

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA**



**“ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE  
*Theobroma cacao* (CACAO AROMÁTICO) EN DOS UNIDADES FISIOGRAFICAS”**

**TESIS**

**Para optar el título de:**

**INGENIERO AGRÓNOMO**

**Presentado Por:**

**DANIEL LUICIN RAMIREZ SANTIAGO**

**Asesor**

**JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO**

**Tingo María – Perú**

**2025**



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
Tingo María  
FACULTAD DE AGRONOMÍA



Km 1.21 carretera Tingo María. Telf. (062) 561136 E.mail: fagro@unas.edu.pe.

"AÑO DE LA RECUPERACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LA ECONOMÍA PERUANA"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Nº 015-2025-FA-UNAS

BACHILLER : DANIEL LUICIN RAMIREZ SANTIAGO

TÍTULO : ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE *Theobroma cacao* (CACAO AROMATICO) EN DOS UNIDADES FISIOGRAFICAS.

JURADO CALIFICADOR

PRESIDENTE : Ing. LUZ ELITA BALCAZAR TERRONES  
VOCAL : M.Sc. JAIME JOSSEPH CHAVEZ MATIAS  
VOCAL : M.Sc. GIANNFRANCO EGOAVIL JUMP

ASESOR : Dr. JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO

FECHA DE SUSTENTACIÓN : 18/07/2025

HORA DE SUSTENTACIÓN : 08:30 A.M.

LUGAR DE SUSTENTACIÓN : Sala de Audiovisuales de la F.A.

CALIFICATIVO : BUENO

RESULTADO : APROBADO

OBSERVACIONES A LA TESIS : EN HOJA ADJUNTA

TINGO MARÍA, 18 DE JULIO DEL 2025

.....  
Ing. LUZ ELITA BALCAZAR TERRONES  
PRESIDENTE

.....  
M.Sc. JAIME JOSSEPH CHAVEZ MATIAS  
VOCAL

.....  
M.Sc. GIANNFRANCO EGOAVIL JUMP  
VOCAL

.....  
Dr. JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO  
ASESOR



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

## CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 324 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

### CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

### Programa de Estudio:

Agronomía

### Tipo de documento:

Tesis

X

Trabajo de Suficiencia Profesional

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE <i>Theobroma cacao</i> (CACAO AROMÁTICO) EN DOS UNIDADES FISIGRÁFICAS"	DANIEL LUCIN RAMIREZ SANTIAGO	18 % Dieciocho	Menor a 20 %

Tingo Maria, 17 de octubre de 2025.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO  
  
ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES  
JEFE

C.C. Archivo



# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo María

## VICERRECTOR DE INVESTIGACION UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

“Promoviendo la Calidad de la Investigación”

### FORMATO PARA REGISTRAR EL PROYECTO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO UNIVERSITARIO

**Universidad** : Universidad Nacional Agraria de la Selva  
**Facultad** : Facultad de Agronomía  
**Escuela Profesional** : Agronomía  
**Título de Tesis** : “Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* (cacao aromático) en dos unidades fisiográficas”  
**Objetivo general** : Cuantificar el almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* (cacao aromático) en dos unidades fisiográficas.  
**Autor de la tesis** : Daniel Lucin Ramírez Santiago  
**DNI** : 46375090  
**Correo electrónico** : daniel.ramirez@unas.edu.pe  
**Asesor** : José Wilfredo Zavala Solórzano  
**Área de Investigación** : Suelos y fertilizantes  
**Grupo de investigación** : Recuperación y manejo de suelos degradados y contaminados  
**Línea de Investigación** : Remediación de suelos e impacto ambiental  
**Lugar de Ejecución** : Distrito de Irazola, Padre Abad, Ucayali  
**Fecha de Inicio** : Febrero 2023  
**Fecha de Término** : Marzo 2023  
**Presupuesto** : S/ 4,550,00  
**Financiamiento** : Propio ( x )      FIF ( )      Externo ( )

Según Resolución: N° 461-2023-R-UNAS y Resolución: N° 295-2023-R-UNAS

## DEDICATORIA

A Dios, porque siempre está conmigo,  
dándome aliento en momentos de dificultades  
y tristezas.

A mis padres Daniel Ramírez Candelario y Silvina  
Santiago Clemente, porque siempre me brinda su  
cariño y fuerza.

A mi hija Romina Chanel Ramírez Tadeo,  
quien es la fuente de mi inspiración y el mayor  
motivo para salir adelante en la vida.

## AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en especial a la Facultad de Agronomía que contribuyó en mi formación profesional.
- Al Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano, mi asesor, por su valiosa colaboración y supervisión en el desarrollo de la presente Tesis, por el apoyo en la instalación manejo y conducción y en la revisión académica y científica de mi trabajo de investigación.
- A los miembros del Jurado de Tesis, Ing. Luz E. Balcázar Terrones, M.Sc. Jaime J. Chávez Matías, M.Sc. Giannfranco Egoávil Jump y M.Sc. Marco Dueñas Tuestas, por su activa participación en el presente trabajo.
- A todos los amigos y familiares que me apoyaron con su cariño, comprensión y consejos para el desarrollo y realización de la presente tesis.

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
I. INTRODUCCIÓN .....	11
1.1. Objetivo general.....	12
1.2. Objetivos específicos .....	12
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	14
2.1. <i>Theobroma cacao</i> (cacao aromático) .....	14
2.2. Sistemas Agroforestales (SAF).....	16
2.3. Potencialidades y beneficios de los Sistemas Agroforestales (SAF) .....	16
2.4. Biomasa aérea de Sistemas Agroforestales (SAF).....	17
2.5. Deposición de hojarasca en Sistemas Agroforestales (SAF).....	18
2.6. Carbono .....	18
2.6.1 Problemática de la emisión de carbono .....	19
2.6.1.1 Dióxido de carbono .....	19
2.6.1.2 Efecto invernadero.....	19
2.6.2 Origen del carbono en el suelo .....	20
2.6.3 Formas y fracciones de carbono en el suelo .....	21
2.6.4 Fuentes y depósitos de carbono en los diferentes sistemas de uso de tierra.....	23
2.7. Carbono en el suelo de Sistemas Agroforestales (SAF).....	24
2.8. Métodos para estimar o cuantificar la cantidad de carbono.....	24
2.9. Reportes del trabajo de investigación.....	25
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	29
3.1 Lugar de ejecución .....	29
3.2 Material y métodos .....	31
3.2.1 Materiales y equipos.....	31
3.3 Metodología .....	32
3.3.1 Selección, delimitación y croquis del área en estudio .....	32
3.4 Parámetros por evaluar de acuerdo con los objetivos .....	36
3.4.1 Carbono almacenado en cacao en dos unidades fisiográficas .....	36
3.4.2 Carbono almacenado de cacao frente las especies arbóreas, herbáceas y hojarasca en dos unidades fisiográficas.....	36
3.4.2.1. Metodología.....	36

3.4.2.2. Parámetros de estudio.....	36
3.4.2.3. Fórmulas para el cálculo de los ítems de biomasa.....	37
3.4.2.4. Fórmulas para el cálculo del carbono total (biomasa vegetal más suelo).....	39
3.4.3. Evaluación de los parámetros de carbono en el suelo, densidad aparente del suelo, peso del volumen del suelo, lombrices y coloración de suelo dentro de dos unidades fisiográficas. ....	40
3.4.3.1 Metodología y parámetros de estudio.....	40
3.4.3.2 Cálculos del peso del volumen del suelo (t ha <sup>-1</sup> ).....	40
3.4.3.3 Formulas para el cálculo de los siguientes parámetros .....	40
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	42
4.1 Contenido de carbono almacenado en cacao en dos unidades fisiográficas .....	42
4.2 Carbono almacenado de cacao frente las especies arbóreas, herbáceas y hojarasca en dos unidades fisiográficas.....	45
4.3 Evaluación de los parámetros de carbono en el suelo, densidad aparente del suelo, peso del volumen del suelo, lombrices y coloración de suelo dentro de dos unidades fisiográficas.....	50
V. CONCLUSIONES .....	65
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	65
VII. REFERENCIAS.....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
1. Datos de la ubicación geográfica de las dos unidades fisiográficas en Irazola.....	29
2. Componentes de estudio .....	31
3. Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para el contenido de carbono en cacao en dos unidades fisiográficas.....	42
4. Prueba de T para la variable contenido de carbono en cacao en dos unidades fisiográficas (t/ha). .....	42
5. Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para el contenido de carbono por componente vegetal en dos unidades fisiográficas de Irazola. ....	45
6. Prueba de T y de Wilcoxon para el valor de carbono en los componentes vegetales en dos unidades fisiográficas en Irazola.....	46
7. Carbono almacenado (t/ha) en los diferentes componentes del sistema agroforestal. ....	49
8. Prueba de normalidad de Shapiro Wilk en dos unidades fisiográficas de Irazola. ....	51
9. Prueba T para muestras independientes en las variables del suelo. ....	51
10.Total de carbono almacenado por unidad fisiográfica.....	58
11.Cuantificación de lombrices y coloración de suelo dentro de dos unidades fisiográficas a diferentes profundidades. ....	58
12.Intervalos de confianza de la densidad de lombrices.....	56
13. Biomasa y carbono del cacao en las parcelas de Irazola.....	78
14. Biomasa y carbono arbóreo – especies forestales en las parcelas de Irazola.....	84
15. Biomasa y carbono del cultivo de plátano en las parcelas de Irazola.....	85
16. Biomasa y carbono herbáceo-arbustivo de las parcelas de Irazola.....	86
17. Biomasa y carbono de la hojarasca de las parcelas de Irazola.....	87
18. Biomasa y carbono radicular de las parcelas de Irazola.....	88
19. Densidad aparente, peso del volumen seco y carbono del suelo de las parcelas de Irazola.....	91
20. Características de color del suelo según la tabla Munshell.....	94
21. Número de lombrices encontradas en los transectos de las unidades fisiográficas.....	97

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. Ciclo de carbono en la tierra.....	21
2. Imagen satelital de ubicación de los sistemas agroforestales de Terraza baja inundable (Tb <sub>2</sub> ) y colina baja (Cb <sub>1</sub> ).....	30
3. Detalle de la parcela con sus ocho transectos internos.....	32
4. Imagen satelital de la ubicación de los sistemas agroforestales de Terraza baja no inundable (Tb <sub>2</sub> ).....	33
5. Imagen satelital de ubicación de los sistemas agroforestales de colina baja (Cb <sub>1</sub> ).....	33
6. Análisis físico químico de suelo de la Terraza baja no inundable (Tb <sub>2</sub> ).....	34
7. Análisis físico químico de suelo de la colina baja (Cb <sub>1</sub> ).....	35
8. Cuadrantes de 1 m x 1 m para material herbáceo, arbustivo y cuadrantes interiores de 0,5 m x 0,5 m para hojarasca. ....	37
9. Diagrama de caja de carbono almacenado en cacao en dos unidades fisiográficas.....	44
10. Diagrama de caja de variables correspondientes al carbono en el suelo de dos unidades fisiográficas. ....	52
11. Diagrama de caja de variables correspondientes de densidad del suelo de dos unidades fisiográficas.....	53
12. Diagrama de caja de variables correspondientes al peso del suelo de dos unidades fisiográficas.....	54
13. Diagrama de cajas de densidad de lombrices/m <sup>2</sup> .....	61
14. Diagrama de cajas de densidad de lombrices/ha.....	62
15. Toma de medida de la circunferencia del tallo de cacao.....	100
16. Medición de la circunferencia (altura de pecho) en especies forestales.....	100
17. Evaluación de plantas herbáceas y hojarasca del agroecosistema del cacao.....	100
18. Apertura de calicata en los transectos para el muestreo de suelo.....	101
19. Evaluación de la densidad aparente del suelo.....	101
20. Evaluación del color del suelo desde 0 cm a 30 cm de profundidad.....	102
21. Evaluación del número de lombrices/unidad de muestreo.....	102
22. Toma de datos mediante identificación de los SAF.....	102

## RESUMEN

La investigación se llevó a cabo en Ucayali, provincia de Padre Abad, distrito de Irazola, con el objetivo de evaluar el almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) de las variedades CMP-15 y TSH-565 en dos unidades fisiográficas: planicie y colina. Se delimitaron parcelas en Vista Alegre de Chía (planicie) y Nueva Bellavista (colina), estableciendo ocho transectos en cada una para la medición de biomasa y carbono almacenado, utilizando la metodología de Arévalo et al. (2002), recomendada por el ICRAF.

Los resultados de total de carbono almacenado por unidad fisiográfica muestran que el cacao CMP-15 en Terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) presentó un alto predominio de almacenamiento en relación con la fisiografía de colina baja (Cb<sub>1</sub>) es decir que presenta contenidos más del 50% de carbono vegetal, carbono del suelo y carbono total SAF, con 172,82; 157,87 y 330,69 (t/ha) respectivamente. Ya en el caso de colina baja (Cb<sub>1</sub>) solo alcanzó 61,11; 83,93 y 145,04 t/ha, respectivamente. Se observó que en la Terraza baja (Tb<sub>2</sub>) hubo mayor almacenamiento de carbono debido a su mayor antigüedad del SAF, el sistema presenta suelos más oscuros y mayor número de lombrices. En contraste, las bajas poblaciones de lombrices en colina baja (Cb<sub>1</sub>) resaltan la necesidad de evaluar enfoques de producción agrícola más sostenibles en la zona con el fin de restaurar la biodiversidad y mitigar la pérdida de la fauna del suelo. La capacidad de almacenamiento varía dependiendo de la edad, altitud, morfología, topografía, tipo de suelo, manejo y vegetación predominante que debido al cambio de uso del bosque produce una degradación, pérdida de la biomasa y el almacenamiento que demora en recuperarse.

**Palabras clave:** Cacao variedad TSH-565, cacao variedad CMP-15, especies arbóreas, humus y organismos del suelo.

## The Carbon Storage in Agroforestry Systems of *Theobroma cacao* (Aromatic Cacao) on Two Physiographic Units

### Abstract

The research was carried out in Ucayali in the Padre Abad province of the Irazola district [in Peru], with the objective of evaluating the carbon storage in agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with the CMP-15 and TSH-565 varieties on two physiographic units: plain and hill. Plots in Vista Alegre de Chia (plain) and Nueva Bellavista (hill) were outlined, establishing eight transects for each one, in order to measure the biomass and stored carbon, using the Arévalo et al. (2002) methodology, recommended by ICRAF.

The results of the total stored by physiographic unit showed that the CMP-15 cacao on a low non-floodable plain (Tb<sub>2</sub>) presented a high predominance in the storage, in relation to the physiography of a low hill (Cb<sub>1</sub>), which is to say, it presented contents of more than 50% vegetative carbon, carbon in the soil and total carbon AFS (SAF in Spanish) with 172.82, 157.87 and 330.69 (t/ac), respectively. In the case of the low hill (Cb<sub>1</sub>) only 61.11, 83.93 and 145.04 t/ac were achieved, respectively. It was observed that the low plain (Tb<sub>2</sub>) had a greater carbon storage due to the greater age of the AFS, the system presented darker soil with a greater number of worms. In contrast, the low populations of worms on the low hill (Cb<sub>1</sub>) highlighted the need to evaluate focuses on more sustainable agricultural production in the zone, with the goal of restoring the biodiversity and mitigating the loss of fauna in the soil. The storage capacity varied, depending on the age, altitude, morphology, topography, soil type, management, and predominate vegetation, that due to the change of use in the forest, produces a degradation, loss of biomass and a storage that is delayed in its recuperation.

**Keywords:** TSH-565 cacao variety, CMP-15 cacao variety, humus tree species, organisms in the soil

## I. INTRODUCCIÓN

La emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera ha aumentado significativamente en las últimas décadas. La quema de combustibles fósiles y los cambios en el uso de la tierra son los principales factores que contribuyen al aumento de las emisiones (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007). La transformación de las zonas forestales en pastos o monocultivos agrícolas, mediante la quema de biomasa, contribuye con alrededor del 25 % de las emisiones anuales de carbono del planeta (IPCC, 2000).

Se ha desarrollado una conciencia general sobre la importancia de reducir o revertir el proceso de emisión de gases a la atmósfera, mediante investigación y políticas públicas, encaminadas a encontrar soluciones que sean sociales, económica y ambientalmente sostenible (Arévalo et al., 2003). Una forma de amenorar los efectos del cambio climático relacionados con el aumento del efecto invernadero es reducir las emisiones de carbono. Otra forma es secuestrarlo de la atmósfera, fijándola y manteniéndola, el mayor tiempo posible, en la biomasa vegetal y materia orgánica del suelo a través de sistemas de producción permanentes, que son capaces de producir alimentos y productos sin necesidad del uso del fuego (Arévalo et al., 2002)

Montagnini y Nair (2004) destacan que la búsqueda de sistemas de producción capaces de satisfacer la demanda de mitigación está surgiendo como un objetivo clave de política internacional en el contexto del cambio climático.

El carbono eliminado de la atmósfera y luego almacenado en la biosfera terrestre (secuestro de carbono) es una de las opciones propuestas para compensar emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC 2007.), siendo una oportunidad para creación de proyectos en países en desarrollo (Albrecht y Kandji, 2003).

El carbono eliminado de la atmósfera en forma de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es incorporado a la biomasa de las plantas, tanto en la parte aérea como en las raíces, y en el suelo, en formas orgánicas e inorgánicas, además de almacenarse en forma de productos duraderos derivados de estas plantas (Palm et al., 2004). La ganancia neta de carbono es el equilibrio entre la ganancia bruta a través de la fotosíntesis y la pérdida a través de la respiración de las plantas, está definida por Chapin et al. (2002), como productividad primaria líquida; en otras palabras, es la biomasa total producida por las plantas en una unidad de área por tiempo. Una forma de reducirlo es mediante las plantas; estas capturan el carbono en la biomasa (raíz, tallo, hojas) o a través de la materia orgánica y lo almacenan en el suelo (Zavala y Vega, 2021). La capacidad de secuestrar carbono está en parte ligada al concepto de productividad primaria neta, ya que

cuanto mayor sea el incremento en biomasa, mayor será el carbono removido de la atmósfera e incorporado al sistema suelo-planta.

La adopción de sistemas de uso de la tierra como los sistemas agroforestales (SAF) también es una medida para reducir los efectos del calentamiento global y es previsto en el Protocolo de Kioto. Los SAF bien gestionados son capaces de reducir impactos negativos de las actividades humanas, como la emisión de gases a la atmósfera mediante la quema de bosques o actividades industriales, que pueden almacenar gran cantidad de carbono (Palm et al., 2004). En general, los SAF presentan mayor capacidad para almacenar carbono que otras formas de uso de la tierra, como pastos y cultivos agrícolas (Zavala, 2015). El correcto funcionamiento de los SAF contribuye a un mejor ciclo de nutrientes, así como al mantenimiento diversidad de fauna y flora en niveles similares al de los ecosistemas naturales (Montagnini y Nair, 2004).

El desarrollo de la productividad agrícola se está centrando en la sostenibilidad ecológica, esto ha generado el interés de entidades financieras y organizaciones de donación para apoyar iniciativas que busquen proteger la diversidad biológica.

Estudios sobre la capacidad de las SAF para brindar servicios ambientales pueden generar subsidios para que estos sistemas de producción estén cubiertos con políticas de incentivos, especialmente en la Amazonía, incorporando beneficios ambientales atribuidas desde el punto de vista social y económico.

Es por ello, que se tiene como interrogante en la investigación la siguiente pregunta ¿Es viable la cantidad de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* (cacao aromático) en dos unidades fisiográficas?, en base a esta interrogante se plantea la hipótesis que hay diferencias en la cantidad de carbono almacenado en las unidades fisiográficas, para ello se propuso determinar qué cantidades de carbono almacenan los diferentes tipos de suelos con cacao en dos unidades fisiográficas (planicie y colina), planteando la investigación con miras al futuro, para el conocimiento del almacenamiento de carbono que ofrece cada uno de ellos, por ello se persiguió los siguientes objetivos:

### **1.1. Objetivo general**

- Cuantificar el almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* (cacao aromático) en dos unidades fisiográficas

### **1.2. Objetivos específicos**

- Determinar el contenido de carbono almacenado por el cacao en dos unidades fisiográficas.

- Determinar el contenido de carbono almacenado de cacao frente a las especies arbóreas, herbáceas y hojarasca en dos unidades fisiográficas
- Evaluar los parámetros de carbono en el suelo, densidad aparente del suelo, peso del volumen del suelo, lombrices y la coloración de suelo dentro de dos unidades fisiográficas.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 1.1. *Theobroma cacao* (cacao aromático)

El cultivo de cacao viene buscando una alternativa para uno de sus principales desafíos: “la baja rentabilidad de las áreas de cacao”. Entre las alternativas visualizadas por los productores de cacao para superar este desafío es, acertadamente la producción de cacao. Cabe resaltar que la denominación de cacao aromático se debe a que reúne condiciones de *Aroma*; es decir, es un cacao sin imperfecciones en su aroma que a la vez proporciona un perfil aromático sofisticado. De esta manera *el cacao fino se puede definir como un cacao que tiene aromas especiales* (Santos et al., 2019).

#### ¿Qué es el cacao fino?

Según Santos (2009), tres organizaciones están directamente interesadas en el concepto de cacao fino y lo definen de la siguiente manera:

Organización Internacional del Cacao (ICCO): El cacao fino es el cacao procedente de la variedad Criollo, Trinitario o “Nacional” originario de Ecuador y producidas en países seleccionados por un comité especializado. Este comité reevalúa periódicamente la lista de los países productores.

Industrias: Cacao fino es cacao que tiene aromas originales: ya sea notas (aromas) frutales, florales, de madera, de caramelo, etc., ya sea por un aroma de cacao pronunciado y delicado.

Investigadores: Es un cacao que tiene un aroma constitucional (presente en almendras frescas) y/o aroma de fermentación, que aparece tras la fermentación.

Analizando detenidamente las tres definiciones, se puede constatar que son idénticas, ya que utilizan la palabra Aroma como palabra clave. Así, sintetizando el cacao fino se puede definir como un cacao que tiene aromas especiales.

Cuando ICCO incluye la palabra “variedades” en la definición de cacao fino es porque existe una especie de consenso de que los cacaos: Criollos, Trinitarios y el “Nacional” de Ecuador son “aromáticos”. Según Barel (2005), el Criollo es un cacao fino y excelente aroma, pero el árbol es extremadamente frágil y poco productivo. El Trinitario es un híbrido entre el Forastero y el Criollo que puede tener características más cercanas de uno o de otro, sin embargo, la investigación en las naciones productoras de cacao fino intenta seleccionar a los Trinitarios que tengan las características aromáticas de los Criollos y la productividad de los Forasteros. Sin embargo, hay Trinitarios que no están clasificados como cacao fino, porque no tienen buenas características aromáticas, es el caso, por ejemplo, de los Trinitarios de República

de Camerún. Por otro lado, está el cacao Forastero que tiene aromas especiales y se clasifican como finos, es el caso del cacao “ameloned” de Santo Tomé; de los Forasteros de Uganda, en África y Vanuatu, una isla al sur del Pacífico. Entonces queda claro que “la variedad no es un criterio definitivo” para distinguir el cacao fino del no fino.

### **¿Cómo distinguir el cacao fino del cacao no fino?**

Según Barel (2009), para distinguir el cacao fino de otros cacaos (bulk) se utilizan parámetros genéticos/geográfico; químicos; y organolépticos:

Parámetros genético-geográficos: ICCO se basa en el origen genético del árbol del cacao y define que las almendras de origen criollo, trinitario y del Ecuador, que se encuentran en regiones preseleccionadas se consideran finos.

Parámetros químicos: Evaluaciones organolépticas asociadas a la relación teobromina/cafeína se ha identificado como un criterio consistente para separar el cacao fino del cacao no fino.

Parámetros organolépticos: Este es el criterio principal y también el criterio que adopta la industria a la hora de comprar. Las principales características que distinguen el cacao fino y no fino son esencialmente organolépticas, es decir, es “el aroma y sabor”. Estas son exactamente las características (aroma y sabor) que la industria busca chocolate fino y por eso paga precios más altos. Así, el Cacao Fino se destaca por presentar aromas y sabores especiales que no se encuentran en el cacao básico (bulk), sin embargo, en su elaboración, todos los criterios utilizados en el análisis del cacao a bulk, pero se pone especial énfasis a los parámetros organolépticos.

Ante lo manifestado en función a las características organolépticas (aroma y sabor) el cacao bulk es un cacao no aromático, teniendo otros parámetros de análisis de calidad que son específicamente físicos, y corresponde a un cacao padrón. África, Asia y América latina (Brasil) son los mayores productores de este tipo de cacao (Amores et al., 2007).

Según Barel (2005), el Cacao fino o fino de aroma. También se le conoce como cacao “flavor”. Se destaca por presentar aromas y sabores especiales y en pruebas de calidad se tienen en cuenta todos los criterios utilizados en el análisis del cacao “bulk”, sin embargo, se pone especial énfasis en los parámetros organolépticos. Así, el comercio internacional clasifica a los países productores de cacao en dos grupos: Países productores de cacao bulk y los productores de cacao fino. El mercado de cacao considera que existe siete orígenes principales de cacao finos, que serían: Ecuador, Venezuela, Caribas, el archipiélago de San tomé, Madagascar, Isla de Java, Papua nueva guinea. En el año 2008 la ICCO, el Perú fue incluido en la lista de los países productores de cacao fino o aromáticos, en la cual es caracterizado por

aromas con notas de miel, caramelo, nueces dulces, hasta a veces hasta a las mismas flores (ICCO, 2008).

## **1.2. Sistemas agroforestales (SAF)**

En general, los SAF se caracterizan por “uso de árboles más cualquier otro cultivo, o por la combinación de árboles con cultivos alimentarios” (Vergara, 1985). Una definición clásica es la que describe a los SAF como sistemas en los que se mezclan, simultáneamente, en la misma área, especies de árboles perennes con cultivos agrícolas anuales, y/o animales, para conseguir una producción permanentemente mayor (International Centre For Research In Agroforestry [ICRAF], 1983).

La Asociación de Agroforestería de Clima Templado, AFTA (acrónimo en inglés), define al SAF como un “sistema de manejo intensivo de la tierra donde la gestión es hecho para optimizar los beneficios de las interacciones ecológicas donde arbustos y/o árboles se mezclan con cultivares agrícolas y/o ganadería”.

En países de América de sur que poseen la Amazonia, las SAF están siendo ampliamente difundidos y han comenzado a ser estudiados más en los últimos años, con énfasis en agricultura familiar, ya que estos sistemas de producción permiten recuperar áreas degradadas, la producción de cultivos diversificados (alimentos y biocombustibles) y la generación de servicios ambientales (infiltración de agua, acumulación de materia orgánica, mantenimiento de la biodiversidad). Además, constituyen importantes sistemas de Fijación de C en biomasa vegetal y suelo (Kato et al., 2006).

La materia orgánica del suelo resulta, en gran parte, de la descomposición de residuos de origen animal y, principalmente, vegetal, por lo que no tienen relación con el material de origen del suelo (Santos y Gamargo, 1999), asimismo los autores mencionan que estos residuos sufren descomposición inicialmente parcial por mesofauna y, posteriormente, por microbiota en descomposición y parte del carbono de los residuos se libera para la atmósfera como CO<sub>2</sub> y el resto pasa a formar parte de materia orgánica como un componente del suelo

## **1.3. Potencialidades y beneficios de los sistemas agroforestales (SAF)**

Sistemas de producción sostenibles que contribuyan a la conservación de los recursos naturales son potencialmente proveedores de servicios ambientales, destacándose los SAF, que han sido recomendados para las regiones tropicales, debido a los beneficios ambientales, sociales y económicos asociados con estos sistemas (Gama-Rodrigues et al., 2006). Según Osterrooht (2002), entre los diferentes sistemas de manejo, los SAF son aquellos que acumulan el mayor volumen de biomasa aérea, debido, en parte, al componente arbóreo,

que forma un sistema de raíces más desarrollado y crea estratos vegetales más diferenciados que los cultivos anuales.

Los SAF son a menudo reconocidos como una de las formas más apropiadas de eliminar carbono de la atmósfera e incorporarlo en la biomasa de las plantas, junto con el manejo de bosques secundarios, y surgen como alternativas viables desde el punto de vista ambiental y económico, capaces de contribuir en la absorción de CO<sub>2</sub> y reducir el efecto invernadero (Smith et al., 1998).

Kalacska et al. (2004) sugirieron que la capacidad de secuestro de carbono y la prestación de otros beneficios ambientales en los SAF está asociada con la complejidad de los agroecosistemas, que puede estimarse mediante el Índice de Complejidad de Holdridge (ICH), un indicador que combina la riqueza de especies con la estructura y fisonomía de los sistemas, utilizando variables como altura, área basal, densidad arbórea y riqueza de especies. Al evaluar el secuestro de carbono, se debe tener en consideración el ciclo del carbono en los SAF y sus reservorios como suelo, raíces, biomasa aérea y aportes de carbono al sistema (vía caída de hojarasca) y también la cobertura del suelo y hojarasca (Palm et al., 2004).

