

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ambiente y Desarrollo
Ingeniería en Ambiente y Desarrollo



Proyecto Especial de Graduación

**Análisis de emisiones de gases de efecto invernadero a partir de la
implementación de sistemas agroforestales en el cultivo de café**

Estudiante

Alberto Manuel Domínguez Meléndez

Asesores

Victoria Alejandra Cortés Matamoros. Dra.

Ivania Margarita Ochoa Barahona. M.Sc.

Josué Aníbal León Carvajal. Mtr.

Honduras, agosto 2024

Autoridades

SERGIO ANDRÉS RODRÍGUEZ ROYO

Rector

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

VICTORIA CORTÉS MATAMOROS

Directora Departamento de Ambiente y Desarrollo

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Agradecimientos

A la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) a través del proyecto Transformando Sistemas de Mercado (TMS) por su valiosa contribución técnica y financiera durante el desarrollo de este estudio. Al equipo técnico de Café Orgánico Marcala S.A. (COMSA®) por su apoyo en la selección de las unidades productivas y durante las visitas en campo. A la Unidad Forestal de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano por facilitar instrumentos de medición dasométrica y por su apoyo técnico durante la toma y procesamiento de datos.

Contenido

Agradecimientos	3
Contenido.....	4
Índice de Cuadros	6
Índice de Figuras	7
Índice de Anexos	8
Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
Metodología.....	15
Sitio de Estudio	15
Estimación de Línea Base de Emisiones de GEI y Captura de CO ₂ en Unidades Productivas de BonCafé® y COMSA®	15
Estimación de Balance de Emisiones	16
Selección de Unidades Productivas	16
Aplicación de Instrumento de Toma de Datos y Cuantificación de Fuentes de Emisiones	19
Cálculo de Emisiones por Unidad Productiva	19
Inventario Forestal.....	21
Análisis de Captura de CO ₂	23
Balance de GEI	25
Tabulación y Análisis	25
Estimaciones de Captura de CO ₂ Mediante el Programa AFOLU.....	25
Resultados y Discusión.....	27
Análisis de Línea Base	27
Caracterización de Unidades Productivas.....	28

	5
Unidad Productiva La Colmena	28
Unidad Productiva Los Cascabeles.....	29
Unidad Productiva Llano Largo	31
Unidad Productiva San José Obrero	32
Unidad Productiva Doña Toña	33
Categorización de las Unidades Productivas	34
Balance de GEI	35
Estimación de Contenido de CO ₂ Mediante Programa AFOLU	38
Conclusiones	40
Recomendaciones.....	41
Referencias.....	42
Anexos.....	45

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Criterios de categorización de los SAF.....	18
Cuadro 2 Potencial de calentamiento global de GEI.....	21
Cuadro 3 Muestro de la biomasa aérea en las unidades productivas	23
Cuadro 4 Categorización de las unidades productivas	35
Cuadro 5 Balance de GEI por unidad productiva	37
Cuadro 6 Estimación de CO ₂ en sistemas productivos con el programa AFULO	39

Índice de Figuras

Figura 1	Mapa de ubicación de las unidades productivas seleccionadas	17
Figura 2	Diagrama de muestreo forestal	22
Figura 3	Esquema de estimación de altura total en árboles.....	23
Figura 4	Proceso de estimación de captura de CO ₂	24
Figura 5	Emisiones por sistema productivo en t CO _{2eq} /ha.....	28
Figura 6	Mapa de unidad productiva La Colmena	29
Figura 7	Mapa de unidad productiva Los Cascabeles	30
Figura 8	Mapa de unidad productiva Llano Largo.....	31
Figura 9	Mapa de unidad productiva San José Obrero	33
Figura 10	Mapa de unidad productiva Doña Toña.....	34
Figura 11	Balance de GEI por unidad productiva.....	37
Figura 12	Comparación directa con fórmulas alométricas y estimaciones AFOLU ajustadas	39

Índice de Anexos

Anexo A Instrumento de toma de datos en unidades productivas	45
Anexo B Instrumento de inventario forestal	49
Anexo C Macro secciones de la metodología desarrollada en el estudio.....	50
Anexo D Contenido de carbono en la unidad productiva La Colmena	51
Anexo E Contenido de carbono en la unidad productiva Los Cascabeles	52
Anexo F Contenido de carbono en la unidad productiva Llano Largo	53
Anexo G Contenido de carbono en la unidad productiva San José Obrero.....	54
Anexo H Captura de carbono anual por árbol de cada especie.....	55
Anexo I Densidad de árboles en las unidades productivas	56

Resumen

La producción de café es un pilar económico de Honduras, representando el 30% del PIB agrícola. Para mitigar la generación de gases de efecto invernadero (GEI) en este sector, se propone implementar sistemas agroforestales (SAF) que integren especies arbóreas. Este estudio tiene como objetivo principal evaluar el impacto de estos sistemas en la mitigación de emisiones de GEI en la producción de café. Para alcanzar este objetivo, se estimó una línea base de emisiones de GEI en unidades productivas de las empresas BonCafé® y COMSA®, a partir de datos proporcionados por el Proyecto TMS. Además, se calculó el balance de GEI en las unidades productivas de café seleccionadas de COMSA® según su categorización de SAF. Finalmente, se realizó la comparación de captura de CO₂ aplicando la herramienta AFOLU y ecuaciones alométricas. Los resultados mostraron que los sistemas productivos convencionales generan un promedio de 0.44 t CO_{2eq}/ha, mientras que los sistemas orgánicos generan 0.16 t CO_{2eq}/ha, reduciendo las emisiones por hectárea en un 63%. La caracterización en campo reveló que los SAF multiestrato capturan más CO₂ debido a su diseño y especies de rápido crecimiento. Además, las cercas vivas son importantes porque capturan CO₂ sin ocupar el área productiva, logrando un balance de GEI de -9.15 t CO₂/ha, representando la mayor diferencia en el balance de GEI. Se observó que el programa AFOLU tiende a reportar valores superiores a los obtenidos mediante fórmulas alométricas en áreas menores a 5 ha. En conclusión, los sistemas agroforestales son una alternativa para la reducción de inventarios de GEI, generando impactos positivos.

Palabras clave: Agroforestería, biomasa arbórea, mitigación, resiliencia climática

Abstract

Coffee production is one of the economic pillars of Honduras, contributing 30% of the agricultural GDP. Given its economic significance, a strategy to mitigate greenhouse gas (GHG) emissions in coffee production is the implementation of agroforestry systems, which integrate tree species that capture CO₂ during their vegetative phases. The primary objective of this study is to assess the impact of these systems on GHG emission mitigation in coffee production. The main objective of this study is to evaluate the impact of these systems on the mitigation of GHG emissions in coffee production. For this purpose, a baseline of GHG emissions in the production units of the companies BonCafé® and COMSA® was estimated, based on data provided by the TMS project. In addition, the GHG balance was estimated in the selected COMSA® coffee production units according to their categorization as agroforestry systems (SAF). Finally, CO₂ sequestration was compared using the AFOLU tool and allometric equations. The results showed that conventional systems generated an average of 0.44 t CO_{2eq}/ha, while organic systems generated an average of 0.16 t CO_{2eq}/ha, achieving a 63% reduction in emissions per hectare. The field characterization revealed that multi-strata SAF have higher CO₂ sequestration due to their design and fast-growing species. Additionally, the importance of living fences was highlighted, which capture CO₂ without occupying productive areas, achieving a GHG balance with the largest difference between capture and emission, with a value of -9.15 t CO₂/ha. It was also observed that the AFOLU software tends to report higher values than those obtained using allometric formulas in areas smaller than 5 ha. In conclusion, agroforestry systems represent a viable alternative for reducing GHG inventories, generating positive impacts on agricultural production.

Keywords: Agroforestry, climate resilience, mitigation, tree biomass

Introducción

El café es un producto agrícola muy apreciado a nivel mundial, con un impacto significativo en la economía global. Este producto representa la principal fuente de ingresos para muchas personas en todo el mundo, generando valor a partir de la producción en campo y en cada uno de sus eslabones en la cadena productiva. Un estudio realizado por Rosales Chiessa (2020) menciona que la producción de café en Honduras es una temática compleja de abordar debido a la necesidad de un enfoque holístico. Entre 2019 y 2023, la producción de café en Honduras alcanzó un total de 7.6 millones de quintales, de los cuales 500 mil quintales se utilizaron para consumo interno y el resto se exportó, generando un aporte del 30.0% del Producto Interno Bruto (PIB) agrícola y del 4.0% del PIB (Instituto Nacional de Estadísticas [INE], 2024).

Como parte de este sector productivo, BonCafé S.A.® es una destacada empresa hondureña dedicada a la exportación de café, con el 50% de su producción certificada y participando en el desarrollo de cafés especiales en Honduras desde 2003. En 2011, se unió al Proyecto ACCESO con La Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), ampliando su impacto en la producción y comercialización de café. Por otro lado, Café Orgánico de Marcala S.A. (COMSA®), fundada en 2001 con apoyo de la Fundación para el Desarrollo Empresarial Rural (FUNDER), agrupa a productores de café orgánico en diversos municipios del departamento de La Paz y se enfoca en objetivos sociales, económicos y ambientales, promoviendo el desarrollo entre sus socios y reduciendo la pobreza. COMSA® se dedica a la producción y exportación de café de especialidad a mercados diferenciados, con un sistema riguroso de trazabilidad y control de calidad.

El café puede calificarse de diversas maneras, de acuerdo con su calidad en grano, procesamiento y prácticas en campo. Actualmente, las certificaciones de producción en campo son claves para acceder a mercados diferenciados, donde el producto es valorado por su impacto social y ambiental. Entre estos sellos y certificaciones ambientales para el sector café se encuentran *Rainforest Alliance*, *USDA Organic*, *UE Organic*, *Comercio Justo*, *Bird Friendly*, *Mayacert Organic* y las

denominaciones de origen que premian las zonas productoras de alta calidad (Segura y Andrade, 2012).

Las prácticas de producción sostenibles permiten mantener sistemas agroalimentarios productivos a lo largo del tiempo y lograr rendimientos competitivos (Machado Vargas y Ríos Osorio, 2016). Un ejemplo de estas prácticas es la implementación de SAF, el uso de abonos orgánicos, el manejo integrado de nutrientes y la incentivación de la agrobiodiversidad, estableciendo sistemas agroalimentarios resilientes (Ponce Vaca et al., 2018). Estas prácticas representan una alternativa a la producción convencional, permitiendo la producción de café a partir de los insumos y servicios proporcionados por los ecosistemas naturales. Además, preservan las cualidades productivas del suelo y del agroecosistema.

Los SAF representan formas integradoras de producción agrícola que permiten el desarrollo de una agricultura climáticamente inteligente. Como parte de las soluciones basadas en la naturaleza (SbN), los SAF mitigan las tendencias del cambio climático (Ayazo-Toscano y Hernández-Palma, 2021). Estos sistemas consisten en establecer cultivos en asociación con una cobertura vegetal arbórea maderable. Según Farfán Valencia (2013), los SAF pueden presentarse en diferentes diseños según su disposición: multiestrato, con la presencia de varias capas de árboles con diversas especies simultáneamente; estrato simple, con la implementación de árboles asociados a cultivos perennes en una sola capa, comúnmente encontrados en unidades productivas de café con árboles de uso múltiple como los del género *Inga*; cercos vivos, que delimitan las áreas cultivadas; y árboles dispersos, con árboles espaciados entre sí.

