

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN TRES AGROECOSISTEMAS DE PLÁTANO (MUSA SP. L). PARA MITIGAR EL CAMBIO CLIMÁTICO EN HUANGANAPAMPA, CASTILLO GRANDE

Ecosystem services in three banana (*musa sp. l.*) agroecosystems. to mitigate climate change in
Huanganapampa Castillo Grande

María Noris Chinchay Córdova¹ , José Wilfredo Zavala Solórzano² 

¹: Ingeniero Agrónomo por la Universidad Nacional San Martín. Especialista en Agricultura Sostenible. Dirección legal: Av. Universitaria s/n, Carretera central km 1.3, Tingo María. Código ORCID: [0009-0000-8304-9384](https://orcid.org/0009-0000-8304-9384). Correo electrónico: maria.chinchai@unas.edu.pe

²: Ingeniero en Agronomía por la Universidad Agraria de la Selva. Magister Scientae en Suelos por la Universidad Nacional Agraria La Molina y Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible por la Universidad Nacional Federico Villareal. Dirección legal: Av. Universitaria s/n, Carretera central km 1.21, Tingo María, Perú. Docente Principal de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Código ORCID: [0000-0002-2990-6290](https://orcid.org/0000-0002-2990-6290). Correo electrónico: jose.zavala@unas.edu.pe

Recibido: 10/01/2025 **Aceptado:** 15/01/2025 **Publicado:** 20/01/2025

RESUMEN

Estudio llevado a cabo en tres unidades fisiográficas en Huanganapampa, distrito de Castillo Grande, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco. El objetivo fue estimar el almacenamiento de carbono en tres agroecosistemas del cultivo de plátano y evaluar los servicios ecosistémicos que brindan para mitigar el cambio climático. Investigación descriptiva no experimental, centrándose en variables como biomasa y el carbono de especies forestales, plátano, herbáceas-arbustos, hojarasca, distribución de raíces, densidad aparente y carbono en el suelo. Se seleccionaron al azar ocho parcelas de muestreo por cada unidad fisiográfica. La metodología utilizada fue la del ICRAF (2002). Los resultados revelan que la mayor cantidad de carbono almacenado (t/ha), lo presenta la terraza alta con 2,57 t/ha, quedando al último la terraza baja con 2,28 t/ha de carbono. En cuanto al carbono de las especies forestales presentó el mayor contenido de carbono en la biomasa vegetal en las tres parcelas, la terraza alta 12,73 t/ha, seguido del carbono en los plátanos con 2,57 t/ha; y por último el carbono en las herbáceas y arbustivas que presenta la terraza media con 0,81 tC/ha. La terraza alta presenta mayor cantidad de Carbono total con 100,04 (t/ha). Así mismo el Carbono total en el suelo en la terraza baja, aportó mayor cantidad de carbono con 83,79 (t/ha). La terraza alta presentó el mejor servicio ecosistémico debido al aporte de materia orgánica y biomasa vegetal; microclima favorable con temperaturas más bajas, menor humedad relativa y menor luminosidad lo que contribuye a un entorno propicio para la producción sostenible, permitiendo almacenar mayor cantidad de carbono en el suelo, reduciendo los gases de efecto invernadero y por lo tanto mitigando el cambio climático.

Palabras clave: Carbono, Terraza, Almacenamiento de Carbono, Unidad Fisiográfica.

ABSTRACT

Study carried out in three physiographic units in Huanganapampa, Castillo Grande district, Leoncio Prado province, Huánuco region. The objective was to estimate carbon storage in three agroecosystems of banana cultivation and evaluate the ecosystem services they provide to mitigate climate change. Non-experimental descriptive research, focusing on variables such as biomass and carbon of forest species, banana, herbaceous-shrubs, leaf litter, root distribution, apparent density and carbon in the soil. Eight sampling plots were randomly selected for each physiographic unit. The methodology used was that of ICRAF (2002). The results reveal that the highest amount of stored carbon (t/ha) is presented by the high terrace with 2.57 t/ha, with the low terrace coming last with 2.28 t/ha of carbon. Regarding the carbon of the forest species, it presented the highest carbon content in the plant biomass in the three plots, the high terrace 12.73 t/ha, followed by carbon in the bananas with 2.57 t/ha; and finally the carbon in the herbaceous and shrubby plants found in the middle terrace with 0.81 tC/ha. The high terrace has the highest amount of total Carbon with 100.04 (t/ha). Likewise, the total carbon in the soil on the low terrace contributed the greatest amount of carbon with 83.79 (t/ha). The high terrace presented the best ecosystem service due to the contribution of organic matter and plant biomass; favorable microclimate with lower temperatures, lower relative humidity and lower luminosity, which contributes to an environment conducive to sustainable production, allowing a greater amount of carbon to be stored in the soil, reducing greenhouse gases and therefore mitigating climate change.

Keywords: Carbon, Terrace, Carbon Storage, Physiographic Unit.

