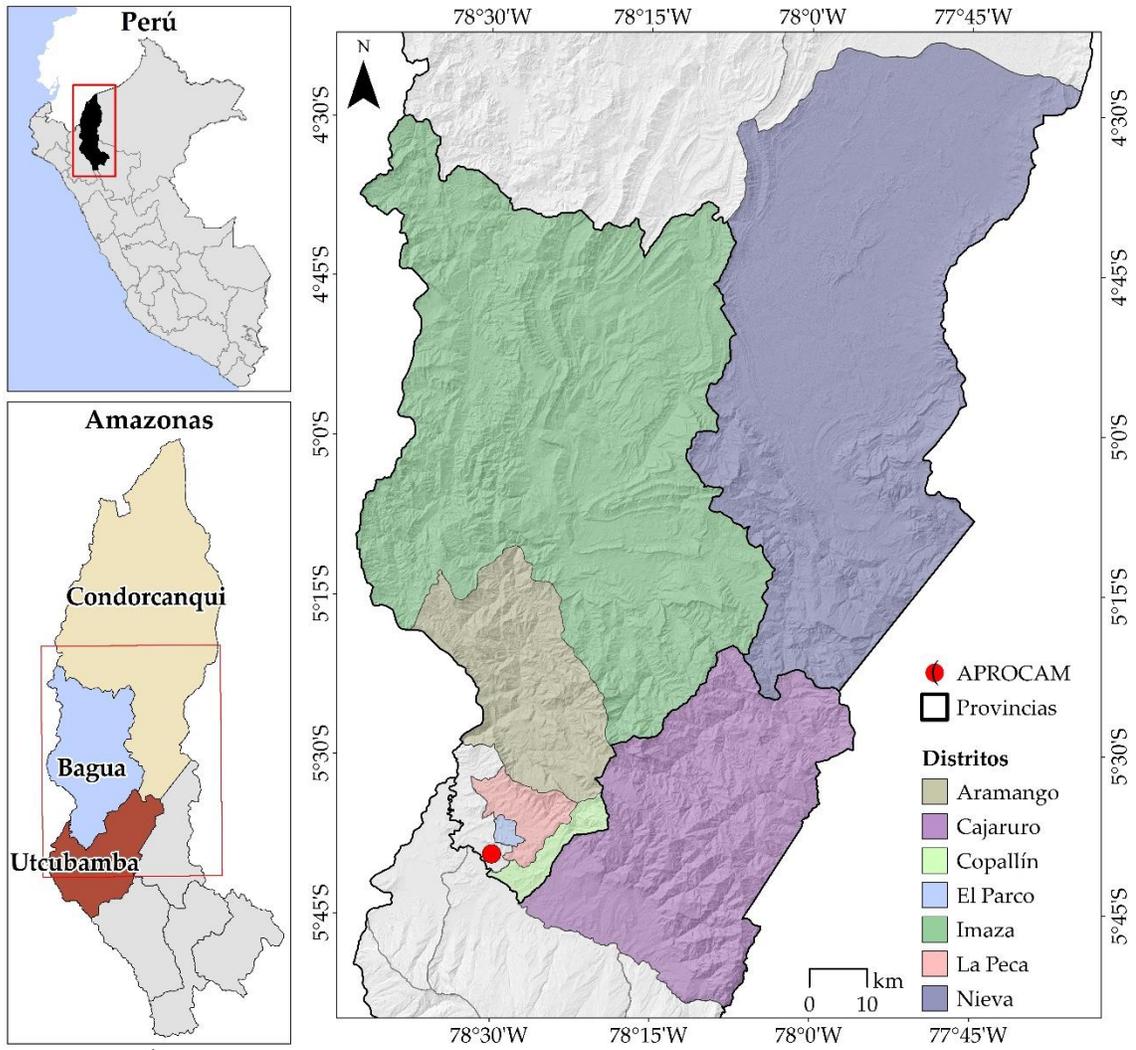


Figura 1. Área de intervención del estudio.

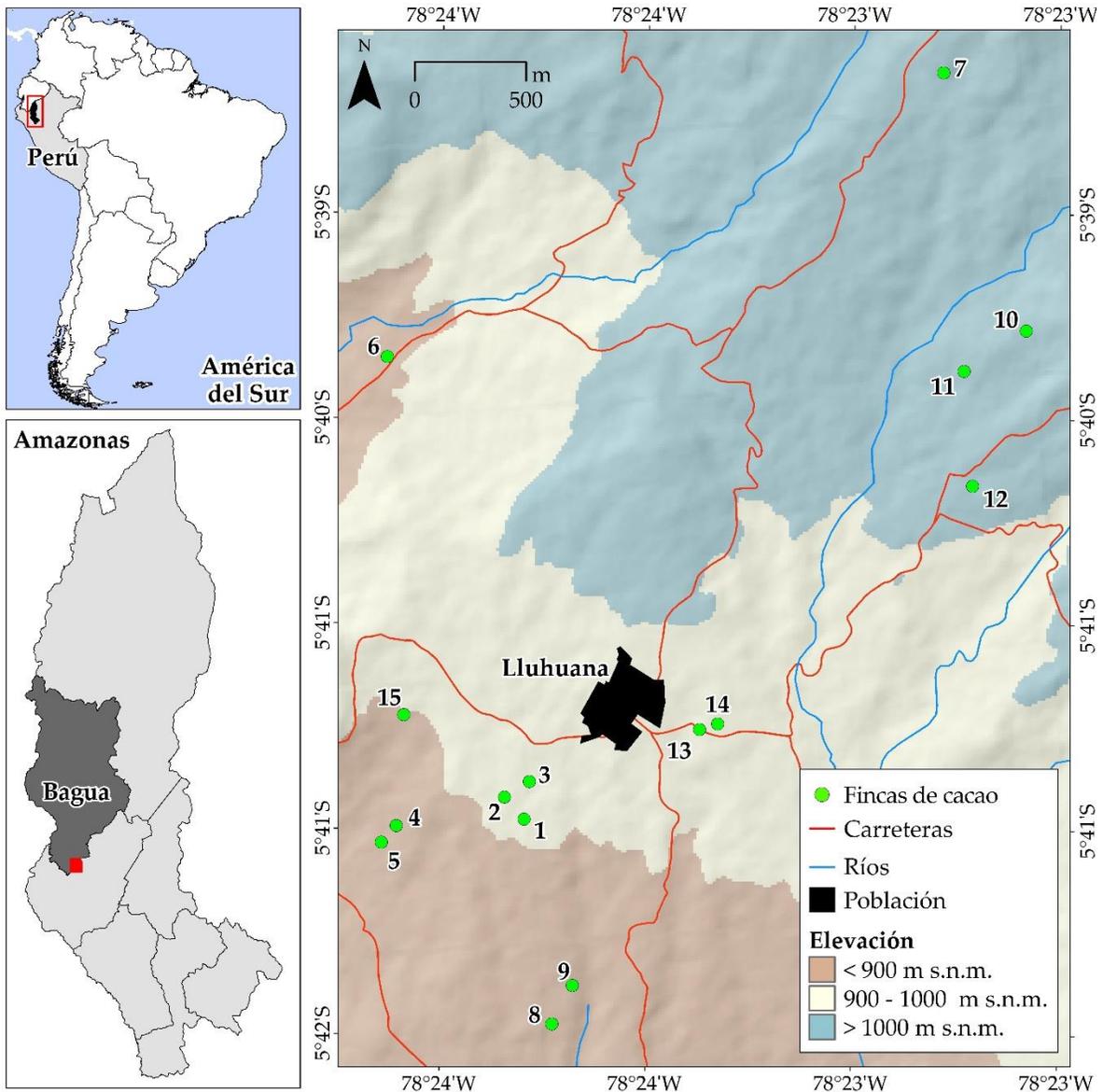


Figura 2. Ubicación de los 15 sistemas agroforestales de cacao evaluados.

2.3 Descripción de la diversidad de árboles en sistemas agroforestales de cacao fino de aroma, Amazonas, Perú

2.3.1 Métodos de recolección de datos

En cada parcela seleccionada, se estableció una subparcela rectangular de 50 m x 20 m (muestra) y se registró el número de especies dentro de esta subparcela. Las especies arbóreas se identificaron en el propio campo, ya que los árboles encontrados (especies frutales y maderables) eran ampliamente conocidos por los técnicos. Por el contrario, para las especies en las que no fue posible la identificación taxonómica,

sólo se tomó el nombre común proporcionado por los agricultores y una muestra botánica para su posterior identificación. Esta identificación botánica se realizó con la ayuda de bibliografía especializada y consulta de expertos en el herbario de KUELAP-UNTRM (Campus Universitario: C. Universitaria N° 304, Chachapoyas, Amazonas, Perú). Adicionalmente, las especies reconocidas fueron clasificadas como nativas o exóticas de acuerdo a su origen; y como especies forestales, medicinales o maderables de acuerdo a su uso principal por parte de los agricultores o productos potenciales.

La circunferencia a la altura del pecho (CAP) de cada uno de los tallos de las especies arbóreas, incluidos los cacaos, se tomó a 1,3 m del suelo. Estos datos se transformaron en Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) de cada uno de los tallos medidos (Cerdá-Bustillos et al., 2013; Hurtado-Lima, 2019). Para esta transformación se utilizó " π " como factor de división de la circunferencia.

2.3.2 Procesamiento y análisis de los datos

Diversidad de los árboles de sombra: Los datos obtenidos se procesaron con el software PAST 3 para generar un análisis de diversidad. Para cada plantación y rango de edad se calcularon los índices de riqueza de especies (S) y el número efectivo de especies (N), así como los índices de Shannon (H'), Simpson (1-D), Margalef (Dmg) (Krebs, 2014), y Chao-1 (Chao, 1984). Se utilizaron hojas de cálculo de Excel para manejar tablas y gráficos, como el diagrama de Venn para la riqueza de especies.

El Índice de Valor de Importancia (IVI) se estimó utilizando la siguiente fórmula desarrollada por Curtis y McIntosh (Ecuación 1) (Curtis & McIntosh, 1951):

$$\text{IVI (\%)}: \text{AR(\%)} + \text{FR(\%)} + \text{DR(\%)} \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde: AR: es la abundancia relativa calculada como el número de individuos por especie. FR: es la frecuencia relativa estimada como la proporción de parcelas en las que la especie apareció al menos una vez. DR: es la dominancia relativa definida como el área basal por especie y por hectárea.

Composición y distribución espacial de los árboles en el sistema agroforestal del cacao: Para evaluar la composición de especies en cada rango de edad, se utilizaron

los índices de Jaccard y Sorensen (Krebs, 2014). Además, los árboles se agruparon según sus productos potencialmente utilizables (madera, frutos o medicinales). También se estableció el área basal de todas las especies de sombra y de los árboles de cacao.

Análisis estadístico: Con los datos que se ajustaron a los supuestos del ANOVA se realizó este análisis para establecer las diferencias entre los estrados de edad. Los análisis se realizaron con el software InfoStat v.2020 y con un nivel de significación del 5% ($p < 0,05$) (Di Rienzo et al., 2020).

2.4 Estimación de los reservorios de carbono de sistemas agroforestales de cacao fino de aroma

2.4.1 Recolección de datos para el cálculo de la Biomasa del material vegetal y del suelo.

- Árboles adultos y juveniles: En el centro de cada plantación, donde delimitamos un rectángulo de 1000m^2 que midió 50,00 m de largo por 20,00 m de ancho (rectángulo mayor donde se contabilizó el número de especies), éste rectángulo fue dividido en 2 sub rectángulo, cada rectángulo midió 25,00 m de largo por 20,00 m de ancho (500m^2 cada uno) (Figura 3) (Cerde-Bustillos et al., 2013), en esta área se midieron y registraron los valores del DAP de todos los árboles con un diámetro mayor a 2,5 cm (Trinidad et al., 2016).
- Hojarasca: Dentro de los cuadrantes de 500m^2 se delimitó dos rectángulos de 5,00 m x 20,00 m (100m^2), en éstos cuadrantes se delimitaron sub cuadrantes de 0,5 m x 0,5 m ($0,25\text{m}^2$) en 8 puntos diferentes, aquí se pesó todo el material vegetal (hojarasca) que se encontró sobre la superficie del suelo de cada punto, se cogió una sub muestra de 500 g en una bolsa hermética y fueron transportados al laboratorio donde se determinó la humedad (Acosta-Mireles et al., 2001).
- Carbono en el suelo: Para calcular el carbono en el suelos, se realizaron 10 puntos aleatorios por parcela a una profundidad de 0-30 cm, de los cuales se recolectaron muestras homogéneas de 500g de suelo por parcela; ésta muestra sirvió para calcular la materia orgánica del suelo en el laboratorio (Cerde-

Bustillos et al., 2013). Los datos del laboratorio se utilizaron para el cálculo del carbono total acumulado en el suelo de los SAF estudiados.

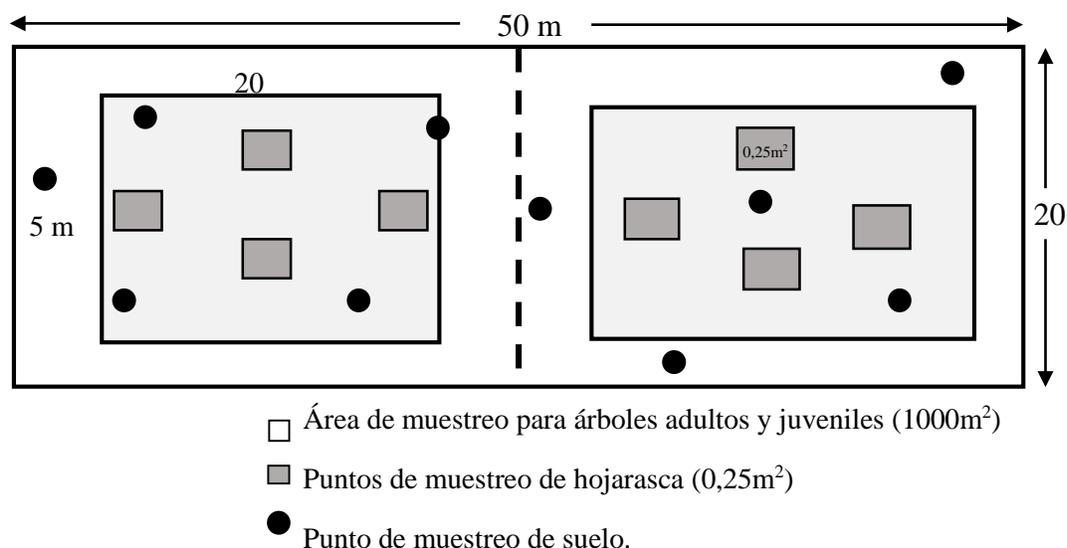


Figura 3. Metodología para muestrear el material vegetal y suelos, en sistemas agroforestales de cacao nativo fino de aroma de la cooperativa APROCAM, adaptado de Cerda-Bustillos et al. (2013).

2.4.2 Medición de la biomasa aérea total (BAT) sobre el suelo y cálculo del carbono total de los sistemas agroforestales de cacao

Para medir la biomasa aérea se empleó la metodología de estimación y monitorio de captura de carbono, bajo el método indirecto, para ello, se utilizaron ecuaciones que fueron establecidas por estudios previos, las cuales se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Ecuaciones para estimar la biomasa vegetal (kg/árbol).

Especie de árboles	Ecuaciones alométricas	Autor
Arboles forestales*	$BA^{**} = 0,1184DAP^{2,53}$	(Arévalo et al., 2003)
Cacao	$Y = 0,1208 DAP^{1,98}$	(Yuliasmara et al., 2009)
Musáceas	$Y = 0,0303DAP^{2,13}$	(Hairiah et al., 2009)
Árboles frutales	$B = 10^{(-1,11+2,64*\text{Log}(DBH))}$	(H. Andrade et al., 2008)

Y= biomasa (kg/árbol), DAP= diámetro a la altura del pecho (cm), BA = Biomasa de árboles forestales, Log: Logaritmo base 10. * Fórmula estándar

Además, la Biomasa aérea Total (BAT) del SAF, estuvo conformado por la Biomasa total de los árboles adultos y juveniles (BTAJ) y la biomasa de la hojarasca (Bh) (Ecuación 2). La BTAJ por hectárea se calculó sumando las biomásas de todos los árboles adultos y juveniles ($BTAJ_{total}$) que se registraron en los transectos por especie

arbórea multiplicados por un factor de conversión de 0,01, éste factor de conversión es porque el transecto fue de 1000m² (Ecuación 3) (Jiménez-Herrera, 2019). Bh se obtuvo de la división del peso fresco muestreado de la muestra de hoja recolectada (g) (PFM) por el peso seco final de la muestra (g) (PSM); este resultado se multiplicó por el peso fresco total por metro cuadrado (g/m²) (PFT) y un factor de conversión de 0,04 (Ecuación 4) (IPCC, 2003).

$$BAT \text{ (t/ha)} = (BTAJ + Bh), \text{ (Ecuación 2)}$$

$$BTAJ \text{ (t/ha)} = \sum BTAJ * 0,01, \text{ (Ecuación 3)}$$

$$Bh \text{ (t/ha)} = ((PFM/PSM) * PFT) * 0,04, \text{ (Ecuación 4)}$$

El carbono total de los sistemas agroforestales, estuvo conformado por el carbono en la biomasa aérea total (CBA) y el Carbono Total del Suelo (CS) (Ecuación 5). Para ello, el CBA se obtuvo a partir de la multiplicación de la BAT por el factor de conversión 0,5 (Ecuación 6) (IPCC, 2003). El carbono del suelo se determinó multiplicando el Peso del Volumen del Suelo (PVS) por el porcentaje de carbono (%C) que se determinó en el análisis de suelo en laboratorio y el factor de conversión 100 (Ecuación 7) (Jiménez-Herrera, 2019).

$$CT \text{ t/ha} = CBA + CS, \text{ (Ecuación 5)}$$

$$CBA \text{ (t/ha)} = BAT * 0,5, \text{ (Ecuación 6)}$$

$$CS \text{ (t/ha)} = (PVS * \%C)100, \text{ (Ecuación 7)}$$

Teniendo en cuenta que la densidad aparente de los suelos está asociado a la clase textural y varía según la porosidad de la misma (Salamanca-Jiménez & Sadeghian-Khalajabadi, 2005). El cálculo del PVS se realizó multiplicando la densidad aparente (DA) estándar en función a la textura del suelo descrito en la tabla 3 (Vasquez et al., 2017), por la profundidad del suelo (PS) y por el área de una hectárea que es 10000 m² (Ecuación 8). Para suelos con textura franco arcillosa arenosa, se consideró una densidad aparente de 1,40 g/cm³ (USDA, n.d.).

$$PVS \text{ (t/ha)} = DA * PS * 10000, \text{ (Ecuación 8)}$$

Tabla 2. Densidad aparente en función a la textura del suelo.

Textura del suelo	Porosidad total/total de espacio poroso (%)	Densidad aparente DA (g/cm³)
Arenoso	38 (32-42)	1,65 (1,55-1,80)
Franco arenoso	43 (40-47)	1,50 (1,40 – 1,60)
Franco	47 (43-49)	1,40 (1,35 – 1,50)
Franco arcilloso	49 (47-51)	1,35 (1,30 – 1,40)
Arcilloso arenoso	51 (49 – 53)	1,30 (1,25 – 1,35)
Arcilloso	53 (51 – 55)	1,25 (1,20 – 1,30)

Fuente: Vasquez et al. (2017)

Finalmente se calculó el CO₂ total secuestrado en los SAF de cacao multiplicando la cantidad de carbono total por un factor de 3,67 (Cerde-Bustillos et al., 2013)

2.4.3 Análisis estadístico

Para el análisis de los datos se utilizó el software estadístico InfoStat/P versión 2020 (Di Rienzo et al., 2020). Los resultados de biomasa aérea y carbono total de los sistemas agroforestales se reportaron en tablas resumen, con valores de media y desviación estándar. Además, el análisis del modelo mixto lineal generalizado (MMLG) seguido de la prueba de comparación de medias LSD de Fisher ($p \leq 0,05$) determinó el nivel de significación de la biomasa aérea total y el contenido de carbono total. MMLG relaja los supuestos de normalidad, varianza de error constante y una relación lineal entre los efectos de las covariables y la media para incorporar una amplia variedad de efectos aleatorios (Dean & Nielsen, 2007); efectivamente, esta técnica proporcionó un enfoque más flexible para analizar los datos (Bolker et al., 2009).