Sin embargo, la producción de café siempre genera emisiones de GEI debido a las operaciones productivas que requieren cambio de uso de suelo, aporte de nutrientes mediante fertilización, transporte de materiales, almacenaje, fermentación, transporte de grano y envasado (Fernández Cortés et al., 2020). Según Montenegro (2020), el uso de fertilizantes nitrogenados genera GEI debido a su volatilización por la naturaleza elemental del nitrógeno, formando óxido nitroso, lo que provoca

emisiones significativas en el sector agrario. No obstante, la implementación SAF es una medida de mitigación para las emisiones generadas en la producción cafetalera, debido a la fijación de carbono que ocurre mediante el crecimiento de la biomasa arbórea, lo que permite compensar las emisiones a lo largo de la cadena de valor del café (Antezana et al., 2023).

Según Sánchez Medina et al. (2018), la huella de carbono es la cuantificación de la cantidad de GEI emitida en una actividad productiva, expresada en kilogramos de dióxido de carbono equivalente ($\text{kg CO}_{2\text{eq}}$). En la agricultura, este indicador se asocia principalmente al rendimiento del producto evaluado, por ejemplo, $\text{kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kg}$ de café. Sin embargo, la huella de carbono en la producción agrícola tiende a ser dinámica, lo que permite asociarla al área de producción, obteniendo kilogramos de dióxido de carbono equivalente por hectárea ($\text{kg CO}_{2\text{eq}}/\text{ha}$) (Hernández-Vázquez et al., 2020). Las principales fuentes de emisiones de GEI en la producción de café son: la aplicación de fertilizantes nitrogenados, el consumo de combustibles fósiles, el consumo de electricidad y la fermentación anaeróbica. Los valores de emisiones de GEI para la producción convencional oscilan entre 0.26 y 0.67 $\text{kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kg}$ de café cereza, mientras que en la producción orgánica varían entre 0.12 y 0.52 $\text{kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kg}$ de café cereza, con emisiones principalmente asociadas a la fertilización nitrogenada (Noponen et al., 2012). Estas emisiones pueden ser controladas mediante el uso adecuado de las tecnologías y la integración de prácticas holísticas en el manejo de los SAF.

En este contexto, USAID, a través del Proyecto Transformando Sistemas de Mercado (TMS, por sus siglas en inglés), promueve alianzas estratégicas con empresas de este sector productivo para fortalecerlas y lograr la competitividad y sostenibilidad en el mercado internacional del café. Conocer el impacto de la implementación de medidas para la mitigación del cambio climático representa una oportunidad para el sector, permitiendo acceder a mercados diferenciados y potencialmente, a mercados de carbono. Por lo que, el objetivo general de esta investigación es evaluar el impacto de la implementación de sistemas agroforestales en la mitigación de emisiones GEI en la producción del cultivo de café. Para esto se plantean los siguientes objetivos específicos: 1) Determinar la línea base

de emisiones de GEI en unidades en unidades productivas de las empresas BonCafé® y COMSA® a partir de bases de datos proporcionadas por el Proyecto TMS; 2) Estimar el balance de los GEI de las unidades productivas de café seleccionadas de la empresa COMSA® conforme a su categorización de SAF; y 3) Comparar estimaciones de captura de carbono CO₂ obtenidas mediante la herramienta Agricultura, Forestería y Otros Usos de Tierra (AFOLU, por sus siglas en ingles) y ecuaciones alométricas.

Metodología

Sitio de Estudio

El estudio se llevó a cabo en dos fases. La primera consistió en el análisis de una base de datos proporcionada por el Proyecto TMS de USAID. La segunda fase incluyó un análisis de campo en la zona cafetalera del departamento de La Paz, con un enfoque en los municipios de Marcala, San José y La Paz. Los resultados de captura de CO₂ fueron analizados utilizando metodologías cuantitativas para evaluar su aplicabilidad en la estimación para las unidades productivas seleccionadas.

Estimación de Línea Base de Emisiones de GEI y Captura de CO₂ en Unidades Productivas de BonCafé® y COMSA®

A través del Proyecto TMS se obtuvo una base de datos de productores de café, la cual se estructuró con la información proporcionada por los productores en el año 2023. Esta base incluye un total de 289 unidades productivas (207 de BonCafé® y 82 de COMSA®). La información recopilada, se basa en un período anual, incluyendo área cultivada, tipo de fertilización implementada (convencional u orgánica), dosis de fertilización, contenido de N/kg de fertilizante, rendimientos, especies de árboles dentro del área productiva, edad de los árboles y especie. Los encargados de las unidades productivas encuestados por el Proyecto TMS estaban distribuidas en los departamentos de La Paz, El Paraíso y Copán, lo cual introduce variabilidad en las estimaciones debido a los diferentes requerimientos de nutrientes según las condiciones edafoclimáticas. La base de datos se procesó utilizando el programa *Microsoft Excel*®. Para la captura de CO₂, se realizó una estimación en sistemas agroforestales, empleando valores de referencia bibliográfica, utilizando promedios de diámetros a la altura del pecho a 1.30 m (DAP) y altura promedio según la especie.

Para desarrollar las estimaciones de emisiones directas por uso de fertilizantes, se agruparon las unidades productivas de acuerdo con el sistema productivo implementado (convencional u orgánico). Se utilizó el proceso detallado en la sección *Cálculo de Emisiones por Unidad Productiva* de este estudio para obtener las emisiones. Para la estimación de la captura de GEI se empleó el método

detallado en la sección *Análisis de captura de CO₂* de este estudio, obteniendo la captura anual de CO₂/ha de un SAF. Posteriormente, se utilizó estadística descriptiva para presentar datos promedio según el sistema de producción empleado. Los valores obtenidos para la línea base no son vinculables debido a la falta de relación entre las unidades productivas, impidiendo la estimación de un balance de GEI en esta sección, debido a que las unidades productivas encuestadas para las emisiones de CO₂ no son las mismas encuestadas para la estimación de captura de CO₂ en sistemas agroforestales.

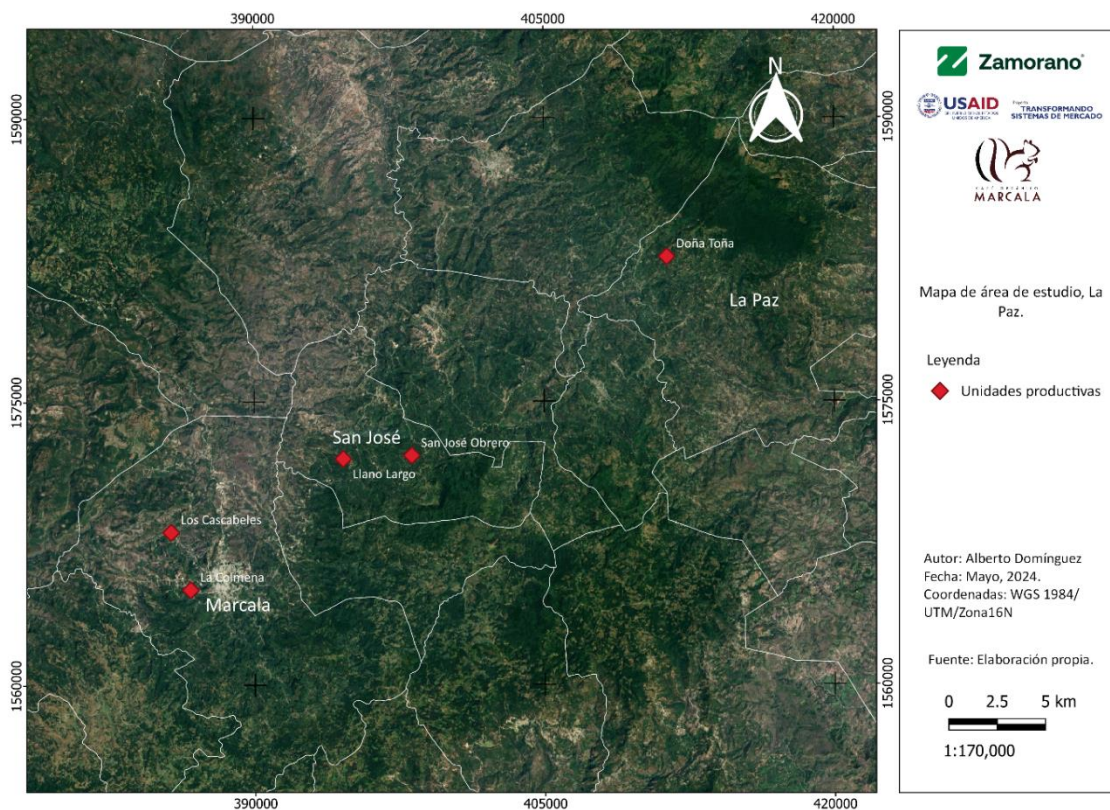
Estimación de Balance de Emisiones

Selección de Unidades Productivas

El estudio se realizó en cinco unidades productivas de asociados de la empresa COMSA®, localizadas en los municipios de San José, Marcala y Concepción de Soluteca, en el departamento de La Paz, Honduras. El área de estudio cuenta con una temperatura media anual de 31.5 °C, una precipitación media anual de 2,558 mm y alturas entre 1,200 y 1,550 msnm, condiciones adecuadas para la producción de café de alta calidad (INE, 2022)

Figura 1

Mapa de ubicación de las unidades productivas seleccionadas



Se seleccionaron diferentes unidades productivas para comprender el comportamiento de la captura de CO₂ y las emisiones de GEI, utilizando la base de datos de asociados de COMSA®. Las unidades productivas muestreadas presentan características particulares de producción y fueron determinadas mediante los siguientes criterios de selección, establecidos según la factibilidad técnica del estudio: caminos accesibles a las unidades productivas, extensión cultivada de 0.5 a 3 ha (lo que facilitó la realización de inventarios forestales), cumplimiento con las prácticas requeridas en las unidades productivas seleccionadas (para asegurar prácticas diferenciadoras), disponibilidad del productor para compartir información (permitiendo una mayor fluidez y acceso a la información requerida para este estudio), y zona altitudinal similar, de 1,200 msnm a 1,550 msnm (delimitando la zona de vida de las especies arbóreas).

Estos criterios de selección permitieron delimitar cinco unidades productivas que posteriormente se clasificaron de acuerdo con su SAF, tomando en cuenta el número de árboles, el número de especies encontradas dentro de las unidades productivas y la distribución de los árboles en las mismas. Posteriormente, se realizó una tabla de categorización de las unidades productivas con las siguientes clasificaciones: SAF dinámico, SAF multiestrato y monocultivo, cumpliendo con las características especificadas en Cuadro 1. Adicionalmente, se clasificaron según la fertilización utilizada: convencional en transición (unidades productivas que en un corto plazo empezó procesos de conversión a producción orgánica) u orgánica estricta.