I. INTRODUCCIÓN

El incremento en la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera se ha convertido en una preocupación global, ya que este gas es uno de los principales responsables del efecto invernadero y del calentamiento global (Andrade, 2013). Actividades humanas como la deforestación y el uso de combustibles fósiles, entre ellos el petróleo y el carbón, son las principales fuentes de emisión de CO₂ (Watson et al., 2000). Los árboles desempeñan un papel crucial en la regulación de este gas gracias a su capacidad de fijarlo mediante la fotosíntesis y almacenarlo en sus estructuras leñosas por periodos prolongados, convirtiéndolos en importantes reservas naturales de carbono (Arévalo et al.; 2003). Esta característica ha impulsado la preferencia por sistemas agroforestales, donde los cultivos se combinan con árboles para maximizar los beneficios ambientales. El cambio climático, derivado de actividades humanas, se manifiesta a través de alteraciones como el aumento de la temperatura global, cambios en los patrones de precipitación y el incremento del nivel del mar (Ciesla, 1996). Este fenómeno también está relacionado con la generación de incentivos económicos, como los pagos por servicios ambientales (PSA), destinados a promover prácticas sostenibles para la captura de carbono. Sin embargo, factores como la deforestación, el uso intensivo de combustibles fósiles, la ganadería extensiva y las prácticas agrícolas inadecuadas contribuyen significativamente a la emisión de gases de efecto invernadero, particularmente CO₂ (Acosta et al.; 2001).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo estimar el almacenamiento de carbono en el sistema agroforestal del cultivo de plátano en tres unidades fisiográficas, evaluando su potencial para mitigar el cambio climático. Además, se busca identificar los servicios ecosistémicos asociados, como el almacenamiento de carbono en el suelo, la generación de humus, la conservación de humedad, la mejora de la calidad del suelo, la creación de microclimas favorables y el aumento de la actividad microbiana. proporcionados por los agroecosistemas de plátano, contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Lugar de ejecución

El estudio se llevó a cabo en tres parcelas ubicadas en el sector de Huanganapampa, en Leoncio Prado. Se identificaron sistemas agroforestales que incluyen plátano. Las parcelas están situadas a una altitud de 630 msnm, con una temperatura promedio de 25 °C y una humedad relativa media del 87 %. La zona corresponde a la clasificación de Bosque Muy Húmedo Tropical (bmh-T) y presenta suelos aluviales con un nivel freático de medio a alto, textura franco-arenosa y un

pH que varía de moderadamente a ligeramente ácido, con baja CIC. Y materia orgánica.

2.2. Método estadístico

Los resultados fueron analizados inicialmente mediante estadística descriptiva para examinar el comportamiento de las variables en dos ecosistemas agroforestales con plátano. Para identificar diferencias estadísticas entre los ecosistemas en relación con las variables dependientes, se aplicó la prueba t para inferencias basadas en dos muestras. Además, se utilizó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia del 5 %. Los hallazgos se presentaron a través de tablas y gráficos descriptivos.

2.3. Metodología en campo

El estudio se llevó a cabo en una parcela experimental de plátano con un área total de 0,950 hectáreas, ubicada en una terraza media y con un distanciamiento de siembra de 3 x 4 metros. La parcela tiene una edad de 2 años y mantiene una producción constante, estando asociada con árboles maderables. La segunda parcela se situó en una terraza baja no inundable, al igual que la tercera, ambas caracterizadas por suelos aluviales. Se realizó la delimitación del área destinada al muestreo. Para realizar el alineamiento se empleó el método 3,4,5, estableciendo un rectángulo de 20 x 50 metros que cubriría un área de 1 000 m². En este espacio se delimitaron 8 subparcelas de 10 x 10 metros identificadas con rafia, de las cuales se recolectaron muestras de biomasa aérea, hojarasca, raíces y suelo.

2.4. Características evaluadas

2.4.1. Carbono en la biomasa aérea

Con una vara de 4,5 m, se midió la altura desde la base hasta el ápice de todas las plantas de plátano dentro de cada subparcela.

2.4.2. Carbono en la biomasa de hojarasca

Se utilizó un cuadrante de 0,5 x 0,5 m lanzado aleatoriamente en un área de 1 m² para recolectar toda la materia seca presente. Las muestras recolectadas fueron pesadas y, posteriormente, se seleccionaron submuestras de entre 80 y 150 g. Estas submuestras se secaron en una estufa a 70 °C durante 72 horas hasta alcanzar un peso constante, dato empleado para estimar la biomasa.

2.4.3. Carbono en la biomasa radicular

Se excavó una mini calicata de 40 x 40 cm con una profundidad de 50 cm, evaluando tres estratos: 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm. Se cortaron bloques de suelo de 10 x 10 cm en cada profundidad y, tras tamizar y lavar las raíces menores de 2 mm, se registró el peso fresco. Luego, las muestras se secaron a 70 °C durante 72 horas para obtener el peso seco.

2.4.4. Densidad aparente

Se utilizó el método del cilindro con recipientes de aproximadamente 100 ml de volumen, calculando la densidad mediante la fórmula masa/volumen. Las muestras de suelo, tomadas a profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm, se secaron en una estufa a 105 °C durante 24 horas hasta obtener peso constante.

2.4.5. Determinación de carbono orgánico del suelo

Se recolectaron bloques de suelo de 10 x 10 cm a profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm, los cuales se secaron previamente. El análisis del porcentaje de materia orgánica y el pH se realizó en laboratorio mediante el método Walkley y Black.

