



# Economic valuation of carbon sequestration in coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry systems in Junín, Peru

## Valoración económica de la captura de carbono en sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) en Junín, Perú

Violeta Valderrama Real\* & Karen I. Eckhardt

Universidad Científica del Sur, Facultad de Ciencias Ambientales, Grupo de Investigación de Restauración de Ecosistemas y Calidad Ambiental (REC). Lima, Perú. \*Corresponding author: v.valderramareal@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** Coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry systems (AFS) are carbon sinks that can generate additional income for coffee producers.

**Objective.** To compare carbon sequestration in coffee AFS compared with monocultures and to estimate the economic value of this environmental service.

**Materials and methods:** The study was carried out in coffee AFS (15 plots) and monocultures (17 plots) in a montane forest in the province of Chanchamayo, Junín, Peru. Allometric equations were used to estimate aboveground biomass. Opportunity cost was used to calculate the economic value of the carbon stored in the AFS.

**Results.** Coffee AFS store more carbon than monocultures ( $62.67 \pm 63.6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  vs.  $6.25 \pm 7.33 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , respectively;  $P < 0.05$ ). Floristic diversity in the AFS had no significant impact on carbon storage; however, more diverse composition showed higher carbon contents. The average opportunity cost per ton of CO<sub>2</sub> equivalent (tCO<sub>2</sub>eq) is 1774.2 USD·ha<sup>-1</sup>·yr<sup>-1</sup>. If a payment of 20.83 USD and 89.45 USD per tCO<sub>2</sub>eq is implemented, farmers' income from selling CO<sub>2</sub>eq could increase from 4862.17 to 20879.5 USD·ha<sup>-1</sup>·yr<sup>-1</sup>.

**Conclusions.** Coffee AFS sequester 80 % more carbon than monocultures. Implementing payments for CO<sub>2</sub>eq capture would generate significant additional income for farmers, ranging from 3.6 to 16.9 times their current earnings.

**Keywords:** aboveground biomass, opportunity cost, carbon dioxide, monocultures, environmental service.

### Resumen

**Introducción.** Los sistemas agroforestales (SAF) de café (*Coffea arabica* L.) son sumideros de carbono que pueden generar ingresos adicionales para los caficultores.

**Objetivo.** Comparar la captura de carbono en SAF de café con respecto a los monocultivos y estimar el valor económico de dicho servicio ambiental.

**Materiales y métodos:** El estudio se realizó en SAF de café (15 parcelas) y en monocultivos (17 parcelas) en un bosque montano en la provincia de Chanchamayo, Junín, Perú. Se emplearon ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea. El costo de oportunidad se utilizó para calcular el valor económico del carbono almacenado en los SAF.

**Resultados.** Los SAF de café almacenan más carbono que los monocultivos ( $62.67 \pm 63.6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  vs.  $6.25 \pm 7.33 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , respectivamente;  $P < 0.05$ ). La diversidad florística en los SAF no afectó significativamente el almacenamiento de carbono; sin embargo, las composiciones más diversas mostraron mayores contenidos. El costo de oportunidad promedio por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente (tCO<sub>2</sub>eq) es 1774.2 USD·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>; si se implementa un pago entre 20.83 USD y 89.45 USD por tCO<sub>2</sub>eq, los ingresos de los caficultores por la venta de CO<sub>2</sub>eq podrían aumentar desde 4862.17 hasta 20879.5 USD·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>.

**Conclusiones.** Los SAF de café capturan 80 % más de carbono que los monocultivos. La implementación de un pago por la captura de CO<sub>2</sub>eq generaría ingresos adicionales significativos para los caficultores, entre 3.6 y 16.9 veces más altos que sus ingresos actuales.

**Palabras clave:** biomasa aérea, costo de oportunidad, dióxido de carbono, monocultivos, servicio ambiental.

Please cite this article as follows (APA 7): Valderrama Real, V., & Eckhardt, K. I. (2025). Economic valuation of carbon sequestration in coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry systems in Junín, Peru. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 31, e24046. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2024.10.046>



## Introduction

In the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2022) it is noted that climate change results from the increase of greenhouse gas (GHG) caused by anthropogenic activities, which are generating severe impacts on agricultural systems (Phillips et al., 2017; Timoteo et al., 2016). This is due to changes in rainfall patterns, droughts, floods and the geographic redistribution of pests and diseases (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2016).

In Peru, 47.9 % of GHG emissions come from land use and land-use change, as well as forestry, and 13.5 % from agriculture (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2023). In response to this issue, the Peruvian government has proposed reducing GHG emissions by 40 % by 2030 (Actualidad Ambiental, 2020). One strategy to achieve this target is the implementation of sustainable production systems, such as agroforestry systems (AFS).

AFS are a viable option for achieving resilience and connectivity in landscapes facing increasing human pressure (Doblas-Miranda et al., 2014; Grosrenaud et al., 2021). AFS contribute to mitigating the effects of climate change (Schroth et al., 2016), because the associations of crops with tree species increase carbon stocks (De Stefano & Jacobson, 2018), biodiversity (Torralba et al., 2016), water infiltration and retention, as well as soil fertility (Awazi & Tchamba, 2019; Villa et al., 2020).

Coffee AFS stand out as important carbon sinks. According to Hergoulac'h et al. (2012), coffee AFS store more carbon than monocultures, with 25.2 Mg·ha<sup>-1</sup> and 9.8 Mg·ha<sup>-1</sup>, respectively. Ehrenbergerová et al. (2016) reported that coffee AFS combined with *Pinus* spp. store up to 177.5 Mg·ha<sup>-1</sup>, whereas coffee monocultures retain 99.7 Mg·ha<sup>-1</sup>. Espinoza-Domínguez et al. (2012) estimated that coffee AFS associated with pink cedar (*Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn.), macadamia (*Macadamia tetraphylla* L. A. S. Johnson), and banana (*Musa paradisiaca* L.) sequester an average of 110 Mg·ha<sup>-1</sup> in aboveground biomass.

In Peru, the Junín region is one of the main coffee-growing areas, accounting for 16 % of national coffee production (United States Department of Agriculture [USDA], 2024). According to the National Coffee Board of Peru (2019), between 2016 and 2019, losses were reported nationwide due to low coffee prices and high production costs, which reached 2.54 USD·kg<sup>-1</sup>, resulting in losses of up to 0.84 USD·kg<sup>-1</sup> in some cases. In addition, 80 % of coffee farms in Peru use traditional technology, which contributes to low yields, with a maximum of 15 quintals per hectare annually (León

## Introducción

En el sexto informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2022) se menciona que el cambio climático es consecuencia del incremento de los gases de efecto invernadero (GEI), producto de las actividades antropogénicas que están generando graves impactos en los sistemas agrícolas (Phillips et al., 2017; Timoteo et al., 2016). Esto debido a los cambios en los regímenes pluviométricos, sequías, inundaciones y la redistribución geográfica de plagas y enfermedades (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2016).

En Perú, 47.9 % de las emisiones de GEI provienen del uso y cambio de suelo, así como de la silvicultura, y 13.5 % de la agricultura (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2023). Ante esta problemática, el gobierno peruano ha propuesto reducir 40 % de las emisiones de GEI para 2030 (Actualidad Ambiental, 2020). Una de las estrategias para lograr la meta establecida es a través de la implementación de sistemas productivos sostenibles como los sistemas agroforestales (SAF).

Los SAF son una opción viable para lograr la resiliencia y conectividad en paisajes ante la creciente presión humana (Doblas-Miranda et al., 2014; Grosrenaud et al., 2021). Los SAF ayudan en la mitigación de los efectos del cambio climático (Schroth et al., 2016), ya que las asociaciones con cultivos y especies arbóreas incrementan las reservas de carbono (De Stefano & Jacobson, 2018), la biodiversidad (Torralba et al., 2016), la infiltración y retención de agua, así como la fertilidad del suelo (Awazi & Tchamba, 2019; Villa et al., 2020).

Los SAF de café se destacan como importantes sumideros de carbono. Según Hergoulac'h et al. (2012), los SAF de café almacenan más carbono que los monocultivos con 25.2 Mg·ha<sup>-1</sup> y 9.8 Mg·ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Ehrenbergerová et al. (2016) informaron que los SAF de café combinados con *Pinus* spp. almacenan carbono en cantidades de hasta 177.5 Mg·ha<sup>-1</sup>, mientras que los monocultivos de café retienen 99.7 Mg·ha<sup>-1</sup>. Asimismo, Espinoza-Domínguez et al. (2012) estimaron que los SAF de café asociados con cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn.), macadamia (*Macadamia tetraphylla* L. A. S. Johnson) y plátano (*Musa paradisiaca* L.) capturan en promedio 110 Mg·ha<sup>-1</sup> en biomasa aérea.

En Perú, la región Junín es una de las principales zonas cafetaleras con 16 % de la producción nacional (United States Department of Agriculture [USDA], 2024). Según la Junta Nacional del Café (2019), entre 2016 y 2019 se reportaron pérdidas a nivel nacional debido a los bajos precios del cultivo y los costos elevados de producción que alcanzaban 2.54 USD·kg<sup>-1</sup>,

Carrasco, 2020). Given this situation, low yields and volatile coffee prices generate economic losses for farmers, who are forced to expand their plantations, leading to deforestation in tropical forests. Moreover, reduced income leads to migration to urban areas and contributes to an increase in regional poverty, reaching 16.21 % (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2020). As an alternative to this problem, the economic valuation of carbon sequestration in coffee AFS is proposed through the opportunity cost (OC) method, within a payment for ecosystem services program, to increase producer's income.

In Latin America, public incentive programs have been developed, which recognize ecosystem services and generate additional income for farmers. Among the most notable are the National Forestry Financing Fund (FONAFIFO) in Costa Rica and the Incentives Program for Small Holders of Forest Lands (PINPEP) in Guatemala (National Forest Institute [INAB], 2025), which offer financial compensation for environmental conservation. In Brazil, the Suruí Carbon Project was a pioneer in the scale of carbon credits certified under the REDD+ mechanism, promoting sustainable AFS (Charchalac Santay, 2012). In Peru, the Alto Mayo Protected Forest Conservation Project has generated more than 4 million carbon credits and has prevented the deforestation of 6000 ha, demonstrating the feasibility of valuing the environmental services provided by forests (Conservación Internacional, 2025).

In this context and given the importance of studies that economically quantify the environmental contribution of coffee AFS, this research aims to compare carbon sequestration in AFS with that of monocultures and to estimate the economic value of this environmental service as a mechanism to increase income from coffee AFS. The hypothesis is that coffee AFS have greater carbon-sequestration potential and higher economic viability compared with monocultures, due to their capacity to generate additional income through payment-for-ecosystem-services schemes. This hypothesis is supported by previous studies that demonstrate the potential of AFS to combine environmental and economic benefits (Canal Daza & Andrade Castañeda, 2019; De Stefano & Jacobson, 2018; Funk et al., 2019).

## Materials and Methods

### Study area

The study area is located in the sub-watershed of the Toro and Garou rivers in Chanchamayo, Junín, at elevations ranging from 600 to 2500 m. The area comprises two life zones: pluvial montane forest and very humid lower montane forest. Temperature ranges

situación que generó pérdidas de hasta 0.84 USD·kg<sup>-1</sup> en algunos casos. Además, 80 % de los cultivos de café en Perú utiliza tecnología tradicional, lo que contribuye a un rendimiento bajo con máximo 15 quintales por hectárea anualmente (León Carrasco, 2020). Ante lo mencionado, los bajos rendimientos y la volatilidad de los precios del café generan pérdidas económicas para los agricultores, quienes se ven forzados a expandir sus cultivos, lo que causa deforestación en los bosques tropicales. Además, la reducción de ingresos conlleva a la migración a zonas urbanas y contribuye al aumento de la pobreza regional que alcanza 16.21 % (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2020). Como alternativa a tal problemática se propone la valoración de la captura de carbono en los SAF de café mediante el método de costo de oportunidad (CO), dentro de un programa de pago por servicios ecosistémicos, para incrementar los ingresos de los productores.