Cuadro 1

Criterios de categorización de los SAF

Sistemas y prácticas de producción	Características	Fuente
SAF dinámico	<p>Presencia de alta densidad de especies de manera intercalada con diferentes propósitos, maderables, arbustivas, frutales, fijadores de nitrógeno.</p> <p>Cobertura vegetal $\geq 50\%$ de sombra.</p> <p>Presencia de especies de diferentes alturas y edades.</p> <p>Ejemplares arbóreos en diferentes etapas de su ciclo de vida</p> <p>Presencia de regeneración natural.</p> <p>No ocupa un diseño de establecimiento, busca parecerse a la dispersión natural.</p> <p>Promoción del reciclaje de nutrientes.</p> <p>Producción diversificada.</p>	Helga Gruberg Cazón (2015) y Farfán Valencia (2013)
SAF multiestrato	<p>Distribución de árboles en diseño cuadrado o árboles en líneas.</p> <p>Presencia de diferentes edades y alturas.</p> <p>Especies varían entre maderables o fijadores de nitrógeno.</p> <p>Cobertura vegetal mayor al $\geq 50\%$ de sombra.</p>	Farfán Valencia (2013)
Cercos vivos	<p>Ubicados en contornos de las unidades productivas.</p> <p>Especies maderables, con tallo fuerte y resistente a vientos.</p> <p>Distanciamiento de 2 -3 m entre los árboles.</p> <p>Protección de la unidad productiva.</p>	Farfán Valencia (2013)

Sistemas y prácticas de producción	Características	Fuente
Monocultivo	Cobertura vegetal \leq 20% de sombra. Enfocado únicamente a la producción de café. Densidad de plantas de café alta $>$ 4,300 cafetos/ha.	Farfán Valencia (2013) y Cardona y Sadeghia (2005)

Aplicación de Instrumento de Toma de Datos y Cuantificación de Fuentes de Emisiones

Para la caracterización de las unidades productivas se empleó un instrumento de toma de datos (Anexo A), con el cual se obtuvo información sobre la finca y el propietario, la altura sobre el nivel del mar y el área en producción. Además, se describieron los sistemas productivos de café, como la densidad y edad de la plantación, las variedades de café cultivadas, el método de cultivo predominante, el rendimiento y la frecuencia de renovación. También se registraron aspectos sobre las prácticas productivas, incluyendo el uso de fertilizantes inorgánicos, abonos orgánicos, pesticidas inorgánicos, biopesticidas, cercos vivos, labranza y equipo para actividades de limpieza.

Posterior a la toma de datos, se procedió a la tabulación de estos en el programa Microsoft Excel®, para posteriormente realizar las estimaciones de las fuentes de emisiones encontradas. Adicionalmente, se recolectó información de características geofísicas de las unidades productivas, como la pendiente media del terreno, la pedregosidad y profundidad de los suelos, la exposición a la luz solar y el perímetro de la unidad productiva, utilizando la *app móvil Gaia GPS*® y el GPS Garmin *Etrex 10*® para el levantamiento en campo. Finalmente, se realizó la conversión de los perímetros de las unidades productivas a formato de Lenguaje de Marcado Keyhole (KML, por sus siglas en inglés) mediante el programa *Google Earth Pro*®, permitiendo luego el uso de los polígonos en el programa QGIS®, en el cual se realizó el mapeo de las unidades productivas.

Cálculo de Emisiones por Unidad Productiva

Las estimaciones de las emisiones se realizaron mediante la aplicación de las Directrices por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. En el capítulo 11 de estas directrices,

Emisiones de N₂O de los suelos gestionados y emisiones de CO₂ derivadas de la aplicación de Cal y Urea (De Klein et al., 2006), se aborda la metodología para cuantificar estas emisiones. Para calcular las emisiones directas de N₂O de suelos gestionados, se utilizó la Ecuación 8 (nivel 1) de las directrices del IPCC. Explicándose en este documento como la Ecuación 1.

$$N_2O - N_{N \text{ aportes}} = \left[\frac{(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM}) \times EF_1}{[(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM})_{FR} \times EF_{1FR}]} \right] \quad [1]$$

Nota. Obtenido de De Klein et al. (2006)

Donde:

N₂O–N_{N aportes} = emisiones directas anuales de N₂O–N producidas por aportes de N a suelos gestionados, kg N₂O–N año⁻¹

F_{SN} = cantidad anual de N aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintético, kg N año⁻¹

F_{ON} = cantidad anual de estiércol animal, compost, lodos cloacales y otros aportes de, kg N año⁻¹

F_{CR} = cantidad anual de N en los residuos agrícolas (aéreos y subterráneos), incluyendo los cultivos fijadores de N y la renovación de forraje/pastura, que se regresan a los suelos, kg N año⁻¹

F_{SOM} = cantidad anual de N en suelos minerales que se mineraliza, relacionada con la pérdida de C del suelo de la materia orgánica del suelo como resultado de cambios en el uso o la gestión de la tierra, kg N año⁻¹

EF₁ = factor de emisión para emisiones de N₂O de aportes de N, kg N₂O–N (kg aporte de N)

Tomado del Cuadro 11.1 del documento de De Klein et al. (2006)

EF_{1FR} = es el factor de emisión para emisiones de N₂O de aportes de N en plantaciones de arroz inundadas, kg N₂O–N (kg aporte de N)⁻¹ (Cuadro 11.1 del documento De Klein et al. (2006))

Una vez obtenidas las emisiones de N₂O se empleó el valor de potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) del 2013, presentados en Cuadro 3 del documento de De Klein et al. (2006). A partir de las emisiones de N₂O se obtienen los Kg CO_{2eq} aplicando el factor de GWP de

265 (Cuadro 2), obteniendo las emisiones generadas por medio de la fertilización nitrogenada. Dichos valores son establecidos por el IPCC que posteriormente son actualizados por medio de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) y otras organizaciones. Los cambios se dan de acuerdo con nuevas investigaciones del comportamiento cambiante de los gases en la atmósfera (Australian Government Clean Energy Regulator, 2024; United States Environmental Protection Agency [EPA], 2016).

Cuadro 2

Potencial de calentamiento global de GEI

Potencial de calentamiento global 100	IPCC 2007 ^a	IPCC 2013 ^a	IPCC 2019 ^c
CO ₂	1.00	1.00	1.00
CH ₄	25.00	30.50	28.00
N ₂ O	298.00	265.00	265.00

Nota. Tomado de EPA (2016)^a y Australian Government Clean Energy Regulator (2024)^b

Para este estudio, se consideró únicamente el alcance uno, asociado con las emisiones directas derivadas de la producción (fertilización, limpieza y riego). Se utilizó la metodología de Nivel uno del IPCC debido a la dependencia de factores de emisión predeterminados, dada la ausencia de factores de emisión específicos para el país.

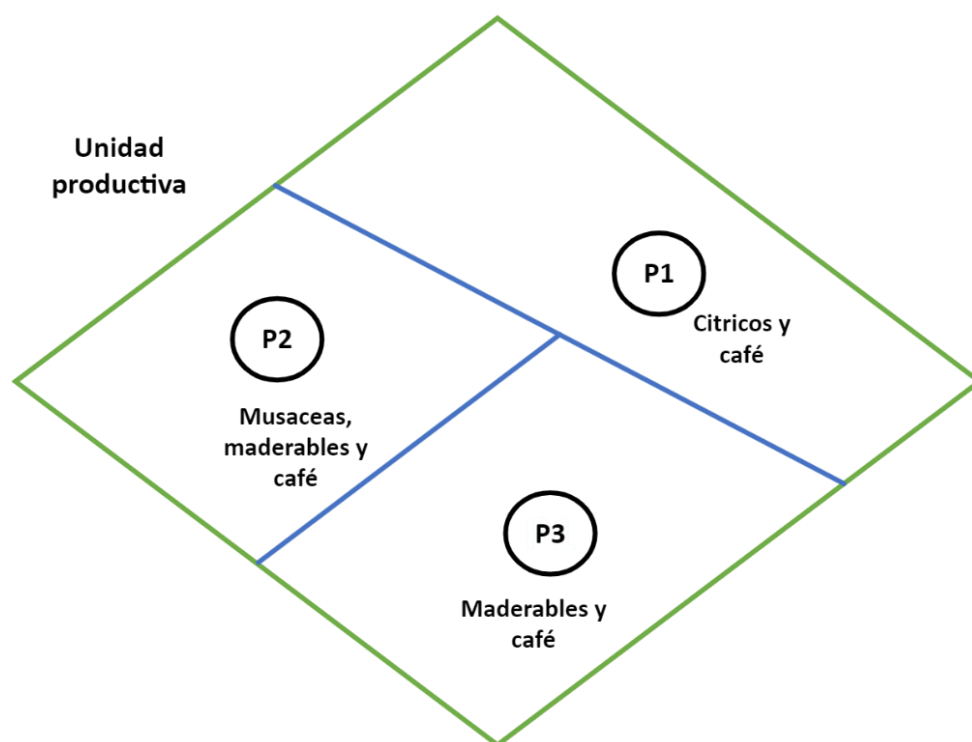
Inventario Forestal

Se realizó un inventario forestal para estimar el contenido de biomasa en las unidades productivas seleccionadas, con el propósito de obtener la captura anual de GEI dentro de las unidades productivas y posteriormente realizar el balance de GEI, permitiendo así un análisis entre las unidades productivas seleccionadas. El inventario forestal se llevó a cabo mediante un muestreo sistemático, estableciendo parcelas temporales de muestreo circulares con un radio fijo de 12.6 m y un área de 500 m², distribuidas con la finalidad de cubrir del 10 al 15% del área total de cada unidad productiva. En el caso de las unidades productivas que presentaban baja uniformidad, se utilizó la estratificación, que consistía en identificar los estratos dentro de la unidad productiva y establecer las diferentes coberturas, permitiendo una mejor representatividad de la vegetación arbórea dentro de las unidades

productivas. Para la realización de las parcelas de muestreo se utilizaron estacas para definir el centro de la parcela; posteriormente, se tomaban sus coordenadas y, con una cinta métrica, se delimitaba el área a inventariar. Una vez definido el límite del radio de la parcela de muestreo, se marcaban los árboles a medir con aerosol de pintura. La Figura 2 muestra un ejemplo de la realización de las parcelas de muestreo en unidades productivas con multiestrato y homogeneidad reducida.

Figura 2

Diagrama de muestreo forestal



De acuerdo con lo mencionado anteriormente, la intensidad de muestreo se detalla en el Cuadro 2, permitiendo saber la representatividad de los muestreos realizados, variando en función de la variabilidad de especies y estratos observada en campo. Estos criterios se establecieron en función de la uniformidad encontrada en el campo. Las unidades productivas con una menor cantidad de parcelas fueron aquellas que contaban con estratos claramente definidos dentro de la misma.