2.4.6. Medición de la densidad aparente y peso del suelo

Se excavó una mini calicata de 50 x 50 x 50 cm en cada cuadrante delimitado para muestreo de biomasa herbácea y arbustiva. Las muestras de suelo se tomaron por estratos (0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm) utilizando cilindros Uhland. Estas muestras se secaron a 105 °C durante 24 horas para calcular la densidad aparente según el método de Alegre et al.; (2002). Además, se recolectaron muestras promedio de 500 g de suelo, debidamente codificadas, y se enviaron al laboratorio para determinar el carbono mediante el método Walkley y Black modificado.

2.4.7. Cálculo de la biomasa vegetal

Las fórmulas empleadas para la determinación del carbono aéreo y del suelo fueron las establecidas por el ICRAF y Arévalo et al.; (2002). La fórmula se muestra a continuación:

$$BA = 0.1184 \times DAP \times 2.53$$

Dónde: 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.

2.4.8. Cálculo del peso del volumen de suelo (t ha-1)

Se calculó el peso del volumen del suelo por hectárea, evaluando primero la densidad aparente del suelo por cada uno de los horizontes.

2.4.8.1. Densidad aparente del suelo (g cc-1)

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

Dónde: DA: Densidad aparente (g cc-1); PSN: Peso seco del suelo dentro del cilindro; VCH: Volumen cilindro (constante)

2.4.8.2. Peso del volumen de suelo por estrato de muestreo

$$PVs \text{ (t/ha-1)} = DA \times Ps \times 10000$$

Dónde: PVs: Peso del volumen de suelo (t. ha-1); DA: Densidad aparente; Ps: Espesor o profundidad del horizonte del suelo (m) y 10000: Constante.

2.4.9. Cálculo del carbono total (biomasa vegetal más suelo)

2.4.9.1. Cálculo del carbono en la biomasa vegetal total (t ha-1)

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

Dónde: CBV: Carbono en la biomasa vegetal; BVT: Biomasa vegetal total; 0,45: Constante (proporción de carbono, asumido por convención).

2.4.9.2. Cálculo del carbono en el suelo (t ha-1)

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

Dónde: CS: Carbono en el suelo (t ha-1); Pvs: Peso del volumen de suelo; % C: Porcentaje de carbono analizado en laboratorio; 100: Factor de conversión.

2.4.10. Cálculo del carbono total del SAF (t ha-1)

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

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

2.4.11. Determinación de los servicios ecosistémicos o servicios ambientales

Se procedió a evaluar los factores ambientales dentro y fuera de los transectos, midiendo la temperatura, la humedad relativa y la luminosidad, También se analizó la materia orgánica a una profundidad de 0 a 10 cm, considerando el contenido de humus, la cantidad de lombrices y el color del suelo. la temperatura y la humedad se midieron con un hidrómetro In/qut thermo chock, mientras que la luminosidad se cuantificó con un medidor digital de lux LX 1010B. para evaluar el compost y humus, se utilizó la tabla Munshell soil color book para identificar las coloraciones y características del suelo en estudio.

III. RESULTADOS

3.1. Carbono almacenado en la biomasa vegetal en tres unidades fisiográficas de Huanganapampa

Tabla 1

Análisis de varianza del contenido de carbono almacenado (t/ha) en la biomasa vegetal en las tres parcelas de plátano como sistema agroforestal.

Fuente de variación	SC	Gl	CM	F	p-valor	Sig
Carbono en las especies forestales (t/ha)	102,80	2	51,4	3,39	0,0799	NS
Carbono en plátanos (t/ha)	0,21	2	0,1	12,32	0,0027	**
Carbono en las herbáceas y arbustos (t/ha)	0,24	2	0,12	15,03	0,0014	**
Carbono en la hojarasca (t/ha)	5,71	2	2,86	35,93	0,0001	**
Carbono en las raíces (t/ha)	1,53	2	0,76	11,4	0,0034	**

NS: No significativo al 5 % **; Existe diferencia estadística altamente significativa.

Tabla 2

Prueba de Duncan ($\alpha=0,05$) del contenido de carbono en la biomasa vegetal en tres parcelas de plátano como sistema agroforestal.

Variables	N	Mínimo	Máximo	Media	Sig	Error	CV (%)	
Carbono en las especies forestales (t/ha)	Ta	4	7,04	17,69	12,73	a	4,37	34,33
	Tb	4	5,99	12,95	9,28	a b	2,85	30,72
	Tm	4	1,36	11,00	5,56	b	4,27	36,92
Carbono en los plátanos (t/ha)	Ta	4	2,40	2,71	2,57	a	0,13	4,99
	Tm	4	2,52	2,57	2,54	a	0,02	0,85
	Tb	4	2,16	2,38	2,28	b	0,09	4,00
Carbono en las herbáceas y arbustos (t/ha)	Tm	4	0,66	0,91	0,81	a	0,11	13,24
	Tb	4	0,56	0,76	0,64	b	0,09	14,21
	Ta	4	0,36	0,51	0,46	c	0,07	14,65
Carbono en la hojarasca (t/ha)	Ta	4	2,57	3,48	3,08	a	0,38	12,31
	Tb	4	1,64	1,88	1,77	b	0,1	5,59
	Tm	4	1,11	1,78	1,50	b	0,29	19,36
Carbono en las raíces (t/ha)	Ta	4	0,96	1,71	1,25	a	0,32	25,9
	Tb	4	0,26	0,87	0,64	b	0,27	41,67
	Tm	4	0,19	0,55	0,41	b	0,16	38,49

Ta: Terraza alta Tb: Terraza baja Tm: Terraza media.