Para Dixon (1995), la acumulación de biomasa en los SAF está relacionada con el manejo utilizado, composición de especies y región donde ocurre. El uso de prácticas de manejo agroforestal y prácticas de conservación de preparación del suelo potencialmente puede mitigar y reducir las emisiones de carbono, es decir secuestrarlo, capturarlo y mantenerlo el mayor tiempo posible en la biomasa y/o en el terreno. El proceso de secuestrar y almacenar carbono está influenciado por las tasas de fotosíntesis y descomposición de la materia orgánica.

#### **1.4. Biomasa aérea de sistemas agroforestales (SAF)**

Según Ketterings et al. (2001) la estimación de la biomasa encima del suelo es esencial para los estudios del balance global de carbono. Sin embargo, en el caso de sistemas agroforestales, Nair et al. (2009) destacaron la dificultad para encontrar métodos rigurosos para estimar la biomasa encima del suelo. La biomasa aérea se puede calcular mediante métodos directos e indirectos (Higuchi et al., 1998).

El método directo se basa en la estimación mediante muestreo destructivo, el que consiste en el desmontaje de individuos para pesar la parte aérea y posterior determinación de carbono en biomasa. Este método, es más preciso y efectivo, pero generalmente es inviable pesar todos los árboles en un área y, por tanto, los trabajos que utilizan el método directo se basan en pocos y parcelas pequeñas (Hairiah et al, 2001).

El método indirecto es más rápido y no requiere corte, pesaje ni secado de ningún individuo. Permite muestrear una mayor superficie y mayor número de individuos, ya que

utiliza variables que se obtienen más fácilmente en el campo, como el diámetro 1,30 m sobre altura total (h) y el suelo (diámetro a la altura del pecho) y Sin embargo, este método está sujeto a errores de medición de campo, que no siempre se mencionan en trabajos que utilizan este método (Higuchi et al., 1998), principalmente en el SAF, que, al tener varias especies con diferentes hábitos, dificultan las generalizaciones de métodos indirectos, lo que puede implicar errores en estimación de la biomasa aérea (Nair et al., 2009).

Algunos estudios (Albrecht y Kandji, 2003; ICRAF, 2004; Montagnini y Nair, 2004) han sido efectuados con la finalidad de evaluar el carbono fijado en el SAF; sin embargo, estos se basan exclusivamente en métodos “destructivos”, que requieren muestras de plantas “in situ” y evaluaciones de laboratorio, con alta relación costo-beneficio.

### **1.5. Deposición de hojarasca en sistemas agroforestales (SAF)**

La importancia de evaluar la producción de hojarasca radica en comprender los reservorios y flujos de nutrientes en los ecosistemas, que constituyen la principal vía de aporte de nutrientes, a través de la mineralización de restos vegetales, desempeñando un importante papel para la formación y/o mantenimiento de fertilidad en el suelo, así como el suministro orgánico para flora y fauna local (Souza y Davide, 2001), ya una vez depositada en el suelo, la hojarasca lo protege contra la erosión, además de convertirse en una fuente potencial de energía para las especies consumidoras del ecosistema, al participar en el ciclo de nutrientes (Oliveira, 1997).

De esta manera, además de representar un eslabón fundamental en el flujo de energía y materia entre el ambiente físico y biótico, la hojarasca producida por la vegetación proporciona al ecosistema del cual hace parte una mayor estabilidad, variando según con su etapa sucesión (Oliveira, 1997). En ecosistemas tropicales con componentes arbóreos, como los SAF, existe una producción continua de hojarasca durante todo el año (Werneck et al. 2001), cuya cantidad producida en otros momentos dependerá del manejo (Leitão-Filho et al., 1993). La gran cantidad de especies pioneras encontradas en bosques en la etapa inicial de sucesión ecológica y en SAF multiestratificados, es preponderante para la mayor producción de hojarasca (Leitão-Filho et al. 1993; Oliveira, 1997).

### **1.6. Carbono**

Es esencial para la vida en el planeta, ya que este elemento forma parte de la estructura de todas las moléculas orgánicas y participa en diversas actividades metabólicas. Es el elemento más abundante en la naturaleza, está presente en el 99,9 % de los seres vivos químicos, se encuentra de distintas formas (sólido, líquido y gaseoso). Los cuatro compartimentos principales de carbono en la Tierra son: los océanos, la atmósfera, las

formaciones geológicas que contienen carbono fósil y mineral y los ecosistemas terrestres (biota + suelo) (Machado, 2005), constituyendo un ciclo con muchas reacciones involucradas.

## **2.6.1 Problemática de la emisión de carbono**

### **2.6.1.1 Dióxido de carbono**

Según United Nations Environment Programme (UNEP, 1992) suscribe que el CO<sub>2</sub> en estado gaseoso se compone de la unión de dos elementos: oxígeno y carbono. Su formación se da a través de la quema de carbón o compuestos hidrocarbonados, el proceso de fermentación de materia orgánica, así como la respiración tanto de humanos como de animales. En la atmósfera, se presenta en concentraciones mínimas y las plantas lo absorben, generando oxígeno a cambio. Este gas tiene un leve olor que puede causar irritación, no tiene color y es más denso que el aire.

### **2.6.1.2 Efecto invernadero**

Centeno (1992) menciona que un fenómeno natural que ha facilitado el surgimiento de la vida en nuestro planeta se debe a la existencia de ciertos gases en la atmósfera, principalmente vapor de agua y dióxido de carbono. Estos gases permiten que parte de la energía térmica proveniente del sol se conserve, manteniendo la temperatura dentro de un rango que ha favorecido el desarrollo de la vida tal como la conocemos. Si no existiera la concentración natural de estos gases en la atmósfera, la temperatura media en la superficie terrestre sería semejante a la de la luna, alrededor de 18° C bajo cero. Los gases de efecto invernadero permiten que las radiaciones solares de corta longitud de onda lleguen, calentando la superficie terrestre. A su vez, estos gases absorben parte del calor que se irradia desde la superficie del planeta en forma de radiaciones infrarrojas, que tienen una longitud de onda más larga, manteniendo así una temperatura en la superficie del planeta cercana a los 15° C.

Houghton y Woodwell (1989) señalan que el efecto invernadero, por sí solo, no representa un peligro para la vida en la Tierra. El desafío actual se origina en el hecho de que las actividades humanas han incrementado la cantidad de dióxido de carbono y otros gases en la atmósfera., debido a la quema deforestación, parque automotor, incendios, industrias, etc., y por ello una mayor cantidad de energía calórica solar tiene así a permanecer atrapada en la atmósfera, elevando la temperatura promedio del planeta.

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 1997) los principales gases producto de la actividad humana, que contribuyen a la amplificación del efecto invernadero, son el CO<sub>2</sub>, metano, monóxido de carbono, ozono troposférico, óxido de nitrógeno, los cloro-fluorocarbonados, óxidos nitrosos y el vapor de agua.

Según el IPCC en 2004, las repercusiones del cambio climático abarcan cualquier transformación en el entorno físico o en los seres vivos originadas por este fenómeno, las cuales tienen impactos adversos notables en la composición, la resiliencia o la productividad de los ecosistemas, así como en el funcionamiento de sistemas socioeconómicos, salud y el bienestar de las personas. El papel de los gobiernos en el contexto del cambio climático indica que, si las emisiones de gases de efecto invernadero se duplicaran en comparación con los niveles preindustriales de CO<sub>2</sub>, esto podría resultar en un aumento de temperatura de entre 1,5 y 3,5 °C.

### **2.6.2 Origen del carbono en el suelo**

Se inicia cuando el carbono penetra en el suelo a través de la fotosíntesis de las plantas y la descomposición de materia orgánica, tanto vegetal como animal. Parte de este carbono se convierte en humus y se queda en el suelo. Una parte regresa a la atmósfera debido a la actividad de microorganismos. Se trata de un equilibrio cambiante que se ve afectado por diversos factores, incluyendo las condiciones climáticas, la composición del suelo, su estructura y la manera en que se maneja. Un manejo adecuado de los suelos agrícolas facilita que el carbono se capture y se conserve a largo plazo, contribuyendo así a disminuir el nivel de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

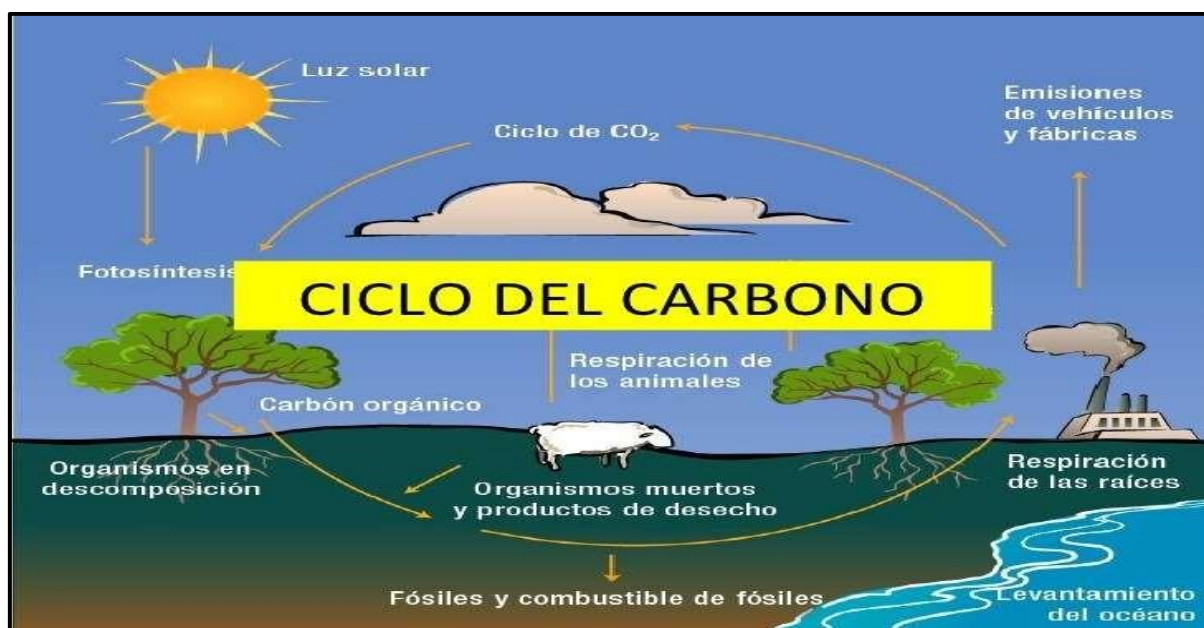
Según Machado (2005), el compartimento de C es el que abunda en mayor cantidad en los sistemas ecológicos bien manejados o que no tengan una acción antrópica dañina (aproximadamente 4 veces el compartimento de C de la vegetación y 3,3 veces el de la atmósfera) y está compuesto de C orgánico y mineral. Según este autor, el C orgánico representa el equilibrio entre el añadido al suelo por la vegetación y el que se pierde en aguas profundas y, finalmente, en los océanos por lixiviación como C orgánico disuelto o en la atmósfera por actividad microbiana como CO<sub>2</sub>.

El ciclo del C en el suelo es bastante complejo, porque, al mismo tiempo que degradan los carbohidratos complejos, los microorganismos sintetizan cuerpos del mismo tipo y sus otros constituyentes celulares, lo que dificulta la separación de los compuestos intermedios de degradación y los de síntesis (Puerto Rico, 2009). Mayores detalles referente al ciclo del carbono se visualiza en la Figura 1. Las transformaciones de C en el suelo comprenden dos fases distintas: la fase de fijación de C-CO<sub>2</sub> atmosférica; y la fase de regeneración, descritas a continuación:

- Fase de fijación. - según Pulrolnik (2009), es realizada por organismos fotosintéticos, donde se sintetizan compuestos de hidrocarburos como almidones, celulosas y hemicelulosas, ligninas, proteínas, ácidos nucleicos, entre otros. Según este autor,

cuando regresan al suelo, son utilizados por organismos que regeneran C-CO<sub>2</sub>, durante el proceso de oxidación respiratoria, utilizando esta energía para mantener el metabolismo.

- Fase de regeneración. - Esta fase, como cita Pulrolnik (2009), comprende las etapas de descomposición de sustancias carbonatadas a través de la acción del microbiota del suelo. Los microorganismos poseen un importante papel en este ciclo, ya que utilizan los residuos vegetales como fuentes de energía, además de obtener sustrato de carbono para la síntesis de nuevas células, por tanto, el producto final producido por el microbiota del suelo es el CO<sub>2</sub>, liberado a la atmósfera.



**Figura 1.** Ciclo de carbono en la tierra

Fuente: <https://encolombia.com/medio-ambiente/interes-a/ciclo-del-carbono/>

### 2.6.3 Formas y fracciones de carbono en el suelo

La materia orgánica es sumamente importante para el buen funcionamiento y desarrollo del suelo. La cantidad y calidad de la materia orgánica puede variar según el tipo de suelo, clima, entre otros. En situaciones donde el suelo se encuentra en condiciones aeróbicas, una gran porción del C que entra es bastante labil, y solo un pequeño porcentaje (1 %) del carbono que ingresa (55 Pg/año) se guarda en la fracción húmica (0,4 Pg/año). La materia orgánica presente en el suelo posee una composición muy compleja y heterogénea y típicamente se encuentra combinada o en asociación con los minerales del suelo. Se han creado numerosos métodos de separación para reconocer los diferentes elementos de la materia orgánica, así como grupos cinéticos, por ejemplo: grupos que pueden ser descritos según una determinada tasa de renovación del carbono (Cambardella, 1998).

El C es el principal constituyente de la materia orgánica y puede presentarse en diferentes formas en el suelo, las cuales pueden ser evaluadas y separadas mediante técnicas de fraccionamiento, ya sea químico o físico. A través de estas técnicas es posible separar las diferentes formas presentes en el suelo, según solubilidad y/o funcionalidad. El fraccionamiento químico consiste en separar el C presente en la materia orgánica del suelo en tres fracciones que varían según su solubilidad, siendo las huminas, los ácidos fúlvicos y húmicos.

En lo que se refiere a la fracción de carbono que es estable, es necesario diferenciar entre las modalidades de protección física o química y la captura. La protección física se refiere al encerramiento de los fragmentos de materia orgánica por partículas de arcilla o por los agregados del suelo ya sean grandes o pequeños (Puget et al., 1995). Por otro lado, la protección química implica uniones específicas de la materia orgánica con otros componentes del suelo, como coloides o arcillas, aunque más comúnmente se relaciona con compuestos orgánicos del suelo que son bastante duraderos. Sin embargo, el concepto de captura de carbono según se utiliza en el Protocolo de Kyoto no considera estas diferencias y se corresponde con el término almacenamiento de cualquier forma de carbono (Cambardella, 1998). Esto también sugiere que diversas categorías de materia orgánica en los suelos están afectadas por variados factores. Las partículas de materia orgánica libre y la biomasa microbiana en los suelos son influenciadas por la cantidad de residuos y la gestión de los residuos de cultivos o coberturas, así como por el clima. La forma en que se agregan los suelos, su textura y mineralogía determinan la materia orgánica en los macroagregados y, en consecuencia, la labranza tiene un impacto considerable en el tamaño de esos reservorios. Los otros tipos de reservorios son menos influenciados por factores agronómicos, siendo más afectados por factores relacionados con el suelo, como la microagregación y la composición de la arcilla.

Los procedimientos de separación física como la clasificación por tamaño de las partículas, la densidad de las porciones o las fracciones basadas en el tamaño de los agregados hacen posible la separación de fracciones cinéticas relevantes. Dentro de estas fracciones, las partículas de materia orgánica son extremadamente reactivas a las variaciones en el uso del suelo (Cambardella, 1998). Hay algunas técnicas directas para medir la biomasa microbiana, la cual representa de 1 a 5 % del total de la materia orgánica del suelo y es una fuente de reserva de nutrientes (nitrógeno y fósforo). Esta es una fracción muy lábil que fluctúa con la estación y que también responde rápidamente a los cambios de manejo del suelo (Gregorich et al., 1996).

Los métodos isotópicos, como el C 14 y la proporción natural de C 13, son sumamente útiles porque facilitan la estimación del tiempo que la materia orgánica y sus fracciones pasan en el suelo. La proporción de C 13 natural es adecuada para evaluar tasas de recambio en escalas de tiempo desde años hasta siglos, mientras que el C 14 sirve para plazos que van de siglos a milenios. Estos métodos se pueden aplicar tanto a grandes muestras de suelo como a fracciones específicas de ellas. La técnica basada en la proporción de C 13 solo se puede utilizar si se ha producido un cambio de vegetación entre tipos fotosintéticos (C3 y C4), o viceversa. La FAO (1998) señala que la principal ventaja de los métodos isotópicos es que permiten medir el recambio de la materia orgánica, lo que a su vez permite deducir el tiempo que diferentes compartimentos han estado presentes. Tras cambios significativos en la vegetación, como la transición de bosques a cultivos o pastizales, se puede rastrear la evolución de distintos tipos de residuos vegetales. Además, señala que los diversos reservorios de C en el suelo tienen diferentes tiempos promedio de residencia, que pueden ir desde uno o pocos años hasta varias décadas o más de mil años (fracción estable), dependiendo de su composición bioquímica. Por ejemplo, la lignina presenta mayor estabilidad que la celulosa. Existe también cierta relación con la composición, aunque es más relevante el tipo de protección o las uniones químicas involucradas.

#### **2.6.4 Fuentes y depósitos de carbono en los diferentes sistemas de uso de tierra**

En diferentes sistemas de uso de tierra, el C es liberado por la vegetación después de su tala y quema y, en el suelo después de frecuentes intervenciones en la preparación del suelo. Esto provoca la alteración del estado estable del carbono en la biomasa, el aumento de la tasa de mineralización de la materia orgánica y, en consecuencia, la liberación de C que se encuentra en los poros del suelo.

Houghton y Woodwell (1989) calcularon que las emisiones resultantes de la conversión de tierras, como la deforestación y el aumento del pastoreo y la agricultura, sumaron cerca de 140 Pg entre 1850 y 1990, pasando de 0,4 Pg por año en 1850 a 1,7 Pg por año en 1990. Esto resultó en una liberación neta de 25 Pg de C a la atmósfera. Según el IPCC (2000), la reducción de tierras agrícolas ha sido de 50 Pg de carbono, lo que equivale a un tercio de la reducción total en suelos y vegetación.

La FAO (2002) indica que las reservas de C orgánico en suelos naturales son el resultado de un equilibrio activo entre la captura de materia vegetal muerta y la pérdida a través de procesos de descomposición (humificación y mineralización).

El uso de prácticas de manejo forestal, agroforestal y labranza conservacionistas de preparo del suelo pueden potencialmente mitigar y reducir las emisiones de C, es decir, secuestran, capturan y mantienen al C en mayor tiempo en el suelo, biomasa y los océanos. Mediante las prácticas forestales y agroforestales, el proceso se obtiene por la fotosíntesis y en el suelo, a través de la mineralización y descomposición de la materia orgánica (Dixon, 1995).

### **1.7. Carbono en el suelo de sistemas agroforestales (SAF)**

La importancia del compartimento de carbono, en el suelo su ciclo global es fundamental, ya que este compartimento constituye el mayor reservorio de C terrestre, que comprende casi dos veces de cantidad de C en la atmósfera y en la biomasa vegetal (Swift, 2001)

El paso de áreas de vegetación natural en áreas de cultivo implica cambios en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. A manera de ejemplo se menciona a los cambios en el manejo del suelo pudiendo acelerar la erosión y la pérdida de suelo por escorrentía, alterar el número de organismos, y a la vez interferir con la dinámica de materia orgánica del suelo en sistemas de cultivo tradicionales, que pueden ser mitigados con la implementación del SAF (Trumbore et al., 1995). En los SAF, la inclusión de componentes arbóreos puede mantener o aumentar la productividad de una determinada área, debido a procesos que aumentan la entrada o reduzcan las pérdidas en el suelo, como materia orgánica, nutrientes y agua, además de mejorar propiedades físico-químicas que benefician procesos de microbiología del suelo (Young, 1994).

### **1.8. Métodos para estimar o cuantificar la cantidad de carbono**

El tema de la captura de carbono ha ganado importancia, por su influencia en el cambio climático, en base a esta polémica problemática, la necesidad de estudios específicos de cálculos de captura de carbono por parte de los bosques. Generalmente los cálculos han sido basados en datos existentes sobre producción de biomasa y que no corresponden a las formaciones forestales de las diferentes regiones de zonas que tienen bosques que en especial serían los países que tiene a la Amazonia. En este sentido, existe una demanda de estudios de esta naturaleza, siendo necesario los que tengan aplicación metodológica para el cálculo del C en diferentes manejos, por lo cual debería tener el objetivo de abordar aspectos del potencial de secuestro de C por parte de los bosques, descripción de la metodología, recolección de datos y formas prácticas para la determinación de C.

Para Hernández (2001), hay dos metodologías que permiten calcular la biomasa, que serán descritos a continuación:

- Método destructivo. - utiliza datos recolectados a partir de las medidas destructivas de la vegetación en una unidad de superficie fijada. Debido al elevado costo que determina su ejecución no es recomendable su aplicación.

- Método alométrico. – consiste en medir una parte del individuo para inferir el C total. Se realizan estimaciones en base de datos de volumen de fuste y valores de densidad de biomasa aérea arbórea (BA) de los bosques, aplicando ecuaciones alométricas propuestas por Brown y Lugo (1997), para bosques tropicales húmedo y muy húmedos premontanos tropicales. La biomasa aérea arbórea se calcula mediante la aplicación de ecuaciones de regresión alométrico a un conjunto de árboles de una parcela medida. Este método, se aplica a bosques secundarios y maduros que poseen climas secos y húmedos. Sin embargo, lo apropiado sería usarlo en bosques densos ya que los datos originales usados para desarrollar el modelo provienen de esos bosques.

### **1.9. Reportes del trabajo de investigación**

Ordoñez (1999) en su investigación titulada “Captura de carbono en un bosque templado” señala que la intervención humana en los bosques, cuyos espacios se están utilizando hoy en día para diferentes tipos de cultivos, hace relevante el análisis de los niveles de captura y retención de carbono en sistemas agroforestales dedicados a cultivos, permitiendo evaluar su eficacia y apreciar mejor su aporte no solo a la producción alimentaria, sino también como un factor importante en la reducción de carbono atmosférico, promoviendo así la conservación del medio ambiente. Concluye que uno de los cultivos que ha estado en aumento, sin duda, es la agricultura, cuya inclinación hacia las prácticas orgánicas motiva a los agricultores más que nunca a buscar una mayor consonancia con el entorno natural. Este hecho es beneficioso, ya que permite que desempeñen un papel más destacado en la captura y almacenamiento de carbono en la atmósfera.

Aristizabal et al. (2002), mediante su investigación “Estimación de la tasa de fijación promedio de carbono en el sistema agroforestal *Cordia alliodora* (nogal de café), *Teobroma cacao* (cacao) y *Musa paradisiaca* (plátano), mediante el análisis de diferentes partes de la planta (Hojas, ramas, tronco o tallo y raíces) y en el suelo circundante”. Sembrando en una terraza alta, suelo profundo, ricos en materia orgánica, bien aireados y drenados, de color negro a pardo muy oscuro en superficie y pardo amarillentos de textura franco arenoso. La fijación de carbono se determinó a partir de la medición directa de la biomasa, a través del peso de cada uno de los comportamientos vegetales. El diseño experimental fue un diseño anidado, pretendió efectuar las comparaciones entre edades ( parcelas), especies, comportamiento y estructura, lo cual especifica que en el método anidado cada tratamiento (estructura ,

comportamiento, especies y edades), de anida que incluye dentro de una categoría superior, las estructuras (hojas, troncos y raíz) se anidan en los comportamientos (biomasa aérea, subterránea, necromasa, y suelo), las cuales se anidan en la especie (nogal, cafetero, cacao y plátano), las cuales al final se anidan en la edades. El número de repeticiones correspondió al número de individuos tomados por especie de cada una de las parcelas. El total de individuos por parcela fue en el cacao (60), nogal (15), plátano (10), la superficie fue de 500 m<sup>2</sup>. El resultado tomó en cuenta del plátano, por lo que con este cultivo trabajó, obteniendo una biomasa total de 30 kg/planta sin contabilizar el racimo, lo cual tiene un peso de 15 kg, este peso se obtuvo a partir de los 15 meses de haberse sembrado, en esta investigación no se tomó en cuenta la cantidad de carbono fijado por esta especie, por el corto tiempo de vida no permitió el almacenamiento prolongado de carbono, lo que imposibilita al plátano ser considerado un sumidero de carbono. Los resultados que obtuvo fueron por permanencia dando valores para el primer año 5,5 t de carbono fijado por ha, el carbono fijado por planta es de 3,06 kg.

Márquez (2005), en su investigación “Cálculo de biomasa y captura de carbono en cuatro sistemas agroforestales diferentes de café con sombra en la estación experimental del Instituto de Cultivo Tropicales” verifico que el carbono acumulado por unidad de superficie es muy variable dependiendo del tipo y estado del bosque. Observo en los bosques adultos siempre verdes, el carbono total fue 606,80 MgC/ha, distribuyéndose de esta manera: 283,75 MgC/ha en la biomasa aérea; 79,92 MgC/ha en raíces (diámetro >5 mm); 2,79 MgC/ ha en el sotobosque; 53,56 MgC/ha en la necromasa; 5,87 MgC/ha en la hojarasca; y 180,91 MgC/ha en los primeros 30 cm de suelo. El carbono acumulado en los suelos superó en todos los casos estudiados 140 MgC/ha, considerando los primeros 30 cm, aunque encontró materia orgánica hasta los 120 cm, estimando que cambios son significativos más allá de los 30 cm. Manifestado además que los reservorios de carbono en los ecosistemas forestales en la cuales predominan en la vegetación, hojarasca y suelo.

Zavala (2015), en su tesis doctoral “Influencia de la edad del cultivo del (cacao) *Theobroma cacao* L, bajo sistemas agroforestales en la captura y almacenamiento del carbono en Tingo María” afirma en cuanto al carbono en el suelo, que no encontró diferencias significativas entre los sistemas evaluados, de edades en diferentes unidades fisiográficas, sin embargo, el sistema agroforestal con cacao menores de 8 años presentó la mayor reserva de carbono en el suelo con 66,16 t C/ha, seguido por el sistema agroforestal de 8 a 16 años con 62,38 t C/ha mientras que el sistema agroforestal mayor de 16 años presenta la menor reserva con 59,08 t C/ha. así mismo menciona que la mayor cantidad de carbono orgánico del suelo está en la primera capa u horizonte del suelo entre 0 a 10 cm, siendo mayor en el SAF Cacao

menores de 8 años con 28,36 tC/ha, seguido del Cacao mayores de 16 años con 27,74 tC/ha. y de 8 a 16 años con 27,11 tC/ha.

Cruz y Sanjurjo (2016), en su estudio “Cacao y la captura de CO<sub>2</sub>”, verificaron que los sistemas de cacao que incluyen árboles maderables y frutales mostraron un aumento significativo en la cantidad de carbono retenido en la biomasa de la parte aérea de los árboles, contribuyendo de forma continua a la presencia de gran cantidad de hojas caídas, actuando como un factor clave para la conservación del suelo y un eficaz regulador de las malas hierbas. Los sistemas agroforestales capturan grandes cantidades de CO<sub>2</sub>.

Existen trabajos que utilizan fórmulas que determinan sus parámetros de estudio, cabe destacar que esto depende de conocer las variables de estudio enfocados en la captura, stock o almacenamiento de carbono, que son descritos a continuación: Timoteo et al. (2016), mediante su estudio “Estimación del carbono almacenado en tres sistemas agroforestales durante el primer año de instalación en el departamento de Huánuco”, calcularon el carbono presente en la biomasa de los árboles, utilizando la fórmula  $Biomasa = 0,1184 \times 2,53 (DAP)$ , que incorpora el diámetro (DAP) como variable. Para determinar el carbono en la biomasa herbácea y arbustiva, así como en la necromasa, se secaron las muestras recolectadas en el campo en un horno a 75 °C hasta que alcanzaron un peso seco constante. El valor de humedad en las muestras (CH) y el carbono total se calcularon mediante las formulaciones siguientes:  $CH = (\text{peso húmedo de la muestra} - \text{peso seco de la muestra}) / \text{peso seco de la muestra}$ , y  $Biomasa/Necromasa\ total = \text{peso húmedo total} / (1 + CH)$ . Asimismo, que el carbono representa el 50 % de la biomasa y la necromasa respectivamente. Aplicaron un factor de corrección de 0,1 para transformar la biomasa (t/ha) en el componente de los árboles, y 0,01 para la biomasa de hierbas y arbustos, así como 0,04 para la necromasa.