Cuadro 3

Muestra de la biomasa aérea en las unidades productivas

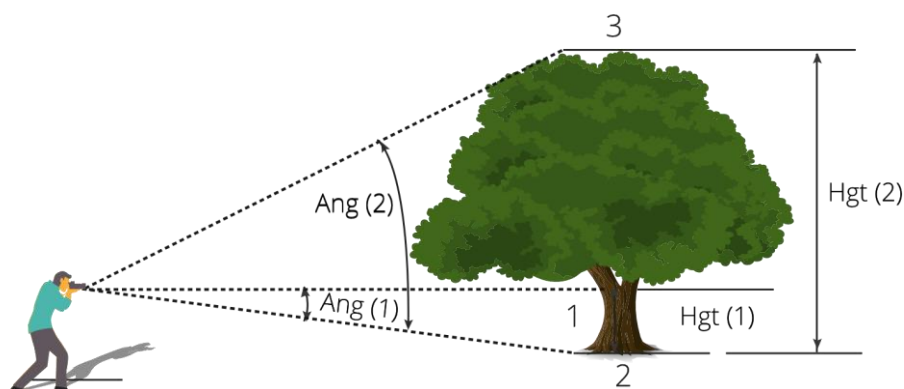
Unidad productiva	Área de la unidad productiva (ha)	Cantidad de parcelas de (500 m ²)	Intensidad de muestreo (%)
La Colmena	1.43	3	10.49
Los Cascabeles	1.39	2	7.19
San José Obrero	0.61	1	8.20
Llano Largo	1.37	3	10.95
Finca Toña	0.72	0	0

Nota. En el caso de Finca Toña no se realizaron parcelas de muestreo debido a que se encuentra sin sombra a pleno sol.

Dentro de las parcelas de muestreo se realizó la medición dasométrica de todos los árboles presentes, acompañada del conteo de las musáceas si estas se encontraban dentro del área seleccionada. Se empleó un instrumento para inventarios forestales (Anexo B) para la recolección de la siguiente información: número de parcela, número de árbol, DAP a 1.30 m medido con cinta diamétrica, altura total estimada con isómetro a 15 m lineales del árbol a medir (ejemplo diagramado en la Figura 3), identificación de especie, y coordenadas de los centros de las parcelas.

Figura 3

Esquema de estimación de altura total en árboles



Nota. Tomado de Universidad Nacional Autónoma de México (2018).

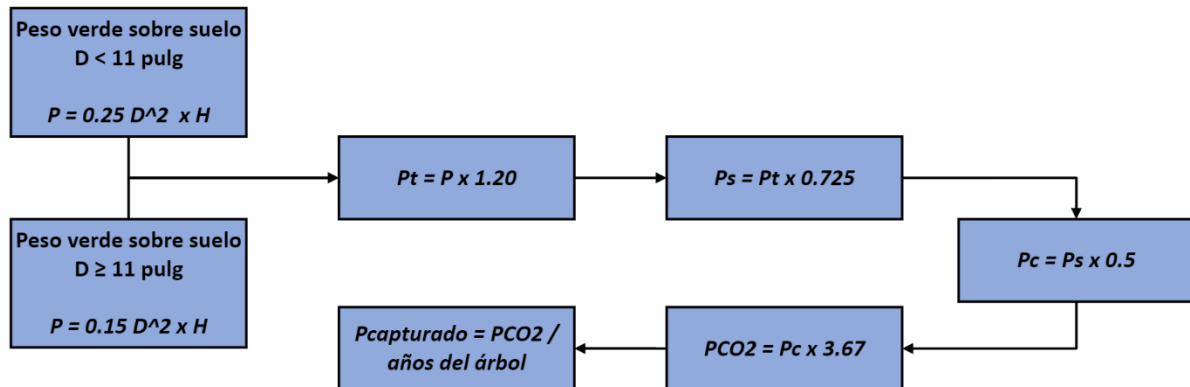
Análisis de Captura de CO₂

A partir de los datos recolectados previamente en campo, se realizó la limpieza y tabulación de los datos dasométricos y las actividades que generan GEI. El ordenamiento y procesamiento de los datos se efectuó en el programa Microsoft Excel®. Posteriormente, se estimó el contenido de carbono

de las unidades productivas muestreadas utilizando el método empleado por Broward (2018), el cual consiste en una serie de ecuaciones interconectadas para encontrar el CO₂ capturado por árbol. Proceso que es resumido en la Figura 4, en la cual se representan las ecuaciones en secuencia.

Figura 4

Proceso de estimación de captura de CO₂



Nota. Adaptado de Broward (2018); DeWald et al. (2005); Gayoso y Guerra (2005); Myers y Goreau (1992).

Donde:

P = peso verde sobre el suelo en libras

H = altura en pies

D = diámetro en pulgada

P_t = peso verde con raíces en libras

P_s = peso seco del árbol en libras

P_c = peso de carbono en el árbol en libras

P_{CO₂} = peso de CO₂ en el árbol en libras

P_{capturado} = peso de CO₂ por año en libras

Una vez finalizado el proceso de la estimación del CO₂ almacenado y capturado se procedió a la estimación de contenido de CO₂ y captura total por unidad productiva. El contenido de carbono de las plantas de café no se estimó debido a justicia ambiental, que busca prever la expansión de la frontera agrícola en las áreas de intervención.

Balance de GEI

El balance de GEI permitió realizar comparaciones entre las unidades productivas muestreadas. El balance presenta un comportamiento singular, las unidades productivas que presenta valores menores son las que tienen una mayor captura de CO₂, siendo carbono negativas. En cambio, los valores mayores tienden a presentar más emisiones de CO₂, siendo carbono positivas. Este balance de GEI se detalla en la Ecuación 2, la cual emplea como unidad Kg CO₂/ha.

$$\text{Balance GEI} = \text{Emisiones directas} - \text{Captura de CO}_2 \quad [2]$$

Donde:

Emisiones directas = emisiones en kg CO_{2eq}/ha

Captura de CO₂ = kg CO₂capturado/ha

Tabulación y Análisis

Posterior a la toma de datos, se realizó la tabulación utilizando el programa *Microsoft Excel*[®]. Se efectuaron los cálculos necesarios para obtener los valores de emisiones de GEI y la captura de CO₂, con el fin de realizar el balance de GEI. Los valores obtenidos se presentaron en función del área, permitiendo una comparación directa entre los sistemas productivos encontrados. Posteriormente, se realizó el análisis mediante la comparación de los datos representados en gráficos.

Estimaciones de Captura de CO₂ Mediante el Programa AFOLU

Se realizó la estimación de captura de CO_{2eq} anual utilizando la calculadora de carbono desarrollada por USAID, llamada AFOLU. Se creó un proyecto nuevo y se agregaron como actividades cada una de las unidades productivas con su delimitación en formato *Shapefile* comprimido. Posteriormente, se asignaron las actividades vinculadas a las áreas de las unidades productivas, en este caso, sistemas agroforestales multiestrato, y se completó una serie de preguntas cerradas para determinar la efectividad del proyecto. Dependiendo de las respuestas, se estimó el porcentaje de

efectividad, el cual se puede ajustar manualmente si se considera demasiado bajo o alto para la actividad productiva asociada.

Se estableció una edad de plantación de 1 año para poder realizar las proyecciones. A partir de esto, se calculó la media de años de la biomasa aérea y se determinó el contenido de CO₂ almacenado en el sistema productivo sin ajuste. Posteriormente, se agregó la captura de carbono anual, expresada en t C/ha/año, utilizando las fórmulas para la estimación de captura de CO₂, permitiendo ajustar de manera precisa las estimaciones en el programa. Para el uso del programa AFOLU, se emplearon las cinco unidades productivas seleccionadas previamente. Se realizó una comparación de los resultados obtenidos mediante las fórmulas alométricas y los obtenidos por AFOLU, utilizando gráficos para su representación.

Resultados y Discusión

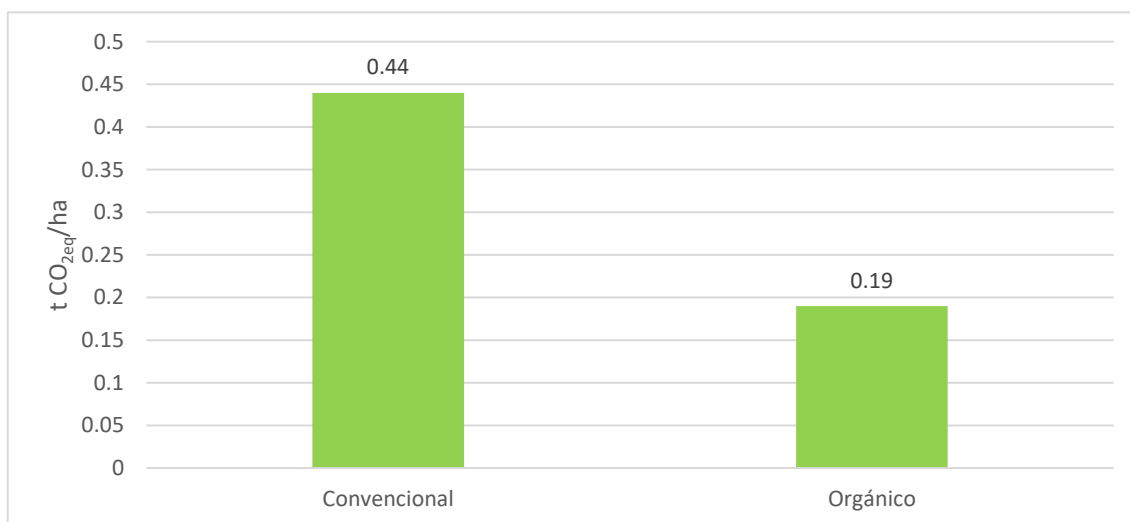
Análisis de Línea Base

A partir de la base de datos recolectada por medio de encuestas, se realizó la estimación de la captura de CO₂ anual para SAF, obteniendo un valor promedio de 5.12 t CO₂/ha. Este valor se encuentra dentro del rango reportado por Segura y Andrade (2012), que oscila entre 5.0 y 17.6 t CO₂/ha en SAF, lo cual indica una contribución significativa en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

En cuanto a las emisiones de GEI, se obtuvo un valor de 0.44 t CO_{2eq}/ha para productores convencionales y 0.16 t CO_{2eq}/ha para productores orgánicos. Como se muestra en la Figura 5, las emisiones de los sistemas productivos convencionales son el doble que las de los sistemas orgánicos. Por lo tanto, los productores que realizan una transición a sistemas orgánicos pueden reducir aproximadamente el 63% de sus emisiones por hectárea producida. Sin embargo, es importante considerar el acceso a diversas fuentes de nutrientes en los sistemas orgánicos, así como la aplicación de materia orgánica en sus diferentes etapas de descomposición (humidificación, mineralización y estabilización) (Julca-Otiniano et al., 2006). Además, la incorporación de sombra con especies fijadoras de nitrógeno puede reducir la cantidad de N necesaria para la nutrición de los cafetos, lo cual disminuye las emisiones al proporcionar nutrientes asimilables de manera constante y limitando la generación de GEI.

Figura 5

Emisiones por sistema productivo en t CO_{2eq}/ha



Caracterización de Unidades Productivas

Como parte del proceso de la investigación, a continuación, se describen las prácticas agrícolas y características de cada unidad productiva seleccionada, por medio del empleo de los criterios de selección previamente mencionados. Con la información obtenida de los sistemas productivos, se pudo contrastar lo encontrado en la literatura con lo observado en campo.