Nota. Carbono almacenado en el suelo de las unidades fisiográficas de Huanganapampa.

Tabla 3

Análisis de varianza (ANOVA) del contenido de carbono orgánico en el suelo de tres unidades fisiográficas (tC/ha).

Fuente de variación	SC	GL	CM	F	p-valor	Sig
Carbono en el suelo (t/ha)	876,93	2	438,47	3,72	0,0664	NS
Densidad aparente del suelo (g/cc)	0,01	2	0,01	2,8	0,1133	NS
Peso del volumen del suelo (t/ha)	12724,48	2	6362,24	3,09	0,095	NS

NS: No significativo al 5 %

Tabla 4

Prueba de Duncan ($\alpha=0,05$) para las variables en el suelo de tres unidades fisiográficas del cultivo de plátano.

Variables	N	Mínimo	Máximo	Media	Sig	Error	CV (%)	
Carbono en el suelo (t/ha)	Tb	4	76,18	93,00	83,79	a	5,43	9,94
	Ta	4	63,62	92,13	79,95	a	5,43	15,21
	Tm	4	50,74	78,11	64,04	a	5,43	18,23
Densidad aparente del suelo (g/cc)	Tm	4	1,04	1,08	1,06	a	0,02	1,64
	Tb	4	1,01	1,09	1,05	a	0,02	3,21
	Ta	4	0,89	1,04	0,99	a	0,02	7,25
Peso del volumen del suelo (t/ha)	Tm	4	1042,21	1079,57	1057,39	a	22,68	1,49
	Tb	4	1011,19	1086,66	1050,01	a	22,68	3,02
	Ta	4	892,29	1040,02	984,92	a	22,68	7,12

Ta: Terraza alta. Tb: Terraza baja Tm: Terraza media.

Tabla 5

Valores promedio para el carbono total en tres unidades fisiográficas de un sistema agroforestal.

Localidad	Carbono total en la biomasa vegetal aérea (t/ha)	Carbono total en la biomasa vegetal radicular (t/ha)	Carbono total en el suelo (t/ha)	Carbono total en el SAF (t/ha)
Terraza alta (Ta)	18,84	1,25	79,95	100,04 a
Terraza baja (Tb)	13,97	0,64	83,79	98,40 a
Terraza media (Tm)	10,41	0,41	64,04	74,86 b

Se puede ver la significativa diferencia en el peso de raíces a 0-10 cm refleja la mayor concentración de actividad radicular en las capas superficiales, donde hay más nutrientes y mejor acceso al oxígeno. La disminución del peso de raíces con la profundidad es común, dado que las raíces se desarrollan menos en capas más profundas con menos recursos disponibles.

Tabla 6

Prueba de Duncan de densidad aparente del suelo (g/cc) y peso seco de raíces (g) por estrato y unidad fisiográfica.

Variable	Profundidad (cm)	Terraza	Medias	Sig	Terraza	Medias	Sig
Densidad aparente del suelo (g/cc)	0-10	Media	0,84	a			
		Baja	0,83	a	Media	1,06	a
		Alta	0,77	b			
	10-20	Media	1,08	a			
		Baja	1,07	a	Baja	1,05	a
		Alta	1,02	a			
20-30	Media	1,26	a				
	Baja	1,25	a	Alta	0,98	a	
	Alta	1,16	b				
Peso seco de las raíces (g)	0-10	alta	56,55	a			
		baja	25,34	b	Alta	23,20	a
		media	14,04	b			
	10-20	alta	8,85	a			
		baja	6,96	a	Baja	11,89	b
		media	5,99	a			
20-30	alta	4,2	a				
	baja	3,36	a	Media	7,55	b	
	media	2,62	a				

3.2. Identificación de los servicios ecosistémicos en los cultivos de plátano como sistema agroforestal

Tabla 7

Servicios ecosistémicos que brindan las parcelas de plátano en (Ta, Tm, y Tb)

Servicio Ecosistémico	Descripción
Regulación del clima	Se ha demostrado que el cultivo de plátano como sistema agroforestal contribuye a un microclima templado dado por la sombra de los árboles, donde la temperatura desciende en promedio de 0,99 a 2,20 °C, al igual que la humedad relativa, teniendo en cuenta que al interior aumenta en promedio de 4,00 a 13,60%.
Conservación de la biodiversidad	Servicio ligado a la dotación de hábitats y recursos de flora y fauna.
Mitigación y adaptación al cambio climático	El cultivo de plátano como sistema agroforestal ayuda a prevenir la deforestación al proporcionar productos madereros en tierras deforestadas y es una herramienta para implementar programas REDD+. Asimismo, la gestión adecuada de la parcela permite mayores tasas de almacenamiento de carbono, lo que la convierte en una herramienta eficaz para mitigar el cambio climático.