En América Latina se han desarrollado programas de incentivos públicos que reconocen los servicios ecosistémicos y generan ingresos adicionales para los agricultores. Entre ellos destacan el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) en Costa Rica y el Programa de Incentivos para Poseedores de Pequeñas Extensiones de Tierras Forestales (PINPEP) en Guatemala (Instituto Nacional de Bosques [INAB], 2025), los cuales ofrecen compensaciones financieras por la conservación ambiental. En Brasil, el Proyecto de Carbono Suruí fue pionero en la venta de créditos de carbono certificados bajo el mecanismo REDD+, promoviendo SAF sostenibles (Charchalac Santay, 2012). En Perú, el proyecto de Conservación del Bosque de Protección Alto Mayo ha generado más de 4 millones de bonos de carbono y ha evitado la deforestación de 6000 ha, lo cual demuestra la viabilidad de valorizar los servicios ambientales de los bosques (Conservación Internacional, 2025).

En este contexto y considerando la relevancia de los estudios que valorizan, económicamente, el aporte ambiental de los SAF de café, la presente investigación tiene como objetivo comparar la captura de carbono de los SAF en relación con los monocultivos y estimar el valor económico de dicho servicio ambiental que incrementa los ingresos generados por la producción de SAF de café. Se plantea la hipótesis de que los SAF de café presentan mayor potencial de captura de carbono y mayor viabilidad económica en comparación con los monocultivos, debido a su capacidad de generar ingresos adicionales mediante esquemas de pago por servicios ecosistémicos. Esta hipótesis se fundamenta en estudios previos que demuestran el potencial de los SAF para combinar beneficios ambientales y económicos (Canal Daza & Andrade Castañeda, 2019; De Stefano & Jacobson, 2018; Funk et al., 2019).

from 16 to 24.5 °C, mean annual precipitation of  $3\,142 \pm 398.6$  mm and a potential evapotranspiration of  $1\,347.6 \pm 30.6$  mm·yr<sup>-1</sup>.

The agroforestry and monoculture soils have a loam texture. According to reported literature, agroforestry soils have 24.6 % moisture retention and 2.2 % organic matter, similar to those of monocultures (Noriega-Puglisevich & Eckhardt, 2022).

#### Land use identification

A simple random stratification was conducted using field data and satellite imagery. Based on land cover and vegetation type (herbaceous, shrub, and tree), a land use map was generated. For this purpose, land use trajectories, 2019 satellite imagery (Sentinel at 10 m), and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) were employed (Table 1). The images were analyzed using ArcGIS 10.7 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2019).

#### Estimation of carbon stocks

##### Plot establishment

Following the methodology of Phillips et al. (2016), rectangular plots measuring 20 x 50 m were randomly established, and all trees with DBH greater than 30 cm

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El área de estudio se localiza en la subcuenca de los ríos Toro y Garou en Chanchamayo, Junín, con altitudes de 600 a 2500 m. El área abarca dos zonas de vida: bosque montano pluvial y bosque montano bajo muy húmedo. La temperatura oscila entre 16 y 24.5 °C con una precipitación media anual de  $3\,142 \pm 398.6$  mm y una evapotranspiración potencial de  $1\,347.6 \pm 30.6$  mm·año<sup>-1</sup>.

Los suelos agroforestales y de monocultivo tienen textura franca. De acuerdo con la literatura reportada, los suelos de agroforestería tienen 24.6 % de retención de humedad y 2.2 % de materia orgánica, similar a los de monocultivo (Noriega-Puglisevich & Eckhardt, 2022).

### Identificación de usos de suelos

Se hizo una estratificación aleatoria simple utilizando datos de campo e imágenes satelitales. Con base en la cobertura y tipo de vegetación (herbácea, arbustiva y arbórea) se generó un mapa de los usos de suelo. Para esto, se emplearon las trayectorias de uso de suelo, imágenes satelitales de 2019 (Sentinel a 10 m) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Cuadro 1). Las imágenes se analizaron con el software

**Table 1. Land use identification in Chanchamayo, Junín, Peru.**

**Cuadro 1. Identificación de usos de suelo en Chanchamayo, Junín, Perú.**

Land use / Uso del suelo	Criteria / Criterio	NDVI*	Area (ha) / Área (ha)	Total area (%) / Área total (%)
Montane forest in regeneration / Bosque montano en regeneración	Areas with continuous tree cover in the study area / Zonas con cobertura arbórea continua en el área de estudio	0.7 to 1	1443.42	77.81
Agroforestry / Agroforestería	Areas with sparse cover, shaded coffee crops (rows are visible under tree canopy) / Zonas con cobertura no densa, cultivos de café bajo sombra (se denotan hileras bajo la cobertura arbórea)	0.45 to 0.7	176.07	9.49
Cropland / Cultivo	Areas without continuous cover or with grass, coffee, and banana crops / Zonas sin cobertura continua o con pastos, cultivos de café y plátano	0.05 to 0.45	219.29	11.82
Urban area / Área urbana	-	-1 to 0.05	16.20	0.87
Total			1854.98	100

\*According to Zhe and Zhang (2021): NDVI = 1 to 0.1, areas without vegetation, water, or with very sparse vegetation; NDVI = 0.1 to 0.33 areas with low vegetation cover; NDVI = 0.33 to 0.66 areas with moderate vegetation cover and NDVI > 0.66 areas with abundant vegetation.

\*Según Zhe y Zhang (2021): NDVI = 1 a 0.1, espacios sin vegetación, agua o vegetación muy pobre; NDVI = 0.1 a 0.33 espacios con poca vegetación; NDVI = 0.33 a 0.66 espacios con vegetación moderada y NDVI > 0.66 espacios con vegetación abundante.

were measured. Within each plot, three subplots measuring 10 x 10 m were set up to measure trees with DBH between 5 and 30 cm, as well as the height and stem diameter of coffee plants measured 15 cm above the ground. Figure 1 shows the spatial distribution of the 15 plots corresponding to coffee AFS and the 17 plots of monocultures included in the study. Tables 2 and 3 present the characteristics of the identified AFS and monocultures.

### Calculation of aboveground biomass in coffee AFS and monocultures

Aboveground biomass was estimated using a non-destructive method employing allometric equations (Table 4). These equations are recommended for montane forests because they were developed under similar climate and precipitation conditions. After calculating the aboveground biomass (kg), it was converted to total carbon (Mg·ha<sup>-1</sup>), assuming that carbon corresponds to 50 % of the biomass (Rafidinal et al., 2021; Tak & Kakde, 2020).

### Estimation of land-use profitability

The productive characterization was based on 102 surveys applied to households selected from the

ArcGIS 10.7 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2019).

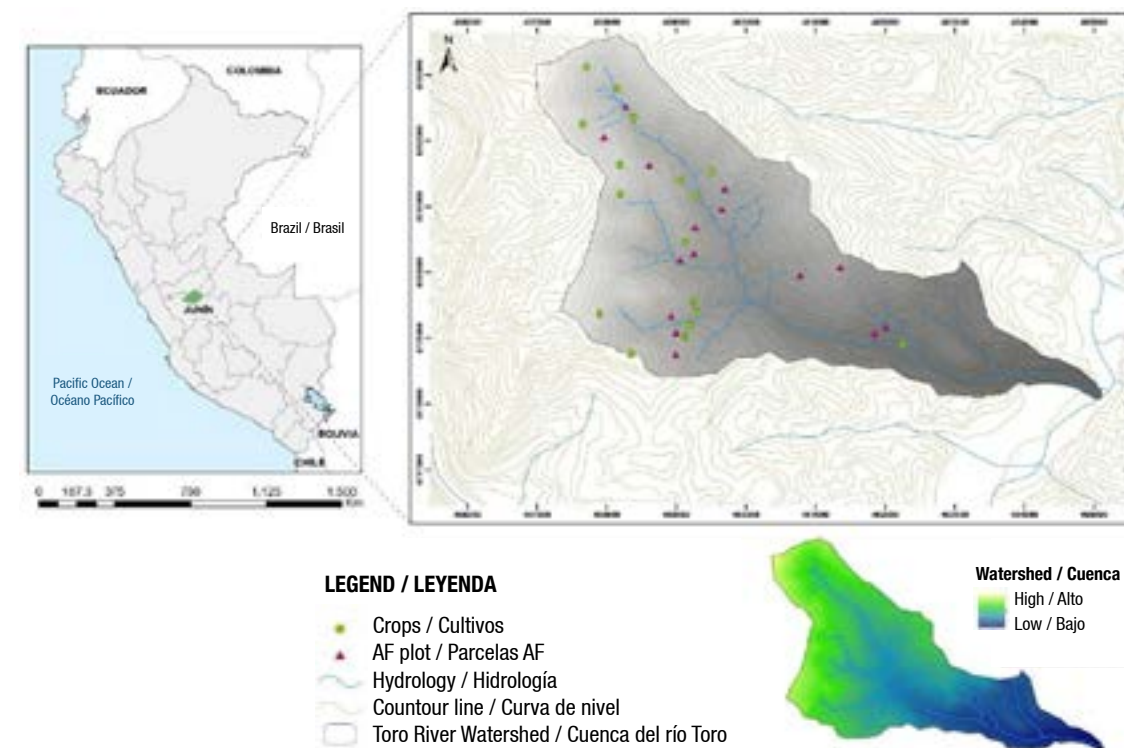
### Determinación de carbono almacenado

#### Establecimiento de parcelas

Con base en la metodología de Phillips et al. (2016) se establecieron parcelas rectangulares de 20 x 50 m al azar y se midieron los árboles con DAP superior a 30 cm. En cada parcela se establecieron tres subparcelas de 10 x 10 m, donde se midieron árboles con DAP entre 5 y 30 cm, además de la altura y el diámetro del tronco de las plantas de café a 15 cm del suelo. La Figura 1 muestra la distribución espacial de las 15 parcelas correspondientes a SAF de café y las 17 de monocultivo consideradas en el estudio. Los Cuadros 2 y 3 detallan las características de los SAF y monocultivos identificados.

### Cálculo de la biomasa aérea en los SAF de café y monocultivos

La biomasa aérea se estimó a través de un método no destructivo empleando ecuaciones alométricas (Cuadro 4). Estas ecuaciones son recomendadas para el bosque montano por haber sido desarrolladas bajo condiciones similares de clima y precipitación. Luego de hallar



**Figure 1. Location map and field plots surveyed in Chanchamayo, Junín, Peru. Source: Compiled by the authors using ArcGIS 10.7 (ESRI, 2019).**

**Figura 1. Mapa de ubicación y parcelas agroforestales (AF) establecidas en Chanchamayo, Junín, Perú. Fuente: Elaboración propia con ArcGIS 10.7 (ESRI, 2019).**

**Table 2. Coffee agroforestry systems (AFS) in the study area in Chanchamayo, Junín, Peru.****Cuadro 2. Sistemas agroforestales (SAF) de café en el área de estudio en Chanchamayo, Junín, Perú.**