Londoño (2018) en su tesis titulada “Almacenamiento de carbono orgánico en suelos de producción agrícola en cultivo de cacao en ecosistema tropical” busco cuantificar carbono bajo diferentes profundidades (0-20 cm y 20-40 cm) en siete áreas en las cuales tres tienen plantaciones de cacao con sombra asociada (A, B, C), tres de manera convencional (D, E, F) y una sin ninguna intervención antrópica en la cual está siendo protegida hace 20 años (G). Asimismo, hay que mencionar que el orden del manejo vegetal está de acuerdo con los siguientes clones que son los siguientes CCN 51, EET 8, ICS 65, IMC 67, ICS 90, TSH 565 y SCC 61, respectivamente. La producción con cobertura bajo un sistema de cobertura evidencia un incremento en la captura de recursos orgánicos de carbono con 49,27 tC ha<sup>-1</sup> gracias al vínculo vegetal y la aportación de combustible. Es importante destacar la relevancia de la taxonomía y litología. Los procesos de retención del suelo en los procesos de fijación y captura

están relacionados directamente con el suelo, dado que están conectados de manera directa con la conservación del carbono, definidas mayoritariamente por la textura, aparente estructura y densidad.

Zavala y Vega (2021), en su estudio “Captura y almacenamiento de carbono en distintas edades de cacao bajo sistemas agroforestales de Tingo María”, en base a sus objetivos calcularon carbono de la biomasa empleó la fórmula  $CBV(T/ha) = BVT \times 0,45$ ; donde CBV carbono de la biomasa vegetal (T/ha), BVT biomasa vegetal (g), 0,45 proporción de carbono, asumido por convención; mientras que para el carbono en el suelo empleó la fórmula  $CS (t/ha) = (PVs \times \% C)$ ; en donde CS Carbono en el suelo (t/ha), PVs peso del volumen del suelo; % C Porcentaje de carbono almacenado analizado en el laboratorio; 100 factor de conversión. Como resultado obtuvieron en cacao mayor de 16 años con una biomasa Arborea viva de 609,28 t/ha, Biomasa arbustiva herbácea de 5,8 t/ha y una biomasa de hojarascas de 18,54 t/ha; mientras que en una plantación menor a 8 años la biomasa Arborea viva de 170,29 t/ha, una biomasa arbustiva herbácea de 5,43 t/ha y biomasa de hojarascas de 21,50 t/ha.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Lugar de ejecución

Fue realizado en el caserío de Vista Alegre de Chía con una fisiografía de planicie y en Nueva Bellavista de fisiografía colina la cual se muestra en la Figura 2. Estas parcelas que se encuentran en la región Ucayali, provincia de Padre Abad y Distrito de Irazola. Los detalles de la ubicación geográfica y altitud se presentan en la Tabla 1.

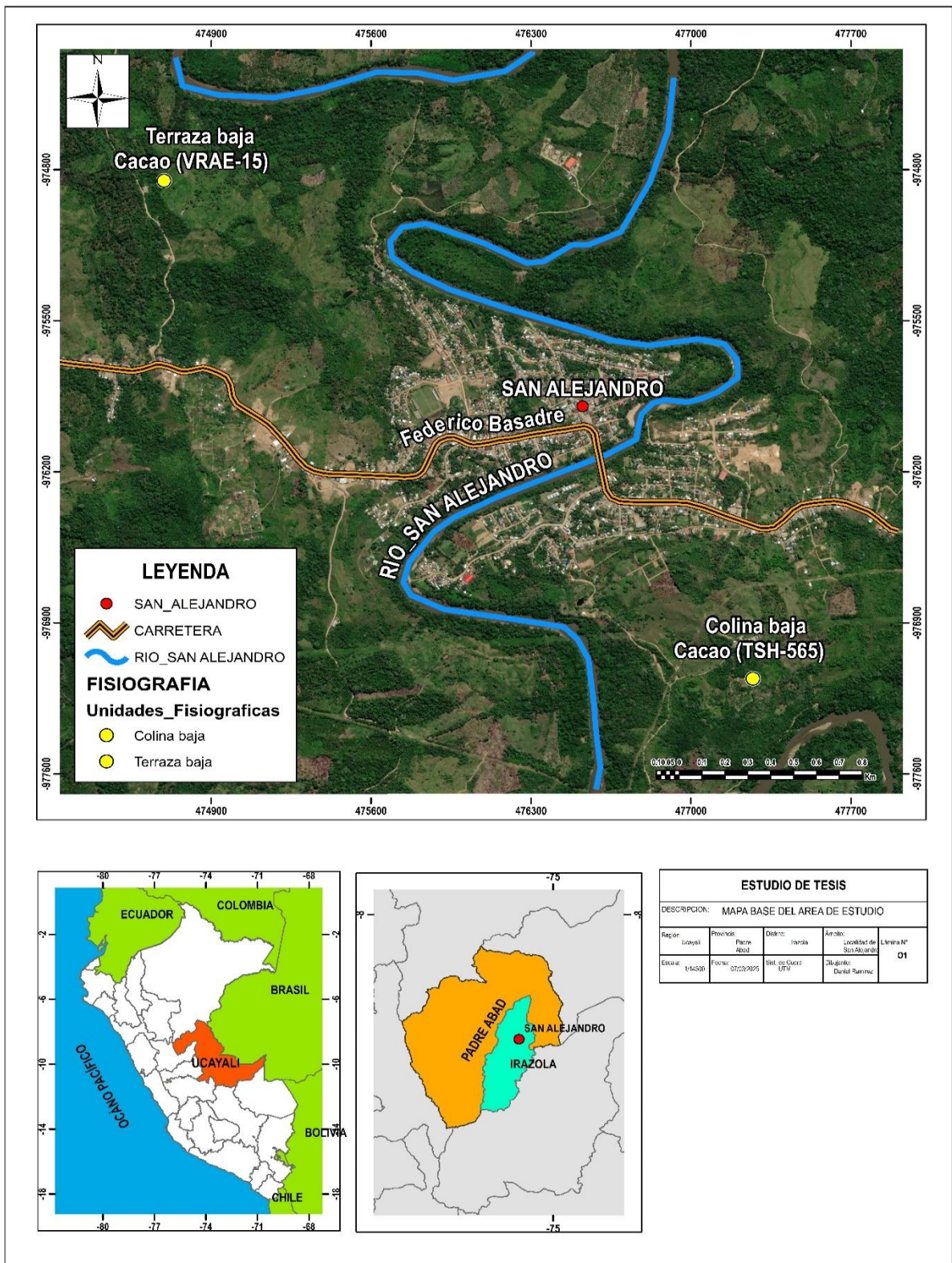
**Tabla 1.** Datos de la ubicación geográfica de las dos unidades fisiográficas en Irazola

Fisiografía	Transecto	Ubicación		
		mE	mN	Altitud m.s.n.m
Terraza baja no inundable (Tb <sub>2</sub> )	A	470653	9033076	204
	B	470645	9033067	200
	C	470616	9033080	202
	D	470620	9033101	202
	E	470607	9033117	212
	F	470587	9033089	211
	G	470571	9033118	211
	H	470561	9033096	210
Colina baja (Cb <sub>1</sub> )	I	482631	9017194	318
	J	482641	9017175	313
	K	482636	9017185	314
	L	482663	9017194	320
	M	482623	9017180	321
	N	482633	9017171	320
	O	482632	9017193	318
	P	482661	9017192	319

#### 3.1.1. Datos climáticos geológicos y suelos

Los valores promedio mensuales de temperatura más altos se dan entre junio y noviembre (verano), registrándose valores de 28 °C a 33 °C. Por otro lado, las temperaturas promedio mensuales más bajas se dan entre diciembre y Mayo (invierno) registrándose valores de 25 °C y 27 °C. Las lluvias son abundantes (2344 mm en promedio), los ciclos estacionales lluviosos son en febrero, marzo, abril y mayo; el ciclo seco es en junio, julio y agosto (SENAMHI, 2023). Los suelos de la zona de estudio según la clasificación natural

de los Estados Unidos de América (Soil Taxonomy, 2016), pertenecen a los órdenes Entisols, Inceptisols y Ultisols.



**Figura 2.** Imagen satelital de ubicación de los sistemas agroforestales de terraza baja inundable (Tb<sub>2</sub>) y colina baja (Cb<sub>1</sub>)

## 3.2 Material y métodos

### 3.2.1 Materiales y equipos

**3.2.1.1. Materiales:** 01 wincha de 100 m y 3 m, 02 tijeras de podar, 02 Palas rectas, 02 picos, 04 machetes, 80 cilindros Uhlands de 85 cc, 06 plumones indeleble, 01 millar de papel periódico, 02 millares de bolsas de plásticos de diferentes tamaños, 20 costales de polietileno de 50 Kg, 01 Marco de madera de 1 m x 1 m, 01 Marco de madera de 0,5 m x 0,5 m; 01 docena de lapiceros, 01 docena de lápices, 01 tablero de campo, 02 libretas de campo, 01 cinta métrica, 01 martillo de madera, 01 martillo de Geólogo, 01 tabla Munsell de color de suelos.

**3.2.1.2. Equipos:** 01 GPS, 01 cámara fotográfica, 01 estufa, 01 balanza analítica, 01 equipo de cómputo, 01 calculadora científica.

#### 3.2.2.1. Variables de estudio

**a. Variable Independiente:** Cultivo de cacao en planicie y colina.

**b. Variable dependiente:** Carbono almacenado en el SAF donde hubo plantaciones de cacao aromático, en especies forestales, en herbáceas, en raíces, en hojarascas y suelo en dos unidades fisiográficas.

#### 3.2.2.2. Componentes de estudio

El estudio se efectuó en base a los siguientes componentes que se describen en la Tabla 2. Cabe resaltar que no se trabajó con un modelo experimental específicamente por que se trabajó con puntos de muestreo al azar específicamente a través de 8 transectos en cada parcela de estudio en las cuales en cada uno de ellos se extrajeron muestras para los parámetros de evaluación, cada parcela tiene 1 ha en promedio (Ver Tabla 1, Figuras 3, 4 y 5).

**Tabla 2.** Componentes de estudio

<b>Entrada (planta)</b>	<b>Unidad experimental (Fisiografías)</b>	<b>Salida (Parámetros de estudio)</b>
Cacao CMP-15	Terraza baja no inundable (Tb <sub>2</sub> )	Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales
Cacao TSH 565	Colina Baja (Cb <sub>1</sub> )	

#### 3.2.2.3. Análisis estadístico

Los resultados fueron analizados mediante una estadística descriptiva; asimismo, se realizó la prueba de normalidad de Shapiro Wilk para comprobar la distribución normal de datos y la prueba de homocedasticidad para determinar si aplicar la

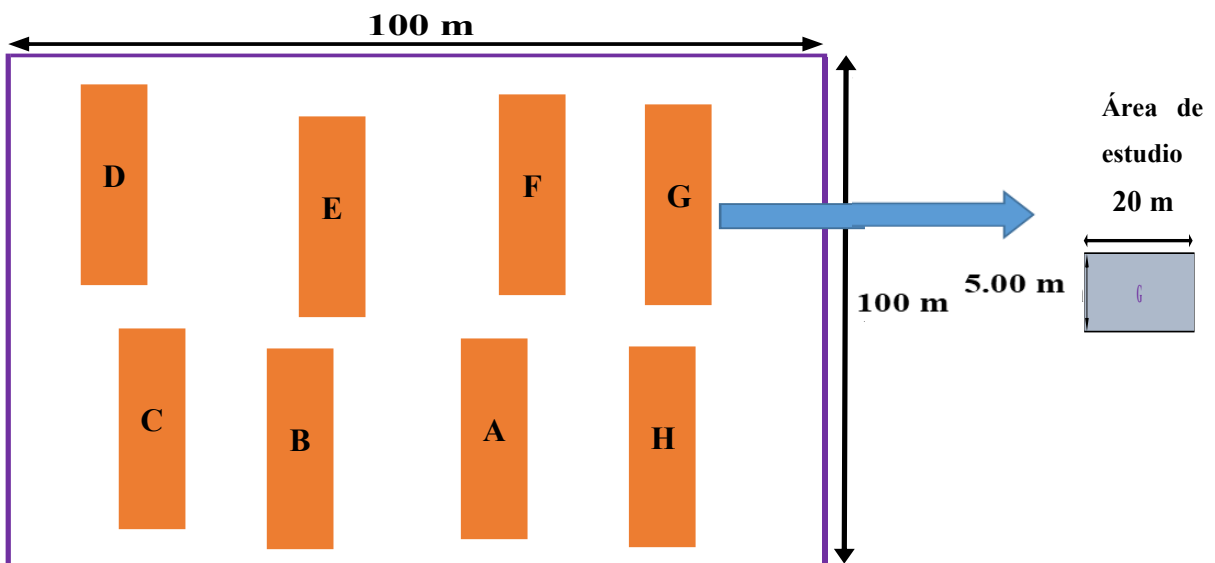
prueba de T para dos muestras independientes en el caso de que exista homogeneidad de varianzas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) o la prueba de Wilcoxon en caso contrario.

### 3.3 Metodología

#### 3.3.1 Selección, delimitación y croquis del área en estudio

Ambas parcelas de cacao aromático y diferentes unidades fisiográficas, manejados bajo el sistema agroforestal, se encuentran en el distrito de Irazola. El SAF con cacao CMP-15 está ubicado en la terraza baja no inundable ( $Tb_2$ ) (Figura 4); el SAF con cacao TSH 565 está ubicado en colina baja ( $Cb_1$ ) (Figura 5). Cabe resaltar que en estas dos fisiografías fueron realizadas análisis de caracterización física y químicas de su suelo (Figura 6 y 7, respectivamente).

Las parcelas tienen 1 ha en promedio, y se procedió a delimitar ocho transectos dentro de cada parcela (Ver Tabla 1 y Figura 3), en el caso de la fisiografía terraza baja no inundable ( $Tb$ ) se tuvo los transectos codificados (A, B, C, D, E, F, G y H) y para la fisiografía colina baja ( $Cb$ ) (I, J, K, L, M, N, O y P).



**Figura 3.** Detalle de la parcela con sus ocho transectos internos



**Figura 4.** Imagen satelital de la ubicación de los sistemas agroforestales de terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>)



**Figura 5.** Imagen satelital de ubicación de los sistemas agroforestales de colina baja (Cb<sub>1</sub>)



# ANALISIS DE SUELOS



1. DATOS

SOLICITANTE:	WILFREDO ZAVALA SOLORZANO	MUESTREADO POR:	DANIEL RAMIREZ SANTIAGO
DEPARTAMENTO:	UCAYALI	FECHA DE RECEPCION:	23/02/2023
PROVINCIA:	PADRE ABAD	FECHA DE INICIO DE ENSAYO:	24/02/2023
DISTRITO:	IRAZOLA	FECHA DE REPORTE:	16/03/2023
CASERÍO:	VISTA ALEGRE DE CHIA	RECIBO O FACTURA:	TRABAJO DE INVESTIGACION
NOMBRE DE LA PARCELA:	FUNDO TAPIA	OBSERVACIÓN:	CACAO AROMATICO AGROFORESTAL

2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS SOLICITADO

N°	DATOS		ANÁLISIS MECÁNICO				pH	CE dS/cm	M.O. %	N %	C %	P ppm	K ppm	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiabiles %	Acidos Cambiabiles %	Saturación de Aluminio %
			Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural																		
			%	%	%																			
1	S0286	M1	34	37	29	Franco Arcilloso	5.10	0.125	1.786	0.089	1.036	24.154	120.947	—	5.623	0.808	0.237	0.053	0.221	0.040	6.981	96.261	3.739	3.186

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.  
Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
Tingo María  
  
Ing. GILMER WILSON NEIRA TRUJILLO  
Profesor del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
Tingo María  
  
Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI  
Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

[analisisdesuelosunas@hotmail.com](mailto:analisisdesuelosunas@hotmail.com)

Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531

Figura 6. Análisis físico y químico de suelo de la terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>)



# ANALISIS DE SUELOS



1. DATOS

SOLICITANTE:	WILFREDO ZAVALA SOLORIZANO	MUESTREADO POR:	DANIEL RAMIREZ SANTIAGO
DEPARTAMENTO:	UCAYALI	FECHA DE RECEPCION:	4/05/2023
PROVINCIA:	PADRE ABAD	FECHA DE INICIO DE ENSAYO:	5/05/2023
DISTRITO:	IRAZOLA	FECHA DE REPORTE:	15/05/2023
CASERÍO:	VISTA ALEGRE DE CHIA	RECIBO O FACTURA:	TRABAJO DE INVESTIGACION
NOMBRE DE LA PARCELA:	FUNDO TAPIA	OBSERVACIÓN:	CACAO AROMATICO AGROFORESTAL - COLINA BAJA

2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS SOLICITADO

N°	DATOS		ANÁLISIS MECÁNICO				pH	CE		M.O.	N	C	P		K	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases	Acidos	Saturación
			Arena	Arcilla	Limo	Clase		dS/cm	disponible				CAMBIALES	Cmol(+)/kg										%	%	%
			%	%	%	Textural		1:1	1:1				%	ppm										ppm	%	%
1	M1	S0730	16	68	25	Arcilloso	6.40	0.105	2.058	0.103	1.194	2.88	204.66	16.202	12.264	2.604	0.231	0.104	0.000	0.000	-	100	0	0		

Los Resultados presentados son válidos unicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.  
 Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
 Tingo María  
  
 Ing° GILMER MILTON NEIRA TRUJILLO  
 Profesional del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
 Tingo María  
  
 Dr. HUGO ALAREDO HUAMANI YUPANQUI  
 Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

[analisisdesuelosunas@hotmail.com](mailto:analisisdesuelosunas@hotmail.com)

Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531

Figura 7. Análisis físico y químico de suelo de la colina baja (Cb<sub>1</sub>)

### **3.4 Parámetros por evaluar de acuerdo con los objetivos**

#### **3.4.1 Carbono almacenado en cacao en dos unidades fisiográficas**

Se realizó una Mini calicata en cada uno de los cuadrantes delimitados para el muestreo del suelo en forma estratificada en las profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm). Las muestras del suelo fueron de 500 g en promedio en cada transecto, se codificaron debidamente y fueron llevados al laboratorio para su determinación de carbono por el método de Walkley y Black adaptado por Zavala y Mansilla (2015).

#### **3.4.2 Carbono almacenado de cacao frente las especies arbóreas, herbáceas y hojarasca en dos unidades fisiográficas**

##### **3.4.2.1. Metodología**

La estimación del carbono de la biomasa vegetal fue por el método alométrico (Arévalo et al., 2002), esta metodología es la más recomendada por la Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) a través de su centro Nacional de investigación de florestas ya que fueron los precursores en este estudio en el año 2022 al presentar el material informativo Documento 73 titulado “Metodología para estimar el contenido y almacenamiento de Carbono en diferentes sistemas de uso de la tierra” cabe resaltar que fue un esfuerzo científico en conjunto entre el International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF o también llamado Centro Internacional de Investigación en Agroforestería) y Embrapa Florestas.

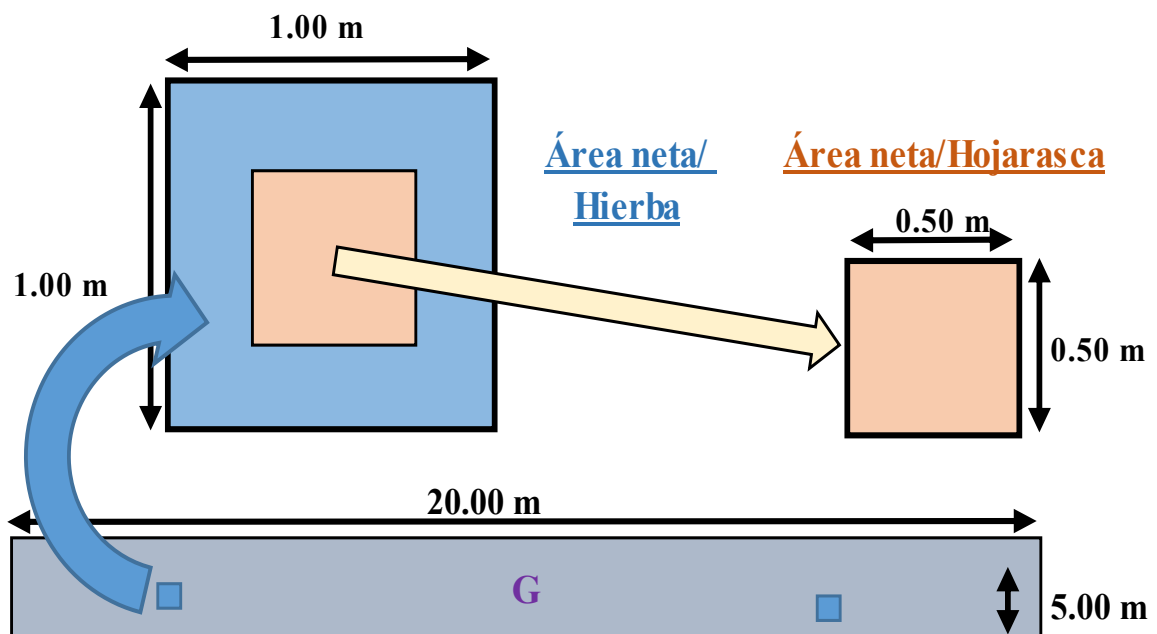
##### **3.4.2.2. Parámetros de estudio**

- **Biomasa arbórea viva.** - Para evaluar este ítem se trabajó con árboles que tengan diámetros mayores de 2,5 cm, trazándose transectos de 5 x 20 m, donde se realizó el inventario de todos los árboles con diámetro (DAP) DAP mayor a 2,5 cm, donde el diámetro basal, para el caso del “cacao aromático” fue tomado a 30 cm del suelo (Alegre et al., 2002), mientras que para el componente forestal el DAP fue evaluado a 1,30 m del suelo, de todos los árboles con un DAP mayor de 2,5 cm.

- **Biomasa arbustiva (BAb) y herbácea (Hbh).** - estuvo compuesta por la biomasa vegetal del suelo, plantas con diámetro menores de 2,5 cm de gramíneas y otras hierbas. El muestreo del material herbáceo y arbustivo fue por muestreo directo con dos cuadrantes de 1 m x 1 m, distribuidos al azar dentro de los transectos de 5 m x 20 m (Figura 6). Se cortó toda la vegetación al nivel del suelo, se pesó el total de la muestra y luego se sacó una submuestra en bolsas de papel periódico para ser colocado en una estufa de aire caliente a 75 °C durante 48 h hasta obtener peso seco constante.

- **Biomasa seca (hojarasca).** – consistió en cuantificar la capa de hojarasca y otros residuos (ramillas, ramas), utilizando cuadrantes de 0,5 m x 0,5 m colocados dentro de cada uno de los cuadrantes de 1 m x 1 m. (Figura 8). Colocándose toda la hojarasca en bolsas, registrando su peso fresco total por 0,25 m<sup>2</sup>. Sacando una submuestra y registrando su peso, cabe resaltar que se secó en la estufa a temperatura de aire caliente a 75 °C, hasta obtener peso seco constante.

**Figura 8.** Cuadrantes de 1 m x 1 m para material herbáceo, arbustivo y cuadrantes interiores de 0,5 m x 0,5 m para hojarasca.



### 3.4.2.3. Fórmulas para el cálculo de los ítems de biomasa

- **Biomasa vegetal.** - Las fórmulas usadas para determinar el carbono aéreo y del suelo fueron las determinadas por Arévalo et al. (2002).

$$BA = 0,1184 \times DAP^{2,53} \quad (1)$$

Donde:

BA	:	Biomasa de árbol individual (kg)
0,1184	:	Constante
2,53	:	Constante
DAP	:	Diámetro a la altura del pecho
1,30 m	:	Especies forestales
0,30 m	:	Plantas de cacao.

• **Biomasa vegetal del plátano (t ha<sup>-1</sup>).** – Se aplicó la fórmula sugerida por Hairiah et al. (2001), donde solo se considera como variable predictiva el DAP en cm:

$$B = 0,0303 * DAP ^ 2,1345 \quad (2)$$

• **Biomasa arbórea viva (t ha<sup>-1</sup>).** - Para calcular la biomasa/ha, se sumaron los árboles medidos y registrados en cada parcela y se multiplicó por un valor numérico estipulado en las especificaciones del factor de conversión, a partir de ello se debe escoger la formula a usar:

$$BAVT (t ha^{-1}) = BTAV \times 0,1 \quad (3)$$

ó

$$BAVT (t ha^{-1}) = BTAV \times 0,02 \quad (4)$$

Donde:

BAVT	:	Biomasa de árboles vivos en t ha <sup>-1</sup>
BTVA	:	Biomasa total de la parcela
0,1	:	Factor de conversión de la parcela 4 x 25 m
0,2	:	Factor de conversión de la parcela 5 x 100 m

• **Biomasa arbustiva y herbácea (t ha<sup>-1</sup>):** Esta variable se determinó en conjunto con una sola ecuación:

$$BAb - hb (t ha^{-1}) = ((PSM/PFM) \times PFT) \times 0,01 \quad (5)$$

Donde:

BAb - hb	:	Biomasa Arbustiva – Herbácea (t ha <sup>-1</sup> )
PSM	:	Peso Seco de la Muestra (g)
PFM	:	Peso Fresco de la Muestra (g)
PFT	:	Peso Fresco Total (g)

El peso seco de esta biomasa se llevó a t ha<sup>-1</sup> y se multiplicó por el factor 0,45; obteniéndose la cantidad de carbono existente.

• **Biomasa de la hojarasca (tha<sup>-1</sup>)**

$$Bh (t ha^{-1}) = ((PSM/PFM) \times PFT) \times 0,04 \quad (6)$$

Donde:

Bh (t ha-1)	:	Biomasa hojarasca (t ha <sup>-1</sup> )
-------------	---	---

PSM	:	Peso Seco de la Muestra (g)
PFM	:	Peso Fresco de la Muestra (g)
PFT	:	Peso Fresco Total (g)

- **Biomasa Vegetal Total (t ha<sup>-1</sup>)**

$$BVT \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = BAVT + BAb\text{- hb} + Bh \quad (7)$$

### 3.4.2.4. Fórmulas para el cálculo del carbono total (biomasa vegetal más suelo)

- **Cálculo del carbono en la biomasa vegetal total (t ha<sup>-1</sup>)**

$$CBV \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = BVT \times 0,45 \quad (8)$$

Donde:

CBV	:	Carbono en la biomasa vegetal
BVT	:	Biomasa vegetal total
0,45	:	Constante (Brown y Lugo, 1997).

- **Cálculo del carbono en el suelo (t ha<sup>-1</sup>)**

$$CS \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = (PVs \times \% C)/100 \quad (9)$$

Donde:

CS	:	Carbono en el suelo (t ha <sup>-1</sup> )
Pvs	:	Peso del volumen de suelo
% C	:	Porcentaje de carbono analizado en laboratorio
100	:	Factor de conversión

- **Cálculo del carbono total del SAF (t ha<sup>-1</sup>)**

$$CT \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = CBV + CS \quad (10)$$

Donde:

CT	:	Carbono total del SAF
CBV	:	Carbono en la biomasa vegetal total
CS	:	Carbono en el suelo.

### 3.4.3. Evaluación de los parámetros de carbono en el suelo, densidad aparente del suelo, peso del volumen del suelo, lombrices y coloración de suelo dentro de dos unidades fisiográficas.

#### 3.4.3.1 Metodología y parámetros de estudio

- **Carbono orgánico del suelo.** - Se realizó en base a unos cortes en los transectos a una profundidad (0-10, 10-20 y 20-30 cm), sacando muestras de suelo codificándose apropiadamente y llevados a laboratorio para su respectiva determinación de carbono por el método de Walkley y Black (modificado).

- **Densidad aparente y peso del suelo.** - se utilizó el método del cilindro, utilizando cilindros de aproximadamente 100 ml de volumen aplicando la fórmula de masa sobre volumen, procediendo a extraer las muestras de suelo a profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm). Esta muestra de suelo fue llevada a estufa a 105 °C que a cabo de 24 horas se determinó el peso constante.

- **Cuantificación de lombrices y color del suelo.** – a profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm) en cada área de estudio en base a los transectos se realizó la contabilización de lombrices. Asimismo, se determinó con la tabla Munshell soil color book, las coloraciones y características del suelo en estudio.

#### 3.4.3.2 Cálculos del peso del volumen del suelo (t ha<sup>-1</sup>)

El cálculo partió analizando primero la densidad aparente del suelo por cada uno de los horizontes.