En cuanto a la calidad del suelo, la Tabla 8, presenta los resultados de la evaluación basada en la Tabla de Colores Munsell. Según la Robert (2002)

Tabla 8

Color de suelo registrado dentro de las 3 unidades fisiográficas a diferentes profundidades.

Terraza	Profundidad (cm)	Código	Descripción
Terraza alta	0-10	10 YR 3/2	Pardo grisáceo oscuro
	0-20	10 YR 5/3	Pardo
	20-30	10 YR 5/6	Pardo amarillento
Terraza baja no inundable	0-10	10 YR 3/1	Gris muy oscuro
	10-20	10 YR 5/2	Pardo grisáceo en seco
	20-30	10 YR 5/6	Pardo amarillento
Terraza media	0-10	10 YR 3/1	Gris muy oscuro
	10-20	10 YR 3/3	Pardo oscuro
	20-30	10 YR 5/2	Pardo grisáceo en seco

Tabla 9

Valores de temperatura, humedad relativa y luminosidad dentro y fuera de la parcela de tres unidades fisiográficas en Huanganapampa. (50 000), promedio de 5 lecturas por parcela.

Localidad	Transecto	Dentro de la parcela					
		T°	HR°	Luminosidad	T°	HR°	Luminosidad
Terraza alta (Ta)	A	28,88	58,40	41x10x100	29,88	54,40	232 x10x100
	B	28,16	60,80	32x10x100	30,36	55,60	334 x10x100
	C	28,68	61,40	38x10x100	30,54	56,00	364 x10x100
	D	28,58	62,00	32x10x100	30,52	50,80	382 x10x100
Terraza media (Tm)	A	33,08	49,40	42,2x10x100	31,46	50,00	458 x10x100
	B	32,10	62,00	49,8x10x100	31,68	48,80	501x10x100
	C	30,18	60,80	48,2x10x100	31,50	47,00	506x10x100
	D	29,14	61,60	51,6x10x100	31,74	47,80	495x10x100
Terraza baja (Tb)	A	31,36	48,00	48,4x10x100	33,24	51,40	435 x10x100
	B	30,58	50,80	58,8x10x100	32,98	49,60	494x10x100
	C	30,04	52,20	70,8x10x100	32,28	49,00	500x10x100
	D	30,40	53,00	63,6x10x100	32,34	48,00	509x10x100

IV. DISCUSIÓN

4.1. Carbono almacenado en la biomasa vegetal y en el suelo en tres unidades fisiográficas de Huanganapampa.

Se determino que al menos una de las parcelas registra niveles de carbono estadísticamente distintos a los de las demás, debido al tipo de suelo de cada unidad y a la unidad fisiográfica, asimismo el carbono en las especies forestales se observa que el máximo nivel se encuentra en la Terraza alta con una media de 12,73 tC/ha, y el contenido más bajo en la Terraza media, con una media de 5,56 toneladas de carbono por hectárea (tC/ha). En cuanto al carbono en los plátanos, el máximo nivel se ha encontrado en la Terraza alta, con una media de 2,57 tC/ha, mientras que el menor valor se registró en la Terraza baja, con una media de 2,28 tC/ha. Para el contenido de carbono en las herbáceas y arbustos, el mayor valor se ha registrado en la Terraza media, con una media de 0,81 tC/ha; mientras que en la Terraza alta se reporta una media de 0,46 tC/ha. En cuanto al carbono en la hojarasca, se encontró un máximo de almacenamiento en la Terraza alta, con una media de 3,08 tC/ha; por el contrario, la menor media se registró en Terraza media, con un valor de 1,50 tC/ha, y el máximo nivel promedio de carbono en las raíces se calculó en Terraza alta, con una media de 1,25 tC/ha; mientras que el menor promedio fue de 0,41 tC/ha calculado en Terraza media posiblemente debido al tipo de suelo de cada unidad fisiográfica.

Según los resultados, se ha encontrado que las especies forestales son las que más contribuyen al almacenamiento de carbono. Esto se debe a que, según Acosta et al.; (2001), a medida que estas especies envejecen, su vigor aumenta, lo que a su vez incrementa la cantidad de biomasa que poseen. Esta capacidad de almacenamiento de carbono está directamente relacionada con la edad de las especies forestales, la cual según Taiz y Zeiger (2010), se efectúa mediante el secuestro del carbono de la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración, llevándolo a almacenarse en la biomasa. Por otro lado, los sistemas agroforestales evaluados tienen aproximadamente 2 años de antigüedad coincidiendo con Zavala et al.; (2018), quienes encontraron valores de 609,28 toneladas de carbono por hectárea (tC/ha) en sistemas agroforestales (SAF) mayores a 16 años y 170,29 tC/ha en SAF menores de 8 años, lo que sugiere que el almacenamiento de carbono aumenta con la edad. Por lo que además de la edad, otros factores como las condiciones del suelo, el clima, las prácticas de manejo y el mantenimiento pueden influir significativamente en la cantidad de biomasa en los sistemas agroforestales.

Asimismo, los aportes de carbono en fuentes de biomasa no arbórea (cultivo de plátano, herbáceas, hojarasca y raíz) son en pequeñas cantidades (Tabla 2), lo que se asemeja a lo reportado por Bringas (2010),

quien encontró que los restos superficiales representan menos del 6 %. Respecto al carbono en la hojarasca, se observa que los niveles encontrados son mayores que en las herbáceas-arbustos; 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 una cantidad de hojarasca.