Unidad Productiva La Colmena

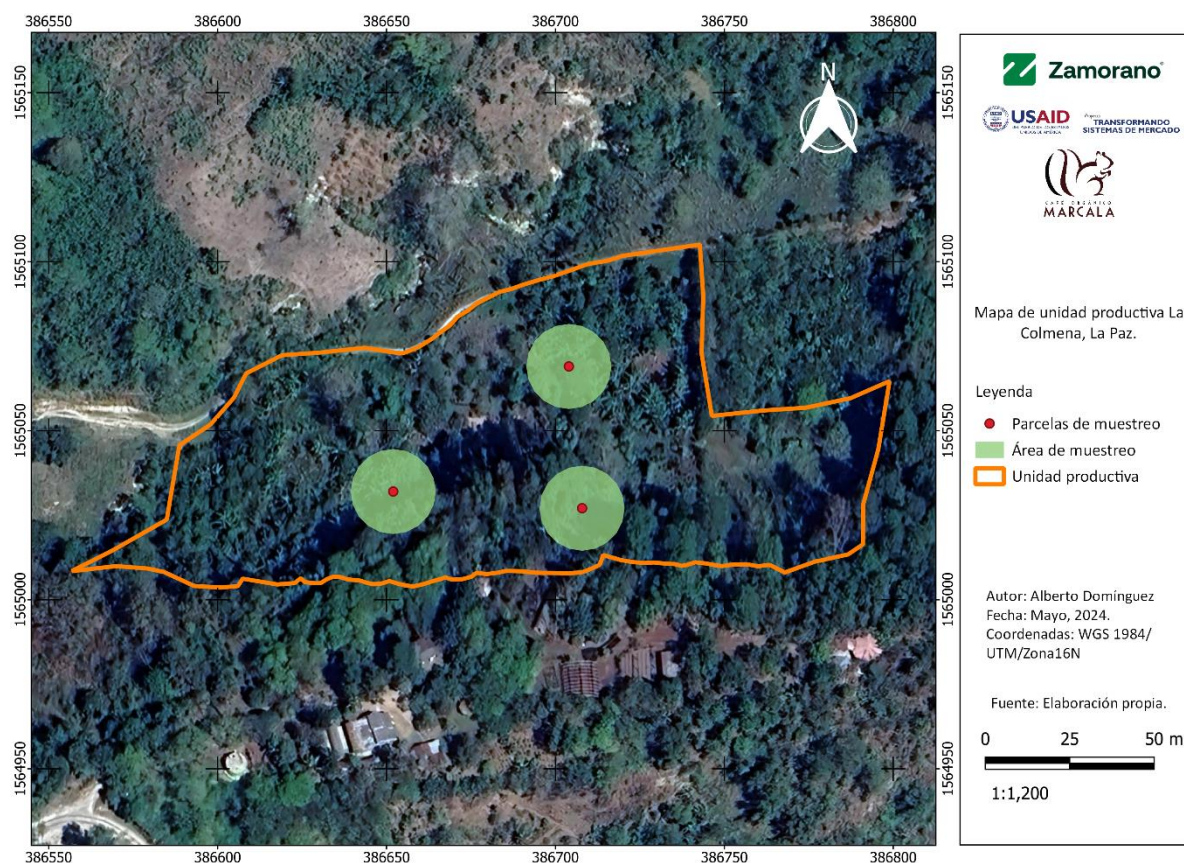
En la Figura 6 se muestra el mapa de la unidad productiva La Colmena, que presenta un sistema de producción agroforestal dinámico. Este carácter dinámico se debe a la presencia de una gran variedad de especies dentro de la unidad productiva (Antezana et al., 2023). En este caso, La Colmena cuenta con 23 especies arbóreas, destacando *Quercus* sp. y *Caliandra calotirsus*. La edad promedio de los árboles es de 15 años, con un DAP promedio de 14.27 cm y una altura promedio de 6.63 m. La unidad productiva ofrece una amplia variedad de especies para la producción de miel, árboles maderables y cítricos.

La Colmena tiene las siguientes características generales: se encuentra a 1,430 m.s.n.m., con un área de 1.43 ha; cuenta con sombra completa, con una densidad de 506 árboles/ha con presencia

de sucesión ecológica natural y una densidad de plantas de café de 4,286 cafetos/ha; presenta un rendimiento de 69.71 qq café cereza/ha; la edad de plantación es de 12 años, aunque diferentes áreas han sido renovadas en varios períodos, con edades de 1, 4 y 8 años; las variedades de café presentes son Parainema y Maragogipe; la unidad recibe luz solar durante todo el día; la profundidad del suelo es mayor a 30 cm; los suelos están compuestos principalmente de limo y arcilla; y la pendiente promedio es del 75%. Estas características categorizan a La Colmena como un SAF dinámico.

Figura 6

Mapa de unidad productiva La Colmena



Unidad Productiva Los Cascabeles

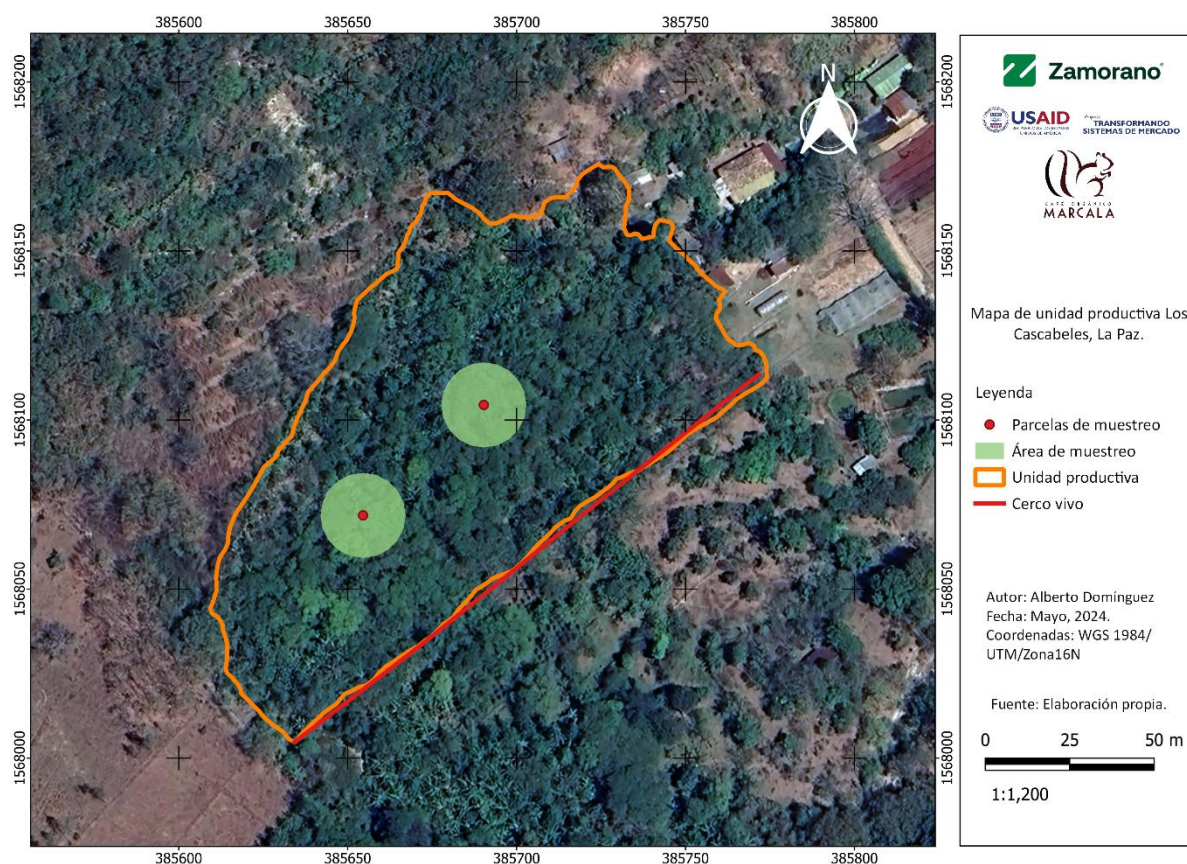
En la Figura 7 se muestra el mapa de la unidad productiva Los Cascabeles. Esta unidad presenta un sistema de producción agroforestal, con una variedad de árboles cítricos, musáceas, árboles maderables y árboles de sombra. En esta unidad se identificaron 11 especies diferentes,

destacando *Inga vera* y *Grevillea robusta*. La edad media de los árboles es de 21 años, con un DAP promedio de 15.89 cm y una altura promedio de 7.15 m.

Los Cascabeles tiene las siguientes características generales: se encuentra a 1,248 m.s.n.m., con un área de 1.39 ha; presenta sombra completa sin presencia de sucesión ecológica natural con una densidad de 823 árboles/ha y una densidad de plantas de café de 4,286 cafetos/ha; el rendimiento es de 312.86 qq de café cereza/ha; la edad de plantación es de 8 años, aunque se realiza una renovación anual constante que varía entre 500 y 1,000 plantas de café para compensar la pérdida debido a enfermedades, daño mecánico, manejo del tejido y rejuvenecimiento seccional; las variedades de café presentes son Catuai, Parainema y *Blend*; la unidad recibe luz solar durante todo el día; la profundidad del suelo es mayor a 30 cm; los suelos están compuestos principalmente de arcilla; y la pendiente promedio es del 10%. Estas características categorizan a Los Cascabeles como un SAF multiestrato.

Figura 7

Mapa de unidad productiva Los Cascabeles



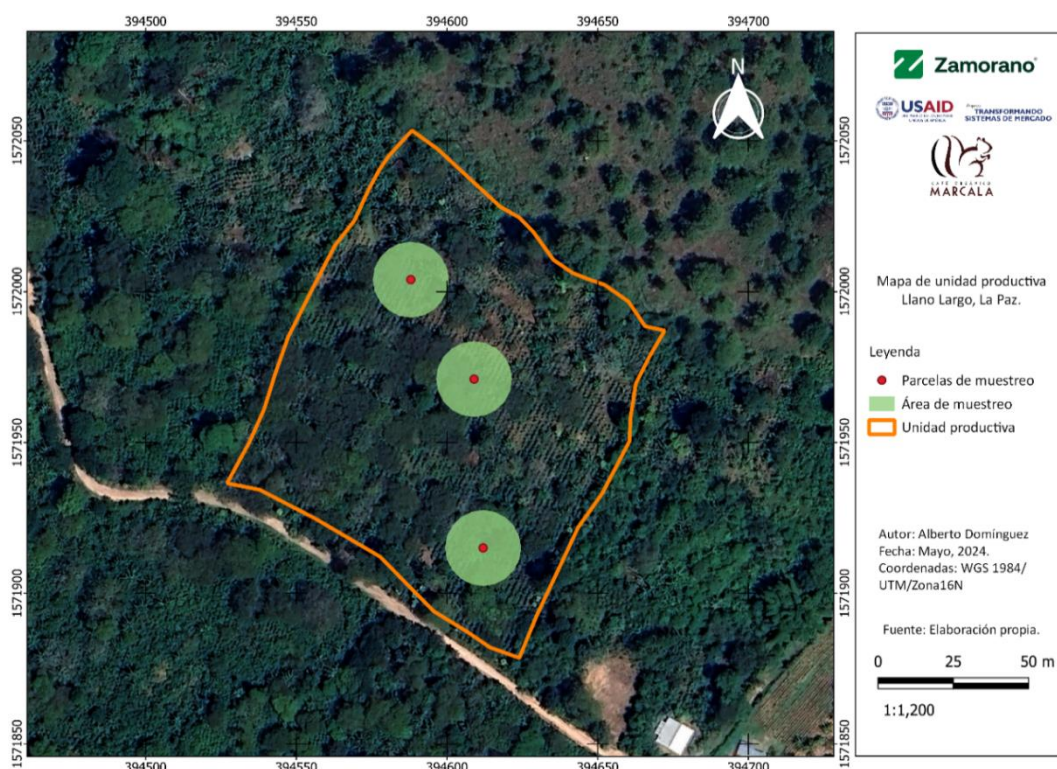
Unidad Productiva Llano Largo

En la Figura 8 se muestra el mapa de la unidad productiva Llano Largo. Esta unidad presenta un sistema de producción convencional con sombra. Dentro de esta unidad se encontraron árboles de servicio y árboles cítricos dispersos. La unidad cuenta con cuatro especies diferentes, siendo *Inga vera* la más dominante. La edad media de los árboles es de 8 años, con un DAP promedio de 14.57 cm y una altura promedio de 10.25 m.