2.5 Importancia de la captación de carbono en sistemas agroforestales de cacao fino de aroma mediante una evaluación económica.

Para evaluar la importancia de la captación de carbono en sistemas agroforestales de cacao fino de aroma mediante una evaluación económica, se realizó un flujo de caja proyectado en 5 años, donde se consideró la implementación de un proyecto de venta de servicios

ambientales por venta de bonos de carbono a nivel de cooperativa financiado con recursos no reembolsables. Por tanto, en análisis de rentabilidad económica fue el indicador para determinar la viabilidad del proyecto.

En análisis de la rentabilidad económico estuvo dividido en dos fases; i) la fase de campo, donde los productores fueron los responsables de dar la información, ii) y la fase de gabinete, donde mediante tabulaciones se calcularon la producción total de cacao seco en kg/año, costos de inversión para la instalación del cacao, costos directos de producción y mantenimiento del cacao, costos indirectos – herramientas y maquinarias que sirvieron para realizar el flujo de caja y el análisis de los indicadores económicos de TIRE y VANE.

2.5.1 Recolección de datos de campo.

Para la recolección de la información de campo, se aplicaron encuestas a 53 productores; las encuestas estuvieron conformada por 11 preguntas de variables cualitativas y cuantitativas relacionadas directamente con la información para realizar el análisis económico (Tabla 3).

Tabla 3. Componentes de la encuesta para la recolección de datos de campo.

Componente	Variables cuantitativas	Variables cualitativas
Características generales	Hectáreas de cacao en producción, rendimiento de cacao seco en kg/ha, densidad de siembra del cacao, precio de venta del cacao (S/ /kg), precio de jornal por día (S/).	Datos generales del productor, Actividad principal
Variables para determinar los costos de mantenimiento y producción	N° de jornales para labores de poda; N° de jornales para labores de cosecha, N° de jornales para la limpieza de malezas, N° de jornales para la aplicación de fertilizantes; N° de jornales para el control de plagas y enfermedades, Costo de transporte (Soles/saco de 50 kg).	

Cálculo de la muestra: La muestra fue calculada por la técnica de muestreo aleatorio simple para poblaciones finitas (Balzarini et al., 2008), para ellos se siguió la fórmula de la ecuación 9:

$$n = \frac{Z^2 P Q N}{E^2(N-1) + Z^2 P Q} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

n: Tamaño de la Muestras

N: población objetivo: 235 productores de cacao de APROCAM

P: Proporción de las unidades que tienen las características: 50% o 0,5

Q: Proporción de las unidades que no reúnen la característica: 50% o 0,5

E = Error = 10% o 0,1

Reemplazando:

$$n = \frac{(1,65)^2 (0,5*0,5*235)}{0,1^2(235-1) + 1,65^2(0,5*0,5)}$$

$$n = \frac{159,95}{3,01}$$

$$n = 53,14$$

Tipo de muestreo: El muestreo fue estratificado por afijación proporcional, ésta técnica permite una muestra entre los estratos de una encuesta muestral estratificada, seleccionando muestras separadas de subgrupos de la población, que se denominan estrato, esto incrementa el grado de precisión de los resultados de la encuesta (Lavrakas, 2013).

Por tanto, para el muestreo se utilizó la fórmula de la ecuación 10.

$$Np = \frac{n}{N} n_1 \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

Np= Tamaño de la muestra por distrito

n= Tamaño de la muestra

n1= tamaño de la población por distrito

N= población objetivo

La tabla 4 muestra la distribución de las 53 encuestas a aplicar por distrito.

Tabla 4. Distribución de encuestas por distrito.

Distrito	n1	n/N	Np	=Np
Aramango	4	0,23	0,90	1
Cajaruro	26	0,23	5,88	6
Copallin	55	0,23	12,44	12
El Parco	5	0,23	1,13	1
Imaza	83	0,23	18,77	19
La Peca	57	0,23	12,89	13
Nieva	5	0,23	1,13	1
Total	235		53,14	53

2.5.2 Características generales de los sistemas agroforestales evaluados.

Para describir las características generales de los SAF de cacao se consideró las variables de: densidad de siembra (plantas/ha), SAF cacao en producción (ha), SAF cacao en evaluados (ha), Rendimiento cacao seco (kg/ha), Precio de venta (Soles por kg/cacao seco), estos valores fueron calculados con los resultados obtenidos después de la aplicación de las encuestas.

2.5.3 Producción total de cacao en kg por año

La producción anual del cacao, se calculó en función al rendimiento promedio por hectárea multiplicado por el número total de hectáreas de SAF cacao producción evaluados, que a su vez fue calculado sumando el total de SAF cacao en producción por productor. Además, se consideró el 5% en autoconsumo y mermas.

La producción total kg/ha por año, fue proyectado para 5 año, el mismo que no se consideró un incremento, ya que la implementación del proyecto (servicios ambientales por venta de carbono) no interviene de manera directa en la producción del cacao.

2.5.4 Retención de CO₂ de los sistemas agroforestales de cacao (t/ha/año)

Para calcular la retención de CO₂ de los sistemas agroforestales en toneladas por hectárea por año, se usó los valores encontrados del CO₂ retenido en el desarrollo del objetivo 2. Con los valores de los sistemas con edades desde los 12 a 20 años, se realizó una proyección lineal, para determinar la tendencia del aumento de la retención de CO₂ al año.

2.5.5 Costos de inversión para la producción del cacao

Dentro de los costos de inversión de la producción del cacao se consideró la valorización del terreno para la siembra de cacao, precio de los plántones necesarios para instalar una hectárea de cacao, costo de transporte de los plántones de vivero a campo definitivo y el costo de instalación (siembra) de una hectárea de cacao.

2.5.6 Costos directos de producción y mantenimiento del cacao

Dentro de los costos directos para el manejo y mantenimiento del cacao se consideró los costos de mano de obra para las diferentes actividades de, control de malezas, poda, manejo de sombra, aplicación de fertilizantes, cosecha y control de plagas y enfermedades. Además, se consideró la adquisición de insumos tales como roca fosfórica y guano de isla.

2.5.7 Costos indirectos – herramientas y maquinarias

Dentro de los costos indirectos, se consideraron la adquisición de herramientas y maquinarias necesarios para el manejo del cultivo, tales como, machete, pico, palanas, motoguadañas, etc.

2.5.8 Costos administrativos de la producción del cacao

Dentro de los costos administrativos, se consideró a los gastos mínimos que necesita la cooperativa APROCAM para poder realizar sus actividades, y el pago por los servicios básicos como, agua, luz e internet y telefonía.

2.5.9 Costos para la implementación del proyecto de servicio ambiental – venta de bonos de carbono

Para calcular el costo para la implementación del servicio ambiental – venta de bonos de carbono en la cooperativa, se consideraron costos de la certificadora reconocida internacionalmente VERRA (<https://verra.org/about-verra/who-we-are/>). Además, se consideró costos para la implementación de un servicio de consultoría para la implementación del proyecto y un rubro de gastos por mantenimiento y monitoreo para vigilar el proyecto una vez que se haya implementado.

2.5.10 Flujo de caja con proyección a 5 años

Con todos los datos que se calcularon anteriormente, se realizó el flujo de caja con proyección a 5 años. Dentro de los supuestos se consideró ingresos y egresos con y sin la implementación del proyecto de servicio ambiental – ventas de bonos de carbono. Estos valores sirvieron para realizar el cálculo de los valores de TIRE y VANE.

El Valor Actual Neto Económico (VANE), es el valor actual/presente de los flujos de efectivo netos de una propuesta, entendiéndose por flujos de efectivo netos la diferencia entre los ingresos periódicos y los egresos periódicos (Mete, 2014).

Para el cálculo del VANE se siguió la ecuación 11:

$$VANE = \sum \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \text{ (Ecuación 11)}$$

Donde:

B= Beneficio en el año t

C= Costos en el año t

r= tasa de descuento aplicada

Si el Valor Actual Neto Económico es mayor o igual a 0 el proyecto se acepta, si esto no se llega a cumplir se rechaza el proyecto (Mete, 2014).

Por otro lado, la tasa Interna de Retorno Económico (TIRE) es aquel valor relativo que iguala el valor actual de la corriente de ingresos con el valor actual de la corriente de egresos estimados, es decir se trata de actualizar una corriente de ingresos (flujos netos esperados) al momento cero o inicial de la inversión, y compararla con el valor actual de una corriente de egresos (volumen de inversión en ese momento) a una tasa K ó i denominada costo de capital o costo de oportunidad de un proyecto, enmarcada en una adecuada estructura, que se determina con anterioridad (Altuve, 2004).

La TIRE se calculó siguiendo la ecuación 12:

$$0 = -A + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{(1+TIRE)^i} \text{ (Ecuación 12)}$$

Donde:

A= inversión inicial;

Q_i = flujo neto del periodo i (desde el momento uno hasta el momento n)

TIRE= tasa interna de retorno económico

n= Tiempo en años

Para tomar la decisión se considerará el siguiente criterio: Si $TIRE < 1$ (la propuesta es rentable); $TIRE = 1$ (es indiferente su realización) y si $TIRE > 1$ (la propuesta no es rentable) (Vásquez et al., 2017).

Finalmente se calculó la relación beneficios/costo según la ecuación 13. Este análisis consiste en comparar los beneficios y costos de un proyecto, si los beneficios superan a los costos, proporciona datos para tomar decisiones y tienden a la aceptación de un proyecto (Arévalo Briones et al., 2016).

$$B/C = \frac{Tbe}{Tcd} = (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

B/C= Relación beneficio costo.

Tbe= Total beneficios encontrados.

Tcd= Total costos encontrados

III. RESULTADOS

3.1 Diversidad de árboles en sistemas agroforestales de cacao fino de aroma

3.1.1 Diversidad, abundancia y valor de importancia

En el presente estudio se inventariaron un total de 454 individuos distribuidos en 12 familias (Tabla 5). Solo dos familias superaron los 50 individuos siendo las más abundantes (Musaceae y Boraginaceae). En general, cuando se visualizan los datos del total las familias con mayor riqueza de especies son Anacardiaceae (2 especies), Fabaceae (2 especies) y Rutaceae (4 especies). Se encontró que el mayor número de individuos de árboles de sombra fue inventariado en las parcelas más jóvenes (8-15 años) contando 206 individuos.

Tabla 5. Número de especies y abundancia de individuos por familia botánica en cada rango de edad de plantaciones y en total.

Familia	Joven		Mediana edad		Viejo		Total	
	Spec.	Indiv.	Spec.	Indiv.	Spec.	Indiv.	Spec.	Indiv.
Anacardiaceae	2	2	1	3	1	2	2	7
Annonaceae	1	2	0	0	0	0	1	2
Arecaceae	1	1	1	3	0	0	1	4
Malvaceae	0	0	0	0	1	2	1	2
Boraginaceae	1	14	1	29	1	12	1	55
Caricaceae	0	0	0	0	1	5	1	5
Fabaceae	2	7	1	8	2	8	2	23
Lauraceae	1	2	1	5	1	5	1	12
Meliaceae	1	3	1	1	1	3	1	7
Musaceae	1	167	1	63	1	86	1	316
Rubiaceae	1	3	0	0	1	2	1	5
Rutaceae	3	5	2	3	3	8	4	16
Total	14	206	9	115	13	133	17	454

Las parcelas de cacao de mediana edad (16-29 año) poseen la más baja riqueza de especies (Tabla 6). De hecho, hubo un total de 17 especies observadas en el estudio. El número total estimado de especies basado en Chao-1 fue de 15; 9,5 y 15 para los

SAF de cacao joven, SAF de cacao de mediana edad y SAF de cacao viejo respectivamente. Los índices de Simpson (1-D) y de Shannon (H) oscilaron entre 0,34 y 0,63 y entre 0,89 y 1,45 respectivamente. En general, en el área de estudio, los SAF de mediana edad son los menos diversos en comparación con los SAF jóvenes y viejos (Tabla 6).

Tabla 6. Índices de diversidad por rango de edad y en general.

	Joven	Mediana edad	Viejo	Índice total
Riqueza de especies (S)	14	9	13	17
Individuos	206	115	133	454
Simpson_1-D	0,34	0,63	0,57	0,4975
Shannon_H	0,89	1,34	1,45	1,271
Margalef	2,44	1,69	2,45	2,615
Chao-1	15,00	9,50	13,00	17,33

De este modo, los 454 individuos se distribuyeron entre 17 especies, de las cuales seis son nativas y 11 son exóticas o introducidas. Las especies con mayor abundancia fueron *Musa* sp. (316 individuos en total), *Cordia alliodora* (55 individuos en total) e *Inga* sp. (16 individuos) mientras que *Spondias purpurea* y *Citrus aurantifolia* son las menos abundantes con apenas 1 individuo inventariado en toda el área de estudio (Tabla7).

Tabla 7. Especies y abundancia según edad de las plantaciones y total. Adicionalmente se indica si la especie es nativa o exótica y los productos potenciales (P.P) que pueden aprovecharse de ellas. (E=Exotico; N=Nativo; F=Forestal; Med=Medicinal; M= Maderable).

Especie	Familia	Joven	Mediana edad	Viejo	Total	Nativo	P.P
<i>Mangifera indica</i>	Anacardiaceae	1	3	2	6	E	F
<i>Spondias purpurea</i>	Anacardiaceae	1	0	0	1	E	F
<i>Annona muricata</i>	Annonaceae	2	0	0	2	N	F,Med
<i>Cocus nucifera</i>	Arecaceae	1	3	0	4	N	F
<i>Matisia cordata</i>	Malvaceae	0	0	2	2	N	F
<i>Cordia alliodora</i>	Boraginaceae	14	29	12	55	E	M
<i>Carica papaya</i>	Caricaceae	0	0	5	5	E	F

<i>Inga</i> sp.	Fabaceae	5	8	3	16	N	F
<i>Lysiloma divaricatum</i>	Fabaceae	2	0	5	7	N	M
<i>Persea americana</i>	Lauraceae	2	5	5	12	E	F
<i>Cedrela odorata</i>	Meliaceae	3	1	3	7	E	M
<i>Musa</i> sp.	Musaceae	167	63	86	316	E	F
<i>Calycophyllum spruceanum</i>	Rubiaceae	3	0	2	5	N	M
<i>Citrus limetta</i>	Rutaceae	2	1	2	5	E	F
<i>Citrus sinensis</i>	Rutaceae	1	2	0	3	E	F
<i>Citrus reticulata</i>	Rutaceae	2	0	5	7	E	F
<i>Citrus aurantifolia</i>	Rutaceae	0	0	1	1	E	F

El IVI revela que en los tres rangos de edad de las plantaciones las dos especies más importantes son *Musa* sp. y *Cordia alliodora* con un IVI total al 115,31% y 87,06% respectivamente (Tabla 8). En las parcelas SAF jóvenes, solo hay 4 especies que superan 10% de IVI. Mientras que en los SAF de mediana edad, hay hasta 9 especies que superan este límite.

Las especies frutales y maderables como *Musa* sp. y *Cordia alliodora* son las más dominantes en las parcelas evaluadas, además todas las especies cultivadas para sombra de cacao tienen otros usos potenciales, ya sea frutal, maderable o medicinal (Tabla 7). En todas las parcelas evaluadas existe una mayoría de especies con una baja densidad de individuos.

Tabla 8. Especies más importantes (IVI>10) según edad de la plantación y en total. (Ar=Abundancia relativa; Fr= Frecuencia relativa; Dor= Dominancia relativa; IVI= Índice de Valor de Importancia).

	Ar (%)	Fr (%)	Dor (%)	IVI (%)
Joven				
<i>Musa</i> sp.	81,07	14,29	69,85	165,20
<i>Cordia alliodora</i>	6,80	19,05	14,68	40,53
<i>Lysiloma divaricatum</i>	0,97	9,52	2,82	13,32
<i>Calycophyllum spruceanum</i>	1,46	9,52	0,21	11,19
Mediana edad				
<i>Cordia alliodora</i>	25,22	22,22%	83,51	130,95
<i>Musa</i> sp.	54,78	22,22%	9,39	86,40

<i>Inga</i> sp.	6,96	11,11	1,92	19,99
<i>Cocus nucifera</i>	2,61	11,11	1,66	15,38
<i>Citrus sinensis</i>	1,74	11,11	0,04	12,89
<i>Persea americana</i>	4,35	5,56	0,23	10,14
Viejo				
<i>Musa</i> sp.	64,66	18,18	40,12	122,96
<i>Cordia alliodora</i>	9,02	4,55	33,72	47,28
<i>Persea americana</i>	3,76	13,64	4,75	22,15
<i>Lysiloma divaricatum</i>	3,76	9,09	6,61	19,46
<i>Carica papaya</i>	3,76	9,09	0,75	13,60
<i>Cedrela odorata</i>	2,26	9,09	1,47	12,82
<i>Citrus limetta</i>	1,50	9,09	0,38	10,98
<i>Matisia cordata</i>	1,50	4,55	4,90	10,95
<i>Citrus reticulata</i>	3,76	4,55	2,37	10,67
Total				
<i>Musa</i> sp.	69,60	18,03	27,67	115,31
<i>Cordia alliodora</i>	12,11	14,75	60,19	87,06
<i>Persea americana</i>	2,64	8,20	1,31	12,15
<i>Inga</i> sp.	3,52	6,56	1,89	11,97

3.1.2 Composición y distribución espacial de árboles en SAF de cacao

El análisis de varianza no evidencia diferencias estadísticas significativas entre el área basal de los árboles de sombra, área basal del cacaotal y el área basal total ($p < 0,05$). Sin embargo, se puede observar que conforme el cacaotal es más viejo el área basal de los árboles de cacao aumenta, se tuvo un total de 8,23 m²/ha; 9,96 m²/ha; 10,95 m²/h de área basal de árboles de cacao para los SAF de cacao joven, de mediana edad y viejos respectivamente. Así mismo, los árboles de sombra ocuparon una mayor área basal promedio (15,92 m²/ha) en los SAF de cacao de mediana edad, mientras que en los SAF de cacao viejo fue menor (4,39 m²/ha) y en los SAF de cacao joven alcanzó 5,6 m²/h de área basal para los árboles de sombra (Figura 4). Igualmente, el área basal total fue mayor en las SAF de cacao de mediana edad que en las SAF de cacao joven o viejo. Sólo en las SAF de cacao de mediana edad el área basal ocupada por los árboles de sombra (61,51%) fue mayor que el área ocupada por los árboles de

cacao (38,49%). En las SAF de cacao joven y viejo, el cacao ocupó un área basal de 59,48% y 71,36% respectivamente del área basal total.