Code/ Código	AFS identified / SAF identificados		Tree distribution in the AFS/ Distribución de los árboles en los SAF
	Common name / Nombre común	Scientific name / Nombre científico	
AFS 1/ SAF 1	Coffee + inga tree / Café + paca	<i>Coffea arabica</i> L. + <i>Inga</i> spp.	Distances of 8 m x 8 m, 10 m x 10 m o 12 m x 12 m. In some cases, the distribution is not uniform because they are part of remnants of primary forests. / Distancias de 8 m x 8 m, 10 m x 10 m o 12 m x 12 m. En algunos casos no tienen distribución equitativa, debido a que forman parte de remanentes de bosques primarios.
AFS 2/ SAF 2	Coffee + a fruit tree species (banana or avocado) / Café + una especie frutal (plátano o palta)	<i>C. arabica</i> + ( <i>Musa</i> × <i>paradisíaca</i> L. or <i>Persea americana</i> Mill.)	Uniform distribution, because they were strategically combined to enhance production / Distribución equitativa, debido a que fueron asociados estratégicamente para obtener una mejor cosecha /
AFS 3/ SAF 3	Coffee + inga tree + a fruit tree species (banana or avocado) / Café + paca + una especie frutal (plátano o palta)	<i>C. arabica</i> + <i>Inga</i> spp. + ( <i>Musa</i> × <i>paradisíaca</i> or <i>P. americana</i> )	La densidad de siembra de los árboles forestales es de 10 m x 10 m o de 12 m x 12 m
AFS 4/ SAF 4	Coffee + inga tree + a timber tree species (cedar, silk tree, eucalyptus, podocarpus tree, pine, walnut, or bay cedar) / Café + paca + una especie maderable (cedro, albizia, eucalipto, ulcumano, pino, nogal o bolaina)	<i>C. arabica</i> + <i>Inga</i> spp. + ( <i>Cedrela angustifolia</i> Sessé & Moc. ex DC., <i>Albizia</i> spp., <i>Eucalyptus</i> spp., <i>Retrophyllum rospigliosii</i> (Pilg.) C. N. Page, <i>Pinus tecunumanii</i> Egüiluz & Perry, <i>Lafoensia punicifolia</i> (Mart.) DC. or <i>Guazuma crinita</i> Mart.)	The planting density of the forest trees is 10 m x 10 m or 12 m x 12 m / La densidad de siembra de los árboles forestales es de 10 m x 10 m o de 12 m x 12 m
AFS 5/ SAF 5	Coffee + inga tree + a fruit tree species (avocado) + two timber tree species (cedar, eucalyptus, or podocarpus tree) / Café + paca + una especie frutal (palta) + dos especies maderables (cedro, eucalipto o ulcumano)	<i>C. arabica</i> + <i>Inga</i> spp. + <i>P. americana</i> + ( <i>C. angustifolia</i> , <i>Eucalyptus</i> spp., <i>R. rospigliosii</i> )	The planting density of the forest trees is 10 m x 10 m or 12 m x 12 m / La densidad de siembra de los árboles forestales es de 10 m x 10 m o de 12 m x 12 m
AFS 6/ SAF 6	Coffee + inga tree + a fruit tree species (avocado) + two timber tree species (podocarpus tree and eucalyptus) / Café + paca + una especie frutal (palta) + dos especies maderables (ulcumano y eucalipto)	<i>C. arabica</i> + <i>Inga</i> spp. + <i>P. americana</i> + <i>R. rospigliosii</i> + <i>Eucalyptus</i> spp.	The planting density of the forest trees is 10 m x 10 m or 12 m x 12 m /

National Directory of Population Centers of INEI (2018) between May 2021 and January 2022 (Figure 2). The sample size was determined using the formula for known finite populations (Spiegel & Stephens, 2009).

The producers surveyed are smallholder farmers with plots of 2-3 ha and limited access to financing and technology, which influences their production decisions. According to the information collected, 64 % establish coffee plantations using slash-and-burn methods, 9 % through selective thinning, and 27 % acquire already established coffee plots. Additionally, 85 % use uncertified seeds and mainly sell coffee as parchment.

la biomasa aérea (kg) se transformó a carbono total (Mg·ha<sup>-1</sup>), asumiendo que este corresponde al 50 % de la biomasa (Rafdinal et al., 2021; Tak & Kakde, 2020).

#### Estimación de la rentabilidad del uso de la tierra

La caracterización productiva se basó en 102 encuestas aplicadas a hogares seleccionados del Directorio Nacional de Centros Poblados del INEI (2018) entre mayo de 2021 y enero de 2022 (Figura 2). La muestra se determinó con la fórmula para poblaciones finitas conocidas (Spiegel & Stephens, 2009).

**Table 3. Description of the monocultures identified in the study area in Chanchamayo, Junín, Peru.****Cuadro 3. Descripción de los monocultivos identificados dentro del área de estudio en Chanchamayo, Junín, Perú.**

Common name / Nombre común	Scientific name / Nombre científico	Description / Descripción
Rocoto	<i>Capsicum pubescens</i> Ruiz & Pav.	Crops recently planted in the mid-watershed area. The most recent land-use transition was to coffee cultivation. /
Granadilla	<i>Passiflora ligularis</i> Juss.	Cultivo sembrado recientemente en el sector de la cuenca media. La última transición de uso de suelo fueron cultivos de café.
Café sin sombra	<i>Coffea arabica</i> L.	Coffee plantations with weed presence and without shade trees. / Cafetales con presencia de maleza y sin árboles sombra
Mandarina	<i>Citrus reticulata</i> Blanco	Farmers believe the crop provides high short-term income / Los caficultores consideran que el cultivo genera altos ingresos en corto tiempo

**Table 4. Allometric equations used to estimate aboveground biomass (AGB, kg) of shade trees and monocultures.****Cuadro 4. Ecuaciones alométricas utilizadas para estimar la biomasa aérea (BA, kg) de árboles sombra y monocultivos.**

Species / Especie	Equation / Ecuación		Source / Fuente
General equation for trees / Ecuación general para árboles	AGB = 0.0509 * ρ(DBH) <sup>2</sup> H	BA = 0.0509 * ρ(DAP) <sup>2</sup> H	Chave et al. (2005)
<i>Inga</i> sp.	Log <sub>10</sub> (AGB) = -0.889 + 2.317 * Log <sub>10</sub> (DBH)	Log <sub>10</sub> (BA) = -0.889 + 2.317 * Log <sub>10</sub> (DAP)	Segura et al. (2006)
<i>Eucalyptus</i> sp.	AGB = 1.22 * DBH <sup>2</sup> * H x 0.01	BA = 1.22 * DAP <sup>2</sup> * H x 0.01	Senelwa and Siens (1997)
Multi-species shade trees / Multiespecie de árboles sombra	Log <sub>10</sub> (AGB) = -0.834 + 2.223 * Log <sub>10</sub> (DBH)	Log <sub>10</sub> (BA) = -0.834 + 2.223 * Log <sub>10</sub> (DAP)	Segura et al. (2006)
<i>Bambusa</i> sp.	AGB = 0.2223(DBH <sup>2.3264</sup> )	BA = 0.2223(DAP <sup>2.3264</sup> )	Gibbon et al. (2010)
<i>Musa x paradisíaca</i> L.	AGB = 0.030(DBH <sup>2.13</sup> )	BA = 0.030(DAP <sup>2.13</sup> )	Van Noordwijk (2002)
<i>Coffea arabica</i> L.	Log <sub>10</sub> (AGB) = -1.113 + 1.578 * Log <sub>10</sub> (d <sub>10</sub> ) + 0.581 * Log <sub>10</sub> (H)	Log <sub>10</sub> (BA) = -1.113 + 1.578 * Log <sub>10</sub> (d <sub>10</sub> ) + 0.581 * Log <sub>10</sub> (H)	Segura et al. (2006)

DBH = diameter (cm) at breast height (1.3 m above the ground), ρ = wood density (g·cm<sup>-3</sup>), Log<sub>10</sub> = base-10 logarithm; d<sub>10</sub> = stem diameter (cm) at 15 cm above the ground; H = total height (m).

DAP = diámetro del tronco (cm) a la altura del pecho (1.3 m sobre el suelo), ρ = densidad de la madera (g·cm<sup>-3</sup>), Log<sub>10</sub> = logaritmo base10; d<sub>10</sub> = diámetro del tronco (cm) a 15 cm sobre el suelo; H = altura total (m).

#### Estimation of opportunity cost

Profitability per hectare was calculated for the 2019-2020 agricultural season. Total costs include expenses related to planting, harvesting, and post-harvest activities.

In this study, gross and net income were estimated exclusively for coffee AFS. Fixed costs were not included due to their high variability among producers and the difficulty of standardizing them in the context of family farming, following the approach proposed by Bentes et al. (2019). Gross income was calculated from the values obtained from the sale of coffee and other

Los productores encuestados son pequeños agricultores con parcelas de 2 a 3 ha con acceso limitado a financiamiento y tecnología, lo que influye en sus decisiones productivas. De acuerdo con la información recabada, 64 % establece cafetales mediante tumba y quema, 9 % mediante raleo selectivo y 27 % adquiere cafetales ya establecidos. Además, 85 % utiliza semillas no certificadas y comercializa el café principalmente en forma de pergamino.

#### Estimación de costo de oportunidad

La rentabilidad por hectárea se calculó durante la campaña agrícola 2019-2020. Los costos totales

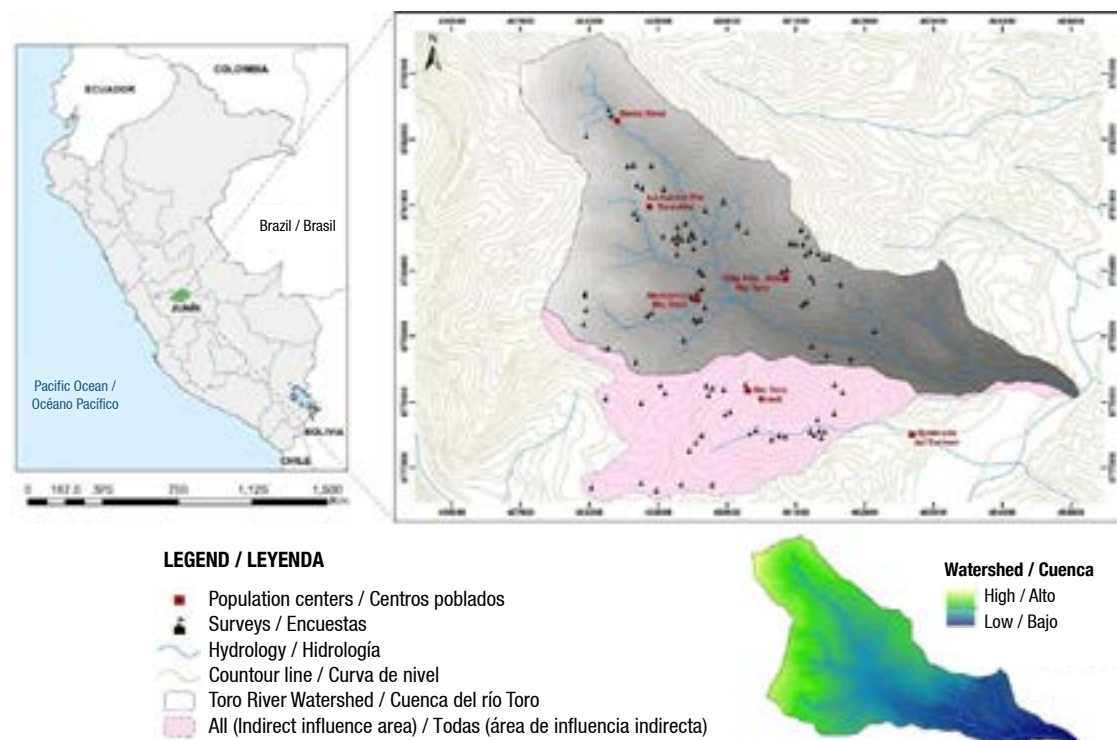


Figure 2. Socioeconomic baseline map in Chanchamayo, Junín, Peru. Source: Compiled by the authors using ArcGIS 10.7 (ESRI, 2019).

Figura 2. Mapa de línea base socioeconómica en Chanchamayo, Junín, Perú. Fuente: Elaboración propia con ArcGIS 10.7 (ESRI, 2019).

crops on the farm and in nearby markets. Net income (NI) was determined using the gross margin resulting from the difference between income and variable production costs (Bentes et al., 2019).

$$NI = p * q - FC - vc$$

Where,  
 $p$  = price  
 $q$  = cost  
 $FC$  = Fixed cost  
 $Vc$  = Variable cost

Opportunity cost (OC) is defined as the foregone opportunities related to the optimal use of certain economic resources (Moreno-Sánchez, 2012; Watson et al., 2018). The OC was calculated as the economic value that farmers in the Toro River sub-watershed would receive for not abandoning sustainable agriculture (coffee AFS) and for protecting forest areas.

#### Economic value per tCO<sub>2</sub>eq

The economic value per ton of carbon dioxide equivalent (tCO<sub>2</sub>eq) was estimated by multiplying the carbon storage results by the equivalence factor of 3.67. As references, the prices per tCO<sub>2</sub>eq suggested by

comprenden los gastos relacionados con la siembra, la cosecha y las actividades posteriores a la cosecha.

En este estudio, los ingresos brutos y netos se estimaron exclusivamente para los SAF de café. No se incluyeron los costos fijos debido a su alta variabilidad entre productores y a la dificultad de estandarizarlos en el contexto de agricultura familiar, con base en el enfoque propuesto por Bentes et al. (2019). Los ingresos brutos se calcularon a partir de los valores obtenidos por venta de café y otros cultivos en la chacra y mercados aledaños. Los ingresos netos (IN) se determinaron empleando el margen bruto resultante de la diferencia entre los ingresos y costos variables de producción (Bentes et al., 2019).

$$IN = p * q - CF - cv$$

Donde,  
 $p$  = precio  
 $q$  = costo  
 $CF$  = costo fijo  
 $Cv$  = costo variable

El costo de oportunidad (CO) se define como las oportunidades perdidas en relación con el mejor aprovechamiento de determinados recursos económicos

Funk et al. (2019) at 20.83 USD, Sohngen et al. (2008) at 27.25 USD and SENDECO<sub>2</sub> (2023) at 89.45 USD were used. The conversion factor of 3.67, recommended by the IPCC (2006) is used to convert tons of carbon to tCO<sub>2</sub>eq based on the ratio of their molecular weights (44/12).