#### 3.4.3.3 Formulas para el cálculo de los siguientes parámetros

- **Densidad aparente del suelo (g cc<sup>-1</sup>)**

$$DA \text{ (g cc}^{-1}\text{)} = \text{PSN/VCH} \quad (11)$$

Dónde:

DA : Densidad aparente (g cc<sup>-1</sup>)  
 PSN : Peso seco del suelo dentro del cilindro  
 VCH : Volumen cilindro (constante)

- **Peso del volumen de suelo por estrato de muestreo**

$$\text{PVs (t ha}^{-1}\text{)} = \text{DA x Ps x 10 000} \quad (12)$$

Dónde:

PVs : Peso del volumen de suelo (t ha<sup>-1</sup>)  
 DA : Densidad aparente  
 Ps : Espesor o profundidad del horizonte del suelo (m)

10 000 : Constante

• **Cálculo del carbono en el suelo (t ha<sup>-1</sup>)**

$$CS \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = (PV_s \times \% C)/100 \quad (13)$$

Dónde:

CS : Carbono en el suelo (t ha<sup>-1</sup>)

Pvs : Peso del volumen de suelo

% C : Porcentaje de carbono analizado en laboratorio

100 : Factor de conversión

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Contenido de carbono almacenado en cacao en dos unidades fisiográficas

A través de la prueba de Shapiro Wilk aplicada a ambas unidades fisiográficas se ha comprobado que los datos tienen una distribución normal. De acuerdo con la Tabla 3 los valores de  $W^*$  están próximos a la unidad, lo que indica que los datos no presentan una desviación extrema respecto a la normalidad; esto se comprueba también mediante el p-valor ( $> 0,05$ ).

**Tabla 3.** Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para el contenido de carbono en cacao en dos unidades fisiográficas.

Unidad fisiográfica	Variedad	n	Media	D.E.	$W^*$	p-valor	CV (%)
Terraza baja (Tb <sub>2</sub> )	CMP-15	8	80,16	22,48	0,96	0,865	28,04
Colina baja (Cb <sub>1</sub> )	TSH-565	8	47,65	14,34	0,95	0,759	30,11

En el mismo sentido, se aplicó la prueba de homocedasticidad, en la cual se obtuvo un valor de 0,259 ( $> 0,05$ ) que indica que existe homogeneidad de varianzas, por lo que se aplicó la prueba de T (Tabla 4).

**Tabla 4.** Prueba de T para la variable contenido de carbono en cacao en dos unidades fisiográficas (t/ha).

Unidad fisiográfica	Variedad	n	Media	Mínimo	Máximo	pHomVar	T	p-valor
Terraza baja (Tb <sub>2</sub> )	CMP-15	8	80,16	42,65	121,20	0,259	-3,45	0,0039
Colina baja (Cb <sub>1</sub> )	TSH-565	8	47,65	23,24	74,37			

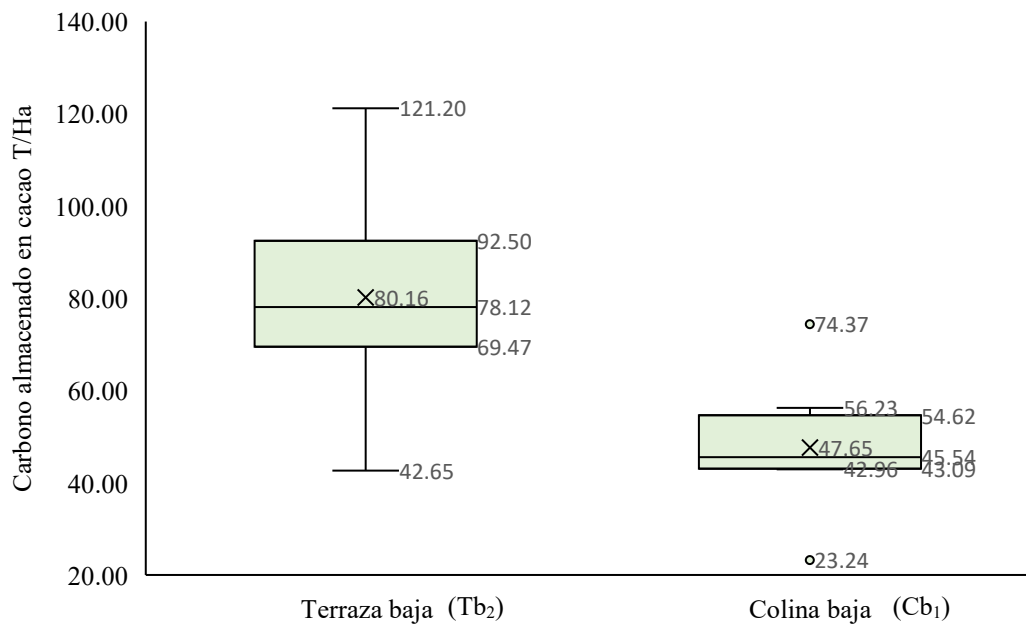
El p-valor ( $p < 0,05$ ) obtenido en la prueba de T indica que existe diferencia estadística entre los niveles de carbono almacenado en cacao en las dos unidades fisiográficas.

Esto puede deberse a la variabilidad de las zonas de estudio, además de la calidad de los lugares donde se situaron las dos plantaciones o la calidad genética del material vegetal. El desarrollo y la calidad son influenciados por la relación entre las características genéticas, del ambiente por la competencia por recursos y la gestión de la plantación. Esto concuerda con

lo observado por Concha et al. (2007) al indicar que la retención de carbono no depende de la antigüedad de los sistemas, sino de la variedad de especies presentes en cada uno, así como de las técnicas de silvicultura y del manejo apropiado de la plantación.

Probablemente, que una fisiografía posea diferencia estadística en relación con otra en lo que se refiere a niveles de carbono, es gracias a sus conductores primarios que tienen propiedades que ejercen un mayor control sobre el carbono. Los principales impulsores estarían relacionados con el contenido de materia orgánica, en las regiones tropicales; asimismo se destacan la estructura, humedad del suelo, manejo, clima y mineralogía (Falcão et al., 2020)

La Tabla 4 también muestra una mayor predominancia de carbono almacenado en cacao en la terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>), donde se encuentra la variedad CMP – 15. Asimismo, se observa que el máximo valor estuvo en la terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) con 121,20 t/ha; en contraste, se tuvo el menor registro en la colina baja (Cb<sub>1</sub>) con 23,24 t/ha. Con relación a los valores promedio se tiene 80,16 t/ha y 47,65 t/ha para la terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) y colina baja (Cb<sub>1</sub>) respectivamente (Tabla 4 y Figura 9). El resultado que indica una mayor captura de carbono en la terraza baja no inundable (80,16 t/ha) y un menor valor en la colina baja (47,65 t/ha) es coherente con el principio técnico que establece una relación directa entre biomasa aérea (volumen, diámetro) y carbono almacenado. La terraza baja proporciona mejores condiciones de crecimiento para el cacao, lo cual justifica una mayor biomasa y, por ende, una mayor reserva de carbono, tal como lo sostiene Guerra (2023), Para la producción de cacao, en cuanto a las características físicas del suelo, se requieren suelos aluviales. Cabe resaltar que cuando hablamos de fisiografía son conocidos los suelos aluviales y residuales; referente a la investigación, estos corresponden a terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) y colina baja (Cb<sub>1</sub>), respectivamente.



**Figura 9.** Diagrama de caja de carbono almacenado en cacao en dos unidades fisiográficas.

En la Figura 9 se observa, como valor mínimo y máximo de carbono almacenado en cacao de la terraza y colina baja (42,65 – 121,20 t/ha) y (42,96 – 56,23 t/ha) respectivamente. Se observa que el primer cuartil, segundo cuartil y tercer cuartil es 69,47; 78,12 y 92,50 t/ha; con una media de 80,16 t/ha con respecto a la terraza baja. Seguidamente se observa que el primer cuartil, segundo cuartil y tercer cuartil es 43,09; 45,54 y 54,62 t/ha; con una media de 47,65 t/ha. Asimismo se observó que los niveles de carbono observados en ambos sistemas fueron muy dispersos debido a la variabilidad del suelo en que se desarrollan, conllevando a que el carbono almacenado en cacao presentó un mayor aporte a la reserva de carbono, en la fisiografía de terraza baja con 80 t ha<sup>-1</sup>, mostrándose valores que fluctuaron de 43 t ha<sup>-1</sup> en relación con fisiografía de colina baja, estos resultados pueden deberse a las diferentes edades y la diversidad de especies presentes, en donde se desarrollan cada sistema agroforestal (Lapeyre et al., 2004). Pues de acuerdo con la biología de la planta de cacao en sistemas agroforestales de 12 años como es el caso del sistema de terraza baja, este sistema ha logrado el óptimo en la captación de carbono debido a las técnicas culturales aplicadas a lo largo de la producción. Además, las podas de formación han facilitado que los ciclos de carbono se mantengan estables en el tiempo, y estos flujos de carbono pueden aumentar aún más con el desarrollo de las especies de sombra.

También estos resultados están en base a las variaciones en la biomasa vegetal, y pueden atribuirse a las condiciones del suelo presentes en los cultivos de cacao, así como al clima característico de la región, sin olvidar el manejo silvicultural aplicado en estas áreas. Mondragón (2019), en su estudio acerca del carbono total almacenado en el cacao en una

plantación de 6 años, obtuvo carbono almacenado de 22,68 t/ha. Estos resultados no se alinean con los rangos obtenidos en la presente investigación, considerando que el SAF de la colina baja también tiene 6 años y se ha estimado 47,65 t C ha<sup>-1</sup>. Probablemente el manejo del SAF en la zona de estudio del autor no fue el óptimo. Añadido a esto, el resultado también se puede atribuir a que el almacenamiento de carbono puede estar influenciado por la variedad de cultivo, en este caso, la variedad de cacao, así como por las características del sitio, el tipo de suelo, los componentes y los factores climáticos.

#### 4.2 Carbono almacenado de cacao frente las especies arbóreas, herbáceas y hojarasca en dos unidades fisiográficas

En la Tabla 5, se muestra la prueba de Shapiro Wilk aplicada a ambas unidades fisiográficas en los distintos componentes del sistema agroforestal. De acuerdo con el p-valor > 0,05 en la mayoría de los casos, los datos presentan una distribución normal, a excepción del contenido de carbono almacenado en las herbáceas, por lo que posteriormente se aplicó la prueba de homocedasticidad y la prueba T (paramétrica) o Wilcoxon (no paramétrica).

**Tabla 5.** Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para el contenido de carbono por componente vegetal en dos unidades fisiográficas de Irazola.

<b>C por especies (t/ha)</b>	<b>Unidad fisiográfica*</b>	<b>n</b>	<b>Media</b>	<b>D.E.</b>	<b>W*</b>	<b>p-valor</b>	<b>CV (%)</b>
<b>Forestales</b>	Terraza baja	8	87,75	40,64	0,95	0,7961	39,40
	Colina baja	8	9,29	7,05	0,94	0,6651	30,02
<b>Plátano</b>	Terraza baja	4	1,28	0,86	0,97	0,8124	18,16
	Colina baja	6	0,83	0,51	0,96	0,8577	29,98
<b>Cacao</b>	Terraza baja	8	80,16	22,48	0,96	0,8650	28,04
	Colina baja	8	47,65	14,34	0,95	0,7593	30,11
<b>Herbáceas</b>	Terraza baja	8	0,26	0,26	0,70	<0,0001	10,80
	Colina baja	8	0,45	0,21	0,91	0,462	15,81
<b>Hojarasca</b>	Terraza baja	8	2,47	1,3	0,97	0,9268	24,08
	Colina baja	8	2,01	1,25	0,85	0,1512	22,57
<b>Radicular</b>	Terraza baja	8	0,90	0,17	0,98	0,9776	6,10
	Colina baja	8	0,88	0,48	0,86	0,1893	16,90

\*Terraza baja (Tb<sub>2</sub>) y colina baja (Cb<sub>1</sub>)

En la Tabla 6 se presenta la prueba de homocedasticidad y el p-valor mediante la prueba de T si  $p_{HomVar} > 0,05$ ; y la prueba de Wilcoxon si  $p_{HomVar} < 0,05$ . De acuerdo al p-valor, se ha encontrado diferencia estadística en el carbono almacenado en las especies forestales y en el cacao entre las dos unidades fisiográficas.

Respecto al carbono en las especies forestales, se tiene que el máximo nivel se encuentra en la terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) con una media de 87,75 t/ha, mientras que en colina baja (Cb<sub>1</sub>) se calculó una media de 9,29 t/ha. En el cultivo de plátano se determinó mayor valor en la terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) con una media de 1,28 t/ha, mientras que en colina baja (Cb<sub>1</sub>) el valor fue de 0,83 t/ha. En la variable carbono en cacao, se calculó mayor nivel en la terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>), con una media de 80,16 t/ha, mientras que en colina baja (Cb<sub>1</sub>) el cálculo de la media fue de 47,65 t/ha. Para el contenido de carbono en las herbáceas el mayor valor se ha registrado en la colina baja (Cb<sub>1</sub>), con una media de 0,45 t/ha; mientras que en terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) se reporta una media de 0,26 t/ha. Con respecto al carbono en la hojarasca, se encontró una media de 2,47 t/ha de almacenamiento en terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>); por el contrario, la menor media se registró en colina baja (Cb<sub>1</sub>), con un valor de 2,01 t/ha. Por último, el máximo nivel promedio de carbono en las raíces se calculó en terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>), con una media de 0,90 t/ha; mientras que el menor promedio fue de 0,88 t/ha calculado en colina baja.

**Tabla 6.** Prueba de T y de Wilcoxon para el valor de carbono en los componentes vegetales en dos unidades fisiográficas en Irazola.

C por especies (t/ha)	Unidad fisiográfica*	Edad (Años)	% de sombra/Ha	N	Media	Mínimo	Máximo	pHomVar	Valor estad.	p-valor
<b>Forestales</b>	Terraza baja	12	40%	8	87,75	9,28	144,78	0,0001	*39,00	0,001
	Colina baja	06	45%	8	9,29	0,58	22,90			
<b>Plátano</b>	Terraza baja	12	15%	8	1,28	0,11	2,13	0,2922	<sup>b</sup> -0,09	0,934
	Colina baja	06	20%	8	0,83	0,25	1,69			
<b>Cacao</b>	Terraza baja	12	50%	8	80,16	42,65	121,20	0,2590	<sup>b</sup> -3,45	0,003
	Colina baja	06	42%	8	47,65	23,24	74,37			
<b>Herbáceas</b>	Terraza baja	-	30%	8	0,26	0,09	0,87	0,5232	*86,00	0,065
	Colina baja	-	50%	8	0,45	0,20	0,76			
<b>Hojarasca</b>	Terraza baja	-	-	8	2,47	0,63	4,91	0,9185	<sup>b</sup> 0,71	0,488
	Colina baja	-	-	8	2,01	0,81	4,56			
<b>Radicular</b>	Terraza baja	-	-	8	0,90	0,60	1,18	0,0135	*60,00	0,442
	Colina baja	-	-	8	0,88	0,40	1,73			

a. Se utilizó la prueba de Wilcoxon. % Valores referenciales

b. Se utilizó la prueba de T.

\*Terraza baja (Tb<sub>2</sub>) y colina baja (Cb<sub>1</sub>).

En base a los resultados de la Tabla 6 se puede indicar que ambas fisiografías evaluadas muestran resultados favorables en relación con almacenamiento de carbono, es decir que el sistema agroforestal presenta una habilidad para capturar carbono orgánico, gracias a la asociación de plantas y la contribución de biomasa. Es fundamental destacar el papel que juegan la taxonomía y la litología del suelo en los mecanismos de fijación y absorción de carbono, ya que están directamente ligadas al almacenamiento del carbono, lo cual depende principalmente de la textura, la estructura y la densidad aparente del suelo.

Probablemente el bajo contenido de carbono en las herbáceas, hojarasca y raíces se debe a que la cantidad de carbono acumulado en los suelos es determinada gracias al equilibrio que va de la agregación de material vegetal en descomposición, también denominado necromasa o material muerto, específicamente como la hojarasca y raíces añadido a las mermas sufridas durante los procesos de pudrición y mineralización, teniendo a manera de ejemplo a la respiración heterotrófica. Estrada (2023) encontró valores más elevados del carbono orgánico en las raíces de cacao ( $4,12 \text{ t C ha}^{-1}$ ) que lo calculado en la presente investigación. El autor manifiesta que las raíces del cultivo de cacao poseen un gran tamaño pues su sistema radicular es proporcional con su tamaño, quiere decir que cuentan con raíces mucho más profundas superando el metro de profundidad.

El mayor aporte de carbono retenido se encuentra en la biomasa de especies forestales; esto se debe a que conforme incrementan su edad se vuelven más vigorosos e incrementa también su biomasa. Es claro que los sistemas con mayor crecimiento e incremento de la biomasa presentan los valores más altos de acumulación de carbono debido a la relación existente entre estas dos variables (de 0,45 a 0,50 %, de acuerdo con IPCC, 2000), pues como mencionan Taiz y Zeiger (1998), el almacenamiento de carbono se efectúa mediante el secuestro del carbono de la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración, llevándolo a almacenarse en la biomasa y en el suelo.

De acuerdo con lo mencionado en el párrafo anterior, es de esperarse que en la terraza baja no inundable ( $Tb_2$ ) se encontraran mayores valores promedio de carbono almacenado tanto en las especies forestales ( $87,75 \text{ t/ha}$ ) como en el cacao ( $80,16 \text{ t/ha}$ ), debido a que este SAF tiene 12 años de instalado, mientras que el SAF de colina baja tiene 6 años. En el mismo sentido, Zavala et al. (2018) obtuvieron valores de  $609,28 \text{ tC/ha}$  en SAF mayores a 16 años y  $170,29 \text{ tC/ha}$  en SAF menores de 8 años. Sin embargo, estos valores también estarán relacionados a las condiciones y mantenimiento que el agricultor brinda a la plantación; por ejemplo, Gonzales (2018) evaluó estas variables en un SAF de café de 4 años y uno de 8 años,

obteniendo como resultado que la biomasa fue de 29,55 y 24,79 t/ha respectivamente. El motivo fue que esta última plantación resultó atacada por la roya amarilla 4 años antes de la evaluación, lo que generó gran mortandad y por ende pérdida de biomasa vegetal.

En ambas unidades fisiográficas, los niveles de carbono en la hojarasca son mayores a los niveles de carbono en las herbáceas. Esto se debe a que en los sistemas agroforestales estudiados no existen especies herbáceas en grandes cantidades debido al mantenimiento brindado por los agricultores, quienes limitan el crecimiento de arbustos y herbáceas, dejando en su lugar cantidad de hojarasca. Los niveles de carbono en hojarasca suelen ser mayores a los niveles de carbono en las herbáceas-arbustos y en las raíces debido al aporte constante y de mayor cantidad de estos restos vegetales muertos que caen en forma natural. Sin embargo, el carbono presente en la hojarasca normalmente es un componente pequeño en términos de biomasa, por lo que muchas veces su inclusión es discrecional (Chidiak et al., 2003). Los promedios de C de hojarasca calculados en terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) (2,47 t/ha) y colina baja (Cb<sub>1</sub>) (2,01 t/ha) son menores a lo obtenido por Dávila (2023), quien reportó 3,48 t/ha, concluyendo que los terrenos usados como plantaciones de capirona y bolaina, purma y maíz tienen mayor capacidad de almacenamiento. Por su parte, Gonzales (2018) obtuvo un valor de 25,72 t/ha en un SAF de 4 años, posiblemente porque la plantación estuvo en constante crecimiento y desarrollo por lo cual hay mayor brotamiento de hojas y labores de poda, además de que los cultivos utilizados son café y guaba. Las labores silviculturales afectan directamente a la cantidad de biomasa y carbono debido a la formación del mantillo, por lo que en ocasiones puede haber un bajo nivel de incorporación al suelo según la intensidad del manejo. De acuerdo con los resultados de la presente investigación y las mencionadas, se coincide con Alpizar et al. (1983) quienes mencionan que se debe considerar la variedad del cultivo utilizado, así como la sombra, la densidad y la época de muestreo.

El contenido de carbono en las herbáceas arroja medias de 0,45 (colina baja – Cb<sub>1</sub>) y 0,26 t/ha (terracea baja no inundable – Tb<sub>2</sub>). Estos datos son menores a lo reportado por Gonzales (2018), quien en un SAF de 4 años determinó 1 t/ha. Por su parte, Zavaleta et al. (2018) en un SAF de 12 años obtuvo un valor de 0,95 t/ha debido a que en la plantación presentaba poca cobertura.

De acuerdo con la Tabla 7, el nivel de carbono almacenado en las especies forestales de la terraza baja no inundable (caoba + shimbillo) se ha estimado 126,06 t/ha y supera ampliamente a lo calculado en la colina baja (bolaina + capirona + guaba + pumaquiro) con 26,25 t/ha. En los cultivos agrícolas (cacao + plátano) se ha estimado 81.44 t/ha para el primer

caso y 48.48 t/ha para el segundo. En el mismo sentido, las herbáceas, arbustos, hojarasca y raíces sumaron un total de 3,63 y 3,34 t/ha, respectivamente.

**Tabla 7.** Carbono almacenado (t/ha) en los diferentes componentes del sistema agroforestal.

Unidad fisiográfica	Componentes	Especies	Nombre científico	Carbono (t/ha)	Carbono vegetal SAF (t/ha)
<b>Terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>)</b>	Forestal	Caoba	<i>Swietenia macrophylla</i>	64,28	211,13
		Shimbillo	<i>Inga oerstediana</i>	61,78	
	Cultivo agrícola	Plátano	<i>Musa paradisiaca</i>	1,28	
		Cacao	<i>Theobroma cacao</i>	80,16	
	Herbáceas, arbustos, hojarasca, radicular	Herbáceas-arbustivas		0,26	
		Hojarasca Radicular		2,47 0,90	
<b>Colina baja (Cb<sub>1</sub>)</b>	Forestal	Bolaina	<i>Guazuma crinita</i>	15,24	78,07
		Capirona	<i>Calycophyllum spruceanum</i>	1,98	
		Guaba	<i>Inga edulis</i>	5,05	
		Pumaquiroy	<i>Aspidosperma macrocarpon</i>	3,98	
	Cultivo agrícola	Plátano	<i>Musa paradisiaca</i>	0,83	
		Cacao	<i>Theobroma cacao</i>	47,65	
Herbáceas, arbustos, hojarasca, radicular	Herbáceas-arbustivas		0,45		
	Hojarasca Radicular		2,01 0,88		

Ante lo manifestado de manera general se aseverar que las especies forestales y cacao han presentado mejores condiciones en terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) con relación a colina baja, debido principalmente a que los árboles forestales son de mayor edad presentes y diámetro, lo que ocasiona que tengan mayor biomasa. Este resultado fue evidenciado por Larrea (2007) al analizar la biomasa aérea en siete SAF de cacao con especies forestales, maderables y frutales de tres sistemas de 3, 6 y 8 años; con la finalidad de verificar la reserva de carbono en regiones (San Martín y Huánuco), observando que el SAF de cacao de 8 años asociado con caoba, presento mayor almacenamiento y flujo de carbono. Asimismo el autor verifico que la guaba fue especie de rápido crecimiento y que unido a la caoba genera abundante volumen de biomasa, reciclando N en el suelo el cual hace que el SAF tenga este beneficio siendo una planta poco extractiva de nutrientes comparado a las especies que no cuenta con guaba, siendo especies más solicitantes de nutrientes el mismo que permite mayor captura de carbono (Alegre

et al., 2001). Para Dixon (1995), la acumulación de biomasa en los SAF está relacionada con el manejo utilizado, composición de especies y región donde ocurre. El uso de prácticas de manejo del SAF y prácticas de conservación de preparación del suelo potencialmente puede mitigar y reducir las emisiones de carbono, es decir secuestrarlo, capturarlo y mantenerlo el mayor tiempo posible en la biomasa y/o en el terreno

Cabe recalcar que también se evidencia que la terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) proporciona mejores condiciones de crecimiento para el cacao, lo cual justifica una mayor biomasa y, por ende, una mayor reserva de carbono, tal como lo sostiene Guerra (2023), Para la producción de cacao, en cuanto a las características físicas del suelo, se requieren suelos aluviales. También estos resultados están en base a las variaciones en la biomasa vegetal presentes, y pueden atribuirse a las condiciones del suelo presentes en los cultivos de cacao, así como al clima característico de la región, sin olvidar el manejo silvicultural aplicado en estas áreas.

Según Lopez y Davila (2018) en su estudio determinación de captura de carbono en el cultivo de plátano encontró 9,28 t/ha, muy superior al presente estudio que en ambas unidades fisiográficas de terraza baja y colina baja se estimó 1,28 t/ha y 0,83 t/ha de carbono almacenado en la biomasa vegetal del plátano, probablemente la diferencia se debe a la densidad del plátano/ha, fue mayor en la investigación de los autores mencionados.

Asimismo, se puede aseverar que la variabilidad de los resultados referentes a la captura de carbono en la biomasa está fundamentada en base a las apreciaciones de varios estudios que muestran que el contenido de carbono varía según la especie y el tipo de tejido del árbol (Francis, 2000; Gifford, 2000; Soares y Oliveira, 2002;). La densidad o gravedad específica (el peso seco por volumen del material establecido) difiere entre especies y en función de las condiciones ambientales (Valenzuela, 2001). En el contexto de proyectos para la captura de carbono, Gayoso et al. (2002) subrayan la relevancia de cuantificar el carbono basándose en información específica de cada especie y sus componentes, ya que dicho dato biológico representa y determina un porcentaje significativo de la cantidad de carbono secuestrado.

#### **4.3 Evaluación de los parámetros de carbono en el suelo, densidad aparente del suelo, peso del volumen del suelo, lombrices y coloración de suelo dentro de dos unidades fisiográficas**

En la Tabla 8 se muestra la prueba de Shapiro Wilk aplicada a ambas unidades fisiográficas en las distintas variables correspondientes al suelo. El p-valor > 0,05 indica que

los datos presentan una distribución normal, por lo que posteriormente se aplicó la prueba de homocedasticidad y la prueba T correspondiente.

**Tabla 8.** Prueba de normalidad de Shapiro Wilk en dos unidades fisiográficas de Irazola

Variable	Terraza	N	Media	D.E.	W*	p-valor	CV (%)
<b>Carbono en el suelo (t/ha)</b>	Terraza baja	8	157,87	36,24	0,91	0,4635	20,33
	Colina baja	8	83,93	17,07	0,84	0,1053	22,96
<b>Densidad aparente del suelo (g/cc)</b>	Terraza baja	8	1,32	0,05	0,94	0,7399	4,16
	Colina baja	8	1,26	0,04	0,96	0,8713	3,43
<b>Peso del volumen del suelo (t/ha)</b>	Terraza baja	8	1321,08	54,34	0,95	0,7966	4,11
	Colina baja	8	1264,62	42,39	0,95	0,7695	3,35

\*Terraza baja (Tb<sub>2</sub>) y colina baja (Cb<sub>1</sub>)

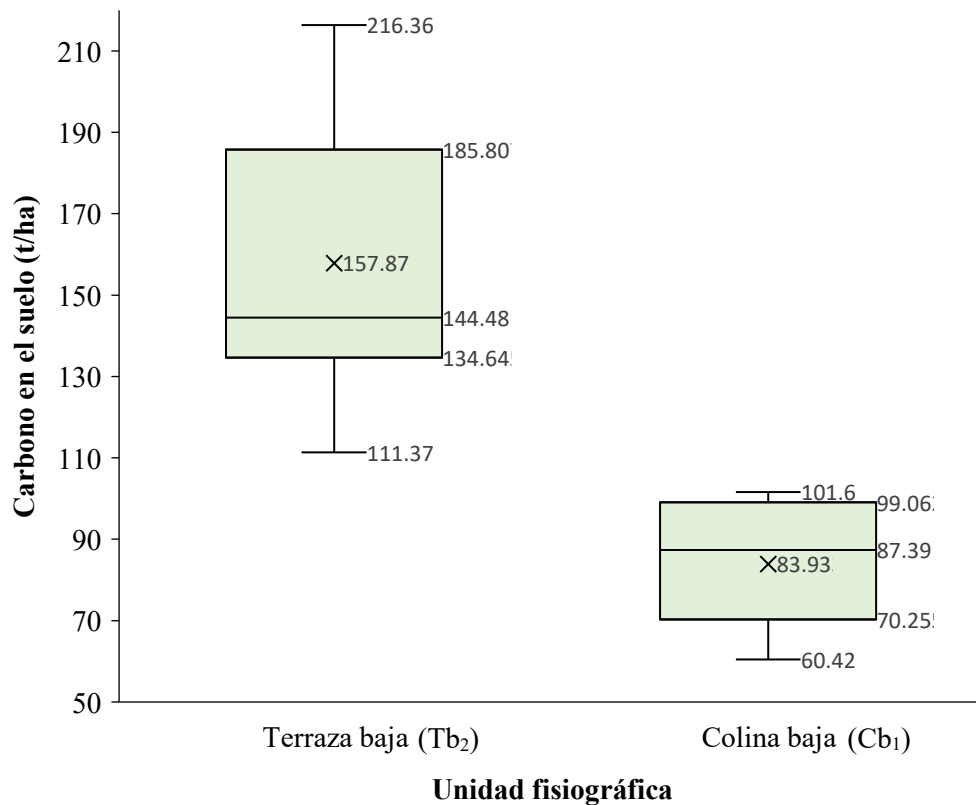
El p-valor de la prueba de T (Tabla 9) muestra que la terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) presentó mejor resultado estadísticamente en los promedios de carbono en el suelo (157,87 t/ha), densidad aparente del suelo (1,32 g/cc) y peso del volumen del suelo (1 321,08 t/ha).