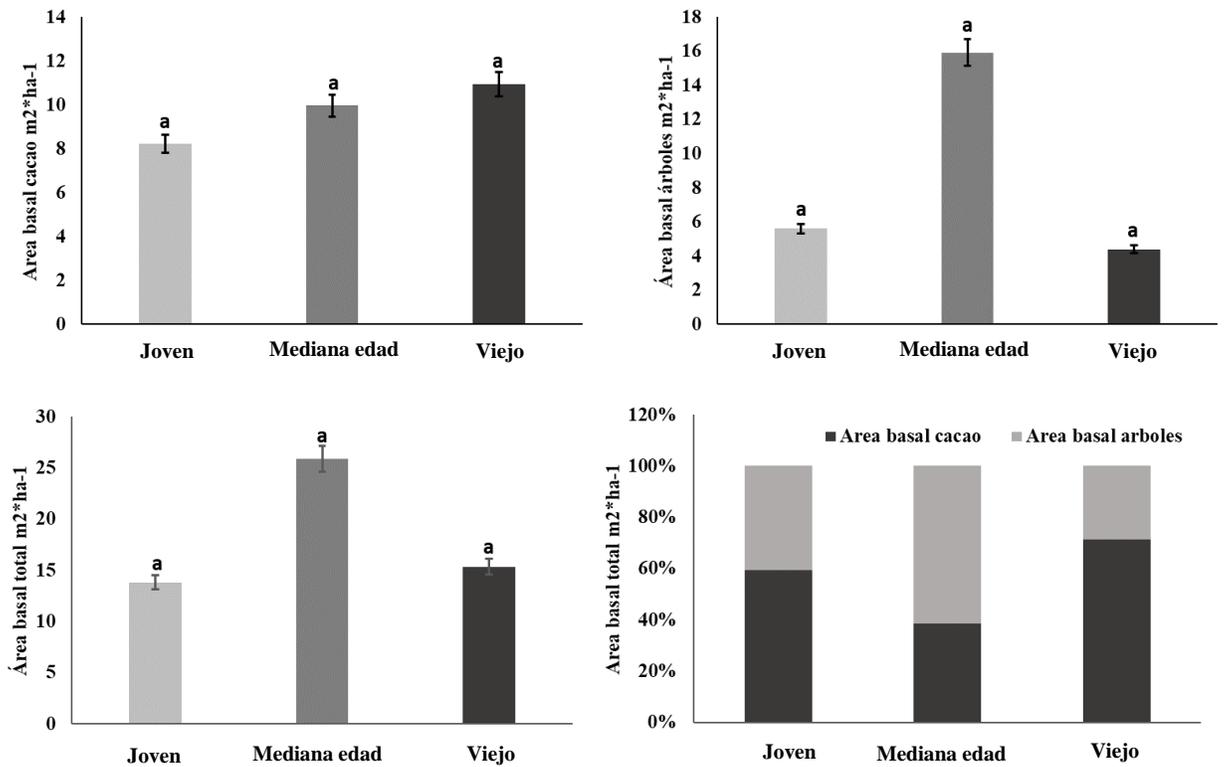


Figura 4. Área basal de cacao, árboles de sombra, total y área basal de cacao y árboles de sombra en porcentaje del total. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes ($p < 0,05$)

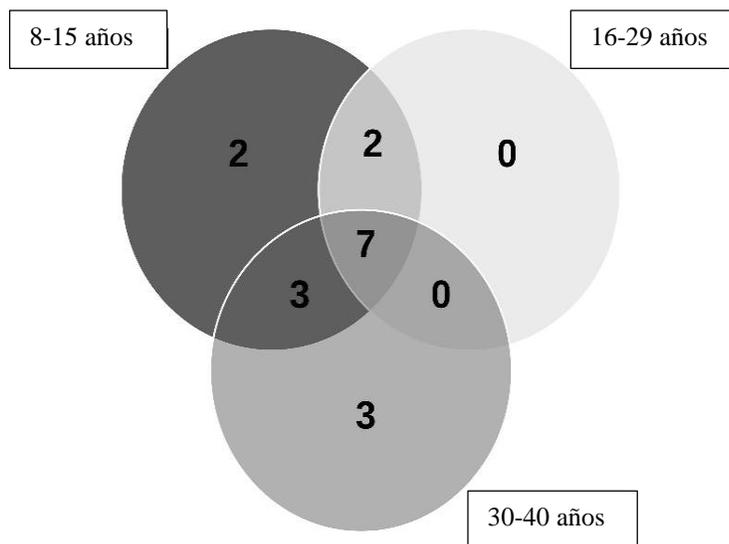


Figura 5. Número de especies por cada nivel de edad de las plantaciones de cacao.

Del número total de especies siete se reportaron en los tres rangos etarios (Tabla 4; Figura 5). *Spondias purpurea* y *Annona muricata* solo fueron reportadas en SAF de cacao joven, mientras que *Matisia cordata*, *Carica papaya* y *Citrus aurantifolia* solo se reportaron en SAF de cacao viejo. Los índices de disimilaridad son mayores cuando se comparan los SAF de cacao joven con SAF de cacao de mediana edad o viejo que cuando se comparan los SAF de cacao de mediana edad con los SAF de cacao viejo (Figura 6).

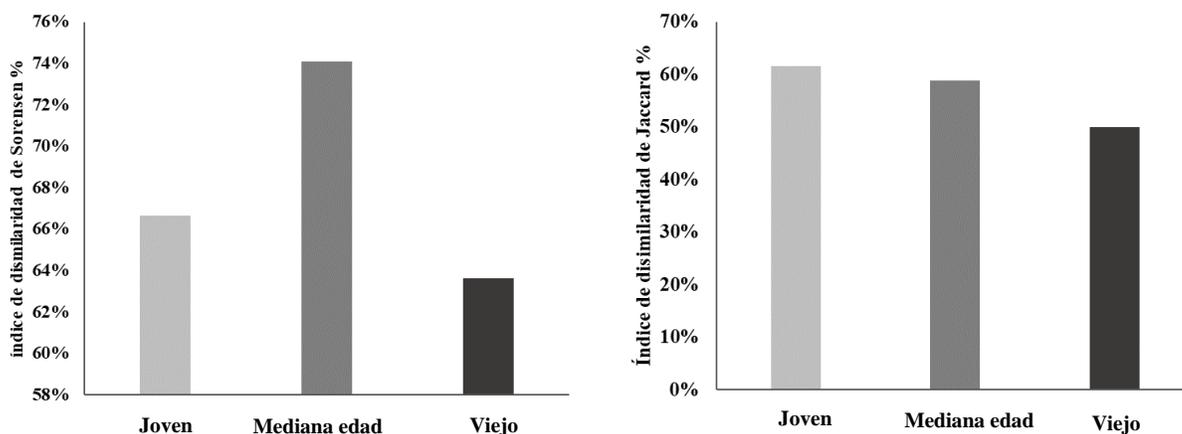


Figura 6. Disimilaridad de especies entre parcelas de cacao según grupos etarios.

3.2 Estimación de los reservorios de carbono de sistemas agroforestales de cacao fino de aroma

3.2.1 Captura de Biomasa aérea y carbono almacenado en los sistemas agroforestales de cacao

Como se puede observar anteriormente, *Theobroma cacao*, *Musa* sp., *Laurus* sp. y *Persea* sp. fueron las especies más comunes y con mayor IVI en los SAF de cacao. La biomasa vegetal aérea de los SAF de cacao, mostró un ligero aumento con la edad de los árboles en el sistema, aunque no se encontraron diferencias significativas para ninguna de las especies de árboles que formaban el SAF (Tabla 9). Los SAF de cacao viejo (30-40 años) acumulan 0,83 t/ha de biomasa en la hojarasca, que es numéricamente inferior a los SAF de cacao joven (8-15 años) 0,97 t/h, y estadísticamente inferior a los SAF de cacao de mediana edad (16-29 años) que acumulan 1,05 t/ha. Por otro lado, la acumulación de biomasa total sobre el suelo en los SAF de cacao viejo (49,82 t/ha) es mayor; sin embargo, no hay diferencias significativas con la acumulada en los SAF jóvenes y de mediana edad (41,14 t/ha y

27,40 t/ha respectivamente). Los SAF que están entre los 30-40 años acumulan 0,83 t/ha de biomasa en la hojarasca, y es significativamente menor que los sistemas de están entre 8-15 años y 16-29 años que acumulan 0,97 y 1,05 t/ha respectivamente. Por su parte, la acumulación de biomasa vegetal total en los SAF de 30-40 años (49,82 t/ha) es mayor, sin embargo, no existencia diferencias significativas con lo acumulado en los SAF de cacao joven y de mediana edad (41,14 t/ha y 27,40 t/ha respectivamente).

Tabla 9. Biomasa aérea de los sistemas agroforestales (Media \pm desviación estándar).

SAF	<i>Theobroma cacao</i> t/ha	<i>Musa sp.</i> t/ha	<i>Cordia alliodora</i> t/ha	<i>Persea sp.</i> t/ha	Otras especies* t/ha	Hojarasca t/ha	Biomasa total sobre el suelo t/ha
1	9,35 \pm 0,05	0,71 \pm 0,03	13,04 \pm 4,65	0,63 \pm 0,04	27,64 \pm 7,01	1,11 \pm 0,10	53,09 \pm 10,68
2	13,24 \pm 0,10	0,85 \pm 0,09	00 \pm 00	00 \pm 00	00 \pm 00	0,83 \pm 0,41	14,92 \pm 05,28
3	14,15 \pm 0,22	00 \pm 00	1,58 \pm 0,00	00 \pm 00	4,72 \pm 0,34	1,14 \pm 0,22	21,59 \pm 05,45
4	9,35 \pm 0,04	1,81 \pm 0,14	27,17 \pm 4,96	00 \pm 00	10,99 \pm 4,87	0,98 \pm 0,14	50,30 \pm 02,66
5	14,47 \pm 0,07	00 \pm 00	13,96 \pm 1,11	00 \pm 00	5,08 \pm 1,69	1,05 \pm 0,15	34,56 \pm 06,81
6	13,11 \pm 0,04	1,14 \pm 0,07	00 \pm 00	00 \pm 00	2,92 \pm 0,38	1,03 \pm 0,14	18,20 \pm 05,05
7	11,59 \pm 0,04	4,77 \pm 0,05	11,24 \pm 1,08	00 \pm 00	00 \pm 00	0,87 \pm 0,21	28,47 \pm 05,46
8	30,64 \pm 0,05	3,61 \pm 0,05	11,24 \pm 1,08	3,68 \pm 0,41	1,42 \pm 0,27	1,06 \pm 0,07	51,65 \pm 11,40
9	24,02 \pm 0,13	00 \pm 00	00 \pm 00	00 \pm 00	18,79 \pm 5,27	0,91 \pm 0,10	43,72 \pm 11,07
10	24,16 \pm 0,11	00 \pm 00	00 \pm 00	00 \pm 00	0,02 \pm 0,00	1,07 \pm 0,27	25,25 \pm 09,78
11	17,76 \pm 0,04	1,54 \pm 0,03	16,34 \pm 11,28	00 \pm 00	0,61 \pm 0,00	1,23 \pm 0,26	37,48 \pm 08,40
12	12,91 \pm 0,09	0,06 \pm 0,00	20,22 \pm 1,06	00 \pm 00	5,51 \pm 0,59	0,87 \pm 0,20	39,57 \pm 08,57
13	07,35 \pm 0,13	4,75 \pm 0,04	4,03 \pm 1,38	3,04 \pm 1,32	14,25 \pm 3,25	0,78 \pm 0,14	34,20 \pm 04,71
14	9,33 \pm 0,06	0,19 \pm 0,02	95,70 \pm 22,52	0,25 \pm 0,00	9,90 \pm 3,63	0,61 \pm 0,31	115,98 \pm 37,69
15	10,01 \pm 0,05	3,92 \pm 0,04	00 \pm 00	2,55 \pm 0,00	5,63 \pm 0,16	0,73 \pm 0,37	22,84 \pm 01,79
8-15 años	12,13 \pm 2,90 a	2,13 \pm 2,44 a	6,16 \pm 6,13 a	0,61 \pm 1,36 a	5,39 \pm 5,34 a	0,97 \pm 0,15 ab	27,40 \pm 7,37 a
16-29 años	14,71 \pm 6,31 a	0,82 \pm 8,83 a	15,48 \pm 10,04 a	0,13 \pm 0,28 a	8,95 \pm 11,34 a	1,05 \pm 0,14 a	41,14 \pm 11,12 a
30-40 años	17,45 \pm 9,44 a	1,71 \pm 1,90 a	21,39 \pm 41,83 a	1,30 \pm 1,71 a	7,15 \pm 7,57 a	0,83 \pm 0,17 b	49,82 \pm 39,89 a

Medias con letras en común no son significativamente diferentes, según LSDFisher ($p > 0,05$).

*Estuvo conformado por otras especies forestales y frutales que se encontraron dentro del SAF cacao.

El carbono total almacenado en el componente aéreo de *Theobroma cacao*, *Musa* sp., *Cordia alliodora*. y *Persea* sp. no presentaba diferencias estadísticas significativas en los SAF de cacao evaluados. Sin embargo, a medida que la plantación envejece, hay una cantidad ligeramente mayor de carbono almacenado. Por otro lado, el carbono retenido en la hojarasca mostró diferencias significativas, ya que los SAF de cacao viejo almacenaron menos carbono que los SAF de cacao de mediana edad y jóvenes (0,47 t/ha y 0,44 t/ha respectivamente). Por último, en los SAF de cacao, el carbono retenido en los componentes sobre el suelo (árboles y hojarasca) no tuvo significación entre ellos, pero los sistemas de cacao viejo almacenan un poco más de carbono que los otros sistemas (Tabla 10).

Tabla 10. Carbono en la biomasa aérea de los sistemas agroforestales (Media \pm desviación estándar).

SAF	<i>Theobroma cacao</i> t/ha	<i>Musa sp.</i> t/ha	<i>Cordia alliodora</i> t/ha	<i>Persea sp.</i> t/ha	Otras especies* t/ha	Hojarasca t/ha	Carbono vegetal total t/ha
1	4,69 \pm 0,03	0,35 \pm 0,01	6,83 \pm 2,33	0,32 \pm 0,02	13,82 \pm 3,50	0,50 \pm 0,05	26,51 \pm 5,35
2	6,62 \pm 0,05	0,43 \pm 0,05	00 \pm 00	00 \pm 00	00 \pm 00	0,37 \pm 0,19	7,42 \pm 2,64
3	7,08 \pm 0,11	00 \pm 00	0,79 \pm 0,00	00 \pm 00	2,36 \pm 0,17	0,51 \pm 0,10	10,74 \pm 2,73
4	4,69 \pm 0,02	0,9 \pm 0,07	13,58 \pm 2,48	00 \pm 00	5,5 \pm 2,43	0,44 \pm 0,06	25,11 \pm 5,15
5	7,24 \pm 0,03	00 \pm 00	6,98 \pm 0,56	00 \pm 00	2,55 \pm 0,80	0,47 \pm 0,06	17,24 \pm 3,34
6	6,52 \pm 0,02	0,56 \pm 0,04	00 \pm 00	00 \pm 00	1,46 \pm 0,20	0,47 \pm 0,07	9,01 \pm 2,52
7	5,81 \pm 0,02	2,36 \pm 0,02	5,62 \pm 0,54	00 \pm 00	00 \pm 00	0,39 \pm 0,09	14,18 \pm 2,74
8	15,30 \pm 0,06	1,79 \pm 0,02	5,62 \pm 0,54	1,84 \pm 0,21	0,7 \pm 0,13	0,48 \pm 0,03	25,73 \pm 5,70
9	11,98 \pm 0,06	00 \pm 00	00 \pm 00	00 \pm 00	9,39 \pm 2,63	0,41 \pm 0,05	21,78 \pm 5,53
10	11,92 \pm 0,06	00 \pm 00	00 \pm 00	00 \pm 00	0,01 \pm 0,00	0,48 \pm 0,12	12,41 \pm 4,83
11	8,86 \pm 0,02	0,77 \pm 0,02	8,17 \pm 0,64	00 \pm 00	0,31 \pm 0,00	0,55 \pm 0,12	18,66 \pm 4,27
12	6,50 \pm 0,05	0,03 \pm 0,00	10,12 \pm 0,53	00 \pm 00	2,75 \pm 0,29	0,39 \pm 0,09	19,79 \pm 4,30
13	3,64 \pm 0,07	2,38 \pm 0,02	2,01 \pm 0,69	1,52 \pm 0,66	7,11 \pm 1,62	0,35 \pm 0,06	17,01 \pm 2,35
14	4,62 \pm 0,03	0,09 \pm 0,02	47,86 \pm 11,26	0,12 \pm 0,00	4,93 \pm 1,82	0,27 \pm 0,14	57,89 \pm 18,860
15	5,04 \pm 0,02	2,00 \pm 0,02	00 \pm 00	1,28 \pm 0,00	2,81 \pm 0,08	0,33 \pm 0,17	11,46 \pm 1,79
8-15 años	6,06 \pm 1,46 a	1,06 \pm 1,22 a	3,08 \pm 3,06 a	0,30 \pm 0,68 a	2,70 \pm 2,67 a	0,44 \pm 0,07 ab	13,64 \pm 3,69 a
16-29 años	7,33 \pm 3,08 a	0,41 \pm 0,41 a	7,74 \pm 5,02 a	0,06 \pm 0,14 a	4,48 \pm 5,67 a	0,47 \pm 0,06 a	20,50 \pm 5,63 a
30-40 años	8,71 \pm 4,71 a	0,86 \pm 0,96 a	10,70 \pm 20,92 a	0,65 \pm 0,86 a	3,57 \pm 7,78 a	0,37 \pm 0,08 b	24,86 \pm 19,91 a

Medias con letras en común no son significativamente diferentes, según LSD Fisher ($p > 0,05$).

*Estuvo conformado por otras especies forestales y frutales que se encontraron dentro del SAF cacao

La reserva de carbono del suelo dentro de los SAF presentó un comportamiento similar al del carbono almacenado en el componente aéreo, en los SAF de cacao viejo (131,96 t/ha) se almacenó más carbono que en los SAF de cacao de mediana edad y jóvenes. Es importante resaltar que más del 50% de los sistemas evaluados presentaron texturas de suelo arcilloso y franco arcilloso arenoso (Tabla 11).

Tabla 11. Carbono orgánico del suelo a 30 cm de profundidad.

SAF	PVS T/ha	Textura	Densidad (g/cm ³)	%CO	Carbono en el suelo T/ha
1	3750	Arcilloso	1,25	1,60	60,00
2	3900	Arcillo arenoso	1,30	2,13	83,07
3	4200	Franco	1,40	2,13	89,46
4	3750	Arcilloso	1,25	3,15	118,13
5	3750	Arcilloso	1,25	2,75	103,13
6	4200	Franco arcillo arenoso	1,40	3,50	147,00
7	3900	Franco Arenoso	1,30	3,57	139,23
8	4200	Franco arcillo arenoso	1,40	3,65	153,30
9	4200	Franco arcillo arenoso	1,40	3,31	139,02
10	3750	Arcilloso	1,25	4,50	168,75
11	3750	Arcilloso	1,25	4,10	153,75
12	3750	Arcilloso	1,25	3,73	139,88
13	4200	Franco arcillo arenoso	1,40	2,88	120,96
14	4500	Franco Arenoso	1,50	3,55	159,75
15	4500	Arcillo arenoso	1,50	2,77	124,65
8-15 años		—	—	2,97±0,59 a	119,96±24,07 a
16-29 años		—	—	2,42±1,13 a	128,10±42,39 a
30-40 años		—	—	3,08± 0,63 a	131,96±30,50 a

Medias con letras en común no son significativamente diferentes, según LSD Fisher ($p > 0,05$).

*Estuvo conformado por otras especies forestales y frutales que se encontraron dentro del SAF cacao.

Aunque el carbono total retenido en los componentes aéreos (árboles y hojarasca) y del suelo en los SAF de cacao adultas fue mayor (156,81 t/ha) que en las SAF de cacao medianas y jóvenes (148,60 y 133,59 t/ha respectivamente), no hubo diferencias significativas entre los tres rangos de edad evaluados (Figura 7).

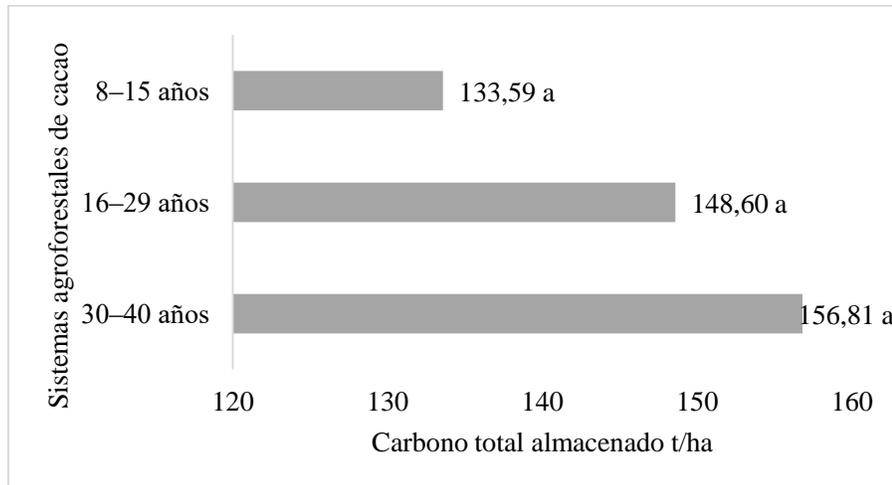


Figura 7. Carbono total almacenado en las SAF de cacao viejo, de mediana edad y jóvenes.