The price per tCO<sub>2</sub>eq on the SENDECO<sub>2</sub> platform has shown variations between 2008 and 2023. In 2008, the price was 22.02 USD per tCO<sub>2</sub>eq, maintaining a downward trend until 2017. From that year onward, prices began to rise progressively, reaching 89.43 USD in 2023 (Figure 3).

#### Statistical Analysis

Statistically significant differences were determined for the following three aspects: (1) carbon stored between coffee AFS and monocultures, (2) carbon stored among the types of coffee AFS, and (3) the average opportunity cost among these systems.

Since the analysis of carbon stored between AFS and monocultures included more than 50 observations, the normality assumption was verified using the Lilliefors test and the Anderson-Darling test, the latter having greater statistical power. For the analysis of carbon stored among types of AFS and of the average OC, whose groups had sample sizes below 50 observations, the Shapiro-Wilk test was used to assess normality and Bartlett's test to verify homogeneity of variances.

In all cases, the non-parametric Kruskal-Wallis test ( $P \leq 0.05$ ) was applied to determine whether statistically significant differences existed between the medians.

(Moreno-Sánchez, 2012; Watson et al., 2018). El CO se calculó como el valor económico que deberían percibir los agricultores de la subcuenca del río Toro, por no abandonar la agricultura sostenible (SAF de café) y conservar las áreas de bosque.

#### Valor económico por tCO<sub>2</sub>eq

El valor económico por tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO<sub>2</sub>eq) se estimó mediante la multiplicación de los resultados del almacenamiento de carbono por el factor de equivalencia de 3.67. Como referencia se utilizaron los precios por tCO<sub>2</sub>eq sugeridos por Funk et al. (2019) con 20.83 USD, Sohngen et al. (2008) con 27.25 USD y SENDECO<sub>2</sub> (2023) con 89.45 USD. El factor de conversión 3.67 recomendado por el IPCC (2006) se utiliza para convertir toneladas de carbono en tCO<sub>2</sub>eq con base en la relación entre sus pesos moleculares (44/12).

El precio por tCO<sub>2</sub>eq en la plataforma SENDECO<sub>2</sub> ha mostrado fluctuaciones entre 2008 y 2023. En 2008, el precio era de 22.02 USD por tCO<sub>2</sub>eq, manteniéndose con una tendencia a la baja hasta 2017. A partir de ese año, los precios comenzaron a aumentar progresivamente, alcanzando los 89.43 USD en 2023 (Figura 3).

#### Análisis estadístico

Las diferencias estadísticamente significativas se determinaron en los siguientes tres aspectos: (1) el carbono almacenado entre SAF de café y monocultivos, (2) el carbono almacenado entre los tipos de SAF de café y (3) el costo de oportunidad promedio entre estos sistemas.

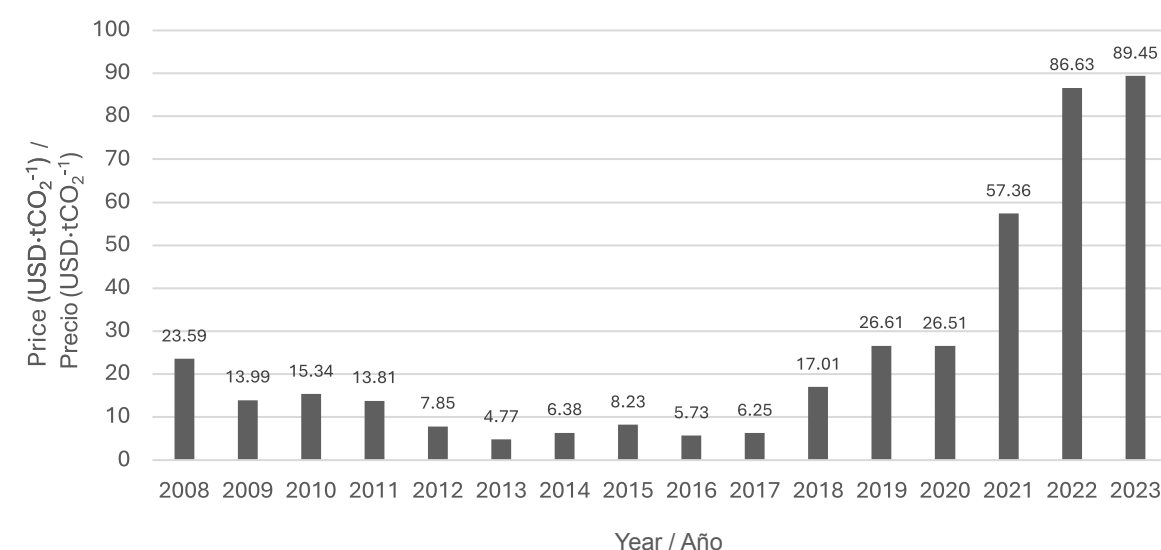


Figure 3. Price fluctuations of one ton of carbon dioxide equivalent (tCO<sub>2</sub>eq). Source: SENDECO<sub>2</sub> (2023).

Figura 3. Fluctuaciones del precio de tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO<sub>2</sub>eq). Fuente: SENDECO<sub>2</sub> (2023).

Statistical analyses were performed using RStudio, version 4.2.3 (R Core Team, 2023).

## Results and Discussion

### Carbon storage in coffee AFS and monocultures

Coffee AFS store an average of  $62.67 \pm 63.6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  of carbon, showing statistically significant differences ( $P < 0.05$ ) compared to monocultures, which store  $6.25 \pm 7.33 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Figure 4 shows the average values of carbon stored in aboveground biomass by system type, with error bars representing the standard deviation. The results demonstrate that AFS have a greater carbon storage potential and far exceed monocultures, due to the tree component, which stores between 47 and 50 % of carbon in wood and 39 to 40 % in leaves (Salgado-Mora et al., 2018).

This trend is evidenced in several studies. For example, in Central America and Colombia, Van Rikxoort et al. (2014) report that polycultures associated with Andean walnut (*Juglans neotropica* Diels) and inga tree (*Inga* spp.) store  $42.5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , whereas monocultures store only  $10.5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Also in Colombia, Canal Daza y Andrade Castañeda (2019) indicate that coffee AFS associated with walnut (*L. punicifolia*) and banana (*M. paradisiaca*) store  $18.03 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  compared to  $1.9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  in monocultures. In Costa Rica, Hergoulac'h

Dado que el análisis del carbono almacenado entre SAF y monocultivos incluyó más de 50 observaciones, se verificó el supuesto de normalidad mediante la prueba de Lilliefors y la prueba de Anderson-Darling; este último con mayor potencia estadística. En los análisis del carbono almacenado entre tipos de SAF y del CO promedio, cuyos grupos presentaron tamaños de muestra inferiores a 50 observaciones, se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad y la prueba de Bartlett para comprobar la homogeneidad de varianzas.

En todos los casos se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ( $P \leq 0.05$ ) para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre las medianas. Los análisis estadísticos se realizaron con el software RStudio, versión 4.2.3 (R Core Team, 2023).

## Resultados y discusión

### Almacenamiento de carbono en SAF de café y monocultivos

Los SAF de café almacenan en promedio  $62.67 \pm 63.6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de carbono con diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0.05$ ) respecto a los monocultivos  $6.25 \pm 7.33 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . La Figura 4 presenta los valores promedio de carbono almacenado en biomasa aérea por tipo de sistema, con barras de

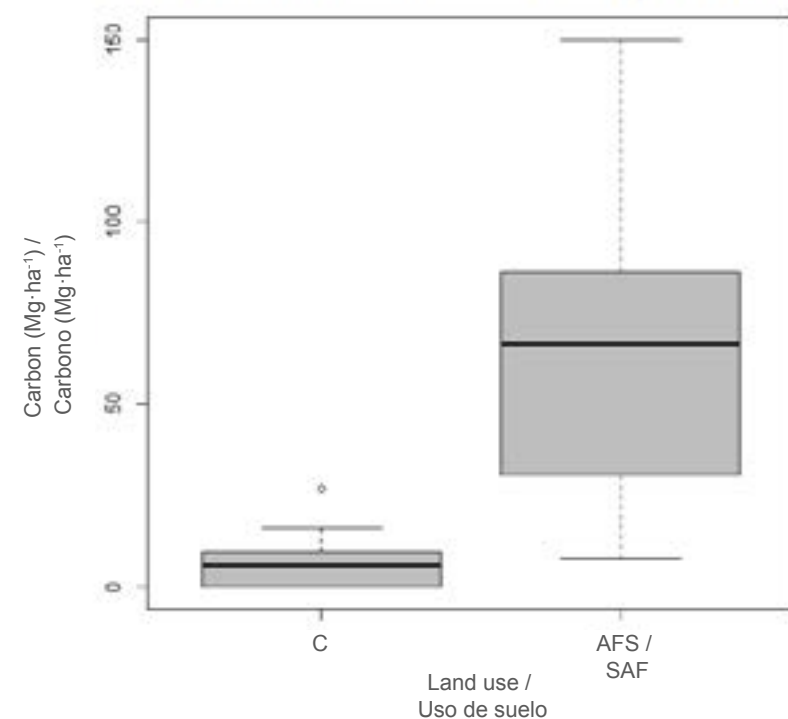


Figure 4. Carbon stored in coffee agroforestry systems (AFS) and monocultures (C) in Chanchamayo, Junín, Peru.

Figura 4. Carbono almacenado en sistemas agroforestales (SAF) de café y monocultivos (C) en Chanchamayo, Junín, Perú.

et al. (2012) found that coffee AFS with inga tree store  $25.2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  compared to  $9.8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  in monocultures.

### Carbon storage by floristic arrangement in coffee AFS

No statistically significant differences were found in carbon storage among the floristic arrangements of the AFS ( $P > 0.05$ ). However, there was a general trend toward higher carbon storage in systems with greater floristic diversity. This is evident in AFS 5 (coffee + inga tree + fruit species + timber species) and AFS 6 (coffee + inga tree + fruit species + two timber species), which showed the highest carbon content, at  $78.45 \pm 38.66 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  and  $81.45 \pm 17.44 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , respectively (Figure 5).

This trend is consistent with the results of Solis et al. (2020) in Colombia, who reported higher carbon storage in AFS composed of coffee and multiple tree species, including nine and twelve timber and fruit species, reaching values of up to  $189 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

The lowest carbon value was reported for AFS 4 ( $54.65 \pm 28.22 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) composed of coffee, inga tree and a single timber species. This result is similar to that obtained by Andrade et al. (2014) in Colombia, who reported  $36.7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  for coffee AFS with only one

error que representan la desviación estándar. Se comprueba que los SAF tienen mayor potencial de almacenamiento de carbono y superan ampliamente a los monocultivos, debido al componente arbóreo que almacena entre 47 y 50 % de carbono en la madera y 39 a 40 % en hojas (Salgado-Mora et al., 2018).

Esta tendencia se evidencia en varios estudios. Por ejemplo, en Centroamérica y Colombia, Van Rikxoort et al. (2014) reportan que los policultivos asociados a cedro negro (*Juglans neotropica* Diels) y pacaé (*Inga* spp.) almacenan  $42.5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , mientras que los monocultivos solo almacenan  $10.5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . También en Colombia, Canal Daza y Andrade Castañeda (2019) señalan que los SAF de café asociados a nogal (*L. punicifolia*) y plátano (*M. paradisiaca*) almacenan  $18.03 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  frente a  $1.9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  en monocultivos. En Costa Rica, Hergoulac'h et al. (2012) encontraron que los SAF de café con pacaé almacenan  $25.2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  frente a  $9.8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  en monocultivos.