Llano Largo tiene las siguientes características generales: se encuentra a 1,300 m.s.n.m., con un área de 1.37 ha; presenta sombra completa sin presencia de sucesión ecológica natural con una densidad de 233 árboles/ha y una densidad de plantas de café de 3,857 plantas/ha; el rendimiento es de 479.96 qq de café cereza/ha; la edad de plantación varía entre 8 y 9 años; las variedades de café presentes son IHCAFE 90, Lempira y Geisha; la unidad recibe luz solar durante todo el día; la profundidad del suelo es mayor a 30 cm; los suelos están compuestos principalmente de arcilla; y la pendiente promedio es del 14%. Estas características categorizan a Llano Largo como un SAF multiestrato.

Figura 8

Mapa de unidad productiva Llano Largo



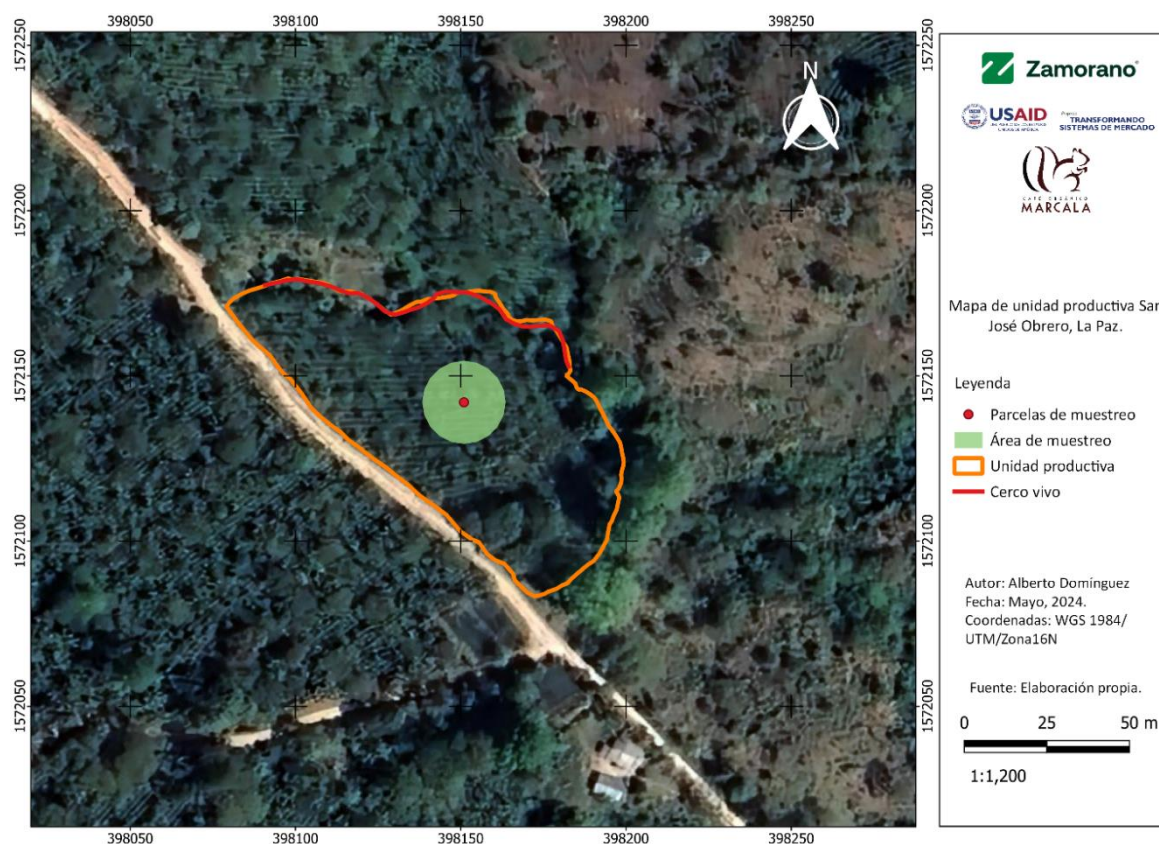
Unidad Productiva San José Obrero

La Figura 9 muestra el mapa de la unidad productiva San José Obrero. Esta unidad presenta un sistema de producción convencional a pleno sol. Dentro de esta unidad se encontraron cuatro especies diferentes, siendo *Grevillea robusta* la más dominante. La edad media de los árboles es de 9 años, con un DAP promedio de 6.61 cm y una altura promedio de 4.65 m. Además, se observa una cerca viva de *Grevillea robusta* y maleza dispersa en la unidad.

San José Obrero tiene las siguientes características generales: se encuentra a 1,450 m.s.n.m., con un área de 0.61 ha; presenta exposición total al sol sin presencia de sucesión ecológica natural con una densidad de 152 árboles/ha y una densidad de plantas de café de 4,310 cafetos/ha; el rendimiento es de 438.05 qq de café cereza por ha; la edad de plantación es de 8 años; la variedad de café cultivada es Bourbon Amarillo; la unidad recibe luz solar durante todo el día; la profundidad del suelo es mayor a 30 cm; los suelos están compuestos principalmente de limo y arcilla; y la pendiente promedio es del 17%. Estas características categorizan a San José Obrero como un sistema de producción monocultivo, sin embargo, cuenta con la presencia de cerca viva establecida en el contorno de la unidad productiva.

Figura 9

Mapa de unidad productiva San José Obrero

**Unidad Productiva Doña Toña**

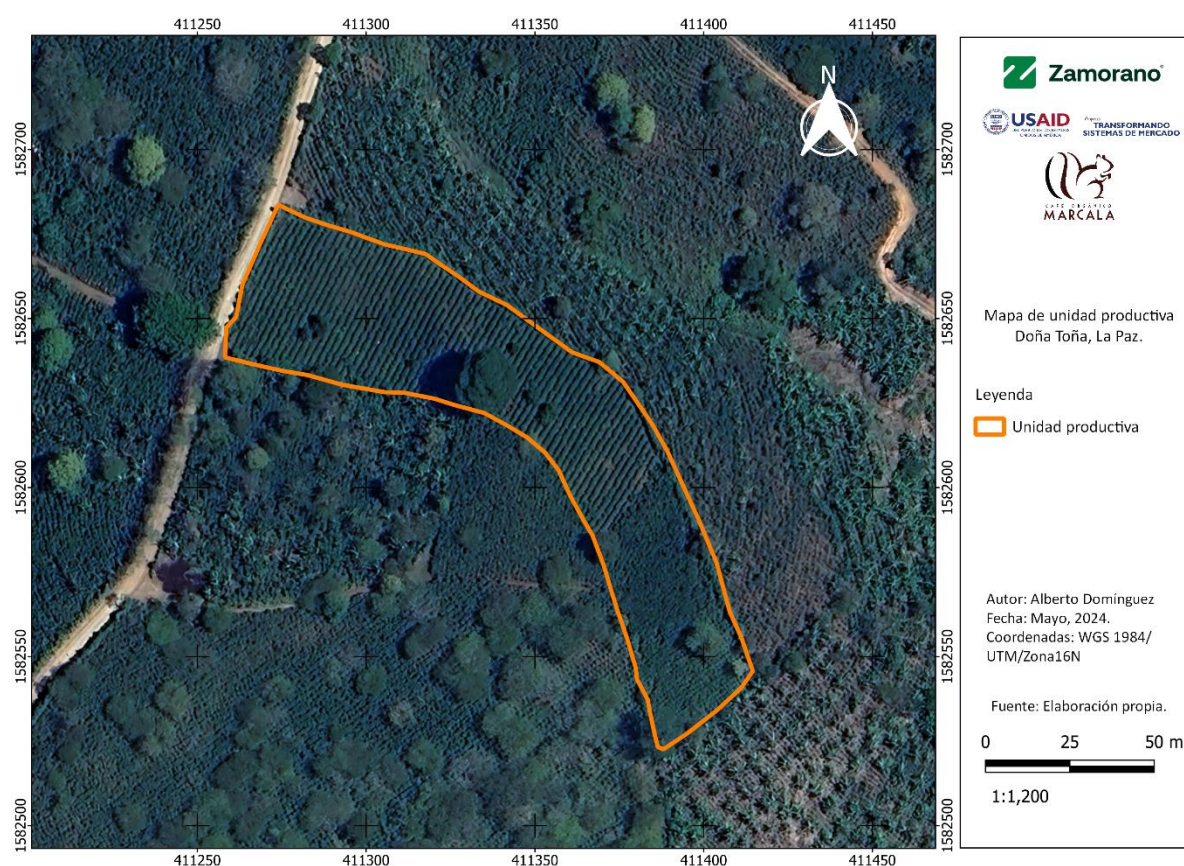
La Figura 10 muestra el mapa de la unidad productiva Doña Toña. Esta unidad presenta un sistema de producción orgánico a pleno sol. Aunque se observan algunos árboles dispersos, realizar parcelas de muestreo en esta unidad podría llevar a una sobreestimación debido a la ausencia de sombra en toda el área productiva, sin presencia de sucesión ecológica natural, por lo cual no se muestreo para la estimación de captura de CO₂ en este estudio. Se establece como monocultivo, ya que para ser considerado sistema agroforestal, se debe contar con al menos 250 árboles/ha (Instituto Nacional de Bosques Guatemala [INAB], s.f).

La unidad productiva Doña Toña tiene las siguientes características generales: se encuentra a 1,550 m.s.n.m., con un área de 0.72 ha; está completamente expuesta al sol, con una densidad de

plantas de café de 4,286 cafetos/ha; el rendimiento es de 463.05 qq de café cereza/ha; la edad de plantación es de 5 años; las variedades cultivadas son Parainema y Catimora; la unidad recibe luz solar durante todo el día; la profundidad del suelo es mayor a 30 cm; los suelos están compuestos principalmente de limo y arcilla; y la pendiente promedio es del 28%. Estas características categorizan a Doña Toña como sistema de producción monocultivo.