3.2.2 Secuestro de CO₂ de Sistemas Agroforestales de Cacao

Los sistemas jóvenes presentaron la menor retención de CO₂ con 490,28 t/ha, seguidos de los sistemas de mediana edad y viejos con más de 500 t/ha de CO₂, aunque no se encontraron diferencias estadísticas significativas en la retención de CO₂ entre ellos (Figura 8).

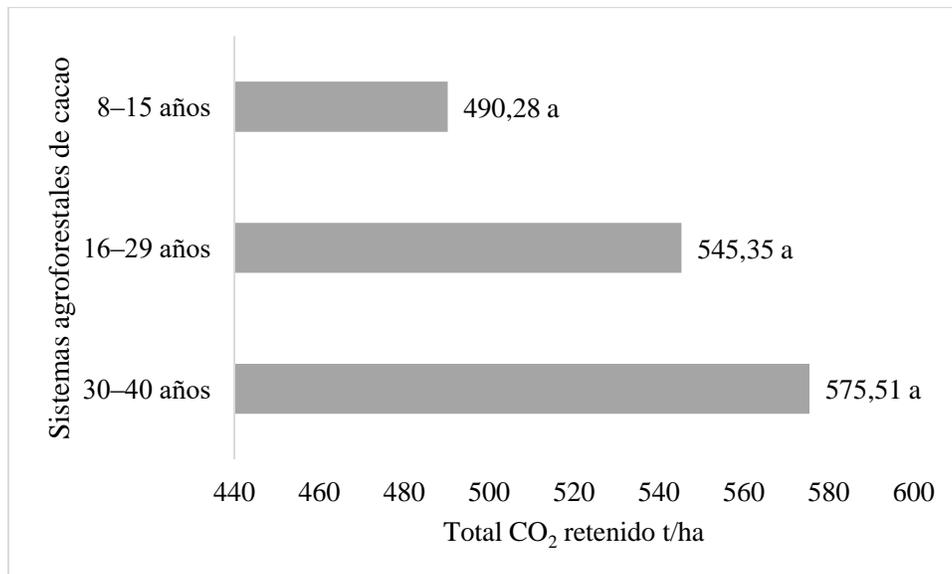


Figura 8. CO₂ retenido en los sistemas agroforestales de cacao de 8-15 años, 16-29 años y de 30-40 años.

3.3 Importancia de la captación de carbono en sistemas agroforestales de cacao fino de aroma mediante una evaluación económica

3.3.1 Características generales de los sistemas agroforestales evaluados

Los 53 sistemas agroforestales intervenidos representaron a un productor de cacao, la extensión de cacao en producción de estos sistemas osciló desde 0,25 ha hasta 5 ha, sumando un total de 104,25 ha de cacao en producción, los cuales formaron parte de la evaluación económica; además, el rendimiento promedio de estos sistemas es de 957 kg de cacao seco por hectárea, el mismo que son vendidos a un precio promedio de S/. 7,30 el kg (Tabla 12).

Tabla 12. Datos de campo: Características generales los sistemas agroforestales de cacao evaluados (n=número de sistemas agroforestales intervenidos).

Concepto	Unidad de medida	Valor
n	SAF	53
Densidad de siembra	Plantas/ha	897
SAF cacao en producción	ha	104,25
SAF cacao en evaluados	ha	104,25
Rendimiento cacao seco	kg/ha	957,32
Precio de venta	S/. / kg	7,38

3.3.2 Producción de cacao

Según el rendimiento promedio de cacao seco en kg/ha, se calculó que la producción del cacao para las 104,25 hectáreas evaluadas es de 99 800,95 kg, considerando un 5% de mermas y autoconsumo la producción total sería 94 810,90 kg. Los valores proyectados para los próximos 5 años son igual al año base, ya que el análisis económico de la venta de bonos de carbono se realizó sin considerar la intervención en la producción del cacao (Tabla 13).

Tabla 13. Producción de cacao desde el año base y los próximos 5 años.

Descripción	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Hectáreas	104 ,25	104 ,25	104 ,25	104 ,25	104 ,25	104 ,25
Productividad (kg/ha)	957 ,32	957 ,32	957 ,32	957 ,32	957 ,32	957 ,32
Producción total (kg)	99 800 ,95	99 800 ,95	99 800 ,95	99 800 ,95	99 800 ,95	99 800 ,95
Mermas y autoconsumo%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Total Kg	94 810.90					

3.3.3 Retención de CO₂ de los sistemas agroforestales de cacao

El secuestro de carbono de los SAF de cacao es variable, los sistemas más jóvenes de 8 a 9 años secuestran menos carbono (465 y 441 t/ha respectivamente) que los sistemas de 10 a 20 años, los 30 años se ve una caída en la cantidad de carbono retenido lo cual puede decaer más cuando los cacaotales son más viejos (40 año), los cuales tienen una capacidad de retener 332 t de CO₂/ha (Figura 9).

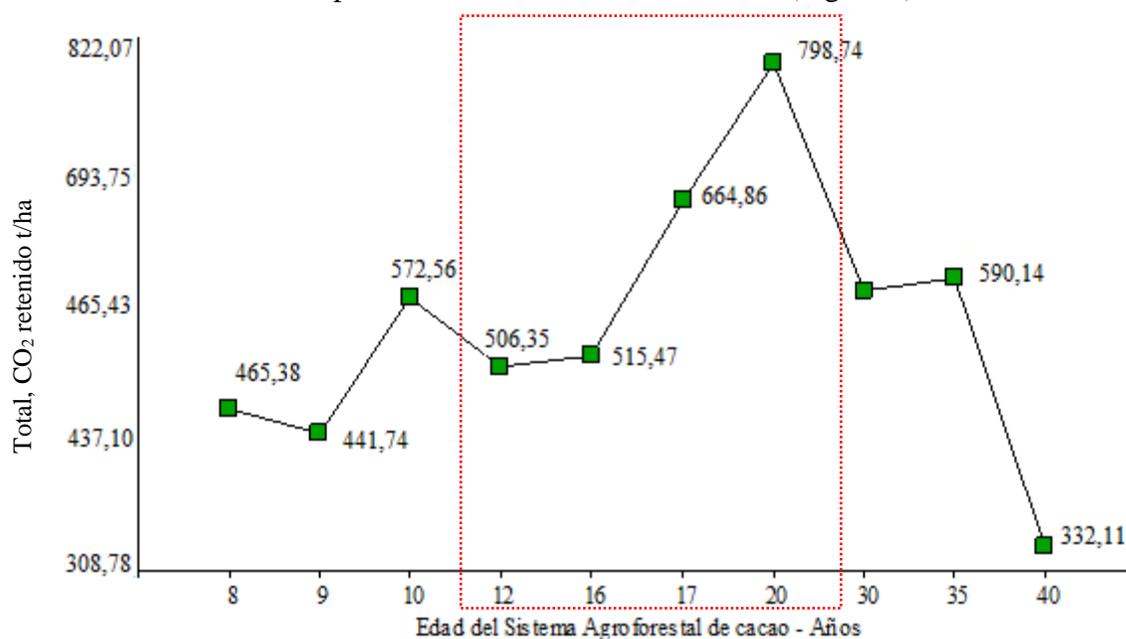


Figura 9. Secuestro de CO₂ según la edad de los SAF de cacao.

La Figura 9, también muestra que el incremento del secuestro de CO₂ en los sistemas de 12 a 20 años (506 y 798 t/ha) es constante (rectángulo rojo), por tanto, estos datos sirvieron para realizar una proyección de tendencia lineal del aumento del secuestro de CO₂ conforme la edad del sistema vaya aumentando los años, cuya ecuación lineal aplicada para la proyección presentó un R² = 0,9117 (Figura 10).

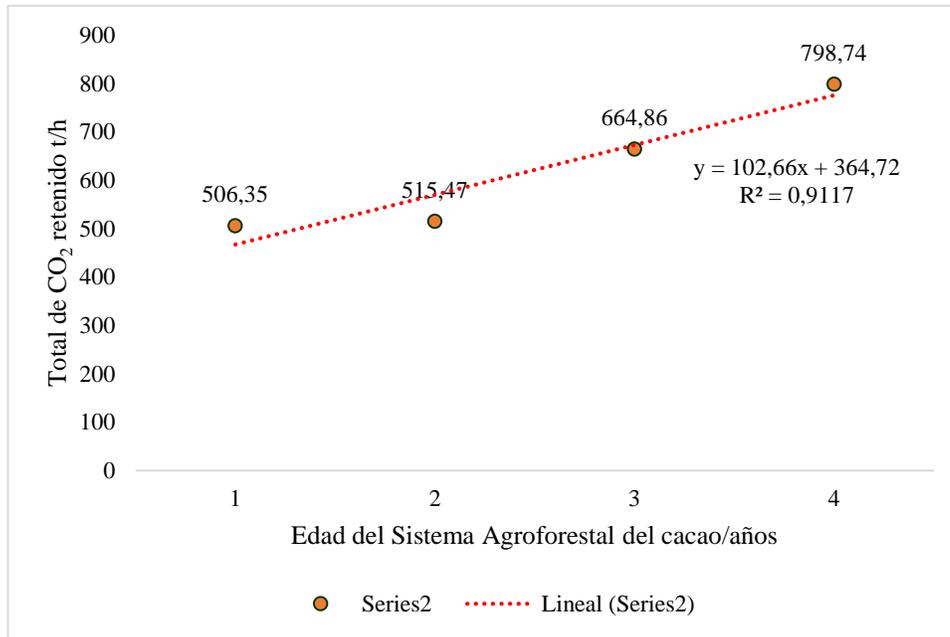


Figura 10. Tendencia lineal del aumento del secuestro de carbono por año (1 = 12 años, 2=16 años, 3=17 año, 4= 20 años).

Después de la aplicación de la ecuación lineal para la proyección del secuestro de carbono de los sistemas, se realizó el cálculo del CO₂ retenido t/ha/año, al tomar como año base a los 12 años del sistema, se encontró que el CO₂ retenido es de 103 t/ha/año, éste dato nos sirvió para realizar el análisis económico de la venta de bonos de carbono de los sistemas evaluados (Tabla 14).

Tabla 14. Proyección del secuestro de CO₂ por año de los sistemas agroforestales.

Periodo de evaluación	Edad del sistema en años	Total, de CO ₂ retenido t/ha	CO ₂ retenido t/ha/año
Año 0	12	506,35	
Año 1	13	1597	1090
Año 2	14	1699	103
Año 3	15	1802	103
Año 4	16	1905	103
Año 5	17	2007	103
Año 6	18	2110	103

3.3.4 Costos de Inversión de la producción de cacao

El costo de inversión para la instalación del cultivo de cacao asciende a la suma de S/ 2 298 048,50, donde se consideró el costo del terreno, el número de plantas por

hectárea, transporte de los plántones y el costo total para instar una hectárea de cacao (Tabla 15).

Tabla 15. Costo de inversión de la producción de cacao.

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Terreno	Hectárea	104,25	S/ 20 000,00	S/ 2 085,000,00
Densidad de siembra (plánton/h)	Plánton	827	S/ 5,00	S/ 4 135,00
Costo de transporte de plánton	Plánton	827	S/ 0,50	S/ 413,50
Instalación de plantación-Siembra	Hectárea	104,25	S/ 2 000,00	S/ 208 500,00
Total				S/ 2 298 048 ,50

3.3.5 Costos directos de producción y mantenimiento del cacao

Para la evaluación de los costos de producción y mantenimiento del cacao se consideró una productividad de 94,811 kg/ año y las hectáreas evaluadas fueron 104,25. Los costos de mano de obra para las labores de poda, control de malezas, aplicación de fertilizantes, control de plagas y enfermedades y cosecha es de S/. 258 520,33, y los costos por la adquisición de insumos es de S/ 112 590,00. Por tanto, sumado los dos rubros, el costo de producción total asciende a S/ 373 612,33 (Tabla 16). Además, el costo por unidad de kg de cacao seco es de 3,94 soles y el costo de producción por hectárea es de S/ 3 559,81

Tabla 16. Costos de producción y mantenimiento del cacao.

	Año 0	Año 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
RUBROS	Costo Total S/.					
COSTOS DIRECTOS	371 110,33					
Mano de obra	258 520,33					
Poda	58 222,64	58 222,64	58 222,64	58 222,64	58 222,64	58 222,64
Control de malezas	62 550,00	62 550,00	62 550,00	62 550,00	62 550,00	62 550,00
Manejo de sombra	20 850,00	20 850,00	20 850,00	20 850,00	20 850,00	20 850,00
Aplicación de Fertilizante	21 892,50	21 892,50	21 892,50	21 892,50	21 892,50	21 892,50
Control de plagas y enfermedades	26 062,50	26 062,50	26 062,50	26 062,50	26 062,50	26 062,50
Cosecha	68 942,69	68 942,69	68 942,69	68 942,69	68 942,69	68 942,69
Insumos	112 590,00					
Guano de Isla	112 590,00	112 590,00	112 590,00	112 590,00	112 590,00	112 590,00

3.3.6 Costos indirectos – herramientas y maquinarias

Dentro de los costos indirectos se consideraron las herramientas y maquinarias que pueden adquirir los productores para el manejo y mantenimiento de los sistemas agroforestales; el costo indirecto más alto se realizaría en el año 2 de la implementación del proyecto que asciende a la suma de S/ 102 290 ,00, el mismo que se incrementa por la compra de una moto guadañas para cada uno de los productores. Además, la compra de herramientas de campo se debe de realizar en el año base y a los 3 años de la implantación del proyecto, para el caso de equipos de protección personal (Protector de oídos, casco, guantes de cuero), se deben de adquirir una vez al año, por ser accesorios que tienen tiempo de vida útil corta (Tabla 17).

Tabla 17. Costos indirectos – herramientas y maquinarias para el cultivo de cacao.

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Herramientas	10 600,00	6 890,00	6 890,00	15 105,00	6 890,00	6 890,00
Machetes			1 325,00			
Picos			1 590,00			
Palanas			1 590,00			
Tijera de podar			1 855,00			
Podón			1 855,00			
Protector de oídos	2 385,00	2 385,00	2 385,00	2 385,00	2 385,00	
Casco	2 650,00	2 650,00	2 650,00	2 650,00	2 650,00	
Guantes de cuero	1 855,00	1 855,00	1 855,00	1 855,00	1 855,00	
Maquinaria	0,00	0,00	95 400,00	0,00	0,00	0,00
Motoguadaña			95 400,00			
TOTAL	10 600,00	6 890,00	102 290,00	15 105,00	6 890,00	6 890,00

3.3.7 Costos administrativos de la producción del cacao

Los costos administrativos básicos para la producción de cacao son de S/ 92 560,0 anuales, durante los 5 años de evaluación del proyecto (Tabla 18). Los rubros considerados son lo básico que necesita la cooperativa para poder desarrollar sus actividades.

Tabla 18. Costos administrativos de la producción del cacao.

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Gastos Administrativos-Personal						
Gerente	36 000,00	36 000,00	36 000,00	36 000,00	36 000,00	36 000,00
Asistente administrativo	13 200,00	13 200,00	13 200,00	13 200,00	13 200,00	13 200,00
Técnico de campo		21 600,00	21 600,00	21 600,00	21 600,00	21 600,00
Responsable de acopio		18 000,00	18 000,00	18 000,00	18 000,00	18 000,00
Útiles de escritorio	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Alquiler de almacén	-	-	-	-	-	-
Sub total	49 600,00	89 200,00				
Servicios básicos						
Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Agua	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Luz	960	960	960	960	960	960
Internet y telefonía	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Sub Totales	3 360,00					
TOTAL DE GASTOS ADMINISTRATIVOS	52 960,00	92 560,00				

3.3.8 Costos para la implementación del proyecto del servicio ambiental – venta de bonos de carbono

El cálculo de los costos para la implementación del proyecto de servicio ambiental – venta de bonos de carbono, en el año base es de S/152 608,45 a los cuales, si se le suma los gastos de mantenimiento y monitoreo del proyecto, el costo total de implementación asciende a S/. 212 608,45. Además, desde el año 1 al año 5 los costos disminuyen a S/ 69 645,00 anual (Tabla 19).

Tabla 19. Costos para la implementación del servicio ambiental – venta de bonos de carbono*.

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
CONSULTORÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA VENTA DE BONOS DE CARBONO	80 000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Servicio de consultoría para la implementación de la venta de bonos de carbono	80 000,00					
CERTIFICACIÓN DEL PROYECTO	72 608,45	9 645,00	9 645,00	9 645,00	9 645,00	645,00
Apertura de cuenta e inscripción	6 057,95	-	-	-	-	-
Comisión de apertura de la cuenta	1 929,00					
Cuota de Inscripción	4 128,95					
Proceso de aprobación de la metodología	66 550,50	9 645,00				
Tasa de solicitud de nota conceptual de metodología	7 716,00					
Tasa de tramitación cuando se acepte el elemento metodológico	50 154,00					
Tasa de solicitud de nota conceptual de metodología	5 787,00					
Tasa solicitud de expertos - Expertos en AFOLU - Agricultura silvicultura y uso del suelo	1 446,75					
Tasa solicitud de expertos - Expertos en Métodos	1 446,75					
Tasa Anual de Organismos de validación/Verificación		9 645,00	9 645,00	9 645,00	9 645,00	9 645,00
Tasa de análisis de carencias	-	-	-	-	-	-
TOTAL PARA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO	152 608,45	9 645,00				
GASTOS DE MANTENIMIENTO Y MONITOREO DEL PROYECTO						
Especialista de campo	36 000,00	36 000,00	36 000,00	36 000,00	36 000,00	36 000,00
Técnico de campo	24 000,00	24 000,00	24 000,00	24 000,00	24 000,00	24 000,00
TOTAL PARA MANTENIMIENTO Y MONITOREO	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
TOTALES	212 608,45	69 645,00				

*Costos referenciales extraído de: https://verra.org/wp-content/uploads/2020/04/Program-Fee-Schedule_v4.1.pdf

3.3.9 Flujo de caja con proyección a 5 años

Los supuestos son los criterios básicos que se necesita para realizar el flujo de caja proyectado en 5 años. Esta matriz fue creada con toda la información que se encontraron en los ítems anteriores, que fueron englobado en criterios de: ingresos y egresos sin la venta de bonos de carbono y egresos e ingresos con la venta de bonos de carbono. La proyección de la retención de CO₂ fue de 10 738 t/ha por año en las 104,25 hectáreas de SAF de cacao evaluados. El precio de venta por tonelada de CO₂ fue de 7,17 dólares, precio social que fue establecido por el Ministerio de Economía y Finanzas para su aplicación en proyectos (Tabla 20 y 21).

Tabla 20. Supuesto para la implementación del proyecto.

SUPUESTOS		PROYECCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE CACAO				
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Sin CO₂						
Producción de cacao seco en kg	99801	99 801	99 801	99 801	99 801	99 801
Costo de producción por kg cacao seco	3,94					
Costo de venta por kg cacao seco	7,38					
Perdida por autoconsumo 5%	5%					
Incremento anual (%)						
Con CO₂						
Producción de cacao seco en kg	99801	99 801	99 801	99 801	99 801	99 801
Costo de producción por kg cacao seco	3,94					
Costo de venta por kg cacao seco	7,38					
Perdida por autoconsumo 5%						
Incremento anual						
Producción (retención) de dióxido de carbono (t)	103	10 738	10 738	10 738	10 738	10 738
Costo por implementación de servicio ambiental						
Costo de venta por tonelada de carbono en \$	7,17					
Tipo de cambio*	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5

*https://www.sbs.gob.pe/app/pp/sistip_portal/paginas/publicacion/tipocambiopromedio.aspx

Tabla 21. Egresos e ingresos con y sin implementación de ventas de bonos de carbono.