**Tabla 9.** Prueba T para muestras independientes en las variables del suelo.

Variable	Grupo	N	Textura	Media	Mínimo	Máximo	pHomVar	t	p-valor
<b>Carbono en el suelo (t/ha)</b>	Terraza baja	8	-	157,87	111,37	216,36	0,065	-5,22	0,0001
	Colina baja	8	-	83,93	60,42	101,6			
<b>Dens. aparente del suelo (g/cc)</b>	Terraza baja	8	Franco Arcilloso	1,32	1,22	1,39	0,548	-2,37	0,0325
	Colina baja	8	Arcilloso	1,26	1,2	1,33			
<b>Peso de vol del suelo (t/ha)</b>	Terraza baja	8	-	1321,08	1221,88	1389,99	0,528	-2,32	0,0362
	Colina baja	8	-	1264,62	1203,31	1326,01			

\*Terraza baja (Tb<sub>2</sub>) y colina baja (Cb<sub>1</sub>)

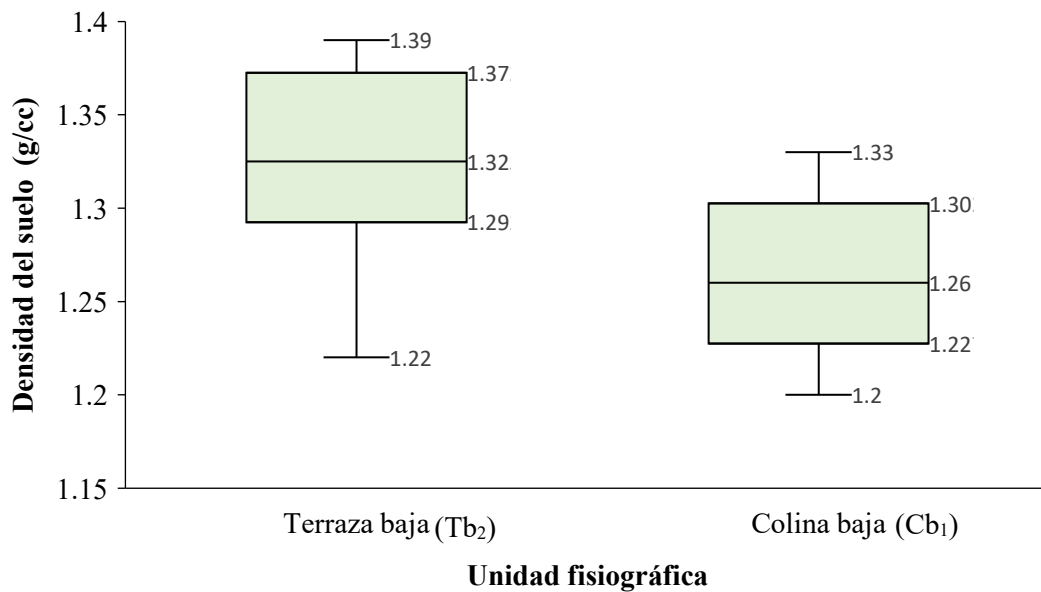
Resultados semejantes fueron observados por Dávila (2024) al encontrar diferencias estadísticas altamente significativas al estudiar el almacenamiento de carbono orgánico en el suelo de las unidades fisiográficas (terrazza alta, media, baja y baja no inundable) del fundo CIPTALD – Tulumayo. El autor atribuye a que el uso del suelo afecta de forma significativa en la captura de carbono de cada tipo fisiográfico.



**Figura 10.** Diagrama de caja de variables correspondientes al carbono en el suelo de dos unidades fisiográficas.

Se observa en la Figura 10; como valor mínimo y máximo de carbono almacenado en el suelo de terraza baja y colina baja (111,37 - 216,36 t/ha) y (60,42 - 101,60 t/ha) respectivamente. El primer cuartil, segundo cuartil, tercer cuartil y la media es 134,65; 144,48; 108,81 y 157,87 tC/ha almacenado en la terraza baja. Seguidamente se observa el primer cuartil, segundo cuartil, tercer cuartil y la media es 70,55; 87,39; 99,06 y 83,93 tC/ha almacenado en la colina baja. Asimismo se observó que el carbono en el suelo presentó un mayor aporte a la reserva de carbono en el suelo, en la fisiografía de terraza baja con 157,87 t ha<sup>-1</sup>, mostrándose valores que fluctuaron de 73,94 t ha<sup>-1</sup> en relación con la fisiografía de colina baja, estos resultados pueden deberse que en el sistemas de terraza baja se encuentran en condiciones de buen manejo y también al tiempo de instalación del presente

sistema, repercute en la alta acumulación de biomasa que se descompone conllevando a que el suelo acumule ese diferencial de carbono en relación a la otra fisiografía.

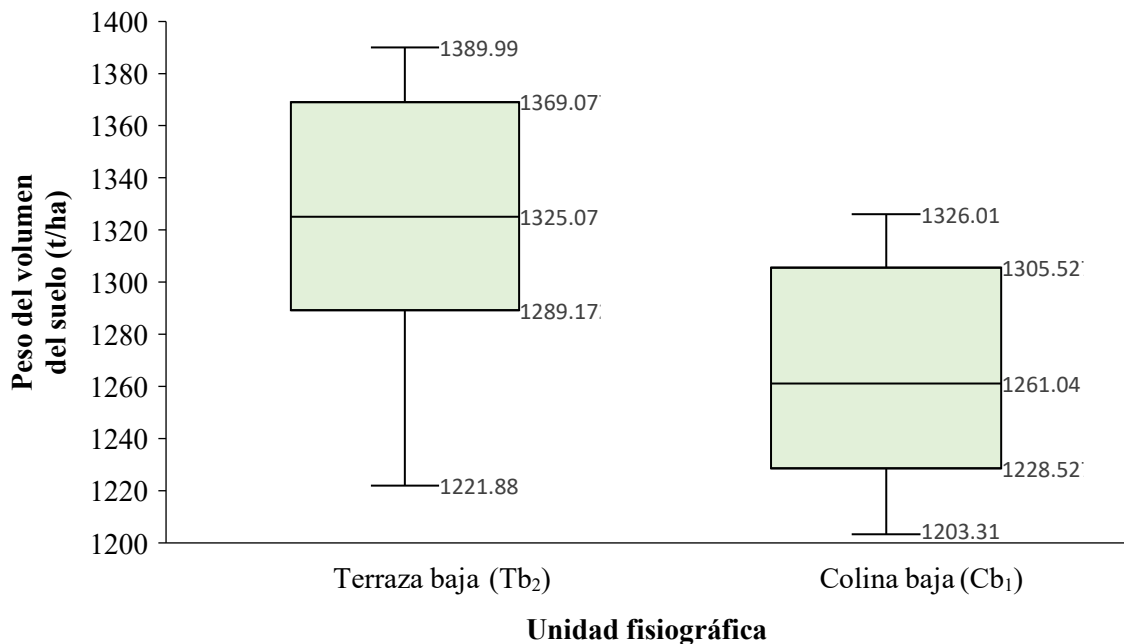


**Figura 11.** Diagrama de caja de variables correspondientes de densidad del suelo de dos unidades fisiográficas.

Se muestra en la Figura 11; como valor mínimo y máximo de la densidad aparente en el suelo de Terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) y Colina baja (Cb<sub>1</sub>) (1,22 - 1,39 g/cc) y (1,2 - 1,33 g/cc) respectivamente. El primer cuartil, segundo cuartil y tercer cuartil es 1,29; 1,32 y 1,37 g/cc con respecto a la terraza baja. Seguidamente se observa en la colina baja el primer cuartil, segundo cuartil y tercer cuartil es 1,22; 1,26 y 1,30 g/cc. Se observó asimismo que la densidad del suelo para terraza baja tuvo una sutil diferencia de 0,06 g/cc, en relación con colina baja, estos resultados nos indican está relacionada al manejo del sistema mediante el cultivo independientemente de la edad de instalación.

El análisis de la Figura 11, revela diferencias estadísticas entre las dos unidades fisiográficas (Tb<sub>2</sub> y Cb<sub>1</sub>). Cabe resaltar que es notorio verificar las diferencias de los resultados (Tabla 9) directamente entre la densidad aparente del suelo con su textura, ya que esta influye en los espacios porosos y en la cantidad de partículas de arcilla y limo, que son fundamentales para la fijación de carbono. Cambardella (1998), menciona que las partículas de materia orgánica son extremadamente reactivas a las variaciones en el uso del suelo, lo que resalta su importancia en la conservación del carbono, lo cual es relevante para discutir la densidad y la textura, esto fue evidenciado por Dávila (2023), este autor también encontró "diferencias estadísticas altamente significativas" al estudiar el almacenamiento de carbono orgánico en suelos de distintas unidades fisiográficas, atribuyéndolo al uso del suelo.

Ante lo manifestado los resultados de la densidad aparente del suelo, mencionados en la Tabla 9, indican que la Terraza baja no inundable ( $Tb_2$ ), con una textura franco-arcillosa, tuvo una densidad media de 1.32 g/cc. Por otro lado, la Colina baja ( $Cb_1$ ), con una textura arcillosa, presentó una densidad media de 1.26 g/cc. Estos hallazgos sugieren que la Terraza baja no inundable ( $Tb_2$ ) posee una densidad aparente más favorable para la acumulación de carbono en el suelo que es mayor en relación con la otra fisiografía de estudio (Tabla 9:  $Tb_2$  con 157, 87 y  $Cb_1$  con 83,93), estos resultados evidencian la capacidad de fijación de carbono orgánico en el suelo está directamente ligada a la textura, la estructura y la densidad aparente del suelo. Es decir la existencia de carbono en el suelo se relaciona con su formación a largo plazo y con el balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto (necromasa) y la mineralización. Por lo tanto, las variaciones en los niveles de carbono pueden atribuirse a la calidad del sitio de estudio, la cual está influenciada por la topografía y el tipo de suelo. Resultados congruentes fueron evidenciados por Falcão et al. (2020), al mencionar que la estructura, humedad, manejo, clima y mineralogía del suelo, además del contenido de materia orgánica, son los principales factores que impulsan la fijación de carbono en regiones tropicales. Esta referencia subraya la complejidad de la relación entre el suelo y el carbono, donde la textura juega un papel crucial.



**Figura 12.** Diagrama de caja de variables correspondientes al peso del suelo de dos unidades fisiográficas.

Se observa en la Figura 12; como valor mínimo y máximo el peso del suelo de terraza baja y colina baja (1 221,88 – 1 389,99 t/ha) y (1 203,31 – 1 326,01 t/ha) respectivamente. El peso del volumen del suelo de la terraza baja que corresponde al primer cuartil, segundo cuartil y tercer cuartil es 1 289,17; 1 325,07; y 1 369,07 t/ha respectivamente. Seguidamente se observa el primer cuartil, segundo cuartil y tercer cuartil es 1 228,52; 1 261,04 y 1 305,52 t/ha con respecto al peso del suelo de la colina baja. La mayor dispersión de los datos de peso del volumen del suelo se ha dado para el componente del sistema de terraza baja al presentar la mayor variabilidad de datos con relación al sistema de colina baja, esto puede indicar la mayor posibilidad que tienen las especies en el suelo de este sistema para poder explorar mayor volumen del suelo y la asimilación de los nutrientes.

En la unidad fisiográfica de terraza baja no inundable se ha encontrado mucho mayor carbono almacenado en el suelo en comparación con la colina baja (157,87 t/ha y 83,93 t/ha, respectivamente) y mayor materia orgánica (2,72 %) (Tabla 19) que en esta última (1,45 %) (Tabla 19). Esta diferencia de niveles puede deberse principalmente a que en la terraza baja no inundable se encuentran árboles forestales de mayor edad y diámetro, lo que contribuye a una mayor entrada de carbono al suelo por haber recibido más aportes de materia orgánica a lo largo del tiempo; asimismo, el suelo tiende a ser más profundo y con mayor capacidad de retención de humedad, lo cual favorece a la acumulación de carbono en el suelo.

Londoño (2018) estudió la cantidad de carbono bajo diferentes profundidades (0-20 cm y 20-40 cm) en bajo la unidad fisiográfica montañosa en siete áreas, en las cuales tres poseen un sistema de producción de cacao con sombra asociada, tres de manera convencional y una sin ninguna intervención antrópica, la cual está siendo protegida hace 20 años. Dichas áreas corresponden a materiales híbridos y clones (ICS 65, ICS 90, TSH 565, IMC 67, EET 8, CCN 51 y SCC 61). El autor ha encontrado que los sistemas de cultivo de cacao poseen una gran habilidad para acumular carbono en el suelo mediante la acumulación y mineralización de desechos vegetales de especies relacionadas con el cultivo. Esto se manifiesta en niveles de captura más elevados en los modelos productivos implementados bajo coberturas de 50,27 tC ha<sup>-1</sup>, dado que incrementan la aportación de materia orgánica al suelo, lo que favorece el almacenamiento de carbono a través de la acumulación en el perfil del suelo.

Pocomucha et al. (2016), evaluaron el carbono almacenado en los sistemas agroforestales de cacao CCN-51 en provincia de Leoncio Prado – Perú, donde el carbono almacenado en SAF de cacao en el suelo presentó 65,57 t C ha<sup>-1</sup>. Los autores atribuyen a que la variación de almacenamiento se debe a la asociación con especies de madera y frutas presentes.

Van y Kuikman (1990) señalan que en suelos arcillosos se verifica mayores contenidos de materia orgánica y carbono en relación con los suelos arenosos, gracias a la protección física que brinda a la materia orgánica. En este sentido, el suelo en colina baja (Cb<sub>1</sub>) presenta mayor porcentaje de Arcilla (59 %) en relación con la terraza baja no inundable que posee 27 % (Figura 6 y 7). Según Tisdall y Oades (1982) esta protección se manifiesta cuando la materia orgánica es adsorbida sobre las partículas de arcillas o limos o probablemente debido a la incrustación o cubrimiento por minerales del tamaño de las arcillas. Sánchez-Hernández et al. (2006) indican que también puede deberse porque la materia orgánica está fuera del alcance de los microorganismos al encontrarse dentro del proceso de la agregación del suelo.

Matus y Maire (2000) señalan que la acumulación de materia orgánica está vinculada a la velocidad de mineralización, y esta, a su vez, se relaciona estrechamente con el tasa de mineralización de carbono en las partículas de arcilla, así como con el cantidad de carbono en el suelo, más que con la cantidad de arcillas o de materia orgánica; en otras palabras, la acumulación de materia orgánica depende del balance entre lo que se introduce al suelo y lo que se mineraliza, además de que la mineralización está influenciada por la calidad del material orgánico que se aporta. De igual manera, el carbono en el suelo está determinado por la cantidad y calidad de los residuos que vuelven al suelo y no por su distribución (Espinoza et al., 2007). Asimismo, los suelos varían en su acidez, la composición de materia orgánica, la mineralogía de las arcillas y las propiedades del complejo intercambiable, debido a la diversidad en el uso del suelo y sus funciones ecológicas; así, la diversidad de los suelos en zonas montañosas y tropicales está regulada por la amplia gama de materiales parentales y la antigüedad de las superficies expuestas (Krasilnikov et al., 2007).

Los resultados de carbono en el suelo superan a lo reportado por Dávila (2023), quien al estudiar los niveles de carbono en distintas terrazas encontró valores entre 20,92 y 32,01 tC/ha, determinando mayor C en la terraza media. Asimismo, Zavala et al. (2018), obtuvieron resultados inferiores a lo mostrado en la presente investigación, determinando 66,16 tC/ha en el suelo del SAF menor a 8 años y 59,08 tC/ha en el suelo del SAF mayor a 16 años. Los SAF de menor edad almacenan una cantidad significativa de carbono en los suelos debido a la mayor acumulación de biomasa que el suelo presenta por la variada presencia de hojarasca, lo que genera la capacidad del suelo de almacenar el carbono en mayor cantidad en comparación con un SAF de mayor edad. Coincidiendo con lo mencionado, Salazar et al. (2018), reportó que el SAF con café de 3-5 años, tuvo mayor capacidad de almacenamiento de carbono (224,26 t/ha) que el SAF de 8-10 años (195,5 t/ha). Las diferencias responden a diversos factores; al respecto, Robert (2001) aclara que la existencia de carbono en el suelo está relacionada

principalmente con la formación del suelo a largo plazo representando un balance dinámico entre la absorción de material muerto y mineralización; de igual manera, al realizar el cambio de uso del suelo de bosque natural a plantación asociada, se genera acumulación de material orgánico cuya biomasa puede influenciar en el contenido de carbono del suelo.

En lo que respecta a la densidad del suelo, se evidenció diferencias estadísticas (Tabla 9) entre ambas fisiografías estudiadas, correspondiendo a terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) el mejor resultado de densidad aparente del suelo y carbono en el suelo. Ante ello se puede afirmar que la densidad aparente constituye un atributo esencial para los procesos de captura de carbono, dado que influye en los espacios porosos y la cantidad de partículas de arcilla y limo, que a su vez definen el área destinada para fijar y recolectar carbono. Este aspecto indica que la acumulación de materia orgánica está vinculada no solo al almacenamiento de carbono, sino también a la mejora de las características del suelo, lo que facilita un incremento en la tasa de fijación y absorción de carbono. A su vez, el estudio y reconocimiento de las condiciones del suelo, tales como el paisaje, el clima, el relieve, la litología, la taxonomía, la pendiente y las unidades fisiográficas, son factores clave para los procesos de captura de carbono, ya que afectan el comportamiento y tipo de material presente. Es importante reconocer que, en términos generales, todos los suelos tienen la capacidad de fijar carbono, aunque varían en sus niveles de captura debido a sus características particulares. Afirmaciones muy semejantes fueron observadas por Londoño (2018) al indicar que es posible notar que las densidades aparentes tienden a ser más elevadas con el incremento de la profundidad, como resultado del peso del suelo, la presencia del material vegetal en la superficie y la composición litológica que lo forma, lo que ocasiona la reducción de los espacios vacíos dentro de él, afectando así la dinámica del carbono.

Asimismo, ante lo manifestado en el párrafo anterior se puede atribuir también que la densidad en ambas fisiografías es muy similar (Tb<sub>2</sub>=1,32 g/cc y Cb<sub>1</sub> = 1,26 g/cc) las cuales corresponden a un suelo Franco arcilloso y Arcilloso, respectivamente (Figura 22 y 23). Barreuzeta et al. (2018) en su estudio de Almacenamiento del carbono en varios suelos cultivados con cacao fino de aroma y el clon CCN 51 en la provincia El Oro - Ecuador encontraron que la densidad aparente fue similar entre ambos con 1,37 g/m<sup>3</sup> los cuales son de tipo Franco limosos (CCN 51) y Franco arenosos (cacao fino de aroma). Agostini et al. (2014) señalan que la densidad aparente varía según el uso del suelo; por su parte, UNLP (2019) indica que, en suelos destinados a la agricultura extensiva, la densidad oscila entre 1,42 y 1,50 g/cm<sup>3</sup>, mientras que, en suelos poco explotados, esta cifra es inferior a 1 g/cm<sup>3</sup>. Asimismo, esto lo corrobora Alvarado y Forsythe (2005), quienes mencionan que niveles menores a 1,9 g/cc no

perjudican el desarrollo del sistema radicular de los cultivos, sino que ayudan a la utilización de actividades agrícolas que reducen la posibilidad de compactarlos y erosionarlos. Gutiérrez y Levano (2023) al evaluar el efecto que tiene los sistemas agroforestales y monocultivo de cacao sobre los indicadores físicos del suelo en el caserío Marona, distrito de Luyando, encontraron que la densidad aparente del suelo fue superior en el sistema de monocultivo de cacao, alcanzando  $1,44 \text{ g/cm}^3$ , mientras que en el sistema de cacao combinado con pino chuncho, la densidad fue inferior, registrando  $1,25 \text{ g/cm}^3$ ; esta diferencia se atribuye al tipo de manejo y uso del suelo. Cerda (2018) reportó hallazgos similares, con una densidad de  $0,9 \text{ g/cm}^3$  en cacao de monocultivo y  $0,83 \text{ g/cm}^3$  en cacao con laurel. Koicheoski (2022) también respalda estos resultados, encontrando una densidad de  $1,04 \text{ g/cm}^3$  en suelos con cultivo de cacao en un sistema agroforestal.

En la última variable, peso del volumen del suelo, se obtuvieron resultados ligeramente superiores a lo reportado por Pérez (2023), quien determinó una media de  $1\ 116,45 \text{ t/ha}$  y  $1\ 046,69 \text{ t/ha}$  en SAF's de 12 y 6 años, respectivamente.

En la Tabla 10 se presenta el total de carbono almacenado en cada unidad fisiográfica objeto de la investigación.

**Tabla 10.** Total de carbono almacenado por unidad fisiográfica.

<b>Unidad fisiográfica</b>	<b>Carbono vegetal (t/ha)</b>	<b>Carbono del suelo (t/ha)</b>	<b>Carbono total SAF (t/ha)</b>
Terraza baja no inundable (Tb <sub>2</sub> )	172,82	157,87	330,69
Colina baja (Cb <sub>1</sub> )	61,11	83,93	145,04

Por su parte, la Tabla 11 presenta los resultados de la verificación de la calidad del suelo basados en la Tabla de color de Munsell. Cabe mencionar que es una referencia a modo de resumen y que los valores se detallan en los Anexos, Tabla 20.

**Tabla 11.** Cuantificación de lombrices y coloración de suelo dentro de dos unidades fisiográficas a diferentes profundidades.

<b>Unidad fisiográfica</b>	<b>Prof. (cm)</b>	<b>Lombriz</b>	<b>Color</b>	<b>Descripción</b>
<b>Terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>)</b>	0-10	59	7,5 YR 3/2	Marrón oscuro
	10-20	25	7,5 YR 4/6	Marrón amarillento
	20-30	7	7,5 YR 5/6	Marrón amarillento
<b>Colina baja (Cb<sub>1</sub>)</b>	0-10	16	5 YR 3/1	Gris muy oscuro

10-20	5	5 YR 4/4	Marrón rojizo
20-30	1	5 YR 5/6	Rojo amarillento

El color del suelo analizado en esta investigación abarca un espectro que va desde el marrón muy oscuro hasta el marrón amarillento, gris oscuro y el rojo amarillento, lo cual sugiere la presencia de óxidos de hierro. Según lo indicado por Vargas (2009), el color de los suelos se determina por la presencia de partículas finas de óxidos de hierro (amarillo, pardo, anaranjado y rojo), materia orgánica humificada (oscura), óxidos de manganeso (negro) y el material parental. En este contexto, Loli (2012) señala que, en el cultivo de cacao, los suelos de tonalidades negras suelen ser más favorables, ya que presentan un menor grado de lixiviación. Esta afirmación es respaldada por Arvelo et al. (2017), quienes indican que el cultivo de cacao prefiere suelos con un horizonte húmico de color oscuro y uniforme. Por lo tanto, se concluye que estos suelos son menos adecuados para el cultivo de cacao. Sin embargo, Vara (2016) reportó hallazgos similares en suelos destinados al cultivo de cacao que presentan colores que varían entre pardo amarillento, pardo oscuro, pardo y marrón pálido, los cuales también muestran un buen rendimiento.

La coloración del suelo también es más oscura en la superficie y disminuye a medida que aumenta el rango de profundidad del suelo de 10-20 cm y 20-30 cm (Tabla 11). En el caso de colina baja (Cb<sub>1</sub>), se observó una coloración que va de una tonalidad gris hasta una tonalidad amarillenta; mientras que, en la terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>), la coloración determinada fue mayormente de marrón oscuro a marrón amarillento, encontrándose en el horizonte O gran descomposición de hojarasca y humificación. Según Martínez y Palacio (2010) esto también puede deberse a la tasa de descomposición de la materia orgánica, conllevando a la disposición elementos nutricionales; sumado a ello, también el pH del suelo es un atributo que influye en la descomposición de la materia orgánica. El cacao se desarrolla de manera efectiva cuando el pH varía de 6 a 6,5 (Figura 22 y 23). El alto contenido del material orgánico mejora el desarrollo del cacao porque garantizaría la presencia de micronutrientes en desenvolvimiento de la planta. Así mismo, la Tabla 9 indica que el mayor contenido de carbono se encuentra en terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>); sin embargo, la colina baja (Cb<sub>1</sub>) de cacao TSH-565 es un sistema agroforestal de 06 años, mientras que la terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) de cacao CMP-15 tiene 12 años. Cabe resaltar que resultados muy sutiles contrariamente fueron observados con el contenido de materia orgánica (Figuras 6 y 7) en la cual se evidencio un contenido de 2,01 para colina baja (Cb<sub>1</sub>) y 1.78 terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) considerando un nivel medio, siendo un nivel admisible. El cultivo de cacao requiere una cantidad adecuada

de materia orgánica que se sitúa en un rango medio-alto (Loli, 2012). Senstius, 1958 (citado por Stevenson, 1982) atribuyó los bajos niveles de materia orgánica en los suelos tropicales por la alta actividad de los microorganismos a consecuencia de las altas temperaturas.

Probablemente estos resultados se deban a que las unidades fisiográficas independientes del tiempo de instalación (edad) la textura arcillosa y franco arcillosa, respectivamente haya generado este diferencial ya que el equilibrio entre la permeabilidad al agua y retención de agua y nutrientes fueron diferentes. Sumado a la textura, también se evidencio suelos con pH moderadamente ácidos entre 6 para Cb<sub>1</sub> y 5 para Tb<sub>2</sub>, esto se debe probablemente a que las zonas provienen de áreas con deforestación, influenciadas de la altitud, morfología, topografía y a ello se unen las intensas precipitaciones que ayudan al lavado de nutrientes. Arvelo (2017) localizaron propensiones parecidas en el comportamiento del pH respecto a la altitud, agregando además la relación de este indicador con las características mineralógicas de los materiales geológicos que originaron los suelos estudiados.

Apreciación concordante de manera general presenta Cepeda (1991) pues señala que durante el proceso de limpieza, el tallo, las hojas y todas las raíces quedan en el suelo; al descomponerse, aumentan la cantidad de materia orgánica. Asimismo, la cantidad y la composición de la materia orgánica se ve afectada por la altitud, la cual se relaciona con variaciones en la vegetación, la temperatura, la humedad, las lluvias y las propiedades de estos tipos de suelo.

Según Ávila et al. (2013), en cultivos de cacao que se asocian con árboles, se observa un mayor contenido de materia orgánica, dado que los árboles contribuyen con una considerable cantidad de hojas al suelo, además de que los propios árboles de cacao aportan hojarasca, ramas y cáscaras. Sánchez et al. (2005) destacan que las parcelas con cobertura vegetal, ya sea viva o muerta, favorecen significativamente el contenido de materia orgánica en el suelo.