Los datos obtenidos de biomasa y carbono, oscilan entre 1,50 y 3,08 tC/ha, siendo similares a lo reportado por Dávila (2023); concluyendo que los terrenos usados como plantaciones de capirona y bolaina, purma y maíz tienen mayor capacidad de almacenamiento. Asimismo, las labores silviculturales afectan directamente 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 Marín et al.; (2019) en que, en condiciones de sombra, el 90 % del carbono puede ser retenido en la biomasa.

En relación con el contenido de carbono en el suelo (t/ha), se observa que la Terraza baja registró la mayor media, con un valor de 83,79 tC/ha, mientras que la Terraza media mostró la más baja, con 64,04 tC/ha. Respecto a la densidad aparente del suelo (g/cc), se encontró que la mayor media se presentó en la Terraza media, con 1,06 tC/ha, mientras que la Terraza alta tuvo la menor, con 0,99 tC/ha, siendo esto más poroso, y de menor peso. En cuanto al peso del volumen del suelo (t/ha), se observa que la media más alta se encontró en la Terraza media, con 1057,39 tC/ha, mientras que en la Terraza alta la media fue de 984,92 tC/ha. Sin embargo, la menor densidad aparente del suelo se encuentra en la primera capa de 0 a 10 cm de profundidad con 0,85 g/cc y en la terraza media la densidad es mayor con 1,04 g/cc a una profundidad de 20 a 30 cm.

La acumulación significativa de biomasa en el suelo, debido a la presencia variable de hojarasca, es un factor clave que contribuye a estas variaciones. En consecuencia, los SAF más jóvenes albergan una cantidad considerable de carbono en el suelo, lo que sugiere un mayor potencial de almacenamiento en comparación con los SAF más antiguos. Pusare y Asto (2021) respaldan esta noción al descubrir que los SAF que incluyen cultivos de café de 3 a 5 años exhiben una capacidad de almacenamiento de carbono mayor (224,26 t/ha) que aquellos de 8 a 10 años (195,5 t/ha). Estas diferencias reflejan una serie de variables interconectadas. Según Robert (2002), la presencia de carbono en el suelo está estrechamente vinculada a la formación del suelo a lo largo del tiempo, donde se establece un equilibrio dinámico entre la absorción de material en descomposición y la mineralización.

4.2. Carbono total almacenado en tres unidades fisiográficas en Huanganapampa

Los niveles de carbono total en el SAF de la Terraza media son significativamente menores a los niveles obtenidos en las unidades de Terraza baja y Terraza alta, porque presentaban suelos con mayor fertilidad o debido al manejo u otros factores de ambos SAF. Por otro lado, Dávila (2022) reportó niveles más bajos de carbono en tres tipos de sistemas agroforestales, con medias de 40,42 tC/ha en sistemas silvopastoriles, 71,51 tC/ha en café sin sombra y 81,30 tC/ha en café bajo sombra.

Los SAF emergen para mejorar las capacidades productivas de los cultivos principales, además de brindar servicios ecosistémicos sin comprometer los rendimientos agrícolas. Por eso, al incorporar especies forestales dentro de su estructura, los SAF simulan la biodiversidad y la capacidad de un bosque natural y de acuerdo con Ríos (2018) y Pusare y Asto (2021), confiere una mayor capacidad para secuestrar carbono tanto en el subsuelo como en la vegetación aérea, en comparación con otros usos del suelo como ganadería o monocultivos.

Además, los SAF promueven prácticas agrícolas sostenibles de bajo impacto que preservan la salud de las plantas y los suelos. Destacan también por sus beneficios en el reciclaje de nutrientes y el uso de vegetación perenne, que contribuyen al almacenamiento a largo plazo del carbono (Robert, 2002; Chou y Gutiérrez, 2013). Aunque el secuestro de carbono puede no ser el objetivo principal de los sistemas agroforestales, su capacidad para aumentar las reservas globales de carbono es un beneficio adicional significativo (Callo, 2001; Alegre et al.; 2002).

La ausencia de diferencias significativas entre 10-20 cm, puede deberse a una uniformidad en la compactación del suelo a esa profundidad específica en todas las parcelas. Sin embargo, las disparidades a 0-10 cm y 20-30 cm sugieren variaciones en la estructura del suelo superficial y en las capas más profundas debido a factores como la textura del suelo, la actividad biológica y las prácticas de manejo. Asimismo, los valores más elevados en la Terraza media pueden indicar una mayor compactación o menor porosidad, posiblemente debido a procesos geomorfológicos o al uso del suelo. La menor densidad en Terraza alta podría estar relacionada con una mayor actividad biológica y mejor aireación.