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
EGRESO SIN BONO DE CARBONO						
Cantidad de cacao seco en kg	99 800,95	99 800,95	99 800,95	99 800,95	99 800,95	99 800,95
Costo de producción/hectárea	371 110,33	371 110,33	371 110,33	371 110,33	371 110,33	371 110,33
Gastos administrativos	52 960,00	92 560,00	92 560,00	92 560,00	92 560,00	92 560,00
Costos por herramientas	10 600,00	6 890,00	102 290,00	15 105,00	6 890,00	6 890,00
Gastos por comercialización	15 801,82	15 801,82	15 801,82	15 801,82	15 801,82	15 801,82
TOTAL EGRESO SIN BONO DE CARBONO	450 472	486 362	581 762	494 577	486 362	486 362
INGRESO SIN BONO DE CARBONO						
Cantidad de cacao seco en kg	94 811	94 811	94 811	94 811	94 811	94 811
Venta de cacao seco en soles	699 275	699 275	699 275	699 275	699 275	699 275
TOTLA INGRESO BONO DE CARBONO	699 275	699 275	699 275	699 275	699 275	699 275
EGRESO CON VENTA DE BONOS DE CARBONO						
Cantidad de cacao seco en kg	99 800,95	99 800,95	99 800,95	99 800,95	99 800,95	99 800,95
Costo de producción/hectárea	371 110,33	371 110,33	371 110,33	371 110,33	371 110,33	371 110,33
Gastos administrativos	52 960,00	92 560,00	92 560,00	92 560,00	92 560,00	92 560,00
Costos por herramientas	10 600,00	6 890,00	102 290,00	15 105,00	6 890,00	6 890,00
Gastos por comercialización	15 801,82	15 801,82	15 801,82	15 801,82	15 801,82	15 801,82
Costo de implementación- venta de bonos de carbono	212 608,45	69 645,00	69 645,00	69 645,00	69 645,00	69 645,00
TOTAL GENERAL VENTA DE BONOS DE CARBONO	663 081	556 007	651 407	564 222	556 007	556 007
INGRESO CON VENTA DE BONOS DE CARBONO						
Cantidad de cacao seco en kg	94 811	94 811	99 801	99 801	99 801	99 801
Venta de cacao seco en soles	699 275	699 275	736 079	736 079	736 079	736 079
Cantidad de CO ₂ capturado en toneladas		10 738	10 738	10 738	10 738	10 738
Venta de CO ₂ capturado en soles		297 103	297 103	297 103	297 103	297 103
INGRESO CON VENTA DE BONOS DE CARBONO	699 275	996 378	1 033 182	1 033 182	1 033 182	1 033 182

El flujo de caja del análisis de rentabilidad económica se muestra en la Tabla 22. La implementación de un Proyecto de servicio Ambiental por venta de bonos de carbono registra un VANE de S/. 1 454 547,8 es decir, luego de haber descontado la inversión y los costos de producción en un periodo de 5 años, la cooperativa contará con una utilidad o ganancia de S/. 1 454 547,8, es por ello que se sugiere realizar la inversión en la implementación del proyecto.

Así mismo, el proyecto registra un TIRE de 44%, es decir, es la rentabilidad que se obtendrá la Organización con la implementación del proyecto.

Otro de los indicadores financieros que permite evaluar la viabilidad o rentabilidad del proyecto es la relación Beneficio-Costo (B/C), el cual, según la evaluación de proyecto es de 1,86; por tanto, se concluye que la implementación de un Proyecto de servicio ambiental de venta de bonos de carbono es viable.

Tabla 22. Flujo De caja.

RUBROS	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
I, MÓDULO DE INVERSIÓN (Expresados en "negativo")	-2 297 548,5	0	0	0	0	0
Instalación de parcela	-2 297 548,5					
II, MÓDULO DE OPERACIÓN (A -B)	486 667	926 733	963 537	963 537	963 537	963 537
A, INGRESOS INCREMENTALES (a - b)	0	297 103	333 907	333 907	333 907	333 907
(a) Ingresos con venta de bonos de carbono	699 275	996 378	1 033 182	1 033 182	1 033 182	1 033 182
Venta de cacao seco en soles	699 275,13	699 275,13	736 079,09	736 079,09	736 079,09	736 079,09
Venta de CO ₂ retenido en soles	0,00	297 103,13	297 103,13	297 103,13	297 103,13	297 103,13
(b) Ingresos sin venta de bonos de carbono	699 275	699 275	699 275	699 275	699 275	699 275
Venta de cacao seco en soles	699 275,13	699 275,13	699 275,13	699 275,13	699 275,13	699 275,13
B, EGRESOS OPERATIVOS INCREMENTALES (c - d)	212 608	69 645	69 645	69 645	69 645	69 645
(c) Costos y gastos operativos con bonos de carbono	663 081	556 007	651 407	564 222	556 007	556 007
El costo de producción involucra todo los que genera la producción y venta,	663 081	556 007	651 407	564 222	556 007	556 007
(d) Costos y gastos operativos sin bonos de carbono	450 472	486 362	581 762	494 577	486 362	486 362
El costo de producción involucra todo los que genera la producción y venta,	450 472	486 362	581 762	494 577	486 362	486 362
FLUJO DE CAJA NOMINAL (I + II)	-1 811 382	926 733	963 537	963 537	963 537	963 537
FLUJO DE CAJA ACUMULADO	-1 811 382	-884 649	1 890 270	1 927 074	1 927 074	1 927 074
VALOR ACTUAL NETO ECONÓMICO (VANE)	1 454 547,8					
TASA INTERNA DE RETORNO ECONÓMICO (TIRE)	44,0%					
TASA DE INTERÉS MÍNINA	12%					
BENEFICIO/COSTO	1,86					

La figura 11 muestra los ingresos y egresos con o sin la implantación del proyecto. La línea roja representa a los ingresos con la implementación del proyecto, el cual en el año cero no se ve reflejado su crecimiento, pero a partir del año 3 va aumentando, lo cual supera a los ingresos sin la implementación del proyecto.

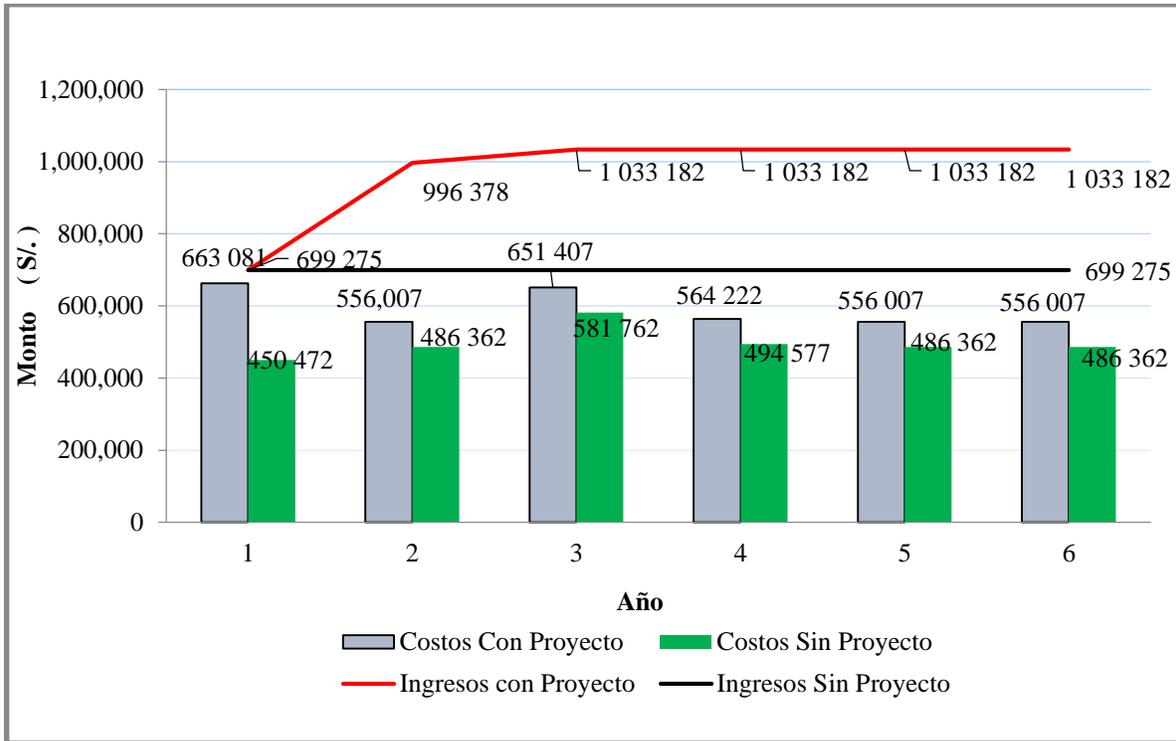


Figura 11. Costos de producción e ingresos con o sin venta de bonos de carbono (con y sin proyecto).

IV. DISCUSIÓN

En nuestro estudio, los SAF de cacao de tres grupos etarios evaluados presentaron diversidad, abundancia de especies y especies predominantes diferentes. Las dos especies predominantes en los tres niveles de edad del SAF de cacao son *Musa* sp. y *Cordia alliodora*, la primera cultivada principalmente por su fruto altamente comercial y la segunda una especie maderable con un importante mercado local. En general, todas las especies reportadas son explotadas ya sea para la venta o el consumo de sus frutos o de su madera. Del mismo modo, en el SAF del cacao en Costa de Marfil se reportaron el predominio de las especies de árboles frutales en el SAF e indicaron que los agricultores plantaban árboles frutales para proporcionar sombra e ingresos (Tondoh et al., 2015).

La diversidad reportada en nuestro estudio está en línea con la reportada en otras latitudes para el SAF del cacao. En Centroamérica y México, el índice de diversidad de Shannon (H') y la riqueza de especies (S) oscilan entre 0,8-2,99 y 22-104 (Deheuvels et al., 2012; Salgado-Mora et al., 2007). En las biomas del Amazonas y del Bosque Atlántico, hay SAF con variación en el número de familias (11-45), S (13-180) y H' (1,37-2,73) (Sambuichi & Haridasan, 2007; Santos et al., 2004; Vebrova et al., 2014).

La mayoría de las especies encontradas en el estudio tienen usos alternativos como la alimentación y la madera. Esta diversificación promueve la sostenibilidad del SAF del cacao ya que genera una mayor seguridad económica para los agricultores (Ofori-Bah & Asafu-Adjaye, 2011; Sonwa et al., 2014; Tschardtke et al., 2011). Esto significa que los SAF genera beneficios sociales y ambientales sin afectar el aspecto económico de la producción agrícola (Clough et al., 2011; Franzen et al., 2007; Götz Schroth et al., 2016), ya que también pueden generar efectos antagónicos ante la presencia de enfermedades (Mvondo et al., 2022) y pueden mantener la calidad del suelo dentro del SAF para la producción de cacao (Lori et al., 2022). Además, el cultivo de cacao en SAF mejora la conservación de la diversidad floral y las prácticas de manejo (Deheuvels et al., 2012).

Esta tendencia al predominio de árboles frutales, maderables y medicinales puede ser un fuerte indicio del cambio deliberado del paisaje ocasionado por los agricultores, pasando de las especies pioneras naturales que usualmente se han cultivado con el cacao a especies que proporcionan beneficios medicinales y alimenticios (Asigbaase et al., 2019). Además,

considerando que los agroecosistemas evaluados en nuestro estudio son espacios con un alto nivel de antropización, se explican los niveles relativamente bajos de diversidad y el predominio de especies que además de sombra proporcionan otros beneficios al productor, como la recolección de madera y frutos y usos tradicionales como árboles medicinales, ya que el arreglo de los componentes dentro de un sistema agroforestal e integración de especies influyen en la producción y la productividad (Celi-delgado, 2022).

Por tanto, los árboles de sombra bien planificados influyen positivamente en el rendimiento del cacao y mejoran los ingresos netos junto con varios servicios ecosistémicos, siempre que se apliquen estrategias de gestión adecuadas (Bos et al., 2007; Jagoret et al., 2018; Somarriba & Beer, 2011; Utomo et al., 2016; Vanhove et al., 2016). Además, la diversificación del agroecosistema con árboles de sombra mejora el rendimiento general del agroecosistema, ya que cada una de estas especies cumple una o más funciones esenciales en el ciclo de los nutrientes (Asase & Tetteh, 2016; Hartemink, 2005), el control de plagas y enfermedades, (Bos et al., 2007; G. Schroth et al., 2000), la producción de biomasa y las reservas de carbono (Abou Rajab et al., 2016; Asase & Tetteh, 2016; Saj et al., 2013; Silatsa et al., 2017; Somarriba et al., 2013).

La microparcelación también fue un fenómeno común observado en la zona de estudio debido a la presencia de parcelas cultivables relativamente pequeñas (1,5-2 ha). Asare et al. (2014) y Asigbaase et al. (2019) también observaron la microparcelación en otros lugares donde se produce cacao. En cuanto al área basal, aunque no se observan diferencias significativas, se observan valores más altos del área basal ocupada por los árboles de cacao en los SAF de mediana edad o viejas que en los SAF jóvenes. Esto se debe probablemente a que, en los SAF viejos los cacaotales han podido desarrollar un mayor grosor de tallo.

Sin embargo, al comparar el área basal promedio de los árboles de sombra, se observa que los SAF de cacao de mediana edad ocupan un área basal mayor a pesar de tener una menor densidad de árboles de sombra totales. Esto se debe probablemente a la presencia de muchos árboles maderables maduros como *Cordia alliodora*. Estos fenómenos también son reportados por Asigbaase et al. (2019) cuando evaluaron SAF de cacao orgánico y convencional en Ghana.

Los índices de disimilitud de Jaccard y Sorensen son superiores al 50% cuando se comparan los grupos de edad entre sí, lo que evidencia una similitud moderada entre estos grupos. Otros autores como Asigbaase et al. (2019) y Braga et al. (2019) informan de altos niveles de disimilitud; sin embargo, la principal diferencia es que Asigbaase et al. (2019) realizaron comparaciones entre árboles de cacao orgánico y convencional.

Por otro lado, los SAF proporcionan bienes y servicios ecosistémicos que mitigan el cambio climático mediante el secuestro de biomasa y carbono (Patiño et al., 2018). En los SAF de cacao fino de aroma en Amazonas; *Theobroma cacao*, *Musa* sp., *Cordia alliodora*. y *Persea* sp. fueron las especies más comunes; dicho esto, el componente aéreo en estos SAF de cacao puede almacenar de 14 a 115 t/ha de biomasa vegetal, de 7 a 54 t/ha de carbono, y en los suelos puede almacenar de 60 a 168 t/ha de C. Por otro lado, estudios anteriores han demostrado que los SAF de cacao compuestos por frutales como *Inga edulis*, *Citrus sinensis* y *Averrhoa carambola* pueden reservar 76,6 t/ha de carbono en biomasa aérea, 8,9 t/ha de carbono en biomasa muerta y 25,6 t/ha de carbono en suelo (Ramírez-Vela et al., 2014).

Los sistemas que almacenan un promedio de 122 ± 24 t/ha de carbono total, donde el 43% del carbono almacenado proviene de la biomasa aérea y el 41% del suelo, se consideran sistemas con un nivel de almacenamiento intermedio a alto (Cerde-Bustillos et al., 2013); por lo tanto, los sistemas de cacao de nuestro estudio están por encima de estos resultados mostrando sistemas de alto nivel de almacenamiento de carbono. Esto podría deberse a que los sistemas evaluados estuvieron compuestos por árboles de cacao nativo y se evaluaron diferentes estratos de edades, con un sistema de siembra a criterio del productor, a diferencia de los sistemas evaluados por Cerde-Bustillos etc., (2013), quienes evaluaron sistemas de 25 años de edad y con árboles de cacao híbridos que formaban parte de una red de proyectos de investigación.

La cantidad de carbono por encima del suelo en los SAF de cacao puede estar influenciada positivamente por la proporción de árboles maderables y negativamente por la proporción de plantas de cacao (Caro-Paza, 2018). De hecho, los SAF de cacao bien asociados con especies forestales maderables, frutales e industriales tienen eficientemente el mayor secuestro de carbono (Concha et al., 2007). Los SAF de cacao entre 12 y 20 años pueden reservar carbono por encima de los 40 t/ha, mientras que los sistemas de 5 años capturan C por debajo de las

30 t/ha (Concha et al., 2007); en consecuencia, la cantidad de carbono almacenado también puede estar influenciada por la edad de los cultivos, es decir, a medida que aumenta la edad del cacao, la cantidad de carbono almacenado es mayor (Yuliasmara et al., 2009). Este mismo comportamiento se observó en los SAF de cacao estudiados en esta investigación, mostrando que a medida que aumenta la edad de los sistemas, la cantidad de C almacenado se incrementa.

En particular, *Theobroma cacao* y *Cordia alliodora*, la primera un cultivo principal y la segunda una especie de sombra maderera, reportan el mayor almacenamiento de carbono con 6,06 y 3,08 t/ha respectivamente en SAF de cacao joven, aumentando con la edad del sistema en función de la edad del cultivo de cacao. En nuestro estudio, en sistemas viejos, *Theobroma cacao* y *Cordia alliodora*. pueden almacenar 8,71 y 10,70 t/ha respectivamente. Se ha observado que en las especies maderables existe una relación positiva entre la altura total, el DAP y la edad de la especie, por lo que existe una relación lineal entre el DAP y la acumulación de biomasa total, en consecuencia la acumulación de carbono total (Bohre et al., 2013). En un sistema cordia-cacao de 25 años, los árboles de cordia pueden almacenar entre el 80 y el 85% del carbono total de la biomasa (Ortiz et al., 2008), lo que explica que en los SAF de cacao de mediana edad y viejos que estudiamos, la cordia reportó la mayor cantidad de stock de carbono.

Por otro lado, las especies frutales *Musa* sp. y *Persea* sp. reportaron bajos niveles de almacenamiento de carbono con 0,86 t/ha y 0,65 t/ha de carbono en las SAF de cacao viejos, aunque este almacenamiento puede ser mayor cuando las SAF de cacao son más jóvenes. Estos resultados son similares a otros estudios que han reportado que las fincas de plátano en producción pueden almacenar hasta 0,69 t/ha de C (Alcudia-Aguilar et al., 2019). Por tanto, *Musa* sp. puede reportar bajos niveles de almacenamiento de carbono especialmente como monocultivo (Zake et al., 2015). Sin embargo, *Musa* sp. en combinación con cultivos de árboles leñosos, constituyen potencialmente un componente importante de la agroforestería (Danarto & Hapsari, 2015). En general, los sistemas agroforestales con cultivos perennes pueden ser importantes sumideros de carbono, mientras que los sistemas agroforestales gestionados de forma intensiva con cultivos anuales tienen una mayor similitud con la agricultura convencional (Montagnini & Nair, 2004).

Por otra parte, el secuestro de carbono en el suelo fue relativamente mayor en comparación con el componente aéreo en estos SAF de cacao, oscilando entre 119,96 t/ha de carbono en los SAF de cacao jóvenes y 131,96 t/ha en los SAF de cacao viejos. Estudios previos afirman que el suelo puede albergar mayores reservas de carbono orgánico dentro de una finca (Janiola & Marin, 2016; Jiménez-Herrera, 2019), sin embargo, puede estar influenciado por el contenido de arcilla que tenga (Nijmeijer et al., 2019). Además, los suelos agrícolas con vegetación perenne pueden tener mayor carbono orgánico en el suelo que los suelos con vegetación anual, ya que la concentración de materia orgánica puede favorecer el secuestro de carbono en los suelos (Post & Kwon, 2000). Asimismo, las raíces de los árboles bajo el suelo también contribuyen al almacenamiento de carbono bajo el suelo, esencial para mantener un entorno estable en el suelo (United States Environmental Protection Agency, 2018).

Por otro lado, en los sistemas con podas de árboles más frecuentes, el aporte total de materia orgánica es mayor (Oelbermann et al., 2004). Este análisis puede explicar por qué los SAF de cacao de mediana edad y viejos son capaces de secuestrar más carbono que los SFA de cacao más jóvenes. Por el contrario, la degradación, el mal uso y la mala gestión del suelo pueden provocar el agotamiento de las reservas de carbono en este componente (Lal, 2004); por lo tanto, los SAF de cacao con cultivos perennes necesitan una labranza mínima para la conservación del suelo. En efecto, en el SAF de cacao viejo la acumulación de materia orgánica aumenta y puede favorecer el secuestro de carbono.