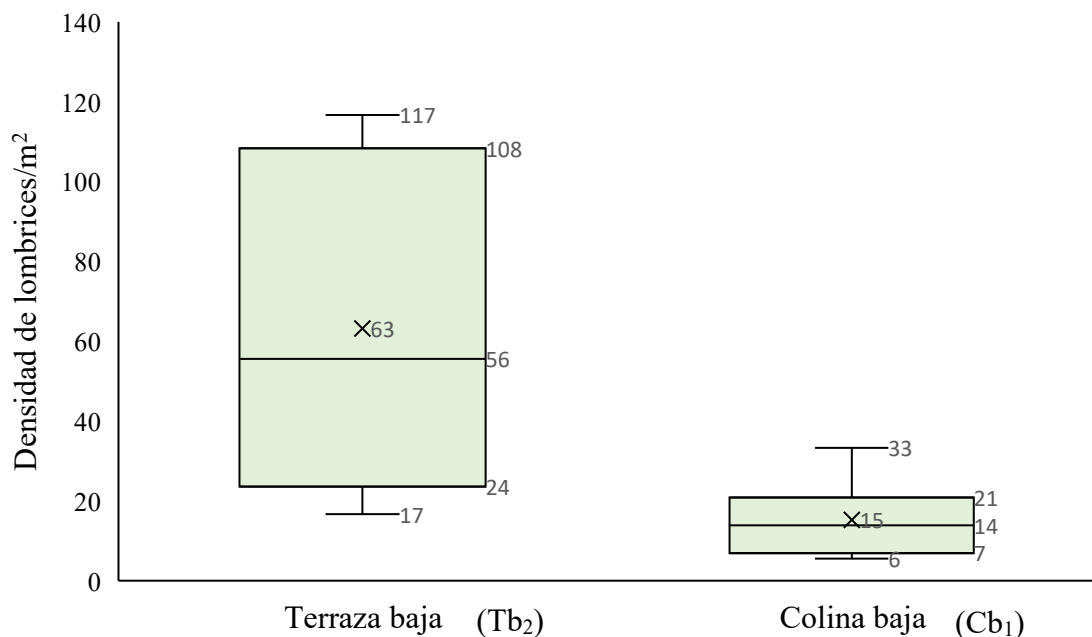
La actividad biológica por presencia de macrofauna (lombrices) es mayor en los primeros 10 cm del suelo, y se ve disminuida mientras la profundidad del suelo aumenta; en el mismo sentido, Harmand et al. (2006), indica que la materia orgánica del suelo es la fracción orgánica que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados, y que la actividad de los microorganismos depende directamente de la cantidad de carbono disponible en cualquier tiempo pues es la fuente de energía o el sustrato sobre el que estos se alimentan. En cuanto a los organismos del suelo, se encontró actividad de la mesofauna y macrofauna, contabilizando un total de 91 lombrices en los transectos de la terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) y 22 en la colina baja (Cb<sub>1</sub>), de los cuales la mayoría estuvieron a una profundidad de 0-10 cm reduciendo

gradualmente su presencia hasta los 30 cm que se tomaron las muestras de ambas unidades fisiográficas. Además de almacenar y secuestrar carbono, los sistemas agroforestales también pueden influir potencialmente en la biodiversidad del suelo subterráneo (Cardinel et al., 2019). Esta diversidad incluye organismos como las lombrices de tierra, que son una de las biotas más importantes del suelo porque influyen en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Juárez-Ramón y Fragoso, 2014; Tao et al., 2012). Sus movimientos crean poros que facilitan la dinámica de los nutrientes y el agua en el suelo (Lavelle et al., 1987).

**Tabla 12.** Intervalos de confianza de la densidad de lombrices

Variable	Media	E.E.	LI (95%)	LS (95%)
Lombrices Tb <sub>2</sub> /1m <sup>2</sup>	63	15	29	98
Lombrices Cb <sub>1</sub> /1m <sup>2</sup>	15	3	8	23
Lombrices Tb <sub>2</sub> /ha	631 945	145 076	288 896	974 994
Lombrices Cb <sub>1</sub> /ha	152 778	32 783	75 258	230 298

Se observa en la Tabla 12; la densidad de lombrices estimado a un nivel de confianza del 95% en la terraza y colina baja oscila entre (29 - 98) y (8 - 23) por metro cuadrado; también la densidad de lombrices estimado a un nivel de confianza del 95% en la terraza y colina baja oscila entre (288 896 - 974 994) y (75 258 - 230 298) por hectárea.

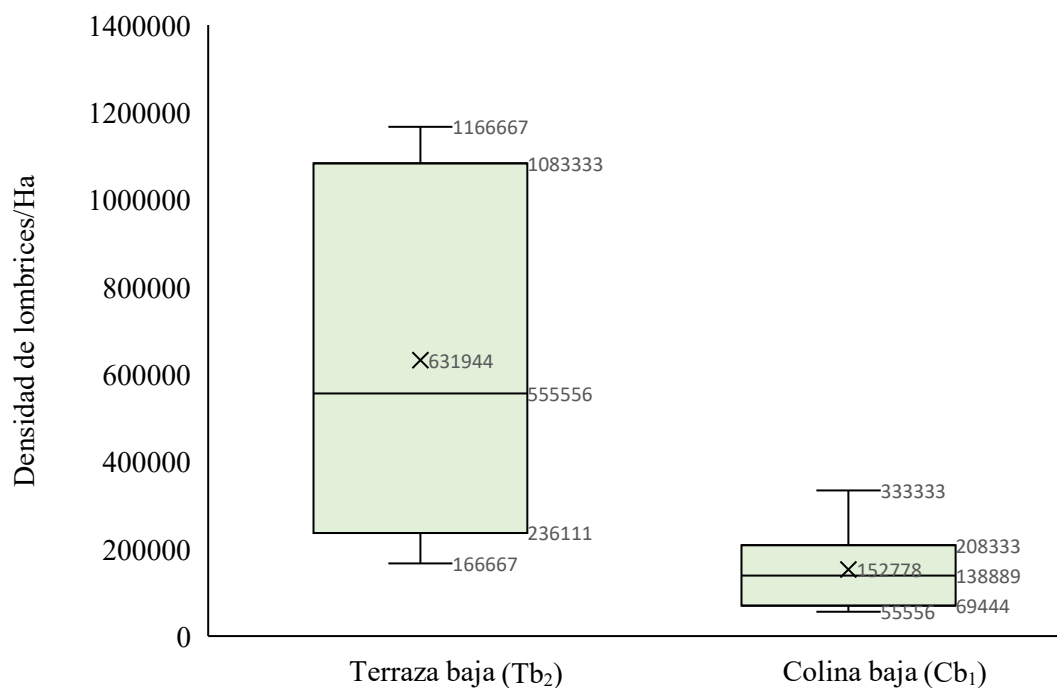


**Figura 13.** Diagrama de cajas de densidad de lombrices/m<sup>2</sup>

Por ejemplo, en un sistema agroforestal con *Solanum quitoense* y *Selenicereus megalanthus* en la amazonía ecuatoriana, se encontró que la abundancia de lombrices de tierra variaba de 73 a 114 y de 70 a 100 individuos por metro cuadrado y en un monocultivo, de 42 a 67 y de 51 a 91 individuos/m<sup>2</sup> respectivamente; de igual modo, la abundancia de lombrices de tierra depende de la temporada de muestreo, observándose más lombrices de tierra en la temporada de lluvias que en la temporada seca (Vargas et al., 2020; Vargas et al., 2022).

Se observa en la figura 13; como valor mínimo y máximo en la terraza baja y colina baja (17 - 117 lombrices/m<sup>2</sup>) y (6 - 33 lombrices/m<sup>2</sup>) respectivamente. El primer cuartil segundo cuartil, tercer cuartil y la media es 24; 56; 108 y 63 lombrices/m<sup>2</sup> en la terraza baja. Seguidamente se observa el primer cuartil, segundo cuartil, tercer cuartil y la media es 7; 14; 21 y 15 Lombrices/m<sup>2</sup> con respecto a la colina baja.

De manera general los resultados de la Figura 13 y 14, se presencia que los sistemas evaluados muestran una contribución muy positiva de la presencia de lombrices en cantidad notables para terraza baja marcando un diferencial elevados de 50 individuos y una densidad de 631 944 en media, esto probablemente se da a que este sistema también posee un diferencial marcado en el almacenamiento de carbono por la mayor presencia de biomasa y el manejo realizado durante 12 años, ya que las lombrices son especies clave para diferencias sistemas naturales de los intervenidos por el hombre.



**Figura 14.** Diagrama de cajas de densidad de lombrices/ha

Se observa en la figura 14; como valor mínimo y máximo en la terraza baja y colina baja (166 667 – 1 166 667 lombrices/ha) y (55 556 – 333 333 lombrices/m<sup>2</sup>) respectivamente. El primer cuartil, segundo cuartil, tercer cuartil y la media es 236 111; 555 556; 1 083 333 y 631 944 Lombrices/ha en la terraza baja. Seguidamente se observa el primer cuartil, segundo cuartil, tercer cuartil y la media es 69 444; 138 889; 208 333 y 152 778 Lombrices/ha con respecto a la colina baja.

Las poblaciones y la diversidad de lombrices de tierra varían entre hábitats terrestres debido a las variaciones en la humedad del suelo, la temperatura del suelo, las propiedades del suelo, la abundancia de biomasa aérea, los tipos de vegetación, la gestión del uso de la tierra y las intervenciones humanas (Blouin et al., 2013; Zhang et al., 1993).

## V. CONCLUSIONES

- El contenido de carbono almacenado por el cultivo de cacao variedad CMP-15 en la unidad fisiográfica de terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) es de 80,16 t/ha; mientras que en colina baja (Cb<sub>1</sub>), de la variedad TSH-565 se obtuvo un contenido de carbono de 47,65 t/ha.
- En la terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>), el CMP-15 almacena el 46,38 % del carbono vegetal, con 172,82 t/ha. En la colina baja (Cb<sub>1</sub>), el TSH-565 concentra el 77,64 % del carbono vegetal, con 61,11 t/ha. Tb<sub>2</sub> presenta un total de 330,69 t/ha de carbono, destacando el suelo (157,87 t/ha) y especies forestales (87,75 t/ha). Cb<sub>1</sub> acumula 145,04 t/ha, siendo en plátano (83,93 t/ha) y especies forestales (9,29 t/ha) los principales aportes. La distribución del carbono varía significativamente según la topografía y la variedad de cacao cultivada.
- Las especies arbóreas en Tb<sub>2</sub> mostraron mejores condiciones de carbono, densidad y peso del suelo por su mayor edad y biomasa. Cb<sub>1</sub> presentó baja población de lombrices, lo que evidencia deterioro de la fauna edáfica y necesidad de prácticas sostenibles. El suelo en Tb<sub>2</sub> tuvo coloración marrón oscuro, mientras que en Cb<sub>1</sub> varió de gris a amarillento, verificando que la tonalidad del suelo se oscurece en la superficie y se aclara con la profundidad. Estas diferencias reflejan el impacto de la topografía y manejo que influyen directamente en la calidad del suelo y biodiversidad del ecosistema.
- Con respecto a la macrofauna (lombrices) en la terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>) y colina baja (Cb<sub>1</sub>) se obtuvo 63 y 15 lombrices/m<sup>2</sup> y 631,944 y 152,778 lombrices/ha

## **VI. PROPUESTAS A FUTURO**

- Dado que existen diversos criterios metodológicos para calcular el almacenamiento de carbono, es importante determinar las variables posibles de un ecosistema específico pues se consideran la altitud, especies forestales asociadas, época de muestreo, entre otros.
- Realizar la valorización de los sistemas agroforestales para compensar los servicios ambientales como captura de carbono en los agricultores y/o productores.
- Continuar con los trabajos de investigación relacionados en diversos sistemas agroforestales, para buscar establecer parámetros y estándares de captura de carbono.

## VII. REFERENCIAS

- Albrecht, A. y Kandji, S. (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry system. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 99(1-3), 15-27. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880903001385?via%3Dih>
- Alegre, J; Arevalo, L; Ricse; Callo-Concha, D y Palm, Ch. (2002). Secuestro de carbono con sistemas alternativos en el Perú [Ponencia]. *IV Congreso Brasileño de Sistemas Agroflorestais*. Ilhéus, Bahía. Brasil.
- Alpizar, L., Fassbender, H. y Heuvelodp, J. (1983). *Estudios de sistemas agroforestales en el experimento central del CATIE, Turrialba*. Departamento de recursos naturales Renovables, CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/1811>
- Alvarado, A. y Forsythe, W. (2005). Variaciones de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29, 85-94. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6312831>
- Amores, F., Butler, D. Ramos, G., Sukha, D., Espin, E., Zambrano, A., Hollywood, N., Van Loo, R. y Seguine, E. (2007). *Project to determine the physical, chemical and organoleptic parameters, ICCO/06 (CFC)*. <https://www.icco.org/wp-content/uploads/2019/07/6.-Determine-the-Physical-and-Organoleptic-parameters-to-differentiate-between-Fine-and-Bulk-Cocoa-1.pdf>
- Arvelo, M., González, D., Maroto, S., Delgado, T. y Montoya, P. (2017). *Manual técnico del cultivo de cacao, prácticas latinoamericanas*. Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/6181>
- Arévalo L; Alegre, J. y Palm. (2002). *Determinación de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra*. World Agroforestry Centre y CODESU. Lima, Perú. <https://www.cifor-icraf.org/es/conocimiento/publicacion/27681/>
- Ávila, A., Campos, M., Guharay, F. y Camacho, A. (2013). *Aprendiendo e innovando sobre el manejo de fertilidad de suelos cacaoteros*. Lutheran World Relief [https://cadenacacaoca.info/CDOCDeployment/documentos/19\\_Guia\\_4\\_Fertilidad\\_de\\_Suelos.pdf](https://cadenacacaoca.info/CDOCDeployment/documentos/19_Guia_4_Fertilidad_de_Suelos.pdf)
- Barel, M. (2005). Comment fonctionne le commerce du cacao dans le monde. *Chocolat et confiserie magazine*, 410, 10-14. <https://agritrop.cirad.fr/528861/>
- Barel, M. (2009). *Du cacao au Chocolat, l'épopée d'une gourmandise*. Éditions Quae.

- Barrezueta, U. S., Luna-Romero, E. y Barrera-León, J. (2018). Almacenamiento del carbono en varios suelos cultivados con cacao en la provincia El Oro-Ecuador. *Revista Científica Agroecosistemas*, 6(1), 154-161. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes>.
- Blouin, M.; Hodson, M.E.; Delgado, E.A.; Baker, G.; Brussaard, L.; Butt, K.R.; Dai, J.; Dendooven, L.; Peres, G. y Tondoh, J.E. (2013). a review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science*, 64, 161–182. <https://doi.org/10.1111/ejss.12025>
- Brown, S. y Lugo, A. (1997.) *Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon* Interciencia 17. FAO. <http://www.fao.org/docrep/005/Y2779S/y2779s05.htm>; 05/05/ 2015)
- Cambardella, C. (1998). *Experimental verification of simulated soil organic matter pools*. In Lal L., Kimble J. M., Follett R.A., Stewart B.A. eds. Soil processes and the carbon cycle. CRC Pres. <https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=77968>
- Cardinael R, Hoefner K, Chenu C et al (2019) Spatial variation of earthworm communities and soil organic carbon in temperate agroforestry. *Biol Fertil Soils* 55:171–183. <https://doi.org/10.1007/s00374-018-1332-3>
- Centeno, J. (1992). *El Efecto Invernadero*. PLANIUC. 18 – 19: <https://catalogosiidca.csuca.org/Record/CR.UNA01000109794/Details>
- Cepeda D. (1991). *Química de Suelos*. (2 ed), Trillas S.A. [https://books.google.com.pe/books/about/Qu%C3%ADmica\\_de\\_suelos.html?id=QZG3PAAACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.pe/books/about/Qu%C3%ADmica_de_suelos.html?id=QZG3PAAACAAJ&redir_esc=y)
- Cerda, R. (2018). *Calidad de Suelos en Plantaciones de Cacao (Theobroma Cacao L.), Banano (Musa AAA) y Plátano (Musa AAB) en el Valle de Talamanca, Costa Rica* [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5551>
- Concha, J.; Alegre, J. y Pocomucha, V. (2007). Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en el departamento de San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*, 6, 75-82. <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v6n1-2/a09v6n1-2.pdf>
- Cruz, A. y Sanjurjo, C. (2016). *Cacao y la captura de CO<sub>2</sub>*. EAP Ingeniería ambiental, facultad de ingeniería y arquitectura, Universidad Peruana Unión, Filial Tarapoto.
- Chapin, F. S., Iii, P. A. Matson, y H. A. Mooney (2002). Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4419-9504-9>

- Chidiak, M., Moreyra, A. y Greco, C. (2003). *Captura de carbono y desarrollo forestal sustentable en la Patagonia Argentina*.  
<http://www.territorioscentroamericanos.org/ecoagricultura/Documents/capturadecarbonoydesarrolloforestal.pdf>
- Dávila, V. (2023). *Almacenamiento de carbono en el suelo de las unidades fisiográficas del fundo CIPTALD – Tulumayo, Tingo María – Huánuco*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS.  
<https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/573e96a1-2e1a-4818-a3a0-61501b92a088/content>
- Dixon, R.K. (1995). SAF's y gases invernadores. *Agroforestería en las Américas*, 2(7), 22-27.  
<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6822>
- Espinoza, Y., Lozano Z. y Velásquez, L. (2007). Efecto de la rotación de cultivos y prácticas de labranza sobre las fracciones de la materia orgánica del suelo. *Interciencia*, 32(8), 554-559.  
[http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442007000800012&lng=es&tylng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442007000800012&lng=es&tylng=es).
- Estrada, T. Y. X. (2023). *Carbono orgánico del suelo en cinco sistemas de uso en el centro de investigación y producción Tulumayo Anexo La Divisoria (CIPTALD), Pueblo Nuevo*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria De La Selva]. Repositorio institucional UNAS.  
<https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/46812eb2-d498-43e9-9851-b802d075eb80/content>
- Falcão, KS, Monteiro, FN, Ozório, JMB, Souza, CBS, Farias, PGS, Menezes, RS, Panachuki, E., Rosset, JS (2020). Reservas de carbono y agregación del suelo bajo diferentes sistemas de uso en el Cerrado. *Revista Brasileira de Ciências Ambientales*, 55(2), 242–255. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820200695>.
- Francis, J. (2000). Estimating biomass and carbon content of saplings in puerto rican secondary forests. *Caribbean journal of science*, 36(3), 346-350.  
<https://research.fs.usda.gov/treearch/30106>
- Food and Agriculture Organization (1998). *Agroforestería para la producción animal en América Latina*. FAO. [www.fao.org/documentos](http://www.fao.org/documentos).
- Food and Agriculture Organization (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Basado en el trabajo de Michael Robert. Institut national de recherche agronomique*. FAO.

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d8b7252e-03c2-4116-8b6c-ebd5ca3c9662/content>

- Gama-Rodrigues, A.C.D.; Barros, N.F.D.; Gama-Rodrigues, E.F.D.; Freitas, M.S.M.; Viana, A.P.; Marciano, C.R. y Carneiro, J.G.D.A. (2006) *Sistemas agroflorestais: bases científicas para o desenvolvimento sustentável*. [Tesis de pregrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro]. [https://www.researchgate.net/publication/289534112\\_Sistemas\\_Agroflorestais\\_Bases\\_Cientificas\\_para\\_o\\_Desenvolvimento\\_Sustentavel](https://www.researchgate.net/publication/289534112_Sistemas_Agroflorestais_Bases_Cientificas_para_o_Desenvolvimento_Sustentavel)
- Gayoso, J.; Guerra, J. y Alarcón, D. (2002). *Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas*. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile. <http://revistas.uach.cl/index.php/bosque/article/view/5666>
- Gifford, R. (2000). *Carbon contents of aboveground tissues of forest and woodland trees*. Canberra: Australian Greenhouse Office, National Carbon Accounting System, Technical Report No. 22. <http://www.ncl.ac.uk/press.office/press.release/item/soil-sucks-up-65-000-tonnes-of-co#.UdLWWRqDPtQ>
- Gonzales, J. (2018). *Carbono almacenado en sistemas agroforestales de Coffea arabica L. (café) de 4 y 7 años en relación con la gradiente altitudinal, Huánuco*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. [https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1476/JFGR\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1476/JFGR_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Gregorich, E. G., Drury, C.F., Ellert, B.H. y Liang, B.C. (1996). Fertilization effects on physically protected light fraction organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 60, 472 – 476. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1997.03615995006100020016x>
- Gutierrez, T. L. V. y Levano, C. J.D. (2023). Efecto de sistemas agroforestales y monocultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.), en los indicadores físico del suelo. *Revista de investigación y Amazonia*, 3 (16), 1-9. <https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/312>
- Hairiah, K.; Sitompul, S.M.; Noordwijk, M. Van. y Palm, C. (2001). *Methods for sampling carbon stocks above and below ground*. In: Noordwijk, M. Van.; Williams, S.; Verbist, B. (Ed.). *Towards integrated natural resource management in forest margins of the humid tropics: local action and global concerns*. ICRAF. ABS Lecture Note 4 A, Bogor, <https://www.cifor-icraf.org/publications/downloads/Publications/PDFS/LN01035.pdf>

- Harmand, J.M., K. Hergoualc'h, S. De-Miguel-Magaña, B. Dzib, P. Siles y Vaast, P. (2006). *Carbon sequestration in coffee agroforestry plantations of Central America*. In: ASIC, editor, 21<sup>st</sup> International Conference on Coffee Science. CIRAD, Montpellier, FRA. p. 1071-1074.  
[https://www.researchgate.net/publication/237836766\\_Carbon\\_Sequestration\\_in\\_Coffee\\_Agroforestry\\_Plantations\\_of\\_Central\\_America](https://www.researchgate.net/publication/237836766_Carbon_Sequestration_in_Coffee_Agroforestry_Plantations_of_Central_America)
- Hernández, L. (2001). *Densidad de biomasa aérea en bloques extensos del neotrópico húmedo. Caso de la Cuenca del Río Caura, Venezuela*. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1(1), 24-34.
- Higuchi, N.; Santos, J.; Ribeiro, R. J.; Minette, L. y Biot, Y. (1998). Biomassa da parte aérea da vegetação de floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia Brasileira. *Acta Amazônica* 28(2), 153-165. <https://doi.org/10.1590/1809-43921998282166>
- Houghton, R. y Woodwell, G. (1989). *Cambio Climático Global*. Investigación y Ciencia. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ipcc\\_90\\_92\\_assessments\\_far\\_full\\_report\\_sp.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ipcc_90_92_assessments_far_full_report_sp.pdf)
- Intergovernmental Panel On Climate Change (2000). *Land use, Landuse Change, and Forestry*. (IPCC).  
[https://unfccc.int/documents?f%5B0%5D=topic%3A669ysearch2=ysearch3=yitems\\_per\\_page=10yorder=field\\_document\\_type\\_1ysort=descypage=%2C%2C19](https://unfccc.int/documents?f%5B0%5D=topic%3A669ysearch2=ysearch3=yitems_per_page=10yorder=field_document_type_1ysort=descypage=%2C%2C19)
- Intergovernmental Panel On Climate Change (2004). *Climate change. spatial report on emissions scenarios*. Intergovernmental panel on climate change (IPCC). <http://grida.no/climate/ipcc>. 2015.
- Intergovernmental Panel On Climate Change (2007). *Synthesis report: Climate change 2007*. Ginebra, Suiza. (IPCC). <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/publications/ipcc-fourth-assessment-synthesis-report-climate-change-2007>
- International Centre For Research In Agroforestry (1983). *Agroforestry systems inventory (AFSI) project coordinators's report for the period September 1982 – June 1983*. (ICRAF). <http://www.worldsagroforestrycentre.org/>
- International Centre For Research In Agroforestry (2004). *Agroforestry defined*. In: International center for research in agroforestry. ICRAF. <http://www.ciesin.org/ic/icraf>
- Juárez-Ramón, D. y Fragoso, C. (2014). Comunidades de lombrices de tierra en sistemas agroforestales intercalados, en dos regiones del centro de México. *Acta Zoology.*, 30,

- 637–654. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0065-17372014000300013](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0065-17372014000300013)
- Kato, O. R.; Kato, M. S. A.; Carvalho, C. J. R.; Figueiredo, R. De O.; Camarão, A.; Sá, T. D. De A.; Denich, M. y Vielhauer, K. (2006) *Uso de agroflorestas no manejo de florestas secundárias*. In: Gama-Rodrigues, A. C. et al. (Org.). CBSAF. Campos dos Goytacazes. Anais Campos dos Goytacazes: UENF. [https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=adyid=305148ybiblioteca=vazyioybusca=\(autoria:%22CAMAR%C3%83O,%20A.%22\)yqFacets=\(autoria:%22CAMAR%C3%83O,%20A.%22\)ysort=ypaginacao=typaginaAtual=14](https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=adyid=305148ybiblioteca=vazyioybusca=(autoria:%22CAMAR%C3%83O,%20A.%22)yqFacets=(autoria:%22CAMAR%C3%83O,%20A.%22)ysort=ypaginacao=typaginaAtual=14)
- Kalacska, M.; Sanchez-Azofeifa, G.A.; Calvo-Alvarado J.C.; Quesada, M.; Rivard, B. y Janzen, D.H. (2004). Species composition, similarity and diversity in three successional stages of a seasonally dry tropical forest. *Forest Ecology and Management*, 200, 227-247. [https://www.researchgate.net/publication/222689681\\_Species\\_composition\\_similarity\\_and\\_diversity\\_in\\_three\\_successional\\_stages\\_of\\_a\\_seasonally\\_dry\\_tropical\\_forest](https://www.researchgate.net/publication/222689681_Species_composition_similarity_and_diversity_in_three_successional_stages_of_a_seasonally_dry_tropical_forest)
- Ketterings, Q.M.; Coe, R.; Noordwijk, M. Van.; Ambagau, Y. y Palm, C.A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting aboveground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146, 199-209. <https://www.scielo.sa.cr/scieloOrg/php/reference.php?pid=S1659-13212013000200011ycaller=www.scielo.sa.crylang=en>
- Koicheoski, R. (2022). *Evaluación de la calidad del suelo en cuatro sistemas de uso (cacao, plátano, café y purma) ubicados en el caserío los cedros, distrito José Crespo y Castillo* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2371>
- Krasilnikov, P. N. E., García C. y Galicia, P. M. (2007). Soil developed on different parent materials. *Terra Latinoamericana*, 25(4), 335-344. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57315558001>
- Larrea, G. (2007). *Determinación de las Reservas de Carbono en la Biomasa Aérea de Combinaciones Agroforestales de Theobroma cacao L. Departamento de San Martín*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio digital CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/1152>
- Lavelle, P.; Barois, I.; Cruz, I.; Fragoso, C.; Hernandez, A.; Pineda, A. y Rangel, P. (1987). Adaptive strategies of *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae, Oligochaeta), a Peregrine Geophagous earthworm of the humid tropics. *Biology and Fertility of Soils*, 5, 188–194. <https://doi.org/10.2307/2389178>

- Leitão-Filho, H.F.; Pagano, S.N.; Cesar, O.; Timoni, J.L. y Rueda, J.J. (1993). *Ecologia da mata atlântica em Cubatão*, SP. EDUNESP/EDUNICAMP. <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutodebotanica/1993/01/ecologia-da-mata-atlantica-em-cubatao-sp/>
- Loli, O. (2012). *Análisis de suelos y fertilización en el cultivo de cacao*. Oficina Académica de Extensión y Proyección Social de la Universidad Nacional Agraria la Molina. <https://www.agrobanco.com.pe/data/uploads/ctecnica/010-b-cacao.pdf>
- Londoño, O. J. A. (2018). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos de producción agrícola en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en ecosistema tropical. *RIDUM*, [https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/3622/Articulo%20Investigaci%C3%B3n\\_Ortiz\\_Jaime\\_2018..pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/3622/Articulo%20Investigaci%C3%B3n_Ortiz_Jaime_2018..pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Machado, P.L.O.A. (2005). Carbono no solo e a mitigação da mudança climática global. *Química Nova*, 28(2), 329-334. <https://www.scielo.br/j/qn/a/CB6Dn3MwxgLYNcdmwjYmvZF/>
- Márquez T. (2005). *Cálculo de biomasa y captura de carbono en cuatro sistemas agroforestales diferentes de café con sombra en la estación experimental del Instituto de Cultivo Tropicales*. Perú.
- Martínez, G. y Palacio, C. (2010). *Determinación de metales pesados cadmio y plomo en suelos y granos de cacao fresco y fermentado mediante espectroscopia de absorción atómica de llama*. [Tesis de pregrado, Universidad industrial de Santander]. Repositorio institucional UIS. <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/397/2/136115.pdf>.
- Matus, F. J. y C. R. Maire G. (2000). Relación entre la materia orgánica y textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agricultura Técnica*, 60(2), 112-126. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/28470>
- Mesías-Gallo, Freddy W., Hernández-Jiménez, Alberto, Vera-Macías, Leonardo R., Guzmán-Cedeño, Ángel M., Cedeño-Sacón, Ángel F., Ormaza-Cedeño, Katty P., y López-Alava, Geoconda A. (2018). Reservas de carbono orgánico en suelos de la llanura fluvial Calceta-Tosagua, Manabí, Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 39(4), 27-33. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362018000400004&lng=es&lng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362018000400004&lng=es&lng=es).
- Mondragón, G. G. L. (2019). Carbono total almacenado en una plantación de *Theobroma cacao* L. en condiciones de Ceja de Selva - Bellavista - Jaén [Tesis de pregrado, Universidad

- Nacional De Jaén]. Repositorio institucional UNJ.  
<https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/122>
- Montagnini, F. y Nair, P.K.R. (2004) Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*. 61, 281-295.  
<https://link.springer.com/article/10.1023/B:AGFO.0000029005.92691.79>
- Nair, P. K. R.; Kumar, B. M. y Nair, V. D. (2009). Agroforestry as strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 172, 10-23.  
[https://theses.cz/id/qjaeo6/zaverecna\\_prace\\_Archive.pdf](https://theses.cz/id/qjaeo6/zaverecna_prace_Archive.pdf)
- Oliveira, R.E. (1997). *Aspectos da dinâmica de um fragmento florestal em Piracicaba-SP: silvigênese e ciclagem de nutrientes*. [Tesis de maestría, Universidad de São Paulo]. Repositorio Digital USP. <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11142/tde-20191218-161539/?ylang=pt-br>
- Organização Internacional do cacau (2008). *Revisão do anexo “c” do acordo internacional do cacau*. ICCO. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/ceplac/publicacoes/chocolates-finos-e-de-aroma/cacau-fino-e-requerimentos-de-mercado>
- Ordoñez, A. (1999). Captura de carbono en un bosque templado. El caso de San Juan Nuevo. Michigan. Instituto Nacional de Ecología SEMARNAP. [http://140.84.163.2:8080/xmlui/bitstream/handle/publicaciones/168/296\\_1999\\_Captura\\_a\\_carbono\\_san\\_juan\\_Michoacan.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://140.84.163.2:8080/xmlui/bitstream/handle/publicaciones/168/296_1999_Captura_a_carbono_san_juan_Michoacan.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Osterrooht, Von M. (2002). Manejo de SAF's. *Agroecologia Hoje*, 15, 12-13.  
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/676189/1/Doc30.pdf>
- Palm, C.; Tomich, T.; Van Noordwijk, M.; Vosti, S.; Gockowski, J.; Alegre, J. E. y Verchot, L. (2004). Mitigating GHG emissions in the humid tropics: Case studies from the alternatives to slash-and-burn program (ASB). *Environment, Development and Sustainability*. 6, 145-162. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-3604-6\\_8](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-3604-6_8)
- Pérez, M. V. (2023). Efecto de la variedad y edad del cultivo de (café) *Coffea arabica* L. en el carbono almacenado y los servicios ecosistémicos de SAF's en la zona de La Divisoria. [Tesis de Maestría, Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/f52b2f93-c553-42fe-8448-b8695bf618e2>
- Pocomucha, V. S., Alegre, J. y Abregú, L. (2016) Análisis socio económico y carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Huánuco.