4.3. Identificación de los servicios ecosistémicos en los cultivos de plátano como sistema agroforestal

Los datos recopilados en este estudio respaldan la idea de que los sistemas agroforestales (SAF) representan una significativa reserva de dióxido de carbono (CO₂) acumulado a lo largo de años de actividad fotosintética, superando los niveles observados en plantaciones individuales. Los ecosistemas terrestres tienen la

capacidad de acumular hasta tres veces más carbono (1/5 en la vegetación, 4/5 en el suelo) que el presente en la atmósfera. En cuanto a la calidad del suelo, la Tabla 8 presenta los resultados de la evaluación basada en la Tabla de Colores Munsell. Según la Robert (2002), la Tabla Munsell, puede proporcionar indicios sobre la cantidad de materia orgánica presente en las capas minerales, considerando también la clase textural del suelo. La combinación de minerales de tonalidades claras y materiales orgánicos de colores más oscuros tiende a oscurecer el color del suelo a medida que aumenta la cantidad de materia orgánica en él. Este fenómeno refleja la influencia significativa, La combinación de minerales de tonalidades claras y materiales orgánicos de colores más oscuros tiende a oscurecer el color del suelo a medida que aumenta la cantidad de materia orgánica en él.

De acuerdo con lo expuesto el contenido de materia orgánica en las unidades fisiográficas analizadas alcanza su punto máximo en el rango de profundidad de 0-10 cm, caracterizado por tonalidades más oscuras, y disminuye gradualmente a medida que aumenta la profundidad del suelo, específicamente en los intervalos de 10-20 cm y 20-30 cm. La materia orgánica del suelo, compuesta por residuos vegetales y animales en diversos estados de descomposición, influye significativamente en la actividad microbiana, ya que el carbono disponible en el suelo actúa como fuente de energía para los microorganismos. Por otro lado, las evaluaciones de temperatura, humedad relativa y luminosidad con el propósito de desarrollar un modelo de manejo climático para el crecimiento del banano dentro del sistema agroforestal (SAF). Se registró una temperatura máxima de 28,88 °C y una mínima de 26,16 °C en la Terraza Alta del SAF. Los datos obtenidos fuera del rango de la parcela, que oscilaron entre 29,88 y 30,54 °C, indican que el SAF contribuye a reducir la temperatura en un promedio de 0,99 a 2,20 °C. Además, se observó un incremento en la humedad, con aumentos que variaron entre 4,00 y 13,60 tC/ha. Asimismo, se constató que el SAF reduce la incidencia de la luminosidad en los sistemas de producción, lo que sugiere que la presencia de árboles forestales como sombra genera un microclima favorable para el cultivo del plátano.

En relación con la regulación del microclima en los sistemas agroforestales, diversos se confirma que las principales causas de las variaciones que se producen bajo el dosel de sombra incluyen la cantidad y calidad de la penetración de la luz, la temperatura, el suelo y las hojas de plátano, así como la velocidad del viento, la humedad del suelo y la evaporación del agua del suelo (Cannavo et al.; 2011). En el mismo contexto, Avelino y Rivas (2013), Avelino et al. (2015) y Villarreyña (2016) señalan evidencia que las alteraciones significativas relacionadas con los impactos de la lluvia. El presente estudio confirma el hallazgo de Lin (2007) de que las temperaturas máximas de los elementos que interactúan dentro del

sistema reducen, lo que también se refleja en los resultados de la humedad relativa, que tienden a aumentar como resultado de una mayor retención de agua y formación de rocío. Es importante destacar que estas características contribuyen al control de plagas y enfermedades en los cultivos. Según Cannavo et al. (2011), la sombra proporcionada por las especies arbóreas ayuda a reducir significativamente la incidencia de la antracnosis y disminuye la probabilidad de la roya del café. Se observaron menos ramas muertas, menos óxido y problemas de insectos, así como enfermedades menos graves en comparación con los cafetales no asociados (Avelino y Rivas, 2013; Avelino et al., 2015).

En términos de biodiversidad, todos los cultivos, incluido el plátano como sistema agroforestal, llega a contribuir a preservar diversas especies de flora y fauna, como aves, polinizadores y controladores biológicos (Zuluaga, 2004; Zavala et al., 2018). Por otro lado, algunos investigadores han observado que, a diferencia de los sistemas agroforestales, donde las aves suelen establecerse en las copas de los árboles que proporcionan sombra al café, hasta la mitad de la variedad de aves se registró en fincas cafetaleras no asociadas. Es crucial recordar que los sistemas agroforestales conservan la biodiversidad al actuar como sitios críticos para la distribución de semillas y como corredores ecológicos para las especies animales que atraviesan entornos agrícolas (Alegre et al., 2002; Villarreyna, 2016). Aunque son importantes para la conservación de la biodiversidad, los sistemas agroforestales no pueden sustituir ni presentarse como una alternativa viable a los bosques naturales.

En cuanto a los servicios ecosistémicos evaluados en las tres parcelas, el sistema agroforestal de plátano genera un microclima favorable, donde la temperatura dentro de la parcela es más templada que fuera de la parcela, la humedad relativa es más alta dentro de la parcela y la luminosidad es menor, lo que crea condiciones propicias para una mayor producción sostenible.

V. CONCLUSIONES

La mayor cantidad de carbono almacenado en (t/ha) de los tres ecosistemas, presenta la terraza alta con 2,57, quedando al último la terraza baja con 2,28, de carbono, por la influencia del tipo de suelo. Asimismo, el carbono de las especies forestales presentó el mayor contenido de carbono en la biomasa vegetal en las tres parcelas, terraza alta 12,73, terraza baja 9,28, y terraza media 5,56, seguido del carbono en los plátanos con 2,57, y por último el carbono en las herbáceas y arbustivas que presenta la terraza media 0,81, terraza baja 0,64 y terraza alta 0,46 tC/ha.