### Almacenamiento de carbono por arreglo florístico de los SAF de café

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el almacenamiento de carbono entre los arreglos florísticos de los SAF ( $P > 0.05$ ). No obstante, se observó una tendencia general hacia un

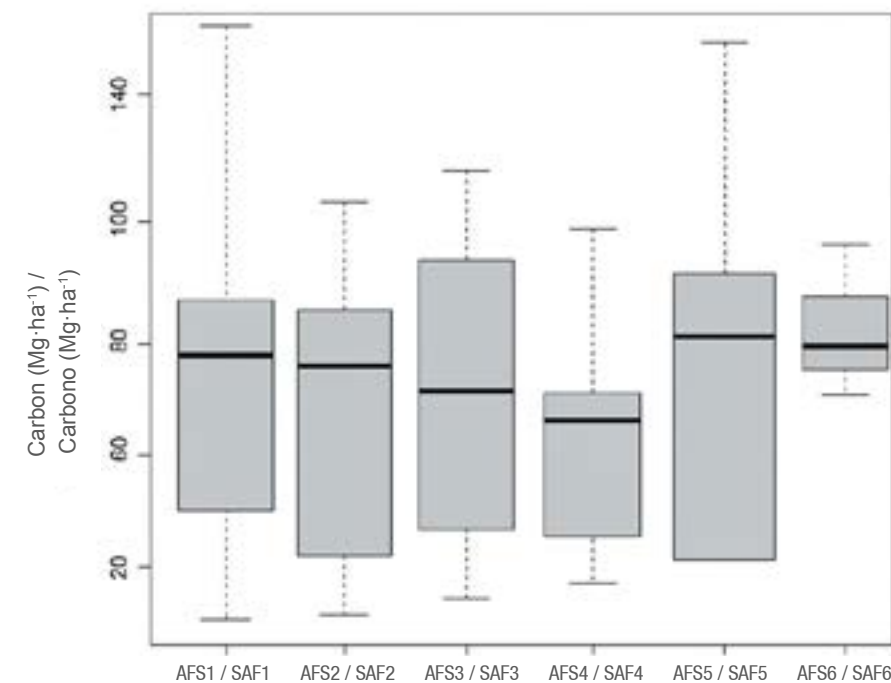


Figure 5. Carbon stored in coffee agroforestry systems (AFS) in Chanchamayo, Junín, Peru. AFS 1 = coffee + inga tree, AFS 2 = coffee + fruit species, AFS 3 = coffee + inga tree + fruit species, AFS 4 = coffee + inga tree + timber species, AFS 5 = coffee + inga tree + fruit species + timber species and AFS 6 = coffee + inga tree + fruit species + two timber species.

Figura 5. Carbono almacenado en sistemas agroforestales (SAF) de café en Chanchamayo, Junín, Perú. SAF 1 = café + pacaé, SAF 2 = café + especie frutal, SAF 3 = café + pacaé + especie frutal, SAF 4 = café + pacaé + especie maderable, SAF 5 = café + pacaé + especie frutal + especie maderable y SAF 6 = café + pacaé + especie frutal + dos especies maderables.

timber species (walnut, *L. puniceifolia*). In contrast, the study of Ehrenbergerová et al. (2016) in Peru (Villa Rica) reported higher carbon values in coffee-pine AFS and coffee-eucalyptus AFS, at 77.5 Mg·ha<sup>-1</sup> and 162.3 Mg·ha<sup>-1</sup>, respectively. These values exceed those obtained in the present study by 41.82 %, because the authors evaluated AFS with higher tree densities (between 124 and 472 trees·ha<sup>-1</sup>). In contrast, in the present study, AFS with timber species had only one to two individuals per plot, resulting in a total of 18 trees across the entire study area, corresponding to a lower average density of 7.5 trees·ha<sup>-1</sup> (based on a total evaluated area of 2-3 ha).

On the other hand, AFS 1 (63.69 ± 33.26 Mg·ha<sup>-1</sup>), despite being composed only of coffee and inga tree (*Inga* spp.), contains carbon above the average of the AFS. The inga tree has a high density (306 trees corresponding to an average density of 127.5 trees·ha<sup>-1</sup>) and, therefore has a greater carbon storage potential compared to fast-growing species such as pine or eucalyptus (López-Fernández et al., 2023). In addition, AFS 1 is the most common arrangement in the study area, as coffee farmers consider it a natural fertilizer. The root nodules of the inga tree (a leguminous species) promote the formation of mycorrhizae and consequently facilitate nutrient recycling, especially nitrogen (Dilas-Jiménez & Mugruza-Vassallo, 2020). Furthermore, the inga tree grows rapidly, and its leaf litter produces a considerable amount of organic matter that helps retain soil moisture (León et al., 2016).

The results highlight the effectiveness of coffee AFS in carbon sequestration, in addition to providing various ecosystem benefits. The combination of tree species improves water infiltration and retention, reduces runoff, and stabilizes the microclimate (Villarreyra et al., 2020). Meanwhile, the leaf litter and organic residues enrich the soil's organic matter and enhance the efficiency of nutrient cycles, including nitrogen and phosphorus (Alegre et al., 2017; Alvez & Alayon Luaces, 2020; Dilas-Jiménez & Mugruza-Vassallo, 2020; Navas Panadero et al., 2020; Villa et al., 2020). AFS create microhabitats and foster biological diversity (Canal Daza & Andrade Castañeda, 2019; Vera, 2017), which translates into increased populations of soil macro- and microorganisms, including *Collembola*, *Pseudomonas* spp., *Bradyrhizobium* spp. and earthworms (Vera, 2017). AFS play a crucial role in controlling plant pests and diseases (Tamayo Ortiz & Alegre Orihuela, 2022; Villarreyra et al., 2020), act as biological corridors, and facilitate connectivity among remnant habitats within the landscape (Salazar et al., 2018). All these benefits strengthen agroecosystem resilience to climate change and contribute to greater long-term productive sustainability (Altieri et al., 2015).

mayor almacenamiento de carbono en sistemas con mayor diversidad florística. Esto se evidencia en los SAF 5 (café + pacaé + especie frutal + especie maderable) y el SAF 6 (café + pacaé + especie frutal + dos especies maderables) que presentan contenido de carbono más elevado, igual a 78.45 ± 38.66 Mg·ha<sup>-1</sup> y 81.45 ± 17.44 Mg·ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 5).

Esta tendencia concuerda con los resultados de Solís et al. (2020) en Colombia, quienes reportan mayor almacenamiento de carbono en SAF compuestos por café y múltiples especies arbóreas que incluyeron entre nueve y 12 especies maderables y frutales, y alcanzaron registros de hasta 189 Mg·ha<sup>-1</sup>.

El menor registro de carbono se reporta para el SAF 4 (54.65 ± 28.22 Mg·ha<sup>-1</sup>) compuesto, además de café y pacaé, por una especie maderable. Este resultado es similar al obtenido por Andrade et al. (2014) en Colombia, quienes reportan 36.7 Mg·ha<sup>-1</sup> para SAF de café con una sola especie maderable (nogal, *L. puniceifolia*). En contraste, el estudio de Ehrenbergerová et al. (2016) en Perú (Villa Rica) informa valores más elevados de carbono en SAF de café-pino y SAF de café-eucalipto, igual a 77.5 Mg·ha<sup>-1</sup> y 162.3 Mg·ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Estos resultados superan en 41.82 % a los obtenidos en el presente estudio, debido a que los autores mencionados evaluaron SAF con una densidad arbórea mayor (entre 124 y 472 árboles·ha<sup>-1</sup>). En contraste, en el presente estudio, los SAF con especies arbóreas maderables tuvieron entre uno y dos individuos por parcela, lo que resulta en un total de 18 en todo el estudio que corresponde a una densidad menor promedio de 7.5 árboles·ha<sup>-1</sup> (si se considera un área total evaluada entre 2 y 3 ha).

Por otro lado, el SAF 1 (63.69 ± 33.26 Mg·ha<sup>-1</sup>), a pesar de estar compuesto únicamente por café y pacaé (*Inga* spp.), contiene carbono por encima de la media de los SAF. El pacaé presenta densidad alta (306 árboles que corresponden a una densidad promedio de 127.5 árboles·ha<sup>-1</sup>) y, en consecuencia, posee mayor potencial de almacenamiento de carbono en comparación con especies de crecimiento rápido como el pino o el eucalipto (López-Fernández et al., 2023). Además, el SAF 1 es el arreglo más común en el área de estudio, ya que los caficultores lo consideran un fertilizante natural. Los nódulos en las raíces del pacaé (especie leguminosa) favorecen la formación de micorrizas y, por consiguiente, facilita el reciclaje de nutrientes, especialmente nitrógeno (Dilas-Jiménez & Mugruza-Vassallo, 2020). Por otra parte, el pacaé crece rápidamente y su hojarasca produce una considerable cantidad de materia orgánica que contribuye a la conservación de la humedad en el suelo (León et al., 2016).

### Analysis of economic value of carbon sequestration in AFS

The average production cost in coffee AFS is 319.31 USD·ha<sup>-1</sup>·yr<sup>-1</sup> compared to 219.37 USD·ha<sup>-1</sup>·yr<sup>-1</sup> in monocultures, representing a 31.29 % difference. This variation is due to the additional investments farmers make in fertilizers and in pest-resistant seed or seedlings. In terms of income, coffee sales in AFS are 33 % lower than in monocultures, influenced by price variability in recent years. In Junín, the average coffee price ranged from 1.35 USD·kg<sup>-1</sup> in 2018 to 2.19 USD·kg<sup>-1</sup> in the second quarter of 2023 (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [MIDAGRI], 2021, 2023). Figure 6 shows the analysis of the average price of coffee grown under chacra conditions (USD·kg<sup>-1</sup>) at the national level and in Junín.

### Estimation of opportunity cost

OC in the Toro River sub-watershed is interpreted as the compensation or payment that should be offered to the coffee farm when choosing AFS over monoculture practices. This average OC was calculated at 1774.17 USD·ha<sup>-1</sup>·yr<sup>-1</sup>.

According to the analysis, no significant differences were reported among the average OC values of the evaluated AFS ( $P > 0.05$ ). AFS 5 recorded the highest OC at 2240.46 USD·ha<sup>-1</sup>·yr<sup>-1</sup>, while AFS 6 had the lowest OC at 500.12 USD·ha<sup>-1</sup>·yr<sup>-1</sup>. In AFS 1, the OC was 2231.82 USD·ha<sup>-1</sup>·yr<sup>-1</sup>, even though it is composed solely of *Inga* spp. (Table 5).

Los resultados destacan la efectividad de los SAF de café en la captura de carbono, además de que ofrecen diversos beneficios ecosistémicos. La combinación de especies arbóreas mejora la infiltración y retención de agua, reduce la escorrentía y estabiliza el microclima (Villarreyra et al., 2020). Por su parte, la hojarasca y los residuos orgánicos generados enriquecen el contenido de materia orgánica del suelo y promueven ciclos más eficientes de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo (Alegre et al., 2017; Alvez & Alayon Luaces, 2020; Dilas-Jiménez & Mugruza-Vassallo, 2020; Navas Panadero et al., 2020; Villa et al., 2020). Los SAF crean microhabitats y fomentan la diversidad biológica (Canal Daza & Andrade Castañeda, 2019; Vera, 2017), lo que se traduce en aumento de la población de macro y microorganismos en el suelo que incluyen *Collembola*, *Pseudomonas* spp., *Bradyrhizobium* spp. y lombrices (Vera, 2017). Asimismo, los SAF desempeñan un papel crucial en el control de plagas y enfermedades de las plantas (Tamayo Ortiz & Alegre Orihuela, 2022; Villarreyra et al., 2020), actúan como corredores biológicos y facilitan la conexión entre hábitats remanentes en el paisaje (Salazar et al., 2018). Todos estos beneficios fortalecen la resiliencia del agroecosistema frente al cambio climático y contribuyen a una mayor sostenibilidad productiva a largo plazo (Altieri et al., 2015).