- Ecología Aplicada*, 15(2), 107-114.  
<https://www.redalyc.org/journal/341/34149036006/html/>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (1997). Protocolo de Kyoto para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. PNUD.  
<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- Pulrolnik, K. (2009). *Transformações do carbono no solo*. Embrapa Cerrados.  
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/664366/1/doc264.pdf>
- Puget, P., Chenu, C. y Balesdent, J. (1995). Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *European Journal of Soil Science*. 46, 449 – 459.  
<https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2389.1995.tb01341.x>
- Raul Guerra Benavides (2023). Microorganismos promovedores de crecimiento (bocashi) en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el sector de picuroyacu, castillo grande - provincia de leoncio prado.  
<https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/70120fcc-0f9c-4b9f-a44d-008a0c0a19e9/content#:~:text=Para%20la%20producci%C3%B3n%20de%20cacao%2C,necesidad%20de%20agua%20de%20la>
- Robert, M. (2001). Soil carbón sequestration for improvement land management. FAO. World Soil Resources Report N° 96. Rome.  
[http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos\\_forestales/article/download/18586/18318/19134](http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/download/18586/18318/19134)
- Santos, G.A. y Gamargo, F.A.O. (1999). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Genesis.  
<https://www.scienceopen.com/document?vid=b8192581-7d2c-4ef0-868f-ed434d09e0f8>
- Santos, A. M. (2009). *La filière cacao-chocolat au Brésil et en France (Fondements basiques pour une stratégie du cacao brésilien)*. Relatório de pós-doctorado. Moisa/Supagro. Montpellier, França. [https://theses.hal.science/tel-04069061/file/21-0035\\_Santos.pdf](https://theses.hal.science/tel-04069061/file/21-0035_Santos.pdf)
- Santos, G. B. M., Santos, P. B. M. y Santos, A. M. (2019). *Cacau fino: conceitos e evolução no Brasil*. Ilhéus: CEPLAC/CEPEC: e UESC - Universidade Estadual de Santa Cruz.  
<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/ceplac/publicacoes/chocolates-finos-e-de-aroma/cacaufino-conceitos-e-evolucao>.
- Sánchez, L., Parra, D., Gamboa, E. y Rincón, J. (2005). Rendimiento de una plantación comercial de cacao ante diferentes dosis de fertilización con NPK en el sureste del

- estado Táchira, Venezuela. *Bioagro*, 17(2), 119-122. [http://www.ucla.edu.ve/bioagro/Rev17\(2\)/8.%20Rendimiento%20de%20una.pdf](http://www.ucla.edu.ve/bioagro/Rev17(2)/8.%20Rendimiento%20de%20una.pdf)
- Sánchez-Hernández, R., V. M. Ordaz-Chaparro, G. S. Benedicto-Valdés, C. I. Hidalgo-Moreno y D. J. Palma-López. (2006). Regeneración estructural de un suelo arcilloso por aportes de vermicompost en la Chontalpa, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 22(1), 13-26. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=15402202>
- Salazar, A., Saucedo, J., y Méndez, L. (2018). Evaluación de la captura de carbono en suelos de sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica* L.) en los distritos Mariscal Benavides y Longar, provincia Rodríguez de Mendoza, departamento de Amazonas. *Revista de Investigación Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 1(1) 1-7. <http://revistas.untrm.edu.pe/index.php/CNI/article/view/261/906#>
- Smith, N.; Dubois, J.; Current, E.; Lutz, E. y Clement, C. (1998). *Experiências agroflorestais na Amazônia Brasileira: restrições e oportunidades*. Programa Piloto para a Proteção das Florestas Tropicais do Brasil. [https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=adybiblioteca=vaziybusca=\(autor:22LUTZ,%20E.%22\)](https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=adybiblioteca=vaziybusca=(autor:22LUTZ,%20E.%22))
- Souza, J. A. y Davide, A. C. (2001). Deposição de serrapilheira e nutrientes em uma mata não minerada e em plantações de bracatinga (*Mimosa scabrella*) e de eucalipto (*Eucalyptus saligna*) em áreas de mineração de bauxita. *Cerne*, 7(1), 101-113. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74470109>
- Tao, Y.; Gu, W.; Chen, J.; Tao, J.; Yj, X. y Zhang, H. (2012). The influence of land use practices on earthworm communities in saline agriculture soils of the west Coast Region of China's Bohai Bay. *Plant Soil and Environment*. 59, 8–13.
- Timoteo, K.; Remuzgo, J.; Valdivia, L., Sales, F.; García, D., Abanto, C. (2016). Estimación del carbono almacenado en tres sistemas agroforestales durante el primer año de instalación en el departamento de Huánuco. *Folia amazónica*. 25 (1). 45 – 54. <https://revistas.iiap.gob.pe/index.php/foliaamazonica/article/view/382>
- Tisdall, J. M. y J. M. Oades. (1982). Organic matter and water stable aggregates in soils. *J. Journal of Soil Science*. 33(2), 141-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>
- United Nations Environment Programme (1992). *Los gases que producen el efecto invernadero*. Sánchez – Vélez y Gerón D. traductores. Universidad Autónoma de Chapingo. México UNEP. <https://www.tdx.cat/bitstream/10803/9637/2/heli.pdf.txt>

- Valenzuela, T. (2001). *Estimación de secuestro de carbono en bosques naturales de Oyamel (Abies religiosa) en el sur del Distrito Federal*. [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma Chapingo].
- Van Veen, J. A. y P. J. Kuikman. (1990). Soil structural aspects of decomposition of organic matter by micro-organisms. *Biogeochemistry*, 11, 213-233. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00004497>
- Vara, J. (2016). *Evaluación de la aptitud de los suelos para el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) en la comunidad El Rocano del Cantón Arenillas de la provincia de El Oro* [Tesis de grado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. Repositorio Institucional UCSG. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/6934>
- Vargas, R. (Ed.). (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b54d0348-dfce-413c-bd5d142b3a14a049/content>
- Vargas, Y.; Viera, W.; Díaz, A.; Tinoco, L.; Macas, J.; Caicedo, C.; Almeida, M. y Vásquez-Castillo, W. (2022). Contribution of agroforestry systems in the cultivation of naranjilla (*Solanum quitoense*) grown in the Amazon Region of Ecuador. *Applied Sciences*, 12(20), 10637. <https://doi.org/10.3390/app122010637>
- Vargas, T. Y. B.; Pico, J. T.; Díaz, A.; Sotomayor Akopyan, D.A.; Burbano, A.; Caicedo, C.; Paredes Andrade, N.; Congo, C.; Tinoco, L.A.; Bastidas, S. (2020). *Manual del Cultivo de Pitahaya para la Amazonía Ecuatoriana*; INIAP, Estación Experimental Central de la Amazonía, Programa Nacional de Fruticultura. <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5551>
- Vergara, N. T. (1985). Sistemas agroforestales: una cartilla. *Unasyuva*, 37(147). <https://www.fao.org/4/r1340s/r1340s05.htm#sistemas>
- Werneck, M. S., Pedralli, G. y Gieseke, L. F. (2001). Produção de serrapilheira em três trechos de uma floresta semidecidual com diferentes graus de perturbação na Estação Ecológica de Tripuí, Ouro Preto, MG. *Revista Brasileira de Botânica*. 24, 195-198. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-84042001000200009>
- Zhang, H. y Schrader, S. (1993). Earthworm effects on selected physical and chemical properties of soil aggregates. *Biology and Fertility of Soils*, 15, 229–234. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00361617>

- Zavala, J. (2015). *Influencia de la edad del cultivo del (cacao) Theobroma cacao L, bajo sistemas agroforestales en la captura y almacenamiento del carbono en Tingo María*, [Tesis Doctoral, Universidad Nacional Federico Villareal].
- Zavala, J., Zavala, S. y Mansilla, L. (2018). Estimación de la biomasa y carbono almacenado en un sistema agroforestal del cafetal de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. *Revista de Investigación y Amazonía*, 8(5), 1-8. <https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/200>.
- Zavala, J. y Vega, L. (2021). *Captura y almacenamiento de carbono en distintas edades de cacao bajo sistemas agroforestales de Tingo María*. [Tesis de maestría, Universidad Hermilio Valdizan]. Repositorio digital UNHEVAL. <https://www.unheval.edu.pe/portal/wp-content/uploads/2021/10/Zavala-Vega.-2021.pdf>

## **VIII. ANEXOS**

**Tabla 13.** Biomasa y carbono del cacao en las parcelas de Irazola.

Localidad	Trans	Cacao	Diam (cm)	Biomasa (kg/arb)	Biomasa (kg/100m <sup>2</sup> )	Biomasa (t/ha)	Carbono (t/ha)
Terraza alta no inundable (Tb <sub>1</sub> )	A	1	17,19	157,95			
		2	18,46	189,25			
		3	14,96	111,16			
		4	22,28	304,55			
		5	20,69	252,48			
		6	17,51	165,45			
		7	18,46	189,25			
		8	17,83	173,17			
		9	15,92	130,00			
		10	9,55	35,70			
		11	12,73	73,92			
		12	20,69	252,48			
		13	17,51	165,45			
		14	18,46	189,25			
		15	17,83	173,17			
				16	15,92	130,00	2693,25
Terraza baja no inundable (Tb <sub>2</sub> )	B	1	12,10	64,93			
		2	15,92	130,00			
		3	16,55	143,56			
		4	11,78	60,69			
		5	14,32	99,58			
		6	14,96	111,16			
		7	14,64	105,28			
		8	11,14	52,73			
		9	14,32	99,58			
		10	12,10	64,93			
		11	13,37	83,63			
		12	14,32	99,58			
		13	14,01	94,08			
		14	15,92	130,00			
		15	13,05	78,69			
				16	13,05	78,69	1497,12
Terraza alta inundable (Tb <sub>3</sub> )	C	1	14,64	105,28			
		2	15,92	130,00			
		3	15,92	130,00			
		4	14,64	105,28			
		5	12,41	69,34			
		6	14,64	105,28			
		7	12,41	69,34	1684,09	168,41	75,78

	8	18,78	197,61			
	9	17,51	165,45			
	10	10,82	49,00			
	11	12,73	73,92			
	12	10,19	42,03			
	13	12,41	69,34			
	14	14,64	105,28			
	15	12,41	69,34			
	16	18,78	197,61			
	1	14,01	94,08			
	2	11,46	56,62			
	3	8,59	27,35			
	4	9,55	35,70			
	5	11,46	56,62			
	6	13,37	83,63			
	7	9,87	38,79			
<b>D</b>	8	9,87	38,79			
	9	9,87	38,79			
	10	9,55	35,70			
	11	15,92	130,00			
	12	10,82	49,00			
	13	11,46	56,62			
	14	13,37	83,63			
	15	9,87	38,79			
	16	13,37	83,63	947,76	94,78	42,65
	1	11,78	60,69			
	2	13,69	88,76			
	3	14,96	111,16			
	4	11,78	60,69			
	5	14,96	111,16			
	6	9,55	35,70			
	7	14,32	99,58			
<b>E</b>	8	19,42	215,00			
	9	13,05	78,69			
	10	16,87	150,65			
	11	14,32	99,58			
	12	15,92	130,00			
	13	17,51	165,45			
	14	14,96	111,16			
	15	19,10	206,20			
	16	14,32	99,58	1824,09	182,41	82,08
	1	14,64	105,28			
<b>F</b>	2	21,01	262,43			
	3	19,10	206,20	2132,75	213,28	95,97

	4	15,28	117,25			
	5	14,32	99,58			
	6	14,32	99,58			
	7	10,82	49,00			
	8	11,78	60,69			
	9	17,19	157,95			
	10	15,28	117,25			
	11	14,32	99,58			
	12	17,51	165,45			
	13	17,19	157,95			
	14	14,96	111,16			
	15	17,51	165,45			
	16	17,19	157,95			
	<hr/>					
	1	13,37	83,63			
	2	17,83	173,17			
	3	11,46	56,62			
	4	12,41	69,34			
	5	16,87	150,65			
	6	16,87	150,65			
	7	13,37	83,63			
<b>G</b>	8	15,60	123,53	1735,76	173,58	78,11
	9	13,69	88,76			
	10	11,46	56,62			
	11	14,01	94,08			
	12	15,28	117,25			
	13	15,92	130,00			
	14	16,87	150,65			
	15	13,37	83,63			
	16	15,60	123,53			
	<hr/>					
	1	16,23	136,68			
	2	15,60	123,53			
	3	12,10	64,93			
	4	13,69	88,76			
	5	19,10	206,20			
	6	11,78	60,69			
	7	16,55	143,56			
<b>H</b>	8	13,69	88,76	1735,91	173,59	78,12
	9	16,23	136,68			
	10	14,01	94,08			
	11	12,41	69,34			
	12	16,55	143,56			
	13	13,69	88,76			
	14	16,23	136,68			
	15	12,10	64,93			

		16	13,69	88,76			
		1	14,64	105,28			
		2	12,73	73,92			
		3	13,37	83,63			
		4	10,82	49,00			
		5	7,32	18,23			
		6	9,55	35,70			
		7	15,28	117,25			
	<b>I</b>	8	6,05	11,24	954,56	95,46	42,96
		9	8,91	29,98			
		10	10,03	40,39			
		11	9,55	35,70			
		12	15,28	117,25			
		13	6,68	14,48			
		14	12,73	73,92			
		15	14,32	99,58			
		16	10,82	49,00			
		1	13,37	83,63			
		2	7,48	19,25			
		3	11,94	62,79			
		4	11,78	60,69			
		5	10,82	49,00			
		6	19,10	206,20			
		7	11,14	52,73			
	<b>J</b>	8	12,73	73,92	1249,45	124,95	56,23
		9	11,78	60,69			
		10	7,00	16,29			
		11	10,19	42,03			
		12	11,94	62,79			
		13	11,78	60,69			
		14	10,82	49,00			
		15	19,10	206,20			
		16	16,55	143,56			
		1	7,00	16,29			
		2	10,19	42,03			
		3	8,28	24,86			
		4	9,87	38,79			
		5	12,41	69,34			
	<b>K</b>	6	13,69	88,76	980,17	98,02	44,11
		7	9,23	32,77			
		8	10,50	45,44			
		9	14,48	102,41			
		10	16,23	136,68			
		11	12,41	69,34			

**Colina  
baja no  
inundable  
(Cb<sub>1</sub>)**

	12	14,01	94,08			
	13	9,87	38,79			
	14	9,23	32,77			
	15	10,50	45,44			
	16	14,48	102,41			
	1	7,64	20,30			
	2	10,19	42,03			
	3	7,00	16,29			
	4	6,68	14,48			
	5	9,87	38,79			
	6	6,68	14,48			
	7	9,23	32,77			
<b>L</b>	8	7,96	22,51	516,42	51,64	23,24
	9	9,87	38,79			
	10	7,96	22,51			
	11	11,14	52,73			
	12	9,23	32,77			
	13	12,10	64,93			
	14	8,28	24,86			
	15	9,23	32,77			
	16	10,50	45,44			
	1	10,82	49,00			
	2	14,01	94,08			
	3	15,28	117,25			
	4	13,69	88,76			
	5	9,55	35,70			
	6	16,55	143,56			
	7	13,37	83,63			
<b>M</b>	8	14,96	111,16	1652,77	165,28	74,37
	9	19,74	224,03			
	10	8,91	29,98			
	11	12,41	69,34			
	12	15,28	117,25			
	13	16,55	143,56			
	14	13,37	83,63			
	15	14,96	111,16			
	16	16,87	150,65			
	1	12,10	64,93			
	2	12,41	69,34			
	3	14,32	99,58			
<b>N</b>	4	13,69	88,76	1043,48	104,35	46,96
	5	14,32	99,58			
	6	10,82	49,00			
	7	11,78	60,69			

	8	9,55	35,70			
	9	6,37	12,80			
	10	13,69	88,76			
	11	14,32	99,58			
	12	10,82	49,00			
	13	9,23	32,77			
	14	11,14	52,73			
	15	13,37	83,63			
	16	11,46	56,62			
	1	11,46	56,62			
	2	13,05	78,69			
	3	12,41	69,34			
	4	7,96	22,51			
	5	12,73	73,92			
	6	17,51	165,45			
	7	13,69	88,76			
<b>O</b>	8	9,23	32,77	1106,56	110,66	49,80
	9	16,55	143,56			
	10	8,28	24,86			
	11	13,05	78,69			
	12	12,41	69,34			
	13	7,96	22,51			
	14	12,73	73,92			
	15	11,46	56,62			
	16	10,82	49,00			
	1	12,73	73,92			
	2	10,50	45,44			
	3	13,69	88,76			
	4	8,91	29,98			
	5	10,50	45,44			
	6	12,10	64,93			
	7	9,55	35,70			
<b>P</b>	8	13,37	83,63	966,48	96,65	43,49
	9	8,91	29,98			
	10	10,50	45,44			
	11	12,10	64,93			
	12	9,55	35,70			
	13	12,41	69,34			
	14	12,41	69,34			
	15	14,64	105,28			
	16	13,05	78,69			

**Tabla 14.** Biomasa y carbono arbóreo – especies forestales en las parcelas de Irazola.

Localidad	Transecto	Especie	Diámetro (cm)	Biomasa (kg/árbol)	Biomasa (kg/100m <sup>2</sup> )	Biomasa (ton/ha)	Carbono (ton/ha)
Tb <sub>2</sub>	A	Shimbillo	42,97	1604,37	1604,37	160,44	72,20
	B	Caoba	19,10	206,20	206,20	20,62	9,28
	C	Caoba	21,01	262,43	2356,88	235,69	106,06
		Caoba	47,75	2094,45			
	D	Caoba	41,38	1458,27	3217,26	321,73	144,78
		Caoba	44,56	1758,99			
	E	Caoba	37,88	1165,99	2307,34	230,73	103,83
		Shimbillo	37,56	1141,36			
	F	Caoba	40,11	1347,40	1347,40	134,74	60,63
	G	Caoba	50,93	2465,95	2465,95	246,59	110,97
H	Caoba	47,75	2094,45	2094,45	209,45	94,25	
Cb <sub>1</sub>	I	Capirona	13,37	83,63	243,49	24,35	10,96
		Capirona	7,00	16,29			
		Guaba	16,55	143,56			
	J	Pumaquiro	6,37	12,80	12,80	1,28	0,58
	K	Capirona	12,41	69,34	508,91	50,89	22,90
		Guaba	13,37	83,63			
		Capirona	12,73	73,92			
		Capirona	6,37	12,80			
		Capirona	7,96	22,51			
		Pumaquiro	13,69	88,76			
		Pumaquiro	17,19	157,95			
	L	Bolaina	23,24	338,66	338,66	33,87	15,24
	M	Guaba	14,64	105,28	188,91	18,89	8,50
		Pumaquiro	13,37	83,63			
	N	Pumaquiro	14,32	99,58	99,58	9,96	4,48
	Ñ	Guaba	15,28	117,25	117,25	11,72	5,28
O	Capirona	8,91	29,98	141,15	14,11	6,35	
	Guaba	14,96	111,16				

**Tabla 15.** Biomasa y carbono del cultivo de plátano en las parcelas de Irazola.

Fisiografía	Transecto	Especie	Diámetro (cm)	Biomasa (kg/árbol)	Biomasa (kg/100m <sup>2</sup> )	Biomasa (ton/ha)	Carbono (ton/ha)	
<b>Terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>)</b>	A	Plátano	10,82	4,89	24,35	2,43	1,10	
		Plátano	9,87	4,01				
		Plátano	12,41	6,55				
		Plátano	14,32	8,89				
	B	Plátano	15,60	10,67	47,28	4,73	2,13	
		Plátano	19,10	16,43				
		Plátano	19,10	16,43				
		Plátano	9,55	3,74				
	D	Plátano	6,68	1,75	13,86	1,39	0,62	
		Plátano	16,55	12,11				
	<b>Colina baja (Cb<sub>1</sub>)</b>	G	Plátano	7,96	2,54	2,54	0,25	0,11
		I	Plátano	6,37	1,58	5,59	0,56	0,25
Plátano			9,87	4,01				
J		Plátano	8,59	2,99	15,74	1,57	0,71	
		Plátano	9,87	4,01				
		Plátano	7,96	2,54				
		Plátano	12,10	6,20				
M		Plátano	8,59	2,99	30,61	3,06	1,38	
		Plátano	10,82	4,89				
		Plátano	7,64	2,32				
		Plátano	7,64	2,32				
		Plátano	14,01	8,48				
	Plátano	7,00	1,93					
	Plátano	13,37	7,68					
N	Plátano	7,96	2,54	37,52	3,75	1,69		
	Plátano	11,78	5,86					
	Plátano	10,82	4,89					
	Plátano	12,10	6,20					
	Plátano	9,87	4,01					
	Plátano	13,69	8,07					
	Plátano	10,50	4,59					
	Plátano	4,14	0,63					
Ñ	Plátano	4,46	0,74	17,37	1,74	0,78		
	Plátano	5,41	1,11					
	Plátano	14,01	8,48					
	Plátano	10,19	4,30					
O	Plátano	9,23	3,48	20,14	2,01	0,91		
	Plátano	11,46	5,52					
	Plátano	13,37	7,68					
	Plátano	8,59	2,99					
	Plátano	6,05	1,41					
		Plátano	7,96	2,54				

Tabla 16. Biomasa y carbono herbáceo-arbustivo de las parcelas de Irazola

Fisiografía	Transecto	PFT(g)	PFM(g)	PSM(g)	Biomasa (t/ha) por muestra	Biomasa (t/ha) por transecto	Carbono (t/ha)	
Terraza baja no inundable (Tb <sub>2</sub> )	A1	373,75	98,52	22,35	0,85	1,94	0,87	
	A2	840,26	60,53	21,74	3,02			
	B1	260,75	85,00	14,22	0,44	0,32	0,14	
	B2	94,81	94,81	19,41	0,19			
	C1	122,56	79,06	14,25	0,22	0,27	0,12	
	C2	171,13	107,48	20,32	0,32			
	D1	200,57	77,30	10,63	0,28	0,21	0,09	
	D2	105,48	105,48	13,97	0,14			
	E1	78,61	78,61	16,73	0,17	0,24	0,11	
	E2	175,02	89,35	15,43	0,30			
	F1	337,90	87,26	10,27	0,40	0,56	0,25	
	F2	273,55	72,88	19,11	0,72			
	G1	320,82	86,43	27,37	1,02	0,85	0,38	
	G2	284,27	82,38	19,38	0,67			
	H1	98,54	98,54	21,27	0,21	0,28	0,13	
	H2	189,40	87,09	15,45	0,34			
	Colina baja (Cb <sub>1</sub> )	I1	259,10	94,50	19,80	0,54	1,69	0,76
		I2	418,60	59,10	39,90	2,83		
J1		334,20	62,70	12,40	0,66	1,56	0,7	
J2		526,80	89,80	42,00	2,46			
K1		277,40	50,70	11,70	0,64	0,53	0,24	
K2		183,90	88,80	20,50	0,42			
L1		344,80	54,80	14,70	0,92	1,01	0,45	
L2		419,60	70,40	18,40	1,10			
M1		226,20	92,50	29,00	0,71	0,74	0,33	
M2		306,30	73,00	18,00	0,76			
N1		243,25	84,21	36,63	1,06	1,2	0,54	
N2		371,78	91,34	32,85	1,34			
O1		192,34	76,09	15,48	0,39	0,44	0,2	
O2		185,57	80,26	21,39	0,49			
P1	358,87	96,30	27,41	1,02	0,79	0,36		
P2	229,34	73,89	17,82	0,55				

Tabla 17. Biomasa y carbono de la hojarasca de las parcelas de Irazola.