La terraza alta presenta la mayor cantidad de Carbono total en el SAF con 100,04 (t/ha), seguido de la terraza baja con 98,4, quedando al último la terraza media con 74,86. Así mismo el Carbono total en el suelo en la

terracea baja, aportó mayor cantidad de carbono con 83,79 (t/ha), frente a la terraza media, 64,04, y la que menos aportó fue en la biomasa radicar vegetal, tanto en la terraza alta, baja y media con valores de 1,25; 0,64 y 0,41 tC/ha respectivamente.

La terraza alta presentó el mejor servicio ecosistémico debido al aporte de materia orgánica y biomasa vegetal; asimismo presenta un microclima favorable con temperaturas más bajas, menor humedad relativa y menor luminosidad lo que contribuye a un entorno propicio para la producción sostenible.

Los sistemas agroforestales del cultivo de plátano permiten almacenar mayor cantidad de carbono en el suelo, reduciendo los gases de efecto invernadero y por lo tanto mitigando el cambio climático debido a los servicios ecosistémicos que genera estos sistemas agroecológicos.

VI. REFERENCIAS

- Acosta, M., Etchevers, J. D., Monreal, C., Quednow, K. & Hidalgo, C. (2001, noviembre 26–30). *Un método para la medición del carbono en los compartimientos subterráneos (raíces y suelo) de sistemas forestales y agrícolas en terrenos de ladera en México* [Ponencia]. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia, Chile.
- Alpizar, L., Enríquez, G. A., Fassbender, H. W., Heuveland, J. (1983). *Estudios de sistemas agroforestales en el experimento central del CATIE, Turrialba*. Departamento de recursos naturales Renovables del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Alvarado, A. & Forsythe, W. (2005). Variaciones de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Revista Agronomía Costarricense*, 29(1), 85-94.
- Andrade, H. J., Figueroa, J. M^a. del P. & Silva, D. P. (2013). Almacenamiento de carbono en cacaotales (*Theobroma cacao*) en Armero-Guayabal (Tolima, Colombia). *Scientia Agroalimentaria*, 1, 6-10.
- Lapeyre, T.; Alegre, J. & Arevalo, L. (2004). Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*, 3(1-2), 35-44.
- Bringas Paredes, H. A. (2010). *Estimación del carbono almacenado en un sistema agroforestal de cacao (Theobroma cacao L.) comparado con un bosque secundario de tres edades* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/119>

- Cannavo, P., Sansoulet, J., Harmand, J. M., Siles, P., Dreyer, E. & Vaast, P. (2011). Agroforestry associating coffee and *Inga densiflora* results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.11.005>
- Castro, R. (2017). *Almacenamiento de carbono y análisis de rentabilidad en sistemas agroforestales con Coffea arábica (L.) en la zona de los Santos, Costa Rica*. [Tesis de pregrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio CORE.
- Ciesla, W. M. (1996). *Cambios climáticos, bosques y ordenación forestal: una visión de conjunto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Dávila Cueva, V. C. (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. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2339>
- Gonzales Rodríguez, J. F. (2018). *Carbono almacenado en sistemas agroforestales de Coffea arábica L. “café” de 4 y 7 años en relación a la gradiente altitudinal, Huánuco*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/1476>
- Lin, B. (2007). Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144(1–2), 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.009>
- Nair, P. K. R. (2004). Agroforestry: Trees in support of sustainable agriculture. En H. Hillel, C. Rosenzweig, D. Powlson, K. Scow, M. Singer & D. Sparks (Eds.), *Encyclopedia of soils in the environment* (pp. 35–44). Elsevier.
- Pérez Meza, 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 inédita, Universidad Nacional Agraria de la Selva].
- Robert, M. (2001). *Soil carbon sequestration for improved land management* (World Soil Resources Report No. 96). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Robert, M. (2001). *Soil carbon sequestration for improved land management* (World Soil Resources Report No. 96). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Salazar, A., Saucedo, J. & 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. *Ciencias Naturales e Ingeniería*, 1(1), 20–26. <http://revistas.untrm.edu.pe/index.php/CNI/article/view/261/906>
- Taiz, L. & Zeiger, E. (1998). *Plant physiology* (3rd ed.). Sinauer Associates, Inc., Publishers.
- Venanzi, S., Vallati, A. & Kruger, H. (2011). *Crecimiento temprano en trigo en función de la densidad aparente del suelo*. Agrositio. <http://www.agrositio.com/vertext/vertext.php?id=75010&se=19>
- Watson, R. T., Noble, I. R., Bolin, B., Ravindranath, N. H., Verardo, D. J. & Dokken, D. J. (2000). *Land use, land-use change and forestry*. Cambridge University Press.
- Zavala, J., Zavala, S. & Mansilla, L. (2018). Estimación de la biomasa y carbono almacenado en un sistema agroforestal del cafetal de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. *Investigación y Amazonía*, 8(5), 1–8. <https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/200>