### Estimación del valor económico de la captura de carbono en SAF

El costo de producción promedio en los SAF de café es de 319.31 USD·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> en comparación con 219.37 USD·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> en monocultivos, lo que

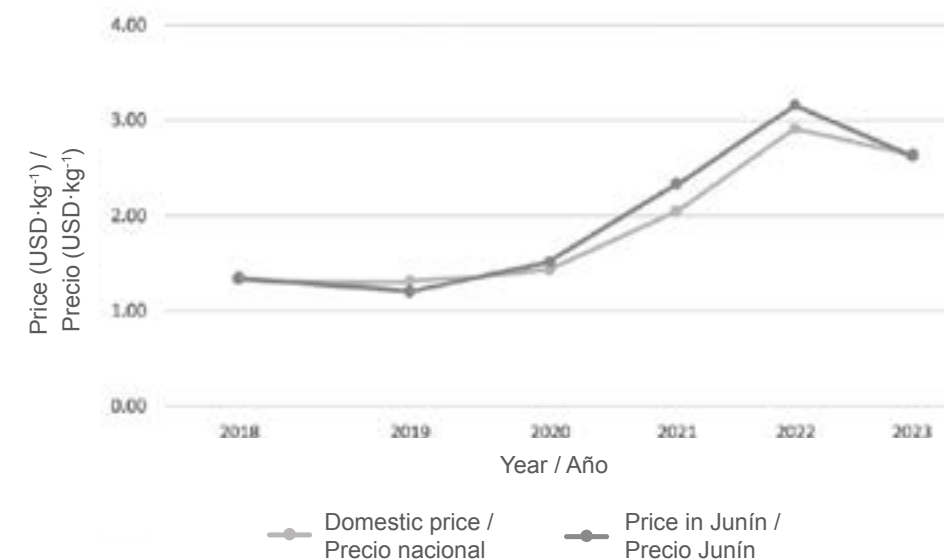


Figure 6. Price of coffee grown under chacra conditions in Junín and at the national level in Peru.  
Figura 6. Precio de café en chacra en Junín y a nivel nacional en Perú.

**Table 5. Average opportunity cost (OC) for each coffee agroforestry system (AFS) in Chanchamayo, Junín, Peru.**  
**Cuadro 5. Costo de oportunidad promedio (CO) por cada sistema agroforestal (SAF) de café en Chanchamayo, Junín, Perú.**

Code/ Código	Coffee association/ Asociación de café	Average OC (USD·ha <sup>-1</sup> ·yr <sup>-1</sup> )/ CO promedio (USD·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )	Standard deviation (USD·ha <sup>-1</sup> ·yr <sup>-1</sup> )/ Desviación estándar (USD·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )
AFS 1/ SAF 1	Coffee + <i>Inga</i> spp./ Café + <i>Inga</i> spp.	2231.82	2077.60
AFS 2/ SAF	Coffee + fruit species/ Café + especie frutal	739.26	288.62
AFS 3/ SAF 3	Coffee + <i>Inga</i> spp. + one fruit tree species/ Café + <i>Inga</i> spp. + una especie frutal	1261.98	871.95
AFS 4/ SAF 4	Coffee + <i>Inga</i> spp. + one timber tree species/ Café + <i>Inga</i> spp. + una especie maderable	1797.39	1534.98
AFS 5/ SAF 5	Coffee + <i>Inga</i> spp. + one fruit tree species + one timber tree species/ Café + <i>Inga</i> spp. + una especie frutal + una especie maderable	2240.46	1909.28
AFS 6/ SAF 6	Coffee + <i>Inga</i> spp. + one fruit tree species + two timber tree species/ Café + <i>Inga</i> spp. + una especie frutal + dos especies maderables	500.12	424.56

Exchange rate (2024) Peruvian sol: 1 PEN = 0.27 USD

Tipo de cambio (2024) sol peruano: 1 PEN = 0.27 USD

It is important to note that income is not directly related to the floristic composition of the AFS. Moreover, the sale of by-products from the system is minimal or primarily intended for household consumption (e.g., avocado and banana), while the tree species mainly provide shade for the coffee crop. No system for timber harvesting or rotation has yet been established in these AFS; therefore, income from wood sales is not included.

#### Economic value of carbon storage in coffee AFS

The economic value per tCO<sub>2</sub>eq exceeds the recorded opportunity costs for all agroforestry systems (Table 6). When the lowest price of 20.83 USD is considered, the average economic value is 2.74 times higher than the average opportunity cost. For intermediate prices of 25.83 USD, this increase rises to 3.4 times, while at a price of 27.25 USD, the value is 3.6 times the OC. Finally, with the highest Price of 89.45 USD, the economic value surpasses the opportunity cost substantially, reaching a level 16.9 times greater.

The results indicate that the average net income from the sale of other crops is 33 % higher than that obtained from coffee AFS. Additionally, fluctuations in coffee prices over the past several years (2018-2023), combined with unfavorable offers from intermediaries, have led coffee growers to choose for the cultivation of more profitable crops. For this reason, the commercialization of carbon credits emerges as an economically attractive option for coffee producers.

Funk et al. (2019) indicate that a price of 20.83 USD per tCO<sub>2</sub>eq would be optimal for discouraging unsustainable

representa una diferencia del 31.29 %. Esta variación se debe a las inversiones adicionales de los caficultores en abonos y en semillas o plántulas resistentes a plagas. En términos de ingresos, las ventas de café en SAF son 33 % menores que en monocultivos, influenciadas por la variabilidad de precios en los últimos años. En Junín, el precio promedio del café fluctuó de 1.35 USD·kg<sup>-1</sup> en 2018 a 2.19 USD·kg<sup>-1</sup> en el segundo trimestre de 2023 (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [MIDAGRI], 2021, 2023). La Figura 6 muestra el análisis del precio promedio del café en chacra (USD·kg<sup>-1</sup>) a nivel nacional y en Junín.

#### Estimación del costo de oportunidad

El CO en la subcuenca del río Toro se interpreta como la compensación o pago que se debería ofrecer al caficultor cuando opta por los SAF en lugar de prácticas de monocultivo. Este CO promedio se calculó en 1774.17 USD·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>.

De acuerdo con el análisis, no se reportan diferencias significativas entre los valores de CO promedio de los SAF evaluados ( $P > 0.05$ ). El SAF 5 registró el valor más alto de CO con 2240.46 USD·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, mientras que el SAF 6 presentó el CO más bajo con 500.12 USD·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>. En el SAF 1 se reporta CO igual a 2231.82 USD·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, aun cuando está compuesto únicamente por *Inga* spp. (Cuadro 5).

Es importante señalar que no existe relación directa entre el ingreso y la composición florística de los SAF. Además, la venta de los subproductos de los componentes es marginal o destinada al autoconsumo (como los cultivos de palta y plátano) y las especies

**Table 6. Opportunity cost (OC) and economic value of CO<sub>2</sub>eq for each agroforestry system (AFS) evaluated in Chanchamayo, Junín, Peru.**

**Cuadro 6. Costo de oportunidad (CO) y valor económico del CO<sub>2</sub>eq por cada sistema agroforestal (SAF) evaluado en Chanchamayo, Junín, Perú.**

Code/ Código	OC (USD·ha <sup>-1</sup> ·yr <sup>-1</sup> )/ CO (USD·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )	tCO <sub>2</sub> eq·ha <sup>-1</sup>	Price per tCO <sub>2</sub> eq ha <sup>-1</sup> / Precios por tCO <sub>2</sub> eq ha <sup>-1</sup>			
			A	B	C	D
			(20.83 USD)	(25.83 USD)	(27.25 USD)	(89.45 USD)
AFS 1/SAF 1	2231.82	233.74	4868.70	6037.38	6369.28	20907.61
AFS 2/SAF 2	739.26	227.09	4730.35	5865.81	6188.28	20313.46
AFS 3/SAF 3	1261.98	226.98	4727.94	5862.82	6185.13	20303.11
AFS 4/SAF 4	1797.39	200.58	4178.05	5180.94	5465.76	17941.74
AFS 5/SAF 5	2240.46	263.09	5480.25	6795.72	7169.32	23533.78
AFS 6/SAF 6	500.12	298.93	6226.67	7721.31	8145.79	26739.12
Average/ Promedio	1774.17	229.99	4862.17	6029.27	6360.73	20879.5

A = Funk et al. (2019), B = Sohngen et al. (2008), C = Alatorre et al. (2019) and D = SENDECO<sub>2</sub> (2023). Exchange rate (2024) for the Peruvian sol: 1 PEN = 0.27 USD.

A = Funk et al. (2019), B = Sohngen et al. (2008), C = Alatorre et al. (2019) y D = SENDECO<sub>2</sub> (2023). Tipo de cambio (2024) sol peruano: 1 PEN = 0.27 USD.

activities such as deforestation. This price is similar to the base price of 21.45 USD (20 EUR, exchange rate for February 2024: 1 EUR = 1.07 USD) used by the Duch bank Rabobank, which has linked smallholder farmers in the San Martín region of Peru with international carbon markets through its Agroforestry Carbon Removal Units for the Organic Restoration of Nature (ACORN) platform, in collaboration with the “Asómbrate” initiative of the non-governmental organization Solidad Network (Solidaridad Network, 2023). However, although the carbon market may be an attractive option for diversifying the income of coffee producers, it is essential to consider fluctuation in carbon prices. These variations can be substantially high, up to 33.79 % within a single year, as evidenced in 2021 according to SENDECO<sub>2</sub> data, when the average price closed at 57.36 USD per tCO<sub>2</sub>eq·ha<sup>-1</sup>, notably different from the 2023 average (89.45 USD per tCO<sub>2</sub>eq·ha<sup>-1</sup>). Consequently, farmers participating in such Payment for Environmental Services (PES) scheme must be aware of the inherent volatility of carbon market prices, which represents a significant risk.

In Latin America, several PES programs, such as those implemented in Costa Rica (Zamora-Cristales et al., 2022), Mexico (Secretaría de Bienestar, 2020, 2025) and Guatemala (INAB, 2025), have successfully compensated farmers for the conservation of trees in AFS. These programs establish criteria such as the minimum area allocated to AFS and the required number of trees per hectare. Mexico’s “Sembrando Vida” program is particularly relevant to the study region in Junín, as it provides support to smallholders in the amount of 201 USD per month for every 2.5 ha (Secretaría de Bienestar, 2020; Zamora-Cristales et al.,

arbóreas proporcionan principalmente sombra al cultivo. En los SAF, aún no se ha establecido un sistema de aprovechamiento y rotación de la madera, por lo que los ingresos por venta de madera no están incluidos.

#### Valor económico del almacenamiento de carbono en SAF de café

El valor económico por tCO<sub>2</sub>eq supera ampliamente los CO registrados para todos los SAF (Cuadro 6). Si se considera la menor tarifa de 20.83 USD, el valor económico promedio supera 2.74 veces el CO promedio. Para tarifas intermedias de 25.83 USD se observa un incremento de 3.4 veces, mientras que con una tarifa de 27.25 USD, esta relación es de 3.6 veces el CO. Finalmente, con la tarifa más alta de 89.45 USD, el valor económico supera significativamente al CO, llegando a ser 16.9 veces mayor.

Los resultados indican que el ingreso neto promedio por la venta de otros cultivos es mayor que para los SAF de café con una diferencia de 33 %. Adicionalmente, la fluctuación en los precios del café durante los últimos años (2018-2023), junto con las ofertas desfavorables de los intermediarios, ha llevado a los caficultores a optar por la siembra de cultivos más lucrativos. Es por ello, que la comercialización de bonos de carbono se presenta como una propuesta económicamente atractiva para los caficultores.

Funk et al. (2019) señalan que el precio de 20.83 USD por tCO<sub>2</sub>eq sería óptimo para desalentar actividades no sostenibles como la deforestación. Este precio se aproxima al precio base de 21.45 USD (20 EUR, tipo de cambio febrero del 2024: 1 EUR = 1.07 USD) utilizado

2022). The relevance of this initiative to the research area is based on its consistency with the characteristics of farmers in the study region, whose plots average 2.38 ha. By comparison, the requirements of the programs in Costa Rica and Guatemala are not feasible under the conditions of the study area in Junín. Costa Rica requires between 500 and 10 000 trees per farm, with a payment of 1.55 USD per tree (Oficina Nacional Forestal [ONF], 2024; Zamora-Cristales et al., 2022). In Guatemala, the PROBOSQUE program provide payments of 1 206 USD·ha<sup>-1</sup>, requiring a density of 120 trees per hectare, at least 60 of which must be high-value timber species (INAB, 2025). In contrast, local coffee growers have AFS with fewer than 200 trees per hectare, many of which are remnants of primary forests.