Fisiografía	Transecto	PFT(g)	PFM(g)	PSM(g)	Biomasa (t/ha) por muestra	Biomasa (t/ha) por transecto	Carbono (t/ha)
Terraza baja no inundable (Tb <sub>2</sub> )	A1	251,25	120,49	56,35	4,70	3,36	1,51
	A2	111,56	45,35	20,53	2,02		
	B1	300,10	66,89	31,51	5,65	4,87	2,19
	B2	311,62	45,98	15,04	4,08		
	C1	461,43	37,14	19,06	9,47	6,03	2,71
	C2	143,11	73,58	33,34	2,59		
	D1	377,48	111,49	57,59	7,80	7,21	3,24
	D2	577,04	48,76	13,97	6,61		
	E1	658,35	79,12	28,96	9,64	10,90	4,91
	E2	822,91	86,43	31,94	12,16		
	F1	356,64	97,26	41,59	6,10	6,39	2,88
	F2	360,06	59,90	27,76	6,67		
	G1	312,64	92,16	31,76	4,31	3,70	1,67
	G2	293,37	85,39	22,51	3,09		
	H1	169,32	72,53	15,48	1,45	1,40	0,63
	H2	158,15	68,81	14,62	1,34		
Colina baja (Cb <sub>1</sub> )	I1	93,70	64,80	43,20	2,50	2,88	1,30
	I2	207,00	38,40	15,10	3,26		
	J1	485,80	64,50	42,00	12,65	10,14	4,56
	J2	277,30	66,50	45,70	7,62		
	K1	163,00	65,20	46,00	4,60	5,47	2,46
	K2	200,00	48,60	38,50	6,34		
	L1	208,00	54,30	34,20	5,24	5,28	2,38
	L2	178,30	46,10	34,30	5,31		
	M1	248,90	34,10	16,50	4,82	5,55	2,50
	M2	195,60	43,80	35,10	6,27		
	N1	98,40	98,40	42,12	1,68	2,55	1,15
	N2	235,64	87,35	31,57	3,41		
	O1	196,08	74,89	22,40	2,35	2,12	0,95
	O2	201,59	78,91	18,46	1,89		
	P1	167,33	82,34	21,95	1,78	1,81	0,81
	P2	229,74	88,42	17,69	1,84		

**Tabla 18.** Biomasa y carbono radicular de las parcelas de Irazola.

Fisiografía	Trans	Prof. (cm)	PFT(g)	PFM(g)	PSM(g)	PSR(kg)	Biomasa	Biomasa	Biomasa (t/ha)	Carbono (t/ha)
							por estrato (t/ha)	por muestra (t/ha)		
Terraza baja no inundable (Tb <sub>2</sub> )	A1	0-10	55,36	55,36	28,17	0,02817	1,13		1,34	0,60165
	A1	10-20	27,86	27,86	12,53	0,01253	0,50	2,11		
	A1	20-30	22,48	22,48	12,15	0,01215	0,49			
	A2	0-10	18,13	18,13	8,92	0,00892	0,36		1,96	0,8829
	A2	10-20	9,70	9,70	4,28	0,00428	0,17	0,56		
	A2	20-30	2,40	2,40	0,80	0,0008	0,03			
	B1	0-10	87,50	87,50	39,76	0,03976	1,59		1,96	0,8829
	B1	10-20	13,60	13,60	6,72	0,00672	0,27	1,90		
	B1	20-30	3,56	3,56	1,05	0,00105	0,04			
	B2	0-10	113,57	113,57	45,60	0,0456	1,82		1,96	0,8829
	B2	10-20	11,47	11,47	4,06	0,00406	0,16	2,02		
	B2	20-30	2,82	2,82	0,91	0,00091	0,04			
	C1	0-10	35,97	35,97	16,72	0,01672	0,67		2,06	0,927
	C1	10-20	30,92	30,92	12,41	0,01241	0,50	1,31		
	C1	20-30	7,13	7,13	3,57	0,00357	0,14			
	C2	0-10	85,55	85,55	38,07	0,03807	1,52		2,06	0,927
	C2	10-20	77,98	77,98	32,21	0,03221	1,29	2,81		
	C2	20-30	2,60	2,60	0,02	0,00002	0,00			
	D1	0-10	68,19	68,19	27,04	0,02704	1,08		2,28	1,02546
	D1	10-20	5,88	5,88	2,21	0,00221	0,09	1,23		
	D1	20-30	3,65	3,65	1,42	0,00142	0,06			
	D2	0-10	159,71	159,71	54,02	0,05402	2,16		2,28	1,02546
	D2	10-20	55,35	55,35	20,25	0,02025	0,81	3,33		
	D2	20-30	23,24	23,24	9,00	0,009	0,36			
	E1	0-10	109,76	109,76	46,73	0,04673	1,87		2,04	0,91782
	E1	10-20	10,16	10,16	3,02	0,00302	0,12	2,08		
	E1	20-30	7,02	7,02	2,21	0,00221	0,09			
E2	0-10	182,23	61,57	34,93	0,02569	1,03		2,04	0,91782	
E2	10-20	72,43	72,43	20,17	0,02017	0,81	2,00			
E2	20-30	10,40	10,40	4,16	0,00416	0,17				
F1	0-10	100,90	100,90	47,94	0,04794	1,92		2,61	1,17657	
F1	10-20	17,85	17,85	7,50	0,0075	0,30	2,43			
F1	20-30	10,90	10,90	5,22	0,00522	0,21				
F2	0-10	144,60	144,60	57,85	0,05785	2,31		2,61	1,17657	
F2	10-20	23,65	23,65	10,42	0,01042	0,42	2,80			
F2	20-30	4,21	4,21	1,80	0,0018	0,07				
G1	0-10	49,36	49,36	14,02	0,01402	0,56		1,85	0,83448	
G1	10-20	4,69	4,69	1,21	0,00121	0,05	0,64			
G1	20-30	2,36	2,36	0,84	0,00084	0,03				

	G2	0-10	126,49	126,49	58,72	0,05872	2,35			
	G2	10-20	35,03	35,03	12,63	0,01263	0,51	3,07		
	G2	20-30	18,36	18,36	5,30	0,0053	0,21			
	H1	0-10	94,51	94,51	27,61	0,02761	1,10			
	H1	10-20	14,72	14,72	4,28	0,00428	0,17	1,40		
	H1	20-30	9,50	9,50	3,12	0,00312	0,12			
	H2	0-10	113,04	113,04	47,62	0,04762	1,90		1,79	0,80622
	H2	10-20	20,16	20,16	6,03	0,00603	0,24	2,18		
	H2	20-30	3,27	3,27	0,92	0,00092	0,04			
	I1	0-10	84,20	84,20	32,40	0,0324	1,30			
	I1	10-20	4,40	4,40	2,70	0,0027	0,11	1,46		
	I1	20-30	3,10	3,10	1,30	0,0013	0,05			
	I2	0-10	68,00	68,00	25,90	0,0259	1,04		1,68	0,7578
	I2	10-20	28,80	28,80	11,50	0,0115	0,46	1,91		
	I2	20-30	23,90	23,90	10,40	0,0104	0,42			
	J1	0-10	60,30	60,30	27,40	0,0274	1,10			
	J1	10-20	9,90	9,90	6,00	0,006	0,24	1,34		
	J1	20-30	0,70	0,70	0,08	0,00008	0,00			
	J2	0-10	30,80	30,80	14,30	0,0143	0,57		1,06	0,47682
	J2	10-20	6,50	6,50	4,00	0,004	0,16	0,78		
	J2	20-30	2,90	2,90	1,20	0,0012	0,05			
	K1	0-10	67,60	67,60	28,60	0,0286	1,14			
	K1	10-20	6,50	6,50	2,90	0,0029	0,12	1,30		
	K1	20-30	4,50	4,50	0,90	0,0009	0,04			
	K2	0-10	10,50	10,50	25,80	0,0258	1,03		1,21	0,54333
	K2	10-20	4,10	4,10	2,10	0,0021	0,08	1,12		
	K2	20-30	0,50	0,50	0,07	0,00007	0,00			
<b>Colina baja (Cb<sub>1</sub>)</b>	L1	0-10	119,80	119,80	39,50	0,0395	1,58			
	L1	10-20	83,50	83,50	30,00	0,03	1,20	3,05		
	L1	20-30	13,80	13,80	6,70	0,0067	0,27		3,85	1,7343
	L2	0-10	157,80	157,80	57,90	0,0579	2,32			
	L2	10-20	91,20	91,20	40,60	0,0406	1,62	4,66		
	L2	20-30	50,30	50,30	18,00	0,018	0,72			
	M1	0-10	70,90	70,90	30,50	0,0305	1,22			
	M1	10-20	63,30	63,30	24,30	0,0243	0,97	2,25		
	M1	20-30	2,10	2,10	1,50	0,0015	0,06		1,52	0,6822
	M2	0-10	21,40	21,40	11,40	0,0114	0,46			
	M2	10-20	13,40	13,40	6,90	0,0069	0,28	0,78		
	M2	20-30	3,40	3,40	1,20	0,0012	0,05			
	N1	0-10	126,80	126,80	59,80	0,0598	2,39			
	N1	10-20	14,70	14,70	7,10	0,0071	0,28	2,72		
	N1	20-30	3,30	3,30	1,01	0,00101	0,04		2,15	0,96606
	N2	0-10	62,20	62,20	28,50	0,0285	1,14	1,58		

N2	10-20	22,70	22,70	10,70	0,0107	0,43			
N2	20-30	1,80	1,80	0,23	0,00023	0,01			
O1	0-10	52,73	52,73	22,13	0,02213	0,89			
O1	10-20	10,47	10,47	5,10	0,0051	0,20	1,11		
O1	20-30	1,30	1,30	0,57	0,00057	0,02			
O2	0-10	48,39	48,39	12,03	0,01203	0,48		0,88	0,39762
O2	10-20	8,35	8,35	3,52	0,00352	0,14	0,66		
O2	20-30	2,90	2,90	0,83	0,00083	0,03			
P1	0-10	119,58	119,58	38,49	0,03849	1,54			
P1	10-20	64,47	64,47	25,10	0,0251	1,00	2,65		
P1	20-30	9,16	9,16	2,68	0,00268	0,11		3,21	1,4436
P2	0-10	126,64	126,64	49,67	0,04967	1,99			
P2	10-20	81,25	81,25	32,43	0,03243	1,30	3,77		
P2	20-30	34,93	34,93	12,03	0,01203	0,48			

**Tabla 19.** Densidad aparente, peso del volumen seco y carbono del suelo de las parcelas de Irazola.

Fisiografía	TRANS	COD	Prof. (cm)	Peso fresco suelo	Peso seco suelo	VC	DA (g/cc)	DA (g/cc) por muestra	DA (g/cc)	M.O %	Peso del volumen de suelo (t/ha) por estrato	Peso del volumen de suelo (t/ha) por muestra	Peso del volumen de suelo (t/ha)	Carbono por estrato (t/ha)	Carbono por muestra (t/ha)	Carbono (t/ha)
Terraza baja no inundable (Tb <sub>2</sub> )	A	A1	0-10	339,42	164,18	137,44	1,19			2,69	1 194,56			156,03		
		A1	10-20	343,72	175,06	137,44	1,27	1,28		2,64	1 273,72	1 283,52		153,13	150,62	
		A1	20-30	359,33	189,98	137,44	1,38		1,30	2,46	1 382,28		1 296,74	142,69		135,63
		A2	0-10	338,65	168,86	137,44	1,23			2,98	1 228,61			172,85		
		A2	10-20	357,67	183,48	137,44	1,33	1,31		1,89	1 334,98	1 309,95		109,63	120,65	
	B	A2	20-30	359,55	187,78	137,44	1,37			1,37	1 366,27			79,47		
		B1	0-10	332,25	152,81	137,44	1,11			2,69	1 111,83			156,03		
		B1	10-20	346,17	175,64	137,44	1,28	1,25		1,55	1 277,94	1 249,44		89,91	103,05	
		B1	20-30	354,17	186,72	137,44	1,36		1,22	1,09	1 358,56		1 221,88	63,23		111,37
		B2	0-10	310,74	136,81	137,44	1,00			2,98	995,42			172,85		
	C	B2	10-20	339,78	163,63	137,44	1,19	1,19		1,89	1 190,56	1 194,32		109,63	119,68	
		B2	20-30	360,80	192,00	137,44	1,40			1,32	1 396,97			76,57		
		C1	0-10	334,26	156,44	137,44	1,14			3,61	1 138,24			209,40		
		C1	10-20	338,80	170,19	137,44	1,24	1,22		2,92	1 238,29	1 224,44		169,37	173,82	
		C1	20-30	340,50	178,23	137,44	1,30		1,31	2,46	1 296,78		1 308,64	142,69		153,33
	D	C2	0-10	356,82	188,92	137,44	1,37			2,58	1 374,56			149,65		
		C2	10-20	357,18	190,62	137,44	1,39	1,39		2,23	1 386,93	1 392,85		129,35	132,83	
		C2	20-30	358,82	194,76	137,44	1,42			2,06	1 417,05			119,49		
		D1	0-10	344,36	170,45	137,44	1,24			3,15	1 240,18			182,71		
		D1	10-20	355,79	188,98	137,44	1,38	1,34		2,23	1 375,00	1 343,25		129,35	136,12	
	E	D1	20-30	360,53	194,42	137,44	1,41		1,38	1,66	1 414,58		1 376,53	96,29		134,96
		D2	0-10	356,89	182,18	137,44	1,33			2,69	1 325,52			156,03		
		D2	10-20	359,55	194,10	137,44	1,41	1,41		2,23	1 412,25	1 409,80		129,35	133,80	
		D2	20-30	369,36	205,01	137,44	1,49			2,00	1 491,63			116,01		
E1		0-10	358,39	188,00	137,44	1,37			3,75	1 367,87			217,52			
F	E1	10-20	361,68	188,42	137,44	1,37	1,37		3,01	1 370,93	1 373,25		174,59	181,36		
	E1	20-30	361,94	189,80	137,44	1,38		1,39	2,62	1 380,97		1 389,99	151,97		194,80	
	E2	0-10	360,60	190,11	137,44	1,38			4,15	1 383,22			240,72			
	E2	10-20	362,95	193,10	137,44	1,40	1,41		3,56	1 404,98	1 406,72		206,50	208,24		
	E2	20-30	370,87	196,81	137,44	1,43			3,06	1 431,97			177,49			
F	F1	0-10	321,61	167,70	137,44	1,22			4,25	1 220,17			246,52			
	F1	10-20	346,67	193,82	137,44	1,41	1,39		3,36	1 410,22	1 385,61		194,90	201,66		
	F1	20-30	363,55	149,85	98,17	1,53		1,34	2,82	1 526,43		1 341,50	163,57		216,36	
	F2	0-10	331,00	153,50	137,44	1,12			4,94	1 116,85			286,54			
	F2	10-20	354,87	186,01	137,44	1,35	1,30		4,05	1 353,39	1 297,39		234,92	231,05		



	M2	10-20	330,10	166,90	137,44	1,21		0,67	1 214,35		38,86		
	M2	20-30	335,90	173,20	137,44	1,26		0,60	1 260,19		34,80		
<b>N</b>	N1	0-10	329,54	166,02	137,44	1,21		1,75	1 207,95		101,51		
	N1	10-20	342,63	179,59	137,44	1,31	1,28	0,60	1 306,68	1 283,59	34,80	54,52	
	N1	20-30	349,82	183,64	137,44	1,34		1,25	0,47	1 336,15	1 248,44	27,26	60,42
<b>N</b>	N2	0-10	322,50	163,73	137,44	1,19		1,82	1 191,28		105,57		
	N2	10-20	331,40	165,95	137,44	1,21	1,21	0,94	1 207,44	1 213,28	54,52	66,32	
	N2	20-30	339,20	170,58	137,44	1,24		0,67	1 241,12		38,86		
<b>O</b>	O1	0-10	341,76	183,59	137,44	1,34		3,04	1 335,78		176,33		
	O1	10-20	346,52	187,64	137,44	1,37	1,36	1,43	1 365,25	1 361,52	82,95	105,96	
	O1	20-30	350,20	190,15	137,44	1,38		1,01	1 383,51		58,58		
<b>O</b>	O2	0-10	329,53	165,30	137,44	1,20		1,33	2,67	1 202,71	1 326,01	154,87	101,02
	O2	10-20	334,39	178,40	137,44	1,30	1,29	1,32	1 298,02	1 290,50	76,57	96,09	
	O2	20-30	353,31	188,40	137,44	1,37		0,98	1 370,78		56,84		
<b>P</b>	P1	0-10	292,73	129,30	98,17	1,32		2,82	1 317,10		163,57		
	P1	10-20	328,48	160,00	137,44	1,16	1,25	2,58	1 164,14	1 253,69	149,65	120,84	
	P1	20-30	346,42	175,90	137,44	1,28		1,27	0,85	1 279,83	1 272,44	49,30	98,41
<b>P</b>	P2	0-10	328,52	163,58	137,44	1,19		1,69	1 190,19		98,03		
	P2	10-20	343,00	180,50	137,44	1,31	1,29	1,22	1 313,30	1 291,18	70,77	75,99	
	P2	20-30	348,52	188,30	137,44	1,37		1,02	1 370,05		59,16		

Tabla 20. Características de color del suelo según la tabla Munshell

<b>Fisiografía</b>	<b>Transecto</b>	<b>Prof. (cm)</b>	<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	
<b>Terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>)</b>	<b>A</b>	<b>A1</b>	0-10	7,5 YR 3/2	Marrón oscuro
		<b>A1</b>	10-20	7,5 YR 4/4	Marrón oscuro
		<b>A1</b>	20-30	7,5 YR 5/8	Marrón fuerte
	<b>A</b>	<b>A2</b>	0-10	7,5 YR 3/4	Marrón oscuro
		<b>A2</b>	10-20	7,5 YR 4/2	Marrón oscuro
		<b>A2</b>	20-30	7,5 YR 5/6	Marrón fuerte
	<b>B</b>	<b>B1</b>	0-10	7,5 YR 3/0	Gris muy oscuro
		<b>B1</b>	10-20	7,5 YR 4/2	Marrón oscuro
		<b>B1</b>	20-30	7,5 YR 5/6	Marrón fuerte
	<b>B</b>	<b>B2</b>	0-10	7,5 YR 3/2	Marrón oscuro
		<b>B2</b>	10-20	7,5 YR 4/4	Marrón oscuro
		<b>B2</b>	20-30	7,5 YR 5/8	Marrón fuerte
	<b>C</b>	<b>C1</b>	0-10	7,5 YR 3/4	Marrón oscuro
		<b>C1</b>	10-20	7,5 YR 4/4	Marrón oscuro
		<b>C1</b>	20-30	7,5 YR 5/8	Marrón oscuro
	<b>C</b>	<b>C2</b>	0-10	7,5 YR 4/2	Marrón oscuro
		<b>C2</b>	10-20	7,5 YR 4/4	Marrón oscuro
		<b>C2</b>	20-30	7,5 YR 5/4	Marrón
	<b>D</b>	<b>D1</b>	0-10	7,5 YR 3/2	Marrón oscuro
		<b>D1</b>	10-20	7,5 YR 4/6	Marrón fuerte
		<b>D1</b>	20-30	7,5 YR 5/6	Marrón fuerte
	<b>D</b>	<b>D2</b>	0-10	7,5 YR 3/4	Marrón oscuro
		<b>D2</b>	10-20	7,5 YR 5/6	Marrón fuerte
		<b>D2</b>	20-30	7,5 YR 5/8	Marrón fuerte
<b>E</b>	<b>E1</b>	0-10	5 YR 2,5/2	Marrón rojizo oscuro	
	<b>E1</b>	10-20	5 YR 3/4	Marrón rojizo oscuro	
	<b>E1</b>	20-30	5 YR 5/6	Rojo amarillento	
<b>E</b>	<b>E2</b>	0-10	5 YR 3/2	Marrón rojizo oscuro	
	<b>E2</b>	10-20	5 YR 3/4	Marrón rojizo oscuro	
	<b>E2</b>	20-30	5 YR 5/8	Rojo amarillento	
<b>F</b>	<b>F1</b>	0-10	5 YR 3/1	Gris muy oscuro	
	<b>F1</b>	10-20	5 YR 4/4	Marrón rojizo	
	<b>F1</b>	20-30	5 YR 5/6	Rojo amarillento	
<b>F</b>	<b>F2</b>	0-10	5 YR 3/1	Gris muy oscuro	
	<b>F2</b>	10-20	5 YR 4/6	Rojo amarillento	
	<b>F2</b>	20-30	5 YR 5/8	Rojo amarillento	
<b>G</b>	<b>G1</b>	0-10	7,5 YR 3/4	Marrón oscuro	
	<b>G1</b>	10-20	7,5 YR 4/4	Marrón oscuro	
	<b>G1</b>	20-30	7,5 YR 5/8	Marrón fuerte	
<b>G</b>	<b>G2</b>	0-10	7,5 YR 3/2	Marrón oscuro	
	<b>G2</b>	10-20	7,5 YR 4/4	Marrón oscuro	

	<b>G2</b>	20-30	7,5 YR 5/6	Marrón fuerte
<b>H</b>	<b>H1</b>	0-10	5 YR 3/1	Gris muy oscuro
	<b>H1</b>	10-20	5 YR 4/4	Marrón rojizo
	<b>H1</b>	20-30	5 YR 5/6	Rojo amarillento
<b>H</b>	<b>H2</b>	0-10	5 YR 3/2	Marrón rojizo oscuro
	<b>H2</b>	10-20	5 YR 5/3	Marrón rojizo
	<b>H2</b>	20-30	5 YR 5/8	Rojo amarillento
<b>I</b>	<b>I1</b>	0-10	5 YR 2,5/2	Marrón rojizo oscuro
	<b>I1</b>	10-20	5 YR 3/4	Marrón rojizo oscuro
	<b>I1</b>	20-30	5 YR 5/6	Rojo amarillento
<b>I</b>	<b>I2</b>	0-10	5 YR 2,5/1	Oscuro
	<b>I2</b>	10-20	5 YR 3/3	Marrón rojizo oscuro
	<b>I2</b>	20-30	5 YR 5/8	Rojo amarillento
<b>J</b>	<b>J1</b>	0-10	5 YR 2,5/2	Marrón rojizo oscuro
	<b>J1</b>	10-20	5 YR 3/3	Marrón rojizo oscuro
	<b>J1</b>	20-30	5 YR 4/6	Rojo amarillento
<b>J</b>	<b>J2</b>	0-10	5 YR 2,5/2	Marrón rojizo oscuro
	<b>J2</b>	10-20	5 YR 3/4	Marrón rojizo oscuro
	<b>J2</b>	20-30	5 YR 5/6	Rojo amarillento
<b>K</b>	<b>K1</b>	0-10	5 YR 3/1	Gris muy oscuro
	<b>K1</b>	10-20	5 YR 4/4	Marrón rojizo
	<b>K1</b>	20-30	5 YR 5/6	Rojo amarillento
<b>K</b>	<b>K2</b>	0-10	5 YR 3/2	Marrón rojizo oscuro
	<b>K2</b>	10-20	5 YR 5/3	Marrón rojizo
	<b>K2</b>	20-30	5 YR 5/8	Rojo amarillento
<b>L</b>	<b>L1</b>	0-10	5 YR 4/2	Gris rojizo oscuro
	<b>L1</b>	10-20	5 YR 5/2	Gris rojizo
	<b>L1</b>	20-30	5 YR 5/6	Rojo amarillento
<b>L</b>	<b>L2</b>	0-10	5 YR 4/3	Marrón rojizo
	<b>L2</b>	10-20	5 YR 5/3	Marrón rojizo
	<b>L2</b>	20-30	5 YR 5/8	Rojo amarillento
<b>M</b>	<b>M1</b>	0-10	5 YR 4/1	Gris oscuro
	<b>M1</b>	10-20	5 YR 4/3	Marrón rojizo
	<b>M1</b>	20-30	5 YR 5/3	Marrón rojizo
<b>M</b>	<b>M2</b>	0-10	5 YR 4/2	Gris rojizo oscuro
	<b>M2</b>	10-20	5 YR 4/4	Marrón rojizo
	<b>M2</b>	20-30	5 YR 5/4	Marrón rojizo
<b>N</b>	<b>N1</b>	0-10	5 YR 4/2	Gris rojizo oscuro
	<b>N1</b>	10-20	5 YR 4/6	Rojo amarillento
	<b>N1</b>	20-30	5 YR 5/3	Marrón rojizo
<b>N</b>	<b>N2</b>	0-10	5 YR 4/2	Gris rojizo oscuro
	<b>N2</b>	10-20	5 YR 5/3	Marrón rojizo

Colina baja  
(Cb<sub>1</sub>)

	<b>N2</b>	20-30	5 YR 5/6	Rojo amarillento
<b>O</b>	<b>O1</b>	0-10	5 YR 3/2	Marrón rojizo oscuro
	<b>O1</b>	10-20	5 YR 4/3	Marrón rojizo
	<b>O1</b>	20-30	5 YR 5/2	Gris rojizo
<b>O</b>	<b>O2</b>	0-10	5 YR 3/3	Marrón rojizo oscuro
	<b>O2</b>	10-20	5 YR 4/4	Marrón rojizo
	<b>O2</b>	20-30	5 YR 5/3	Marrón rojizo
<b>P</b>	<b>P1</b>	0-10	5 YR 3/2	Marrón rojizo oscuro
	<b>P1</b>	10-20	5 YR 3/4	Marrón rojizo oscuro
	<b>P1</b>	20-30	5 YR 5/4	Marrón rojizo
<b>P</b>	<b>P2</b>	0-10	5 YR 3/3	Marrón rojizo oscuro
	<b>P2</b>	10-20	5 YR 4/3	Marrón rojizo
	<b>P2</b>	20-30	5 YR 5/6	Rojo amarillento

**Tabla 21.** Número de lombrices encontradas en los transectos de las unidades fisiográficas

<b>Fisiografía</b>	<b>Transecto</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Número de lombrices</b>	<b>Total de lombrices</b>	
<b>Terraza baja no inundable (Tb<sub>2</sub>)</b>	<b>A</b>	<b>A1</b>	0-10	7	10
		<b>A1</b>	10-20	3	
		<b>A1</b>	20-30	0	
	<b>A</b>	<b>A2</b>	0-10	5	8
		<b>A2</b>	10-20	2	
		<b>A2</b>	20-30	1	
	<b>B</b>	<b>B1</b>	0-10	7	13
		<b>B1</b>	10-20	4	
		<b>B1</b>	20-30	2	
	<b>B</b>	<b>B2</b>	0-10	4	8
		<b>B2</b>	10-20	3	
		<b>B2</b>	20-30	1	
	<b>C</b>	<b>C1</b>	0-10	5	6
		<b>C1</b>	10-20	1	
		<b>C1</b>	20-30	0	
	<b>C</b>	<b>C2</b>	0-10	7	14
		<b>C2</b>	10-20	4	
		<b>C2</b>	20-30	3	
	<b>D</b>	<b>D1</b>	0-10	2	3
		<b>D1</b>	10-20	1	
		<b>D1</b>	20-30	0	
		<b>D2</b>	0-10	1	
		<b>D2</b>	10-20	0	
	<b>E</b>	<b>E1</b>	0-10	2	3
		<b>E1</b>	10-20	1	
		<b>E1</b>	20-30	0	
		<b>E2</b>	0-10	0	
		<b>E2</b>	10-20	0	
	<b>F</b>	<b>F1</b>	0-10	3	3
		<b>F1</b>	10-20	0	
<b>F1</b>		20-30	0		
<b>F2</b>		0-10	1		
<b>F2</b>		10-20	1		
<b>G</b>	<b>G1</b>	0-10	2	3	
	<b>G1</b>	10-20	1		
	<b>G1</b>	20-30	0		
	<b>G2</b>	0-10	6		
	<b>G2</b>	0-10	6		

		<b>G2</b>	10-20	2	
		<b>G2</b>	20-30	0	
		<b>H1</b>	0-10	3	
	<b>H</b>	<b>H1</b>	10-20	1	4
		<b>H1</b>	20-30	0	
		<b>H2</b>	0-10	4	
	<b>H</b>	<b>H2</b>	10-20	1	5
		<b>H2</b>	20-30	0	
		<b>I1</b>	0-10	2	
	<b>I</b>	<b>I1</b>	10-20	0	2
		<b>I1</b>	20-30	0	
		<b>I2</b>	0-10	0	
	<b>I</b>	<b>I2</b>	10-20	0	0
		<b>I2</b>	20-30	0	
		<b>J1</b>	0-10	0	
	<b>J</b>	<b>J1</b>	10-20	0	0
		<b>J1</b>	20-30	0	
		<b>J2</b>	0-10	1	
	<b>J</b>	<b>J2</b>	10-20	0	1
		<b>J2</b>	20-30	0	
		<b>K1</b>	0-10	1	
	<b>K</b>	<b>K1</b>	10-20	0	1
		<b>K1</b>	20-30	0	
		<b>K2</b>	0-10	0	
	<b>K</b>	<b>K2</b>	10-20	0	0
		<b>K2</b>	20-30	0	
		<b>L1</b>	0-10	1	
	<b>L</b>	<b>L1</b>	10-20	2	3
		<b>L1</b>	20-30	0	
		<b>L2</b>	0-10	3	
	<b>L</b>	<b>L2</b>	10-20	0	3
		<b>L2</b>	20-30	0	
		<b>M1</b>	0-10	3	
	<b>M</b>	<b>M1</b>	10-20	0	4
		<b>M1</b>	20-30	1	
		<b>M2</b>	0-10	0	
	<b>M</b>	<b>M2</b>	10-20	0	0
		<b>M2</b>	20-30	0	
		<b>N1</b>	0-10	1	
	<b>N</b>	<b>N1</b>	10-20	1	2
		<b>N1</b>	20-30	0	
		<b>N2</b>	0-10	0	
	<b>N</b>	<b>N2</b>	10-20	0	0
		<b>N2</b>	20-30	0	

Colina baja  
(Cb<sub>1</sub>)

	<b>O1</b>	0-10	1	
<b>O</b>	<b>O1</b>	10-20	0	1
	<b>O1</b>	20-30	0	
	<b>O2</b>	0-10	1	
<b>O</b>	<b>O2</b>	10-20	1	2
	<b>O2</b>	20-30	0	
	<b>P1</b>	0-10	0	
<b>P</b>	<b>P1</b>	10-20	0	0
	<b>P1</b>	20-30	0	
	<b>P2</b>	0-10	2	
<b>P</b>	<b>P2</b>	10-20	1	3
	<b>P2</b>	20-30	0	



**Figura 15.** Toma de medida de la circunferencia del tallo de cacao



**Figura 16.** Medición de la circunferencia (altura de pecho) en especies forestales



**Figura 17.** Evaluación de plantas herbáceas y hojarasca del agroecosistema del cacao



**Figura 18.** Apertura de calicata en los transectos para el muestreo de suelo



**Figura 19.** Evaluación de la densidad aparente del suelo



**Figura 20.** Evaluación del color del suelo desde 0 cm a 30 cm de profundidad



**Figura 21.** Evaluación del número de lombrices/unidad de muestreo



**Figura 22.** Toma de datos mediante identificación de los SAF



**Figura 23.** Avistamiento del complejo ecosistémico del cultivo de cacao con su entorno