Figura 10

Mapa de unidad productiva Doña Toña



Categorización de las Unidades Productivas

En el Cuadro 4 se presenta la categorización de las unidades productivas, clasificadas según las características observadas en campo. Las unidades productivas se clasificaron en tres tipos: SAF dinámico, SAF multiestrato y monocultivo. Esta clasificación permitió una agrupación precisa de las

unidades productivas muestreadas, representando homogeneidad en las prácticas dentro de cada categoría.

Cuadro 4

Categorización de las unidades productivas

Tipo de producción	Fertilización orgánica	Fertilización en transición
Sistema agroforestal dinámico	La Colmena	N/A
Sistema agroforestal multiestrato	Los Cascabeles ^a	Llano Largo
Monocultivo	Doña Toña	San José Obrero ^a

Nota. Unidades productivas con cerco vivos^a.

Balance de GEI

El Cuadro 5 y la Figura 11 proporcionan una visión detallada sobre la captura anual de CO₂, las emisiones de CO₂ y el balance de GEI en distintas unidades productivas con variados sistemas de producción. La unidad productiva La Colmena, que se clasifica como SAF dinámico, muestra una captura anual de 5.51 t CO₂/ha y emisiones de 0.39 t CO_{2eq}/ha, resultando en un balance de GEI de -5.12 t CO₂/ha. Este balance negativo significativo refleja una alta capacidad de secuestro de carbono y bajas emisiones, gracias a la diversidad y la integración de especies arbóreas y cultivos (Antezana et al., 2023).

La unidad productiva Los Cascabeles es otro SAF que presenta una captura anual de 9.97 t CO₂/ha y emisiones de 0.82 t CO_{2eq}/ha, con un balance de GEI de -9.15 t CO₂/ha. Este es el mayor balance negativo de GEI entre las unidades productivas, destacando la efectividad de los SAF tradicionales en el secuestro de carbono, apoyada por la mayor biomasa y la presencia de cercos vivos.

Estos resultados se alinean con los hallazgos de Vega Orozco et al. (2014), que reportan que los SAF con mayor diversidad de especies presentan mayores contenidos de carbono, en un rango de 9 a 63 t C/ha. En este estudio, La Colmena registra 23.65 t C/ha y Los Cascabeles 54.41 t C/ha. La diferencia en el contenido de carbono puede explicarse por la edad de las unidades productivas: 15 años para La Colmena y 21 años para Los Cascabeles. La biomasa incrementa con la edad, el DAP y la

altura, parámetros de influencia también reportados por Ortega Tórrez et al. (2023), quienes encontraron contenidos de carbono en el rango de 6.43 a 25.70 t C/ha en SAF.

En cuanto a los sistemas convencionales, Llano Largo, que incorpora sombra en un manejo convencional, muestra una captura anual de 7.55 t CO₂/ha y emisiones de 0.46 t CO_{2eq}/ha, con un balance de GEI de -7.09 t CO₂/ha. Vinculado a la presencia de sombra la cual contribuye a una mayor biomasa aérea a su vez aumentando la captura de carbono. Este hallazgo demuestra que la cantidad de especies no es el único factor para un mayor contenido de carbono, en sintonía con los hallazgos realizados por Vega Orozco et al. (2014). En este estudio, se demuestra que variables como el DAP, la altura, la edad y la densidad de árboles influyen directamente en el contenido de carbono.

Por otra parte, la unidad productiva San José Obrero, es categorizado como un sistema convencional sin sombra, muestra una captura anual de 2.59 t CO₂/ha y emisiones de 1.59 t CO_{2eq}/ha, resultando en un balance de GEI de -1.00 t CO₂/ha. La baja captura de CO₂ y el balance negativo reducido evidencian las limitaciones de los sistemas convencionales sin sombra para el secuestro de carbono y la necesidad de estrategias adicionales para mejorar la sostenibilidad. La aplicación de fertilizante *Fastrac*® (20-5-17) en San José Obrero, con una dosis de 4 onzas por planta, contribuye al balance negativo de -1 t CO₂/ha. En Llano Largo, se aplica la fórmula cafetalera® (20-5-17) en una cantidad de 2 onzas por planta.

Finalmente, Doña Toña, un sistema orgánico sin sombra, presenta una captura anual de 0 t CO₂/ha y emisiones de 1.05 t CO_{2eq}/ha, resultando en un balance de GEI positivo de 1.05 t CO₂/ha. Este balance positivo indica que las emisiones superan la captura de CO₂. Aunque es un sistema orgánico, la falta de sombra limita su capacidad de secuestro de carbono. Este resultado subraya la importancia de integrar prácticas agroforestales en sistemas orgánicos para mejorar su desempeño ambiental (Fernández Cortés et al., 2020).

Las tasas de captura de CO₂ se encuentran dentro de lo esperado, según estudios sobre captura de carbono en biomasa en SAF, que sitúan las tasas entre 7.7 y 16.9 t CO₂/ha (Avilés Vásquez,

2009). En este estudio, la tasa de fijación varía entre 2.59 y 9.97 t CO₂/ha, lo cual es adecuado para los SAF muestreados dentro de esta investigación.

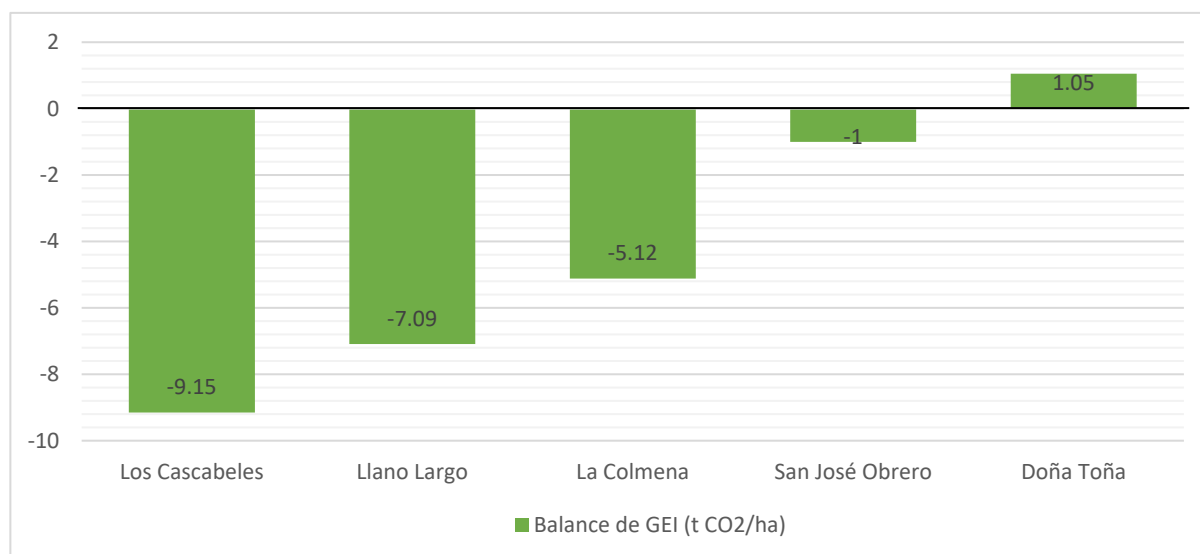
Cuadro 5

Balance de GEI por unidad productiva

Unidad productiva	CO ₂ almacenado (t CO ₂ /ha)	Captura de CO ₂ anual (t CO ₂ /ha)	Emisiones CO ₂ (kg CO _{2eq} /kg café cereza)	Emisiones CO ₂ (t CO _{2eq} /ha)	Balance de GEI (t CO ₂ /ha)
La Colmena	82.65	5.51	0.12	0.39	-5.12
Los Cascabeles	209.37	9.97	0.06	0.82	-9.15
Llano Largo	60.40	7.55	0.02	0.46	-7.09
San José Obrero	23.31	2.59	0.08	1.59	-1.00
Doña Toña	0	0	0.05	1.05	1.05

Figura 11

Balance de GEI por unidad productiva



En cuanto a las emisiones encontradas, estas superan los valores esperados según Segura y Andrade (2012), quienes reportaron emisiones de entre 0.47 y 0.57 kg CO_{2eq}/kg de café cereza en sistemas de producción convencional. En contraste, el sistema de producción orgánico presentó un valor significativamente mayor de 18.68 kg CO_{2eq}/kg de café cereza, debido a las elevadas dosis de

abonos orgánicos aplicados. Esta investigación consideró sistemas productivos certificados como buen café (UTZ, por sus siglas en Maya Quiché) *Kapeh*, *Rainforest* y Comercio Justo.

En comparación, los resultados de este estudio muestran un rango de emisiones de 0.02 a 0.12 kg CO_{2eq}/kg de café cereza, lo que indica valores significativamente más bajos. Es de destacar que, debido al acceso a abonos orgánicos en las unidades productivas asociadas con COMSA®, se aplica una dosis mínima de 428.57 qq de abono/ha, aportando los nutrientes necesarios para la producción. Por lo tanto, las unidades productivas orgánicas pueden generar emisiones equivalentes o mayores a las de los sistemas convencionales debido a la alta cantidad de materia orgánica aplicada. No obstante, es importante considerar que los rendimientos de las unidades productivas muestreadas varían, con un mínimo de 69.71 qq de café cereza/ha y un máximo de 479.96 qq de café cereza/ha. Este rango de rendimientos distribuye las emisiones en función de los rendimientos específicos de cada unidad productiva.

Estimación de Contenido de CO₂ Mediante Programa AFOLU

En el Cuadro 6 y la Figura 12 se presentan las estimaciones realizadas mediante el programa AFOLU. La captura acumulada muestra valores cercanos a los estimados por las fórmulas establecidas en la metodología. Se destaca que el sistema agroecológico dinámico La Colmena es el que más se aproxima a las estimaciones, debido a que posee el área más grande de todos los sistemas productivos evaluados, lo que permite ajustar de mejor manera las consideraciones realizadas por AFOLU (Winrock International, 2014). Además, La Colmena tiene una edad media de 15 años, lo que contribuye a la proximidad en la captura anual.

Por otro lado, el sistema agroforestal Los Cascabeles presenta una captura anual más distante de las estimaciones, dado que tiene una edad media de 21 años y se encuentra en una etapa de captura más baja según la curva de crecimiento de los árboles. La Figura 12 muestra la cercanía de los resultados obtenidos al ajustar el programa AFOLU, permitiendo predecir el comportamiento del contenido de CO₂ en el área de las unidades productivas (Winrock International, 2014). Para lograr un

intervalo de confianza del 95%, se recomienda que las unidades productivas tengan áreas en el rango de 90 a 100 ha.