Although coffee AFS demonstrate high potential for carbon sequestration and income generation through PES, this study has certain limitations. It is a short-term assessment, which does not allow for evaluating long-term sustainability, as factors such as species growth, natural regeneration, and the evolution of the carbon market may alter the results (Pérez-Portilla & Geissert-Kientz, 2006). In addition, specific management practices employed by coffee farmers, which influence both productivity and carbon sequestration, were not considered (Obando & Obando, 2024).

Despite these limitations, the study's findings can guide public policies and incentive programs that recognize the environmental benefits of AFS, as long as they are tailored to local conditions and accompanied by technical and financial support.

Finally, evidence that coffee AFS store significantly more carbon than monocultures supports their promotion as a strategy to reduce pressure on forests and encourage sustainable agriculture practices. Quantifying the carbon capture and its economic valuation enables the integration of these systems into national climate change mitigation strategies, such as Peru's Nationally Determined Contributions (NDC) and REDD+ programs. This information is critical for designing more effective PES schemes with the potential to improve the economic well-being of smallholders and strengthen productive sustainability in rural areas.

## Conclusions

Coffee agroforestry systems (AFS) store 80 % more carbon in their aboveground biomass compared to monocultures. Although coffee AFS show no significant differences in overall carbon storage, systems with higher floristic diversity were observed to retain more carbon. The average opportunity cost associated with coffee production in AFS is 1 774.17 USD·ha<sup>-1</sup>·yr<sup>-1</sup>,

por el banco holandés Rabobank, el cual ha conectado a pequeños agricultores de la región San Martín (Perú) con mercados internacionales de bonos de carbono, a través de su plataforma Agroforestry Carbon Removal Units for the Organic Restoration of Nature (ACORN) y en colaboración con la iniciativa "Asómbrate" de la organización no gubernamental Solidaridad Network (Solidaridad Network, 2023). Sin embargo, aunque el mercado de carbono podría ser una opción atractiva para diversificar los ingresos de los caficultores, es esencial tener en cuenta las fluctuaciones en los precios del carbono. Estas variaciones pueden ser considerablemente altas, hasta 33.79 % en un solo año, como se evidenció en el 2021 según datos de SENDECO, donde el precio promedio cerró en 57.36 USD por tCO<sub>2</sub>·eq·ha<sup>-1</sup>, en marcado contraste con el promedio del 2023 (89.45 USD por tCO<sub>2</sub>·eq·ha<sup>-1</sup>). Por consiguiente, los agricultores que participen en este tipo de esquemas de Pago por Servicios Ambientales (PSA) deben tener presente la volatilidad inherente en los precios del mercado de carbono, la cual representa un riesgo significativo.

En América Latina, diversos programas de PSA, como los implementados en Costa Rica (Zamora-Cristales et al., 2022), México (Secretaría de Bienestar, 2020, 2025) y Guatemala (INAB, 2025) han tenido éxito al compensar a los agricultores por la conservación de árboles en SAF. Estos programas establecen criterios como el área mínima destinada a los SAF y el número de árboles por hectárea. El programa "Sembrando Vida" de México es relevante para la región de estudio en Junín, ya que apoya a pequeños agricultores con 201 USD al mes por cada 2.5 ha (Secretaría de Bienestar, 2020; Zamora-Cristales et al., 2022). La pertinencia de esta iniciativa para el área de investigación se fundamenta en su alineación con las características de los agricultores en la región de estudio, cuyas parcelas de cultivo promedian una extensión de 2.38 ha. En contraste, los requisitos de los programas de Costa Rica y Guatemala no resultan viables de cumplir bajo las condiciones del área de estudio en Junín. Costa Rica exige entre 500 y 10 000 árboles por finca, con un pago de 1.55 USD por árbol (Oficina Nacional Forestal [ONF], 2024; Zamora-Cristales et al., 2022). Guatemala, a través de PROBOSQUE, paga 1 206 USD·ha<sup>-1</sup>, exigiendo una densidad de 120 árboles por hectárea, de los cuales al menos 60 deben ser de especies maderables de alto valor (INAB, 2025). En contraste, los caficultores locales poseen SAF con menos de 200 árboles por hectárea, muchos de ellos remanentes de bosque primario.

Aunque los SAF de café muestran alto potencial para la captura de carbono y generación de ingresos mediante PSA, el estudio presenta limitaciones. Se trata de una evaluación de corto plazo que no permite evaluar la sostenibilidad a largo plazo, ya que factores como el

however, the implementation of payment for environmental services schemes could increase this value by 3.6 to 16.9 times. This would provide additional income to farmers and promote sustainable practices. Promoting sustainable agriculture requires intersectoral collaboration, policies that provide support to smallholders, and an integrated approach that considers economic, social, and environmental aspects. Nevertheless, a major limitation to adopting AFS is their higher implementation and maintenance costs compared to monocultures, which may pose a barrier for smallholders with limited resources.

## Acknowledgments

This research was funded by the 2020-1 Seed Fund of the Universidad Científica del Sur. We sincerely thank the Gerbi family, owners of Hacienda Armorique (La Merced, Peru), for their invaluable support and guidance throughout the entire process. We especially acknowledge the coffee farmers of the Toro River micro-watershed for welcoming us into their homes and generously sharing their knowledge and experiences, which made this research possible.

## Conflict of Interest Declaration

The authors declare that they have no economic conflicts of interest or known personal relationships that could have influenced the research presented in this article.

## End of English version

## References / Referencias

- Actualidad Ambiental. (14 de diciembre de 2020). *Perú se propone reducir en 40% sus emisiones de carbono hacia el año 2030*. SPDA. <https://www.actualidadambiental.pe/peru-se-propone-reducir-a-40-sus-emisiones-de-carbono-hacia-el-ano-2030/>
- Alatorre, J. E., Caballero, K., Ferrer, J., & Galindo, L. M. (2019). *El costo social del carbono: una visión agregada desde América Latina* (LC/TS.2019/10). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://www.cepal.org/es/publicaciones/44423-costo-social-carbono-vision-agregada-america-latina>
- Alegre, J., Lao, C., Silva, C., & Schrevels, E. (2017). Recovering degraded lands in the Peruvian Amazon by cover crops and sustainable agroforestry systems. *Peruvian Journal of Agronomy*, 1(1), 1–7. <https://doi.org/10.21704/pja.v1i1.1005>
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 869–890. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- Alvez, N. V., & Alayón Luaces, P. (2020). *Evaluación de policultivos frutihortícolas agroecológicos del Nordeste Argentino*. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 55(2), 273–284. <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v55.n2.26899>

crecimiento de especies, la regeneración natural y la evolución del mercado de carbono pueden alterar los resultados (Pérez-Portilla & Geissert-Kientz, 2006). Además, no se consideraron prácticas específicas de manejo de los caficultores, las cuales influyen en la productividad y el secuestro de carbono (Obando & Obando, 2024).

A pesar de las limitaciones, los resultados del estudio pueden orientar políticas públicas y programas de incentivos que reconozcan los beneficios ambientales de los SAF, siempre que se adapten a las condiciones locales y se acompañen de apoyo técnico y financiero.

Finalmente, la evidencia de que los SAF de café almacenan significativamente más carbono que los monocultivos respalda su promoción como estrategia para reducir la presión sobre los bosques y fomentar prácticas agrícolas sostenibles. La cuantificación del carbono capturado y su valorización económica permiten integrar estos sistemas en estrategias nacionales de mitigación del cambio climático, como las Contribuciones Nacionalmente Determinadas del Perú y los programas REDD+. Esta información es clave en el diseño de esquemas más efectivos de PSA con potencial para la mejora del bienestar económico de los pequeños productores y el fortalecimiento de la sostenibilidad productiva en zonas rurales.

## Conclusiones

Los sistemas agroforestales (SAF) de café retienen 80 % más de carbono en su biomasa aérea en comparación con los monocultivos. Aunque los SAF de café no muestran diferencias significativas en el almacenamiento de carbono, se observó que aquellos con mayor diversidad florística retienen más carbono. El costo de oportunidad promedio asociado a la producción de café en SAF es de 1 774.17 USD·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, pero la implementación de esquemas de pago por servicios ambientales podría incrementarla entre 3.6 y 16.9 veces. Esto proporcionaría ingresos adicionales a los agricultores y fomentaría prácticas sostenibles. Para impulsar la agricultura sostenible es esencial una colaboración intersectorial, políticas de apoyo a pequeños agricultores y un enfoque integral que considere los aspectos económicos, sociales y ambientales. No obstante, una limitación importante para la adopción de los SAF es su mayor costo de implementación y mantenimiento en comparación con los monocultivos, lo cual puede representar una barrera para pequeños productores con recursos limitados.

## Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Fondo Semilla 2020-1 de la Universidad Científica del Sur. Expresamos nuestro sincero agradecimiento a la familia Gerbi, propietarios de la Hacienda Armorique (La Merced,

- Andrade, H. J., Marín, L. M., & Pachón, D. P. (2014). Fijación de carbono y porcentaje de sombra en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el Líbano, Tolima, Colombia. *Bioagro*, 26(2), 127-132. [http://www.scielo.org/ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-33612014000200008&lng=es&tng=es](http://www.scielo.org/ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612014000200008&lng=es&tng=es)
- Awazi, N. P., & Tchamba, M. N. (2019). Mejorando la sostenibilidad y productividad agrícola bajo condiciones climáticas cambiantes mediante prácticas agroforestales mejoradas en sistemas de pequeños agricultores en África Subsahariana. *African Journal of Agricultural Research*, 14(7), 379-388. <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.12972>
- Bentes Diniz, M., Da Paixão Alves, V., & Teixeira Diniz, M. J. (2019). ¿Refleja el uso de la tierra en la Amazonía un fallo del mercado? Un análisis de los servicios ambientales de la Amazonía desde la perspectiva del costo de oportunidad. *Revista de la CEPAL*, 126, 109-129. <https://doi.org/10.18356/0c4437ca-es>
- Canal Daza, D. S., & Andrade Castañeda, H. J. (2019). Sinergias mitigación - adaptación al cambio climático en sistemas de producción de café (*Coffea arabica*), de Tolima, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 67(1), 36-46. <https://doi.org/10.15517/rbt.v67i1.32537>
- Charchalac Santay, S. (2012). *Experiencias en compensación por servicios ambientales en América Latina (PSA o REDD+): Descripción de casos relevantes*. [https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/imported/documento-final-ii-nov-16-2012\\_final\\_final.pdf.pdf](https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/imported/documento-final-ii-nov-16-2012_final_final.pdf.pdf)
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.-P., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145, 87-99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- Conservación Internacional. (2025). *Innovando la gestión del Bosque de Protección Alto Mayo*. <https://peru.conservation.org/innovando-la-gestion-del-bosque-de-proteccion-alto-mayo>
- De Stefano, A., & Jacobson, M. G. (2018). Soil carbon sequestration in agroforestry systems: A meta-analysis. *Agroforestry Systems*, 92, 285-299. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0147-9>
- Dilas-Jiménez, J. O., & Mugruza-Vassallo, C. A. (2020). Instalación de fincas cafetaleras en sistema agroforestal para recuperación y sostenibilidad de suelos degradados de selva alta. *Revista de Investigación de Agroproducción Sostenible*, 4(1), 499-516. <https://doi.org/10.25127/aps.20201.534>
- Doblas-Miranda, E., Paquette, A., & Work, T. T. (2014). Intercropping trees' effect on soil oribatid diversity in agro-ecosystems. *Agroforestry Systems*, 88, 671-678. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9680-y>
- Ehrenbergerová, L., Cienciala, E., Kučera, A., Guy, L., & Habrová, H. (2016). Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. *Agroforestry Systems*, 90, 433-445. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9865-z>
- Espinoza-Domínguez, W., Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A., & Torres-Rivera, A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), 103-113. <https://doi.org/10.5154/rchscfa.2011.04.030>
- Environmental Systems Research Institute. (2019). *ArcGIS Desktop: Release 10.7*. Redlands, CA: ESRI.

Perú, por su invaluable apoyo y acompañamiento durante todo el proceso. Reconocemos especialmente a los caficultores de la microcuenca del río Toro por abrirnos las puertas de sus hogares y compartir sus conocimientos y experiencias, haciendo posible esta investigación.

### Declaración de conflictos de intereses

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en la investigación presentada en este artículo.