La cantidad de carbono en cualquier sistema agroforestal depende de la estructura y función de los diferentes componentes de los sistemas implementados (Albrecht & Kandji, 2003). En consecuencia, si medimos la eficiencia del secuestro de carbono en diferentes sistemas, los sistemas tradicionales de uso de la tierra son menos eficientes que los sistemas agroforestales de cacao en asociación con especies forestales maderables (Concha et al., 2007). En los SAF de cacao de más de 15 años, la cantidad de CO₂ secuestrado supera los 500 t/ha; y no solo mejora con la edad sino también con un buen manejo del suelo como la implementación de mulching, labranza mínima y enmiendas orgánicas en la finca (Vicente-Vicente et al., 2016). Dado que las prácticas agroforestales se identifican como una de las principales estrategias para reducir las emisiones de CO₂ del sector agrícola (Dhillon & Van Rees, 2017).

En América Latina, para evaluar la rentabilidad de un proyecto, se evalúa los valores de VAN y TIR (Valencia, 2011). Según los indicadores de rentabilidad económica evaluados, la implementación de un proyecto de servicios ambientales que venda bonos de carbono en el área de estudio sería rentable, ya que después de 5 años de la inversión tendrán una utilidad de S/. 1 454 994,2 con una TIRE de 44%, lo que permiten afirmar que el proyecto es viable. Los resultados no muestran un análisis de rentabilidad financiera, porque no estamos considerando un préstamo para la implementación del proyecto, por tanto la rentabilidad financiera sería igual que la rentabilidad económica.

Además, la relación costo beneficio es positivo y supera a 1, por tanto es un buen indicador para aceptar el proyecto; al contrario, si los costos superarían a los beneficios no se podría aceptar el proyecto ya que no sería rentable (Arévalo Briones et al., 2016)

Otros estudios que se realizaron en agrosilvopasturas, reportaron que éstos pueden ser cuatro veces más rentables económicamente que los sistemas de monocultivos, donde el carbono puede incrementar la rentabilidad en un mínimo de 0.5% (Waldén et al., 2020), por tanto, los valores económicos de los servicios ecosistémicos asociados siempre tienen a aumentar la rentabilidad del sistema (Kay et al., 2019). Esto sugiere que la integración adecuada de los árboles en la tierra cultivable puede proporcionar mayores beneficios de bienestar para la sociedad en general que la agricultura sin árboles o los sistemas forestales por sí solos (García de Jalón et al., 2018).

Además, documentos climáticos internacionales recientes enfatizan la gran importancia de la forestación de tierras agrícolas que tienen un impacto positivo en los niveles de CO₂, no solo mediante la absorción de carbono por parte de los árboles, sino también mediante la sustitución de combustibles fósiles por biomasa (Korneeva, 2022). Por tanto, valorar los sistemas ecosistémicos de la agrosilvicultura multifuncional daría lugar a un cambio en el uso de la tierra (Kay et al., 2019), que favorezca directamente a los productores. Por ende, los SAF de cacao pueden convertirse en una buena alternativa para mitigar el cambio climático y los productores pueden utilizarlos como una forma de acceder a los pagos por servicios ambientales, aumentando sus ingresos económicos.

V. CONCLUSIONES

- Los altos niveles de similitud observados se combinan con la preferencia de los cacaocultores por cultivar junto al cacao especies maderables o frutales, en su mayoría nativas, diversificando sus parcelas obteniendo beneficios económicos y de consumo además del cultivo del cacao. Además, según los resultados es evidente la dominancia de dos especies utilizadas como sombra, este estudio contribuye al conocimiento de cómo los cacaocultores modifican y diversifican los SAF de cacao. Sin embargo, esta diversificación, debe ser gestionada para mejorar la distribución de los árboles de sombra y mejorar las prácticas de gestión de la diversificación que sean beneficiosas para los agricultores y el medio ambiente.
- La biomasa y el secuestro de carbono del cacao en el SAF tienden a aumentar con la edad del sistema. Las especies arbóreas madereras como *Cordia alliodora* pueden capturar más de 10 t/ha de carbono en sistemas de más de 29 años. Por el contrario, en las especies frutales *Musa* sp. y *Persea* sp., el secuestro de carbono es menor y tiende a disminuir con la edad del sistema. Por otro lado, en los SAF de cacao de más de 29 años, el suelo puede capturar más de 131 t/ha de carbono y esto es superior al carbono capturado por el componente aéreo. Por último, los SAF de cacao pueden retener más de 490 t/ha de CO₂.
- La implementación de un proyecto de servicios ecosistémicos que venda bonos de carbono podría generar un VANE de S/. 1 454 547,8; una TIRE de 44%, y una relación Beneficio-Costo de 1,86; por tanto, se concluye que la implementación de del proyecto es viable. El secuestro de carbono y el comercio de emisiones ofrecen un enfoque innovador para el desarrollo económico rural y la conservación del medio ambiente. Por tanto, los resultados obtenidos pueden ser una alternativa para que los gobiernos nacionales, regionales, locales y/o las organizaciones de agricultores implementen y promuevan programas de servicios ecosistémicos con el fin de contribuir a los ingresos derivados de la producción de cacao y mitigar el cambio climático.

VI. RECOMENDACIONES

Realizar futuros estudios en Sistemas Agroforestales con cacao más tecnificado, Para poder realizar una comparación, sobre la diversidad de especies arbóreas, teniendo en cuenta que éste estudio fue realizado en fincas de cacao finos de aroma.

Gestionar proyectos que involucren implementar los servicios ecosistémicos mediante la venta de bonos de carbono, para sistemas agroforestales de cacao y otros cultivos perennes, y de esta manera contribuir en incrementar los ingresos económicos de los productores.

Realizar el proceso de validación de la metodología, con fines de certificación del proyecto por organismos internacionales expertos en la temática y de esta manera, poder implementar un proyecto de servicios ecosistémicos por la venta de bonos de carbono para sistemas agroforestales con cacao.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abou Rajab, Y., Leuschner, C., Barus, H., Tjoa, A., & Hertel, D. (2016). Cacao cultivation under diverse shade tree cover allows high carbon storage and sequestration without yield losses. *PLOS ONE*, *11*(2), e0149949.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149949>
- Acosta-Mireles, M., Quednow, K., Etchevers-Barra, J., & Monreal, C. (2001). Un método para la medición del carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de La Captura de Carbono En Ecosistemas Forestales*, 1–11.
http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/08_Acosta.PDF
- Albrecht, A., & Kandji, S. T. (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *99*(1–3), 15–27.
[https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00138-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00138-5)
- Alcudia-Aguilar, A., Martínez-Zurimendi, P., Van Der Wal, H., Castillo-Uzcanga, M. M., & Suárez-Sánchez, J. (2019). Allometric estimation of the biomass of *Musa* spp. In homegardens of Tabasco, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *22*(1), 143–152.
- Altuve, J. G. (2004). El uso del valor actual neto y la tasa interna de retorno para la valoración de las decisiones de inversión. *Actualidad Contable Faces*, *7*(9), 7–17.
- Amfo, B., & Ali, E. B. (2020). Climate change coping and adaptation strategies: How do cocoa farmers in Ghana diversify farm income? *Forest Policy and Economics*, *119*(July), 102265. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102265>
- Anchundia, D. M., Herrada, M. R., & Segovia, E. L. (2018). Sistemas agroforestales con cultivo de cacao fino de aroma : entorno socio-económico y productivo Agroforestry systems with fine aroma cocoa cultivation : socio- economic and productive environment. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, *6*(1), 103–115.
- Andrade, H. J., & Ibrahim, M. (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería En Las Américas*, *10*(39–40), 109–116.

<http://www.fao.org/tempref/docrep/nonfao/lead/x6378s/x6378s00.pdf>

Andrade, H., Segura, M., Somarriba, E., & Villalobos, M. (2008). Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería En Las Américas*, 46, 45–50.

Antolinez-Sandoval, E. Y., Almanza-Merchán, P. J., Barona-Rodriguez, A. F., Polanco-Díaz, E., & Serrano-Cely, P. A. (2020). Estado actual de la cacaocultura: una revisión de sus principales limitantes. *Ciencia y Agricultura*, 17(2), 1–11.

<https://doi.org/10.19053/01228420.v17.n2.2020.10729>

Arévalo Briones, K., Pastrano Quintana, E., & Armijos Jumbo, V. (2016). Relación beneficio – costo por tratamiento en la producción orgánica de las hortalizas (Cilantro, Lechuga, Cebolla Roja, Cebolla de Rama) en el cantón Santo Domingo de Los Colorados. *Revista Publicando*, 3(7), 503–528.

<https://revistapublicando.org/revista/index.php/crv/article/view/279>

Arévalo, L., Alegre, J. C., & Palm, C. A. (2003). *Manual de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra en Perú*. (I. N. de I. A. INIA (ed.)).

Asare, R., Afari-Sefa, V., Osei-Owusu, Y., & Pabi, O. (2014). Cocoa agroforestry for increasing forest connectivity in a fragmented landscape in Ghana. *Agroforestry Systems*, 88(6), 1143–1156. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9688-3>

Asase, A., & Tetteh, D. A. (2016). Tree diversity, carbon stocks, and soil nutrients in cocoa-dominated and mixed food crops agroforestry systems compared to natural forest in southeast Ghana. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 40(1), 96–113.

<https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1110223>

Asigbaase, M., Sjoegersten, S., Lomax, B. H., & Dawoe, E. (2019). Tree diversity and its ecological importance value in organic and conventional cocoa agroforests in Ghana. *PLoS ONE*, 14(1), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210557>

Balzarini, M. G., Gonzalez, L. A., Tablada, E. M., Casanoves, F., Di Rienzo, J. A., & Robledo, C. W. (2008). *InfoStat Manual del Usuario* (Brujas Editorial (ed.)).

Banco Mundial. (2022, May 24). Países en la cima de los mercados de carbono. *Banco*

- Muldial*, 1. <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2022/05/24/countries-on-the-cusp-of-carbon-markets>
- Bandanaa, J., Egyir, I. S., & Asante, I. (2016). Cocoa farming households in Ghana consider organic practices as climate smart and livelihoods enhancer. *Agriculture & Food Security*, 5(1), 29. <https://doi.org/10.1186/s40066-016-0077-1>
- Bank World. (2021). *State and Trends of Carbon Pricing 2021* (Bank World (ed.)). The World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1728-1>
- Barrios, E., Shepherd, K., & Sinclair, F. (2015). Agroecology for food security and nutrition. *Proceedings of the FAO International Symposium on 18–19 September 2014*.
- Bohre, P., Chaubey, O. P., & Singhal, P. K. (2013). Biomass accumulation and carbon sequestration in *Tectona grandis* Linn. f. and *Gmelina arborea* Roxb. *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology*, 5(3), 153–174.
- Bolker, B. M., Brooks, M. E., Clark, C. J., Geange, S. W., Poulsen, J. R., Stevens, M. H. H., & White, J.-S. S. (2009). Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(3), 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.10.008>
- Borden, K. A., Anglaaere, L. C. N., Adu-Bredu, S., & Isaac, M. E. (2019). Root biomass variation of cocoa and implications for carbon stocks in agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 93(2), 369–381. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0122-5>
- Bos, M. M., Steffan-Dewenter, I., & Tschardtke, T. (2007). Shade tree management affects fruit abortion, insect pests and pathogens of cacao. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 120(2–4), 201–205. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.09.004>
- Braga, D. P. P., Domene, F., & Gandara, F. B. (2019). Shade trees composition and diversity in cacao agroforestry systems of southern Pará, Brazilian Amazon. *Agroforestry Systems*, 93(4), 1409–1421. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0250-6>
- Caicedo-Vargas, C., Pérez-Neira, D., Abad-González, J., & Gallar, D. (2022). Assessment of the environmental impact and economic performance of cacao agroforestry systems

- in the Ecuadorian Amazon region: An LCA approach. *Science of the Total Environment*, 849(August), 157795. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157795>
- Caro-Paza, D. M. (2018). *Secuestro de carbono en sistemas Agroforestales de los Distritos de las Piedras y Tambopata, Provincia Tambopata, Departamento de Madre de Dios - Peru* [Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios].
<http://repositorio.unamad.edu.pe/handle/UNAMAD/520>
- Celi-delgado, L. (2022). Caracterización de los sistemas agroforestales tradicionales de la parroquia Zumba, cantón Chinchipe, Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(4), 814–837. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.2626
- Cerda-Bustillos, R., Espin-Chion, T., & Cifuentes, M. (2013). Carbono en sistemas agroforestales de cacao de la Reserva Indígena Bribri de Talamanca , Costa Rica. *Agroforestería En Las Américas*, 49, 33–41.
- Chao, A. (1984). Nonparametric estimation of the number of classes in a population. *Scan. J. Statist*, 11, 265–270.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J. P., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87–99.
<https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- Chou, S. W., & Gutiérrez-Espeleta, E. E. (2013). Ecuación para estimar la biomasa arbórea en los bosques tropicales de Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 26(2), 41.
<https://doi.org/10.18845/tm.v26i2.1402>
- Clough, Y., Barkmann, J., Jührbandt, J., Kessler, M., Wanger, T. C., Anshary, A., Buchori, D., Cicuzza, D., Darras, K., Putra, D. D., Erasmi, S., Pitopang, R., Schmidt, C., Schulze, C. H., Seidel, D., Steffan-Dewenter, I., Stenchly, K., Vidal, S., Weist, M., ... Tschardtke, T. (2011). Combining high biodiversity with high yields in tropical agroforests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(20), 8311–8316.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1016799108>

- Concha, J. Y., Alegre, J. C., & Pocomucha, V. (2007). Determinación e las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en el departamento de San Matín, Perú. *Ecología Aplicada*, 6(1–2), 75–82.
<https://doi.org/10.21704/rea.v6i1-2.343>
- Curtis, J. T., & McIntosh, R. P. (1951). An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin. *Ecology*, 32(3), 476–496.
<https://doi.org/10.2307/1931725>
- Danarto, S. A., & Hapsari, L. (2015). Biomass and Carbon Stock Estimation Inventory of Indonesian Bananas (*Musa* spp.) and Its Potential Role for Land Rehabilitation. *BIOTROPIA*, 22(2), 102–108. <https://doi.org/10.11598/btb.2015.22.2.376>
- de Almeida, A.-A. F., & Valle, R. R. (2007). Ecophysiology of the cacao tree. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 425–448. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400011>
- Dean, C. B., & Nielsen, J. D. (2007). Generalized linear mixed models: a review and some extensions. *Lifetime Data Analysis*, 13(4), 497–512. <https://doi.org/10.1007/s10985-007-9065-x>
- Deheuvels, O., Avelino, J., Somarriba, E., & Malezieux, E. (2012). Vegetation structure and productivity in cocoa-based agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 149, 181–188.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.003>
- Dhillon, G. S., & Van Rees, K. C. J. (2017). Soil organic carbon sequestration by shelterbelt agroforestry systems in Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, 97(3), 1–16. <https://doi.org/10.1139/cjss-2016-0094>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2020). *InfoStat version 2020*. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.
- Espinosa-García, J. A., Uresti-Gil, J., Vélez I., A., Moctezuma L., G., Inurreta A., H. D., & Gongora G., S. F. (2015). Productividad y rentabilidad potencial del cacao (

Theobroma cacao L.) en el trópico mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 1051–1063.

FAO. (2020). Emissions due to agriculture. Global, regional and country trends 2000–2018. FAOSTAT Analytical Brief Series No 18. In *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://www.fao.org/3/cb3808en/cb3808en.pdf>

FAO, CIAT, CGIAR, & CCAFS. (2018). Retos del Cambio Climático para la Agricultura en América Latina y el Caribe. In *Informe para responsables de políticas*.

Fernández-Reyes, R. (2016). El Acuerdo de París y el cambio transformacional. *Papeles de Relaciones Ecosociales y Cambio Global*, 132, 101–114.
http://sciencepolicy.colorado.edu/media_coverage

Franzen, M., Monique, A. E., Mulder, B., Franzen, M., & Borgerhoff Mulder, Á. M. (2007). Ecological, economic and social perspectives on cocoa production worldwide. *Biodiversity and Conservation*, 16, 3835–3849. <https://doi.org/10.1007/s10531-007-9183-5>

García de Jalón, S., Graves, A., Palma, J. H. N., Williams, A., Upson, M., & Burgess, P. J. (2018). Modelling and valuing the environmental impacts of arable, forestry and agroforestry systems: a case study. *Agroforestry Systems*, 92(4), 1059–1073.
<https://doi.org/10.1007/s10457-017-0128-z>

Gramlich, A., Tandy, S., Gauggel, C., López, M., Perla, D., Gonzalez, V., & Schulin, R. (2018). Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras. *Science of the Total Environment*, 612, 370–378. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.145>

Haggar, J., Asigbaase, M., Bonilla, G., Pico, J., & Quilo, A. (2015). Tree diversity on sustainably certified and conventional coffee farms in Central America. *Biodiversity and Conservation*, 24(5), 1175–1194. <https://doi.org/10.1007/s10531-014-0851-y>

Hairiah, K., Dewi, S., Agus, F., van Noordwijk, M., & Rahayu, S. (2009). *Measuring Carbon Stocks Across Land Use Systems : A Manual* (B. U. and I. (Indonesian C. for A. L. R. R. and D. World Agro, SEA Regional Office (ed.)).

Hartemink, A. E. (2005). Nutrient stocks, nutrient cycling, and soil changes in cocoa

- ecosystems: A review. *Advances in Agronomy*, 86, 2005.
- Hurtado-Lima, J. A. (2019). Análisis de la producción de *Bertholletia excelsa* H.B.K (Castaña) en el fundo El Bosque, UNAMAD, Tambopata-Madre de Dios [Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios]. In *Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios*. <http://hdl.handle.net/20.500.14070/605>
- ICCO. (2022). *May 2022 Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics*.
- IPCC. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry* (Intergovernmental Panel on Climate Change (ed.); 1st ed., Vol. 338, Issue 2). https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf
- Jacobi, J., Schneider, M., Pillco Mariscal, M., Huber, S., Weidmann, S., Bottazzi, P., & Rist, S. (2015). Farm Resilience in organic and nonorganic cocoa farming systems in Alto Beni, Bolivia. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 39(7), 798–823. <https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1039158>
- Jagoret, P., Snoeck, D., Bouambi, E., Ngnogue, H. T., Nyassé, S., & Saj, S. (2018). Rehabilitation practices that shape cocoa agroforestry systems in Central Cameroon: key management strategies for long-term exploitation. *Agroforestry Systems*, 92(5), 1185–1199. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0055-4>
- Janiola, M. D. C., & Marin, R. A. (2016). *Carbon Sequestration Potential of Fruit Tree Plantations in Southern Philippines*. 8(5), 164–174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2016.10.024>
- Jiménez-Herrera, E. (2019). Estimación de la cantidad de carbono almacenado en un agroecosistema de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el sector Shupishiña - San Martín [Universidad Nacional de San Martín]. In *Journal of Chemical Information and Modeling*. <http://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/3506/AGRONOMIA - Emiliano Jiménez Herrera.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- K Murthy, I. (2013). Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems in India.

Journal of Earth Science & Climatic Change, 04(01), 1–7.

<https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000131>

Kay, S., Graves, A., Palma, J. H. N., Moreno, G., Roces-Díaz, J. V., Aviron, S., Chouvardas, D., Crous-Duran, J., Ferreiro-Domínguez, N., García de Jalón, S., Măcicășan, V., Mosquera-Losada, M. R., Pantera, A., Santiago-Freijanes, J. J., Szerencsits, E., Torralba, M., Burgess, P. J., & Herzog, F. (2019). Agroforestry is paying off – Economic evaluation of ecosystem services in European landscapes with and without agroforestry systems. *Ecosystem Services*, 36(March 2018).
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100896>

Korneeva, E. A. (2022). Economic Assessment and Management of Agroforestry Productivity from the Perspective of Sustainable Land Use in the South of the Russian Plain. *Forests*, 13(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/f13020172>

Krebs, C. J. (2014). *Ecological methodology* (Third). Addison Wesley Longman.

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1–2), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>

Lavrakas, P. (2013). Proportional Allocation to Strata. In *Encyclopedia of Survey Research Methods*. Sage Publications, Inc. <https://doi.org/10.4135/9781412963947.n411>

Lori, M., Armengot, L., Schneider, M., Schneidewind, U., Bodenhausen, N., Mäder, P., & Krause, H. M. (2022). Organic management enhances soil quality and drives microbial community diversity in cocoa production systems. *Science of the Total Environment*, 834(April). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155223>

Magne, A. N., Nonga, N. E., Yemefack, M., & Robiglio, V. (2014). Profitability and implications of cocoa intensification on carbon emissions in Southern Cameroun. *Agroforestry Systems*, 88(6), 1133–1142. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9715-4>

Mete, M. R. (2014). Valor Actual Neto Y Tasa De Retorno: Su Utilidad Como Herramientas Para El Análisis Y Evaluación De Proyectos De Inversión. *Fides et Ratio - Revista de Difusión Cultural y Científica de La Universidad La Salle En Bolivia*, 7(7), 67–85.

- Ministerio del ambiente. (2016). *El Perú y el Cambio Climático Tercera Comunicación Nacional del Perú* (Ministerio del Ambiente (ed.); Primera ed).
- Mohammed, A. M., Robinson, J. S., Midmore, D., & Verhoef, A. (2015). Biomass stocks in Ghanaian cocoa ecosystems: the effects of region, management and stand age of cocoa trees. *European Journal of Agriculture and Forestry Research*, 3(3), 22–43. <http://centaur.reading.ac.uk/67347/>
- Montagnini, F., & Nair, P. K. R. (2004). Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 61–62(1–3), 281–295. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029005.92691.79>
- Mvondo, E. A., Danièle Ndo, E. G., Nomo, L. B., Ambang, Z., Manga, F. B., & Cilas, C. (2022). Tree diversity and shade rate in complex cocoa-based agroforests affect citrus foot rot disease. *Basic and Applied Ecology*, 64, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2022.08.003>
- Nijmeijer, A., Lauri, P.-É., Harmand, J.-M., & Saj, S. (2019). Carbon dynamics in cocoa agroforestry systems in Central Cameroon: afforestation of savannah as a sequestration opportunity. *Agroforestry Systems*, 93(3), 851–868. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0182-6>
- Norris, K., Asase, A., Collen, B., Gockowksi, J., Mason, J., Phalan, B., & Wade, A. (2010). Biodiversity in a forest-agriculture mosaic – The changing face of West African rainforests. *Biological Conservation*, 143(10), 2341–2350. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.12.032>
- Oelbermann, M., Paul Voroney, R., & Gordon, A. M. (2004). Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(3), 359–377. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.04.001>
- Ofori-Bah, A., & Asafu-Adjaye, J. (2011). Scope economies and technical efficiency of cocoa agroforestry systems in Ghana. *Ecological Economics*, 70(8), 1508–1518. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.03.013>

- ONU. (2022, March 14). Las emisiones mundiales de CO2 repuntaron en 2021 hasta su nivel más alto de la historia. *Organización de Las Naciones Unidas*, 1.
<https://unfccc.int/es/news/las-emisiones-mundiales-de-co2-repuntaron-en-2021-hasta-su-nivel-mas-alto-de-la-historia>
- Orozco, L. (2015). *Producción de una planta de cacao durante su vida*.
- Ortiz, A., Lorena, R., & Eduardo, S. (2008). Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y laurel (*Cordia alliodora*). *Agroforestería de Las Américas*, 26–29.
- Patiño, S., Suearez, L. N., Andrade, H. J., & Segura, M. a. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal , Tolima , Colombia Capture of carbon in biomass in FORESTRY plantations and agroforestry systems in Armero-Guayabal , Tolima, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9, 14.
<https://doi.org/https://doi.org/10.22490/21456453.2312>
- Post, W. M., & Kwon, K. C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 6(3), 317–327.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x>
- Ramírez-Vela, C. A., Panduro-Pisco, G., & Miranda-Ruiz, E. (2014). Captura de carbono en un sistema agroforestal con *Theobroma cacao* en el campus universitario nacional de Ucayali - Pucallpa-Perú. *TZHOECOEN*, 6(6), 165–180.
- Ramnewaj, D. S. (2008). Agroforestry systems for carbon sequestration: present status and scope. *Indian Journal of Agroforestry*, 10(1), 1–9.
<https://www.omicsonline.org/carbon-sequestration-potential-of-agroforestry-systems-in-india-2157-7617.1000131.php?aid=11511>
- Rodriguez-Guevara, E. G. (2018). La gestión de la cadena de suministro sostenible en la industria alimenticia. *AD-Minister*, 33, 113–134. <https://doi.org/10.17230/ad-minister.33.6>
- Rueda, X., Garrett, R. D., & Lambin, E. F. (2017). Corporate investments in supply chain

- sustainability: Selecting instruments in the agri-food industry. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2480–2492. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.026>
- Saj, S., Durot, C., Mvondo Sakouma, K., Tayo Gamo, K., & Avana-Tientcheu, M.-L. (2017). Contribution of associated trees to long-term species conservation, carbon storage and sustainability: a functional analysis of tree communities in cacao plantations of Central Cameroon. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 15(3), 282–302. <https://doi.org/10.1080/14735903.2017.1311764>
- Saj, S., Jagoret, P., & Todem Ngogue, H. (2013). Carbon storage and density dynamics of associated trees in three contrasting *Theobroma cacao* agroforests of Central Cameroon. *Agroforestry Systems*, 87(6), 1309–1320. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9639-4>
- Salamanca-Jiménez, A., & Sadeghian-Khalajabadi, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé*, 56(4), 381–397.
http://www.kci.go.kr/kciportal/landing/article.kci?arti_id=ART001330803
- Salgado-Mora, M. G., Ibarra Núñez, G., Macías-Sámamo, J. E., & López-Báez, O. (2007). Diversidad arbórea en cacaotales del Soconusco, Chiapas, México. *Interciencia*, 32(11), 763–768.
- Sambuichi, R. H. R., & Haridasan, M. (2007). Recovery of species richness and conservation of native atlantic forest trees in the cacao plantations of southern Bahia in Brazil. *Biodiversity and Conservation*, 16(13), 3681–3701.
<https://doi.org/10.1007/s10531-006-9017-x>
- Sanial, E., Fountain, A., Hoefsloot, H., & Jezeer, R. (2020). *La agroforestería en el sector del cacao. La necesidad de enfoques de paisaje colaborativos ambiciosos (título original en inglés: Agroforestry in cocoa, a need for ambitious collaborative landscape approaches)*.
- Santos, S. R. M. dos, Miranda, I. de S., & Tourinho, M. M. (2004). Estimativa de biomassa de sistemas agrofloretais das várzeas do rio juba, Cametá, Pará. *Acta Amazonica*, 34(1), 01–08. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672004000100001>

- Schroth, G., Krauss, U., Gasparotto, L., Duarte Aguilar, J. A., & Vohland, K. (2000). Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics. *Agroforestry Systems*, 50(3), 199–241. <https://doi.org/10.1023/A:1006468103914>
- Schroth, Götz, Garcia, E., Griscom, B. W., Teixeira, W. G., & Barros, L. P. (2016). Commodity production as restoration driver in the Brazilian Amazon? Pasture re-agroforestation with cocoa (*Theobroma cacao*) in southern Pará. *Sustainability Science*, 11(2), 277–293. <https://doi.org/10.1007/s11625-015-0330-8>
- Seeberg-Elverfeldt, C., & Gordes, A. (2013). Agriculture, forestry and other land use mitigation project database: second assessment of the current status of land-based sectors in the carbon markets. In *Mitigation of Climate Change in Agriculture Series (MICCA)* (Issue 6).
- Silatsa, F. B. T., Yemefack, M., Ewane-Nonga, N., Kemga, A., & Hanna, R. (2017). Modeling carbon stock dynamics under fallow and cocoa agroforest systems in the shifting agricultural landscape of Central Cameroon. *Agroforestry Systems*, 91(5), 993–1006. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9973-4>
- Somarriba, E., & Beer, J. (2011). Productivity of *Theobroma cacao* agroforestry systems with timber or legume service shade trees. *Agroforestry Systems*, 81(2), 109–121. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9364-1>
- Somarriba, E., Cerda, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Dávila, H., Espin, T., Mavisoy, H., Ávila, G., Alvarado, E., Poveda, V., Astorga, C., Say, E., & Deheuvels, O. (2013). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 173, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.04.013>
- Sonwa, D. J., Weise, S. F., Schroth, G., Janssens, M. J. J., & Howard-Yana Shapiro. (2014). Plant diversity management in cocoa agroforestry systems in West and Central Africa—effects of markets and household needs. *Agroforestry Systems*, 88(6), 1021–1034. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9714-5>
- Toledo-Hernández, M., Tschardtke, T., Tjoa, A., Anshary, A., Cyio, B., & Wanger, T. C. (2020). Hand pollination, not pesticides or fertilizers, increases cocoa yields and

- farmer income. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 304(18), 107160.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107160>
- Tondoh, J. E., Kouamé, F. N., Martinez Guéi, A., Sey, B., Wowo Koné, A., & Gnessougou, N. (2015). Ecological changes induced by full-sun cocoa farming in Côte d'Ivoire. *Global Ecology and Conservation*, 3, 575–595.
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.02.007>
- Trinidad, F. W., Sol-Sánchez, Á., & Galindo-Alcántara, A. (2016). Evaluación de la rentabilidad económica y captura de carbono en plantaciones de cacao en el plan Chontalpa, Tabasco. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 2(1), 53–71. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v2i1.5680>
- Tscharntke, T., Clough, Y., Bhagwat, S. A., Buchori, D., Faust, H., Hertel, D., Hölscher, D., Jührbandt, J., Kessler, M., Perfecto, I., Scherber, C., Schroth, G., Veldkamp, E., & Wanger, T. C. (2011). Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes - a review. *Journal of Applied Ecology*, 48(3), 619–629.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01939.x>
- United States Environmental Protection Agency. (2018). Carbon Storage by Tree Biomass. *EnviroAtlas*; 1–2.
<https://enviroatlas.epa.gov/enviroatlas/DataFactSheets/pdf/ESN/CarbonStoragebyTreeRootBiomass.pdf>
- USDA (United States Department of Agriculture). (n.d.). *Soil Bulk Density/Moisture /Aeration*.
https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053260.pdf
- Utomo, B., Prawoto, A. A., Bonnet, S., Bangviwat, A., & Gheewala, S. H. (2016). Environmental performance of cocoa production from monoculture and agroforestry systems in Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 134, 583–591.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.102>
- Vaast, P., & Somarriba, E. (2014). Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agroforestry Systems*, 88(6), 947–956. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9762-x>

- Valencia, W. (2011). Indicador de Rentabilidad de Proyectos: el Valor Actual Neto (VAN) o el Valor Económico Agregado (EVA). *Industrial Data*, 14(1), 15–18.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81622582003>
- Vanhove, W., Vanhoudt, N., & Van Damme, P. (2016). Effect of shade tree planting and soil management on rehabilitation success of a 22-year-old degraded cocoa (*Theobroma cacao* L.) plantation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 219, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.12.005>
- Vásquez, A., Matus, J. A., Cetina, V. M., Sangerman, J., Rendón, G., & Caamal, I. (2017). *Análisis de rentabilidad de una empresa integradora de aprovechamiento de madera de pino * Profitability analysis of an integrating company of pine wood utilization Resumen Introducción*. 8, 649–659.
- Vasquez, A., Vasquez, I., Vasquez, C., & Cañamero, M. (2017). Fundamentos de la Ingeniería de Riegos. In *Mop* (Primera Ed, Vol. 1).
- Vebrova, H., Lojka, B., Husband, T. P., Zans, M. E. C., Van Damme, P., Rollo, A., & Kalousova, M. (2014). Tree diversity in cacao agroforests in San Alejandro, Peruvian Amazon. *Agroforestry Systems*, 88(6), 1101–1115. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9654-5>
- VERRA. (2013). *VCS AFOLU Requirements: crediting GHG emission reductions for agriculture, forestry, and Other land use*. <https://verra.org/wp-content/uploads/2016/05/FactSheet-AFOLU-2013-UPDATED.pdf>
- Vicente-Vicente, J. L., García-Ruiz, R., Francaviglia, R., Aguilera, E., & Smith, P. (2016). Soil carbon sequestration rates under Mediterranean woody crops using recommended management practices: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 235, 204–214. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.10.024>
- Viteri-Salazar, O., Ramos-Martín, J., & Lomas, P. L. (2018). Livelihood sustainability assessment of coffee and cocoa producers in the Amazon region of Ecuador using household types. *Journal of Rural Studies*, 62(June), 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2018.06.004>

- Waldén, P., Ollikainen, M., & Kahiluoto, H. (2020). Carbon revenue in the profitability of agroforestry relative to monocultures. *Agroforestry Systems*, 94(1), 15–28.
<https://doi.org/10.1007/s10457-019-00355-x>
- Wessel, M., & Quist-Wessel, P. M. F. (2015). Cocoa production in West Africa, a review and analysis of recent developments. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 74–75(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2015.09.001>
- Yuliasmara, F., Wibawa, A., & Prawoto, A. (2009). Carbon stock in different ages and plantation system of cocoa: allometric approach. *Pelita Perkebunan (a Coffee and Cocoa Research Journal)*, 26(3), 86–100.
<https://doi.org/10.22302/iccri.jur.pelitaperkebunan.v26i3.137>
- Zake, J., Pietsch, S. A., Friedel, J. K., & Zechmeister-Boltenstern, S. (2015). Can agroforestry improve soil fertility and carbon storage in smallholder banana farming systems? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178(2), 237–249.
<https://doi.org/10.1002/jpln.201400281>

ANEXOS

Anexo 1. Base de datos de campo para el análisis de diversidad, abundancia y valor de importancia de especies dentro de los SAF cacao

Nombre común	Especie (nombre científico)	Finca 1	Finca 2	Finca 3	Finca 4	Finca 5	Finca 6	Finca 7	Finca 8	Finca 9	Finca 10	Finca 11	Finca 12	Finca 13	Finca 14	Finca 15	Total
Cacao	<i>Theobroma cacao</i>	173	127	244	223	193	273	300	124	185	368	345	306	159	202	215	3437
Mango	<i>Mangifera indica</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	1	0	0	6
Ciruela	<i>Spondias purpurea</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Guanábana	<i>Annona muricata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2
coco	<i>Cocus nucifera</i> L.	2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Zapote	<i>Matisia cordata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2
laurel	<i>Cordia alliodora</i>	3	0	1	6	6	0	4	0	0	0	7	13	3	12	0	55
Papaya	<i>Carica papaya</i>	0	0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	5
Guaba	<i>Inga</i> sp.	7	0	5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	16
Palo blanco	<i>Lysiloma divaricatum</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	4	1	7
palta	<i>Persea americana</i>	5	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	2	1	1	12
Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	1	0	0	0	3	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	7
platano	<i>Musa</i> sp. <i>Calycophyllum</i>	14	12	0	18	0	13	67	10	0	0	30	1	87	5	59	316
Capirona	<i>spruceanum</i>	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	5
lima	<i>Citrus limetta</i>	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	5
Naranja	<i>Citrus sinensis</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	3
Mandarina	<i>Citrus reticulata</i>	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	5	7
Limon	<i>Citrus aurantifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
		205	139	250	250	207	289	371	146	191	369	383	323	258	229	281	3891

Anexo 2. Baso de datos de campo, para calcular la composición y distribución espacial de árboles en el SAF de cacao

Family	Common name	Specie	Farm1	Farm2	Farm3	Farm4	Farm5	Farm6	Farm7	Farm8	Farm9	Farm 10	Farm 11	Farm 12	Farm 13	Farm 14	Farm 15	Total
Theobromae	Cacao	<i>Theobroma cacao</i>	0.64	0.90	0.96	0.63	0.98	0.89	0.79	1.61	1.65	1.64	1.20	0.87	0.50	0.63	0.68	14.57
Anacardiaceae	Mango	<i>Mangifera indica</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.08	0.09	0.00	0.00	0.26
	Cirguela	<i>Spondias purpurea</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02
Annonaceae	Guanábana	<i>Annona muricata</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
Aracaceae	coco	<i>Coccoloba nucifera</i> L.	0.04	0.00	0.00	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14
Bombaceae	Zapote	<i>Matisia cordata</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11
Boraginaceae	laurel	<i>Cordia alliodora</i>	0.15	0.00	0.02	6.00	0.19	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.22	0.29	0.06	0.74	0.00	7.80
Caricaceae	Papaya	<i>Carica papaya</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
	Guaba	<i>Inga</i> sp.	0.15	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.24
Fabaceae	Palo blanco	<i>Lysiloma divaricatum</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.11	0.04	0.22
Lauraceae	palta	<i>Persea americana</i>	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.04	0.17
Meliaceae	Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	0.15	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.24
Musaceae	platano	<i>Musa</i> sp.	0.13	0.15	0.00	0.32	0.00	0.21	0.87	0.11	0.00	0.00	0.29	0.01	0.88	0.04	0.58	3.59
Rubiaceae	Capirona	<i>Calycophyllum spruceanum</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
	lima	<i>Citrus limetta</i>	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
	Naranja	<i>Citrus sinensis</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Rutaceae	Mandarina	<i>Citrus reticulata</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.08
	Limon	<i>Citrus aurantifolia</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01

Anexo 3. Cálculo de la retención de carbono total, en función de la r retención aérea y del suelo.