### Fin de la versión en español

- Funk, J. M., Aguilar-Amuchastegui, N., Baldwin-Cantello, W., Busch, J., Chuvasov, E., Evans, T., Griffin, B., Harris, N., Napolitano Ferreira, M., Petersen, K., Phillips, O., Soares, M. G., & van der Hoff, R. J. A. (2019). Securing the climate benefits of stable forests. *Climate Policy*, 19(7), 845-860. <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1598838>
- Gibbon, A., Silman, M. R., Malhi, Y., Fisher, J. B., Meir, P., Zimmermann, M., Dargie, G. C., Farfan, W. R., & Garcia, K. C. (2010). Ecosystem carbon storage across the grassland-forest transition in the high Andes of Manu National Park, Peru. *Ecosystems*, 13, 1097-1111. <https://doi.org/10.1007/s10021-010-9376-8>
- Grosrenaud, E., Okia, C. A., Adam-Bradford, A., & Trenchard, L. (2021). Agroforestry: Challenges and opportunities in Rhino Camp and Imvepi refugee settlements of Arua District, Northern Uganda. *Sustainability*, 13(4), 2134. <https://doi.org/10.3390/su13042134>
- Hergoualc'h, K., Blanchart, E., Skiba, U., Hénault, C., & Harmand, J.-M. (2012). Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 148(1), 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.018>
- Instituto Nacional de Bosques (INAB). (2025). *Programa de incentivos para poseedores de pequeñas extensiones de tierra de vocación forestal o agroforestal (PINPEP)*. <https://inab.gob.gt/index.php/pinpep>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2020). *Mapa de pobreza monetaria provincial y distrital 2018*. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1718/Libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1718/Libro.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2018). *Directorio de centros poblados. Censos Nacionales 2017*. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1541/index.htm](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1541/index.htm)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Junta Nacional del Café. (2019, marzo-abril). La caficultura peruana está en riesgo. *El Cafetalero*, (62), 10-13. <https://juntadelcafe.org.pe/wp-content/uploads/2019/04/REV-62final.pdf>

- León Carrasco, J. C. (27 de agosto de 2020). *Rendimiento productivo promedio del café en Perú es uno de los más bajos comparado con otros países*. Agraria.pe. <https://agraria.pe/noticias/rendimiento-productivo-promedio-del-cafe-en-peru-es-uno-de-l-22325>
- León, J., Reynel, C., & Pennington, T. D. (2016). *Agroforestería y recuperación de áreas degradadas con árboles de Inga (Pacae, Guaba) en el valle de Chanchamayo, Dp. de Junín, Perú*. Universidad Nacional Agraria La Molina. <http://www.lamolina.edu.pe/facultad/forestales/herbario/libros/6.2016b.pdf>
- López Fernández, J., Giacomotti, J., & Lombardi, I. (2023). Crecimiento de plántulas de *Pinus tecumumanii* usando fertilizantes y sustratos en un vivero de Oxapampa, Perú. *Revista Forestal del Perú*, 38(2), 209-227. <https://doi.org/10.21704/rfp.v38i2.207>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI). (2021, enero). *Reporte estadístico del café: Enero 2021*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1862263/REPORTE%20ESTAD%3%8DSTICO%20CAFE%202021%20ENERO.pdf?v=1654286544>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI). (2023). *Commodities trimestral: Café (abril-junio 2023)*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5524126/4327863-commodities-cafe-abr-jun-2023.pdf?v=1701812688>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI). (2023). *Perfil productivo regional [Informe interactivo en Power BI]*. <https://app.powerbi.com/>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2023). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero 2000-2019*. [https://infocarbo.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2023/01/Informe-INGEI-2019-VF\\_2.pdf](https://infocarbo.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2023/01/Informe-INGEI-2019-VF_2.pdf)
- Moreno-Sánchez, R. del P. (2012). *Incentivos económicos para la conservación: Un marco conceptual*. Sociedad Peruana de Derecho Ambiental. <https://spda.org.pe/publicacion/incentivos-economicos-para-la-conservacion-un-marco-conceptual/>
- Navas Panadero, A., Aragón Henao, L. F., & Triana Valenzuela, J. F. (2020). Efecto del componente arbóreo sobre la dinámica de crecimiento y calidad nutricional de una pradera mixta en trópico alto. *Revista de Medicina Veterinaria*, (41), 71-82. <https://doi.org/10.19052/mv.vol1.iss41.7>
- Noriega-Puglisevich, J. A., & Eckhardt, K. I. (2024). Hydrological effects of the conversion of tropical montane forest to agricultural land in the central Andes of Peru. *Environmental Quality Management*. <https://doi.org/10.1002/tqem.22221>
- Obando, G., & Obando, M. (2024). *Agroforestry systems and carbon capture: Socioecological perspectives in Latin America*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-96-6855-7>
- Oficina Nacional Forestal (ONF). (2024). *Monto por modalidad: Programa de pago por servicios ambientales*. <https://onfcr.org/monto-por-modalidad>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2016). *Cambio climático y tenencia de la tierra: Respuestas institucionales desde América Latina (Estudios sobre la tenencia de la tierra No. 11)*. <https://www.fao.org/3/i5588s/i5588s.pdf>
- Pérez-Portilla, E., & Geissert-Kientz, D. (2006). Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: El caso café (*Coffea arabica* L.) - palma camedor (*Chamaedorea elegans* Mart.). *Interciencia*, 31(8), 556-562. [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442006000800004](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442006000800004)

- Phillips, O. L., Brien, R. J. W., & RAINFOR collaboration. (2017). Carbon uptake by mature Amazon forests has mitigated Amazon nations' carbon emissions. *Carbon Balance and Management*, 12(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s13021-016-0069-2>
- Phillips, O., Baker, T., Feldpausch, T., & Brien, R. (2016). *RAINFOR manual de campo para el establecimiento y la remediación de parcelas*. Red Amazónica de Inventarios Forestales (RAINFOR). [https://forestplots.net/upload/es/recursos/RAINFOR\\_field\\_manual\\_ES.pdf](https://forestplots.net/upload/es/recursos/RAINFOR_field_manual_ES.pdf)
- Rafidinal, R., Pitopang, R., Linda, R., Raynaldo, A., & Subrata, E. (2021). Comparative study of aboveground biomass and carbon storage between Tembawang and conventional rubber agroforestry in West Kalimantan, Indonesia. *Acta Agriculturae Slovenica*, 117(1), 229-238. <https://doi.org/10.14720/aas.2021.117.1.1859>
- R Core Team. (2023). *RStudio: Version 4.2.3 [Software]*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Salgado-Mora, M. G., Ruiz-Bello, C., Moreno-Martínez, J. L., Irena-Martínez, B., & Aguirre-Medina, J. F. (2018). Captura de carbono en biomasa aérea de árboles de sombra asociados a *Coffea arabica* L. en el Soconusco, Chiapas, México. *Agroproductividad*, 11(2), 120-126. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/136>
- Schroth, G., Garcia, E., Griscom, B. W., Teixeira, W. G., & Barros, L. P. (2016). Commodity production as restoration driver in the Brazilian Amazon? Pasture re-agro-forestation with cocoa (*Theobroma cacao*) in southern Pará. *Sustainability Science*, 11, 277-293. <https://doi.org/10.1007/s11625-015-0330-8>
- Secretaría de Bienestar. (2020). *Acuerdo por el que se emiten las Reglas de Operación del Programa Sembrando Vida, para el ejercicio fiscal 2021*. Diario Oficial de la Federación. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5608917](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5608917)
- Secretaría de Bienestar. (2025). *Programa Sembrando Vida*. <https://programasparaelbienestar.gob.mx/sembrando-vida/>
- Segura, M., Kanninen, M., & Suárez, D. (2006). Allometric models for estimating Aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems*, 68(2), 143-150. <https://doi.org/10.1007/s10457-006-9005-x>
- SENDECO. (2023). *Precios CO<sub>2</sub> [conjunto de datos]*. <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>
- Senelwa, K., & Sims, R. E. H. (1997). *Tree biomass equations for short rotation eucalypts grown in New Zealand*. *Biomass and Bioenergy*, 13(3), 133-140. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)00026-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)00026-3)
- Sohngen, B., Beach, R. H., & Andrasco, K. (2008). Avoided deforestation as a greenhouse gas mitigation tool: Economic issues. *Journal of Environmental Quality*, 37(4), 1368-1375. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0288>
- Solidaridad Network. (8 de noviembre 2023). *Asómbtrate: Productores cafetaleros recibieron pagos por bonos de carbono*. <https://solidaridadlatam.org/news/asombtrate-productores-cafetetaleros-recibieron-pagos-por-bonos-de-carbono/>
- Solis, R., Vallejos-Torres, G., Arévalo, L., Marín-Díaz, J., Ñique-Alvarez, M., Engedal, T., & Bruun, T. B. (2020). Carbon stocks and the use of shade trees in different coffee growing systems in the Peruvian Amazon. *The Journal of Agricultural Science*, 158(4), 450-460. <https://doi.org/10.1017/S002185962000074X>

- Tak, A. A., & Kakde, U. B. (2020). Analysis of carbon sequestration by dominant trees in urban areas of Thane city. *International Journal of Global Warming*, 20(1), 1–11. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2020.104615>
- Tamayo Ortiz, C. V., & Alegre Orihuela, J. C. (2022). Asociación de cultivos, alternativa para el desarrollo de una agricultura sustentable. *Siembra*, 9(1), e3287. <https://www.redalyc.org/journal/6538/653869372002/html/>
- Timoteo, K., Remuzgo, J., Valdivia, L., Sales, F., Soria, D. G., & Abanto, C. (2016). Estimación de carbono almacenado en tres sistemas agroforestales durante el primer año de instalación en el departamento de Huánuco. *Forestación y Ambiente*, 25(1), 45–54. <https://doi.org/10.24841/fa.v25i1.382>
- Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P. J., Moreno, G., & Plieninger, T. (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 230, 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>
- United States Department of Agriculture (USDA). (May 20, 2024). Peru: Coffee annual. <https://www.fas.usda.gov/data/peru-coffee-annual-8>
- van Noordwijk, M. (2002). Scaling trade-offs between crop productivity, carbon stocks and biodiversity in shifting cultivation landscape mosaics: The FALLOW model. *Ecological Modelling*, 149, 113–12. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=dae218ddf396f312d621dc3dcc2245ba759b8009>
- van Rikxoort, H., Schroth, G., Läderach, P., & Rodríguez-Sánchez, B. (2014). Carbon footprints and carbon stocks reveal climate-friendly coffee production. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(4), 887–897. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0223-8>
- Vera, D. (2017). *Biodiversidad intraespecífica varietal para mejorar ambientes degradados por monocultivos en Musáceas, como medida de control de plagas y enfermedades* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona]. <https://www.tesisenred.net/handle/10803/457711>
- Villa, P. M., Martins, S. V., de Oliveira Neto, S. N., Rodrigues, A. C., Hernández, E. P., & Kim, D. G. (2020). Policy forum: Shifting cultivation and agroforestry in the Amazon: Premises for REDD+. *Forest Policy and Economics*, 118, 102217. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102217>
- Villarreyna, R. A., Avelino, J., & Cerda, R. (2020). Adaptación basada en ecosistemas: Efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en cafetales. *Agronomía Mesoamericana*, 31(2), 499–516. <https://doi.org/10.15517/am.v31i2.37591>
- Watson, J. E. M., Evans, T., Venter, O., Williams, B., Tulloch, A., Stewart, C., Thompson, I., Ray, J. C., Murray, K., Salazar, A., McAlpine, C., Potapov, P., Walston, J., Robinson, J., Painter, M., Wilkie, D., Filardi, C., Laurance, W., Houghton, R., ...Lindenmayer, D. (2018). The exceptional value of intact forest ecosystems. *Nature Ecology & Evolution*, 2, 599–610. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0490-x>
- Zamora-Cristales, R., Gonzalez, M., Rachmaninoff, V., Franco Chuaire, M., Vergara, W., De Camino, R., Miljanic, A., Sanchez, M., Hilton, L., Cabrera Gaillard, C., & Carazo, F. (2022). *Healing the wounded land: The role of public economic incentives in scaling up restoration efforts in six Latin American countries*. World Resources Institute. <https://doi.org/10.46830/wriib.20.00072>
- Zhe, M., & Zhang, X. (2021). Time-lag effects of NDVI responses to climate change in the Yamzhog Yumco Basin, South Tibet. *Ecological Indicators*, 124, 107431. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107431>