FINCA	Edad del cacao	REPETICIÓN/ FINCA	Carbono cacao	C-Plátano	C-Laurel	C-Palto	C-otras especies	Carbono vegetal	Carbono hojarasca t/ha	CVT	Carbono suelo t/ha	Carbono total
3	1	1	7.08	0.00	0.79	0.00	2.36	10.23	0.51	10.74	89.460	100.200
5	1	2	7.24	0.00	6.98	0.00	2.55	16.77	0.47	17.24	103.125	120.365
6	1	3	6.52	0.56	0.00	0.00	1.46	8.54	0.47	9.01	147.000	156.010
7	1	4	5.81	2.36	5.62	0.00	0.00	13.79	0.39	14.18	139.230	153.412
13	1	5	3.64	2.38	2.01	1.52	7.11	16.66	0.35	17.01	120.960	137.971
1	2	1	4.69	0.35	6.83	0.32	13.82	26.01	0.50	26.51	60.000	86.510
4	2	2	4.69	0.90	13.58	0.00	5.50	24.67	0.44	25.11	118.125	143.231
10	2	3	11.92	0.00	0.00	0.00	0.01	11.93	0.48	12.41	168.750	181.162
11	2	4	8.86	0.77	8.17	0.00	0.31	18.11	0.55	18.66	153.750	172.409
12	2	5	6.50	0.03	10.12	0.00	2.75	19.40	0.39	19.79	139.875	159.667
2	3	1	6.62	0.43	0.00	0.00	0.00	7.05	0.37	7.42	83.070	90.495
8	3	2	15.30	1.79	5.62	1.84	0.70	25.25	0.48	25.73	153.300	179.027
9	3	3	11.98	0.00	0.00	0.00	9.39	21.37	0.41	21.78	139.020	160.800
14	3	4	4.62	0.09	47.86	0.12	4.93	57.62	0.27	57.89	159.750	217.640
15	3	5	5.04	2.00	0.00	1.28	2.81	11.13	0.33	11.46	124.650	136.110

Anexo 4. Datos de campo para realizar la evaluación económica

N°	DNI	Actividad principal	HA en producción	HA por sembrar	Total, de ha	Rendimiento cacao seco kg/ha	Precio de venta S./ kg	Costo del jornal/día	N° Jornales para poda para labores de poda	N° de jornales para la cosecha	N° de jornales para limpieza de malezas	N° de jornales para aplicación de fertilizantes	Costo de transporte x saco (50kg)	N° jornales para el control de plagas y enfermedades	N° jornales para el manejo de sombra	Densidad de siembra
1	33595615	Cacao	5.0	0.0	5.00	750.00	7.5	50	10	12	12		5	5	4	625
2	46646070	Cacao	1.0	0.0	1.00	1216.00	7	50	12	13	12	4		5	4	625
3	33595789	Cacao	3.0	0.0	3.00	760.00	7.5	50	10	12	12		5	5	4	1111
4	33577154	Cacao	2.0	0.0	2.00	736.00	7.5	50	10	12	12		5	5	4	625
5	27258530	Cacao	2.0	0.0	2.00	900.00	7.5	50	10	12	12	4		5	4	816
6	33595311	Cacao	2.0	0.0	2.00	600.00	8	50	12	12	12		5	5	4	1111
7	16720412	Cacao	3.0	0.0	3.00	608.00	7.5	50	12	12	12		5	5	4	1111
8	44833293	Cacao	1.0	0.0	1.00	1140.00	7.5	50	12	13	12	4		5	4	1111
9	73533788	Cacao	3.0	0.0	3.00	633.33	7.5	50	12	14	12			5	4	625
10	73518318	Cacao	1.0	0.0	1.00	1520.00	7.5	50	11	14	12	5	5	5	4	816
11	43357959	Cacao	1.0	0.0	1.00	1520.00	7.5	50	12	15	12	5		5	4	625
12	27382734	Cacao	2.0	0.0	2.00	1368.00	7	50	11	14	12	4		5	4	625
13	33671172	Cacao	0.3	0.0	0.25	912.00	6	50	12	12	12		5	5	4	1111
14	40321708	Cacao	4.0	0.0	4.00	547.20	7.5	50	11	13	12			5	4	1111
15	42085655	Cacao	1.5	0.0	1.50	900.00	7.5	50	11	15	12		5	5	4	1111
16	33644669	Cacao	4.0	0.0	4.00	1000.00	7.5	50	10	14	12	4	5	5	4	625
17	33577095	Cacao	4.0	0.0	4.00	690.00	7.5	50	10	12	12			5	4	625
18	33577009	Cacao	3.0	0.0	3.00	1444.00	7.5	50	12	12	12	4		5	4	625

19	33577332	Cacao	2.5	0.0	2.50	900.00	7.5	50	11	13	12	4		5	4	1111
20		Cacao	2.0	0.0	2.00	1330.00	7.5	50	11	15	12	5		5	4	625
21	40632783	Cacao	3.0	0.0	3.00	900.00	7.5	50	12	12	12			5	4	625
22	9726273	Cacao	4.5	0.0	4.50	1000.00	7.5	50	11	12	12	4		5	4	1111
23	80232798	Cacao	4.5	0.0	4.50	690.00	8	50	11	13	12			5	4	625
24	33595556	Cacao	1.5	0.0	1.50	653.60	7	50	10	14	12		5	5	4	1111
25	33575271	Cacao	3.5	0.0	3.50	1140.00	7.5	50	12	14	12	4	5	5	4	1111
26	41177934	Cacao	1.3	0.0	1.25	1140.00	7.5	50	11	14	12	4		5	4	1111
27	33666013	Cacao	3.0	0.0	3.00	1710.00	7.5	50	12	14	12	4		5	4	813
28	43966947	Cacao	1.0	0.0	1.00	1012.00	7.5	50	11	13	12	4		5	4	625
29	33641992	Cacao	2.0	0.0	2.00	1064.00	7.5	50	12	13	12			5	4	813
30	33646043	Cacao	1.5	0.0	1.50	1064.00	7.5	50	11	15	12	4		5	4	625
31	80244051	Cacao	3.0	0.0	3.00	1250.00	7.5	50	12	14	12	4		5	4	1111
32	80232855	Cacao	2.0	0.0	2.00	722.00	7.5	50	10	14	12			5	4	1111
33	5589343	Cacao	2.0	0.0	2.00	600.00	7	50	12	14	12			5	4	625
34	33641763	Cacao	2.0	0.0	2.00	1610.00	7.5	50	12	14	12			5	4	625
35	33643762	Cacao	2.0	0.0	2.00	1064.00	7.5	50	11	13	12		5	5	4	1111
36	33582035	Cacao	1.0	0.0	1.00	900.00	7.5	50	10	13	12			5	4	1111
37	33585417	Cacao	1.0	0.0	1.00	900.00	7	50	10	13	12			5	4	625
38	3358209	Cacao	1.0	0.0	1.00	1100.00	7	50	12	13	12	5		5	4	1111
39	27402280	Cacao	0.5	0.0	0.50	560.00	7.5	50	11	13	12			5	4	1111
40	23585241	Cacao	1.0	0.0	1.00	1100.00	7	50	12	12	12			5	4	833
41	33587317	Cacao	0.3	0.0	0.25	800.00	7	50	11	12	12	4		5	4	1111
42	80244070	Cacao	1.0	0.0	1.00	950.00	7.5	50	12	12	12			5	4	1111
43	33585435	Cacao	2.0	0.0	2.00	1000.00	7	50	10	15	12			5	4	1111
44	33583479	Cacao	0.5	0.0	0.50	950.00	7.5	50	10	13	12		5	5	4	625

45	33577816	Cacao	0.5	0.0	0.50	800.00	7	50	12	12	12			5	4	1111
46	33583631	Cacao	2.0	0.0	2.00	560.00	7	50	11	15	12			5	4	1111
47	33583858	Cacao	1.0	0.0	1.00	900.00	7	50	12	13	12			5	4	625
48	33587254	Cacao	1.0	0.0	1.00	1100.00	7.2	50	11	14	12	4		5	4	1276
49	27402280	Cacao	0.5	0.0	0.50	840.00	7.5	50	12	14	12			5	4	1111
50	33585417	Cacao	1.0	0.0	1.00	950.00	7.2	50	11	14	12			5	4	1276
51	44851993	Cacao	2.0	0.0	2.00	722.00	7.5	50	12	14	12			5	4	1111
52	33580172	Cacao	1.0	0.0	1.00	600.00	8	50	11	13	12		5	5	4	625
53	40632783	Cacao	3.0	0.0	3.00	912.00	7.5	50	10	12	12			5	4	625
		Promedio	104.25	0.00	104.25	957.32	7.38	50.00	11.17	13.23	12.00	4.20	5.00	5.00	4.00	897.0

Anexo 05. Resultados del análisis estadístico de los datos de campo

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÁREA BASAL DE CACAO, ÁRBOLES DE SOMBRA, TOTAL Y ÁREA BASAL DE CACAO Y ÁRBOLES DE SOMBRA EN PORCENTAJE DEL TOTAL.

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) (Joven=SAF de cacao joven; Madura=SAF de cacao de mediana edad; Adulta: SAF de cacao viejo).

Análisis de la varianza

Theobroma cacao

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Theobroma cacao	15	0.09	0.00	40.83

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	18.97	2	9.49	0.60	0.5628
Age	18.97	2	9.49	0.60	0.5628
Error	188.71	12	15.73		
Total	207.69	14			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=6.69117

Error: 15.7259 gl: 12

Age	Medias	n	E.E.
Adulta	10.95	5	1.77 A
Madura	9.96	5	1.77 A
Joven	8.23	5	1.77 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Arboles

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Arboles	15	0.11	0.00	186.32

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	401.22	2	200.61	0.77	0.4827
Age	401.22	2	200.61	0.77	0.4827
Error	3108.92	12	259.08		
Total	3510.14	14			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=27.15863

Error: 259.0767 gl: 12

Age	Medias	n	E.E.
Madura	15.92	5	7.20 A
Joven	5.60	5	7.20 A
Adulta	4.39	5	7.20 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Total

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
----------	---	----------------	-------------------	----

Total	15	0.14	0.00	80.52
-------	----	------	------	-------

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	431.15	2	215.57	0.99	0.4009
Age	431.15	2	215.57	0.99	0.4009
Error	2620.15	12	218.35		
Total	3051.30	14			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=24.93251

Error: 218.3458 gl: 12

Age	Medias	n	E.E.	
Madura	25.88	5	6.61	A
Adulta	15.34	5	6.61	A
Joven	13.83	5	6.61	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

ANÁLISIS DE VARIANZA Y COMPARACIÓN DE MEDIAS DE BIOMASA POR EDAD DE CULTIVO

Modelos lineales generales y mixtos

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.012_B.cocoa_REML<-gls(B.cocoa~1+Edad.del.cacao
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data12)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.012_B.cocoa_REML

Variable dependiente: B.cocoa

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma R2	0
15	92,76	94,70	-42,38	6,76	0,11

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	71,44	<0,0001
Edad.del.cacao	2	0,77	0,4839

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Edad.del.cacao	2	12	0,77	0,4839

B.cocoa - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.	
3	17,45	3,03	A
2	14,71	3,03	A
1	12,13	3,03	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.013_B.Platano_REML<-gls(B.Platano~1+Edad.del.cacao
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data12)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.013_B.Platano_REML

Variable dependiente: B.Platano

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
15	61,66	63,60	-26,83	1,85	0,10	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	10,61	0,0069
Edad.del.cacao	2	0,65	0,5389

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Edad.del.cacao	2	12	0,65	0,5389

B.Platano - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.	
1	2,13	0,83	A
3	1,71	0,83	A
2	0,82	0,83	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.014_B.Laurel_REML<-gls(B.Laurel~1+Edad.del.cacao
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data12)
```

Resultados para el modelo: `mlm.modelo.014_B.Laurel_REML`

Variable dependiente: *B.Laurel*

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma R2	0
15	124,22	126,16	-58,11	25,08	0,07

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	4,90	0,0469
Edad.del.cacao	2	0,47	0,6371

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Edad.del.cacao	2	12	0,47	0,6371

B.Laurel - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.
3	21,39	11,22 A
2	15,48	11,22 A
1	6,16	11,22 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.015_B.Palto_REML<-gls(B.Palto~1+Edad.del.cacao
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data12)
```

Resultados para el modelo: `mlm.modelo.015_B.Palto_REML`

Variable dependiente: *B.Palto*

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma R2	0
15	52,66	54,60	-22,33	1,27	0,15

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
--	-------	---------	---------

(Intercept)	1	4,24	0,0618
Edad.del.cacao	2	1,07	0,3741

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Edad.del.cacao	2	12	1,07	0,3741

B.Palto - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.
3	1,30	0,57 A
1	0,61	0,57 A
2	0,13	0,57 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.016_B.otras.especies_REML<-
  gls(B.otras.especies~1+Edad.del.cacao
    ,method="REML"
    ,na.action=na.omit
    ,data=mlm.modeloR.data12)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.016_B.otras.especies_REML

Variable dependiente: B.otras.especies

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma R2	0
15	98,12	100,06	-45,06	8,46	0,04

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	10,77	0,0066
Edad.del.cacao	2	0,22	0,8045

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Edad.del.cacao	2	12	0,22	0,8045

B.otras.especies - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.	
2	8,95	3,78	A
3	7,15	3,78	A
1	5,39	3,78	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.017_Biomasa.Hojarasca_REML<-  
gls(Biomasa.Hojarasca~1+Edad.del.cacao  
,method="REML"  
,na.action=na.omit  
,data=mlm.modeloR.data12)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.017_Biomasa.Hojarasca_REML

Variable dependiente: Biomasa.Hojarasca

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
15	1,63	3,57	3,19	0,15	0,32	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	589,64	<0,0001
Edad.del.cacao	2	2,81	0,0499

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Edad.del.cacao	2	12	2,81	0,0499

Biomasa.Hojarasca - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.		
2	1,05	0,07	A	
1	0,97	0,07	A	B
3	0,83	0,07		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.018_BVT.Tn.ha_REML<-gls(BVT.Tn.ha~1+Edad.del.cacao  
,method="REML")
```

```
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data12)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.018_BVT.Tn.ha_REML

Variable dependiente: BVT.Tn.ha

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma R2	0
15	123,44	125,38	-57,72	24,28	0,15

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	39,60	<0,0001
Edad.del.cacao	2	1,08	0,3694

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Edad.del.cacao	2	12	1,08	0,3694

BVT.Tn.ha - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.
3	49,82	10,86 A
2	41,14	10,86 A
1	27,40	10,86 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

CALCULO DE DESVIACIÓN ESTANDAS DE LAS BIOMASAS EN FUNSIÓN DE LA EDAD DEL CULTIVO

Medidas resumen

Edad del cacao	Variable	Media	D.E.
1	B-cocoa	12,13	2,90
1	B-Platano	2,13	2,44
1	B-Laurel	6,16	6,13
1	B-Palto	0,61	1,36
1	B-otras especies	5,39	5,34
1	Biomasa Hojarasca	0,97	0,15
1	BVT Tn/ha	27,40	7,37
2	B-cocoa	14,71	6,31
2	B-Platano	0,82	0,83
2	B-Laurel	15,48	10,04
2	B-Palto	0,13	0,28

2	B-otras especies	8,95	11,34
2	Biomasa Hojarasca	1,05	0,14
2	BVT Tn/ha	41,14	11,12
3	B-cocoa	17,45	9,44
3	B-Platano	1,71	1,90
3	B-Laurel	21,39	41,83
3	B-Palto	1,30	1,71
3	B-otras especies	7,15	7,57
3	Biomasa Hojarasca	0,83	0,17
3	BVT Tn/ha	49,82	39,89

ANÁLISIS DE VARIANZA DEL CARBONO RETENIDO POR FINCA Y ESPÉCIE ARBÓREA DEL SAF

Modelos lineales generales y mixtos

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.019_Carbono.cacao_REML<-
glS(Carbono.cacao~1+Edad.del.cacao
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data19)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.019_Carbono.cacao_REML

Variable dependiente: Carbono.cacao

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma R2	0
15	75,95	77,89	-33,98	3,36	0,12

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	72,22	<0,0001
Edad.del.cacao	2	0,78	0,4797

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Edad.del.cacao	2	12	0,78	0,4797

Carbono.cacao - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.	
3	8,71	1,50	A
2	7,33	1,50	A
1	6,06	1,50	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.020_C.Platano_REML<-gls(C.Platano~1+Edad.del.cacao
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data19)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.020_C.Platano_REML

Variable dependiente: C.Platano

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma R2	0
15	45,05	46,99	-18,52	0,93	0,10

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	10,56	0,0070
Edad.del.cacao	2	0,65	0,5411

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Edad.del.cacao	2	12	0,65	0,5411

C.Platano - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.	
1	1,06	0,41	A
3	0,86	0,41	A
2	0,41	0,41	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.021_C.Laurel_REML<-gls(C.Laurel~1+Edad.del.cacao
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data19)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.021_C.Laurel_REML

Variable dependiente: C.Laurel

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma R2	0
15	107,59	109,53	-49,79	12,54	0,07

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	4,90	0,0469
Edad.del.cacao	2	0,47	0,6370

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Edad.del.cacao	2	12	0,47	0,6370

C.Laurel - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.	
3	10,70	5,61	A
2	7,74	5,61	A
1	3,08	5,61	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.022_C.Palto_REML<-gls(C.Palto~1+Edad.del.cacao  
,method="REML"  
,na.action=na.omit  
,data=mlm.modeloR.data19)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.022_C.Palto_REML

Variable dependiente: C.Palto

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma R2	0
15	36,06	38,00	-14,03	0,64	0,15

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	4,24	0,0619

Edad.del.cacao	2	1,06	0,3762
----------------	---	------	--------

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Edad.del.cacao	2	12	1,06	0,3762

C.Palto - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.	
3	0,65	0,28	A
1	0,30	0,28	A
2	0,06	0,28	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.023_C.otras.especies_REML<-
glS(C.otras.especies~1+Edad.del.cacao
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data19)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.023_C.otras.especies_REML

Variable dependiente: C.otras.especies

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma R2	0
15	81,47	83,41	-36,74	4,23	0,04

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	10,76	0,0066
Edad.del.cacao	2	0,22	0,8039

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Edad.del.cacao	2	12	0,22	0,8039

C.otras.especies - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.	
2	4,48	1,89	A

3	3,57	1,89	A
1	2,70	1,89	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.024_Carbono.hojarasca.t.ha_REML<-
glS(Carbono.hojarasca.t.ha~1+Edad.del.cacao
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data19)
```

Resultados para el modelo:

mlm.modelo.024_Carbono.hojarasca.t.ha_REML

Variable dependiente: Carbono.hojarasca.t.ha

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma R2	O
15	-17,26	-15,32	12,63	0,07	0,31

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	574,26	<0,0001
Edad.del.cacao	2	2,71	0,1069

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1 Edad.del.cacao	2	12	2,71	0,1069

Carbono.hojarasca.t.ha - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.	
2	0,47	0,03	A
1	0,44	0,03	A B
3	0,37	0,03	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.025_Cabono.total_REML<-
glS(Cabono.total~1+Edad.del.cacao
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data19)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.025_Cabono.total_REML

Variable dependiente: Cabono.total

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma R2	0
15	133,87	135,81	-62,93	37,50	0,08

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	228,42	<0,0001
Edad.del.cacao	2	0,49	0,6226

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1 Edad.del.cacao	2	12	0,49	0,6226

Cabono.total - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.
3	156,81	16,77 A
2	148,60	16,77 A
1	133,59	16,77 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

CALCULO DE LA DESVIACIÓN ESTANDAR DEL CABONO TOTAL POR FINCA Y ESPECIE ARBÓREA DEL SISTEMA

Medidas resumen

Edad del cacao	Variable	Media	D.E.
1	Carbono cacao	6,06	1,46
1	C-Plátano	1,06	1,22
1	C-Laurel	3,08	3,06
1	C-Palto	0,30	0,68
1	C-otras especies	2,70	2,67
1	Carbono hojarasca t/ha	0,44	0,07
1	Cabono total	133,59	23,48
2	Carbono cacao	7,33	3,08
2	C-Plátano	0,41	0,41
2	C-Laurel	7,74	5,02
2	C-Palto	0,06	0,14
2	C-otras especies	4,48	5,67
2	Carbono hojarasca t/ha	0,47	0,06
2	Cabono total	148,60	37,53
3	Carbono cacao	8,71	4,71
3	C-Plátano	0,86	0,96
3	C-Laurel	10,70	20,92
3	C-Palto	0,65	0,86
3	C-otras especies	3,57	3,78
3	Carbono hojarasca t/ha	0,37	0,08

3 Cabono total 156,81 47,53

ANÁLISIS DE VARIANZA DEL DIÓXIDO DE CARBONO RETENIDO EL LOS SAF CACAO SEGÚN LA EDAD DEL CULTIVO

Modelos lineales generales y mixtos

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.026_CARBONO_REML<-gls (CARBONO~1+Edad.del.cacao
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data26)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.026_CARBONO_REML

Variable dependiente: CARBONO

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma R2	0
15	42,18	44,12	-17,09	0,82	0,06

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	220,87	<0,0001
Edad.del.cacao	2	0,40	0,6765

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Edad.del.cacao	2	12	0,40	0,6765

CARBONO - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.	
2	3,42	0,37	A
3	3,08	0,37	A
1	2,97	0,37	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.027_Carbono.suelo.Tn.ha_REML<-
gls (Carbono.suelo.Tn.ha~1+Edad.del.cacao
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data26)
```

Resultados para el modelo: `mlm.modelo.027_Carbono.suelo.Tn.ha_REML`

Variable dependiente: `Carbono.suelo.Tn.ha`

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma R2	0
15	130,94	132,88	-61,47	33,20	0,03

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	218,40	<0,0001
Edad.del.cacao	2	0,17	0,8454

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Edad.del.cacao	2	12	0,17	0,8454

Carbono.suelo.Tn.ha - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.
3	131,96	14,85 A
2	128,10	14,85 A
1	119,96	14,85 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA CAPTURA DE CO₂ EN LOS SISTEMAS AGROFORESTALES DE CACAO

Modelos lineales generales y mixtos

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.000_CO2_REML<-glms(CO2~1+Edad.del.cacao
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data00)
```

Resultados para el modelo: `mlm.modelo.000_CO2_REML`

Variable dependiente: `CO2`

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2
15	165,07	167,01	-78,54	137,62	0,08

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	228,42	<0,0001
Edad.del.cacao	2	0,49	0,6226

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	228,42	<0,0001
Edad.del.cacao	2	0,49	0,6226

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1 Edad.del.cacao	2	12	0,49	0,6226

CO2 - Medias ajustadas y errores estándares para Edad.del.cacao

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Edad.del.cacao	Medias	E.E.
3	575,51	61,55 A
2	545,35	61,55 A
1	490,28	61,55 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)