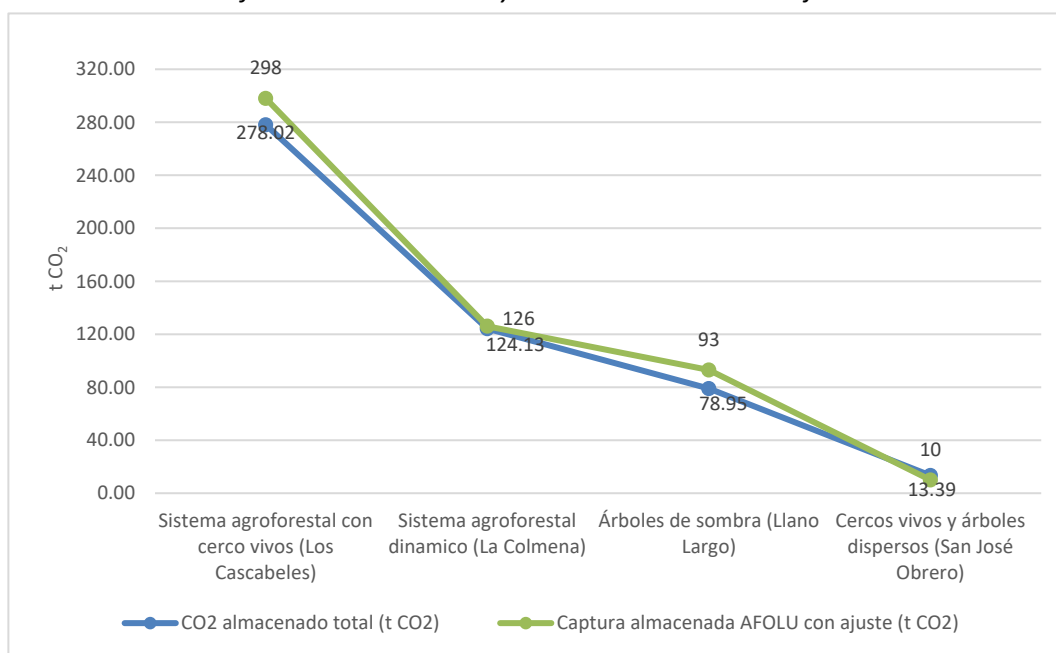
Cuadro 6

Estimación de CO₂ en sistemas productivos con el programa AFULO

Sistemas productivos	Carbono total almacenado (t C)	CO ₂ total almacenado (t CO ₂)	Captura anual C (t C/ha)	Captura anual AFOLU (t CO ₂)	CO ₂ total almacenado AFOLU (t CO ₂)	CO ₂ total almacenado AFOLU ajustado (t CO ₂)
Sistema agroforestal dinámico (La Colmena)	33.82	124.13	2.55	7	280	126
Sistema agroforestal con cerco vivos (Los Cascabeles)	75.63	278.02	2.66	3	251	298
Árboles de sombra (Llano Largo)	21.51	78.95	2.06	15	199	93
Cerco vivos y árboles dispersos (San José Obrero)	3.65	13.39	0.45	6	95	10

Figura 12

Comparación directa con fórmulas alométricas y estimaciones AFOLU ajustadas



Conclusiones

Los sistemas productivos con mayor registro de emisiones corresponden a la producción convencional con un valor promedio de 0.44 t CO_{2eq}/ha. El análisis de la línea base demostró que las unidades productivas en transición de sistemas convencionales a orgánicos logran reducir sus emisiones en un 63% por hectárea producida.

Los sistemas agroforestales (SAF) multiestrato reportan actualmente una mayor captura de carbono. Sin embargo, los SAF dinámicos muestran un mayor potencial a largo plazo debido a su constante integración de especies arbóreas y la facilitación de la sucesión natural. Los cercos vivos contribuyen de manera sustancial a la captura de GEI sin ocupar área dentro de las unidades productivas.

Se demostró que el programa AFOLU es más efectivo para extensiones mayores a 90 ha, ya que reduce el error en la estimación de la captura y almacenamiento total de carbono. En unidades productivas menores a 3 ha, el programa tiende a reportar valores superiores de hasta un 44.33% superiores a los obtenidos mediante inventarios forestales y ecuaciones alométricas.

Recomendaciones

Establecer parcelas permanentes de monitoreo para generar valores de captura de carbono ajustados a las curvas de crecimiento de las especies, teniendo en cuenta las características geofísicas del área productiva o zona de vida.

Realizar pruebas de contenido de carbono en el suelo de las unidades productivas incluidas en este estudio, con el fin de obtener un valor total del contenido de carbono.

Realizar mediciones de biomasa mediante el método destructivo para obtener un valor más preciso del contenido de carbono en los árboles.

Hacer uso de ecuaciones alométricas propias de las especies a muestrear, para obtener valores de biomasa ajustados a la especie.

Contar con registros detallados de las posibles fuentes de emisiones de GEI dentro de las unidades productivas.

Referencias

Antezana, M., Gruberg, H. y Augstburger, H. (2023). Capacidad de los sistemas agroforestales dinámicos de proveer servicios agroecosistémicos. Tres estudios de caso en los Valles Interandinos de Bolivia. *Acta Nova*, 11(1), 3–16. <http://www.scielo.org.bo/pdf/ran/v11n1/1683-0789-ran-11-01-3.pdf>

Australian Government Clean Energy Regulator. (2024). *Global warming potential*. <https://cer.gov.au/schemes/national-greenhouse-and-energy-reporting-scheme/about-emissions-and-energy-data/global>

Avilés Vásquez, I. I. (2009). *Fijación biológica de nitrógeno y almacenamiento de carbono en agrosistemas de producción de café (Coffea arabica L.) En puerto rico* [Tesis de maestría]. Universidad de Puerto Rico Recinto Universitario de Mayagüez, Puerto Rico. <https://scholar.uprm.edu/server/api/core/bitstreams/8210b981-95c1-4222-a334-0f859c0b177b/content>

AYAZO-TOSCANO, R. y HERNÁNDEZ-PALMA, A. (2021). *Portafolio de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) como mecanismo de mitigación y adaptación al cambio climático en áreas rurales de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <https://repository.humboldt.org.co/server/api/core/bitstreams/024ae1b6-3d7e-4e1a-83dc-41670fb52ade/content>

Broward, C. (2018). *How to calculate the amount of CO₂ sequestered in a tree per year*. https://www.unm.edu/~jbrink/365/Documents/Calculating_tree_carbon.pdf

Cardona, D. A. y Sadeghia, S. (2005). Caracterización de la fertilidad del suelo en monocultivos de café (*Coffea Arabica*) y bajo sombrío de guamo (*Inga sp*). *Revista Colombiana Forestal*, 9(18), 87–97. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2005.1.a07>

De Klein, C., Novoa, R. S., Ogle, S., Smith, K. A., Rochette, P., Wieth, T. C., McConkey, B. G., Mosier, A. y Rypdal, K. (2006). *Emisiones de N₂O de los suelos gestionados y emisiones de CO₂: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O%26CO2.pdf

DeWald, S., Josiah, S. y Erdkamp, R. (2005). *Heating with wood: producing, harvesting and processing firewood*. University of Nebraska-Lincoln Cooperative Extension. https://extension.illinois.edu/sites/default/files/nebraska_producing_harvesting_and_processing_firewood.pdf

Farfán Valencia, F. (2013). *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura: Establecimiento de sistemas agroforestales con café*. Centro Nacional de Investigaciones de Café. https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/Manual_Cafetero <https://doi.org/10.38141/cenbook-0026>

Fernández Cortés, Y., Sotto Rodríguez, K. D. y Vargas Marín, L. A. (2020). Impactos ambientales de la producción del café, y el Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. *Producción + Limpia*, 15(1), 93–110. <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v15n1/1909-0455-pml-15-01-93.pdf>

Gayoso, J. y Guerra, J. (2005). Contenido de carbono en biomasa aérea de bosques nativos de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 26(2), 33–38. <https://www.scielo.cl/pdf/bosque/v26n2/art05.pdf>

Helga Gruberg Cazón. (2015). *Sistemas agroforestales dinámicos y su singularidad*. NatureFund. https://www.academia.edu/10088599/SISTEMAS_AGROFORESTALES_DIN%C3%81MICOS_Y_SU_SINGULARIDAD

Hernández-Vázquez, A., Domínguez-Sánchez, G., Valencia-Salazar, I., Mendoza-Sosa, J. A. y Román-Montano, R. A. (2020). Análisis de la huella de carbono en el gran café La Parroquia, de Veracruz, sucursal malecón. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*, 5(1), 279–295. <http://www.rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/59/63>

Instituto Nacional de Bosques Guatemala. (s.f). *Sistemas agroforestales*. <https://www.inab.gob.gt/images/servicios/probosque/foliares/saf-fo liar.pdf>

Instituto Nacional de Estadísticas. (2022). *Precipitación pluvial 2017-2021*. <https://ine.gob.hn/v4/2022/09/30/precipitacion-pluvial-2017-2021/>

Instituto Nacional de Estadísticas. (2024). *Comportamiento de las importaciones y exportaciones de café 2019 -2023*. <https://ine.gob.hn/v4/2024/02/02/comportamiento-de-las-importaciones-y-exportaciones-de-cafe-2019-2023/>

Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R. y Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *IDESIA (Chile) Revista De Agricultura En Zonas Áridas*, 24(1). <https://doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>

Machado Vargas, M. M. y Ríos Osorio, L. A. (2016). Sostenibilidad en agroecosistemas de café de pequeños agricultores: revisión sistemática. *IDESIA (Chile)*, 34(2). <https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v34n2/aop0216.pdf>

Montenegro, J. (2020). Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en la emisión de óxido nitroso en plantaciones de café en Costa Rica. *Revista De Ciencias Ambientales*, 54(2), 111–130. <https://doi.org/10.15359/rca.54-2.6>

Myers, N. y Goreau, T. J. (1992). Tropical Forests and the Greenhouse Effect: A Management Response. En N. Myers y T. J. Goreau (Eds.), *Tropical Forests and Climate* (pp. 215–225). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3608-4_22

Noponen, M. R., Edwards-Jones, G., Haggard, J. P., Soto, G., Attarzadeh, N. y Healey, J. R. (2012). Greenhouse gas emissions in coffee grown with differing input levels under conventional and organic management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 151, 6–15. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.01.019>

Ortega Tórrez, E. F., Munguía Hernández, R. d. J. y Blandón Díaz, J. U. (2023). Carbono almacenado en sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica* L.) en tres municipios de Boaco, Nicaragua. *La Calera*, 23(40), 30–39. <https://doi.org/10.5377/calera.v23i40.16221>

Ponce Vaca, L. A., Acuña Velázquez, I. R., Proaño Ponce, W. P. y Orellana Suárez, K. D. (2018). El sistema agroforestal cafetalero. Su importancia para la seguridad agroalimentaria y nutricional en Ecuador. *Revista Cubana De Ciencias Forestales*, 6(1). <http://scielo.sld.cu/pdf/cfp/v6n1/2310-3469-cfp-6-01-116.pdf>

Rosales Chiessa, D. G. (2020). *Análisis económico de la cadena de valor del café Caso Beneficio Cerrato El Paraíso, Honduras* [Proyecto Especial de Graduación, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras]. [bdigital.zamorano.edu. https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/0fccbc2a-8f18-4ee9-981c-6e2424734f5d/content](https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/0fccbc2a-8f18-4ee9-981c-6e2424734f5d/content)

Sánchez Medina, I. I., Medina Rojas, F. y Cabrera Medina, J. M. (2018). Diseño de software para calcular la huella de carbono e hídrica durante la producción de café. *Ingeniería Solidaria*, 14(24), 1–12. <https://doi.org/10.16925/in.v14i24.2159>

Segura, M. A. y Andrade, H. J. (2012). Huella de carbono en cadenas productivas de café (*Coffea Arabica* L.) con diferentes estándares de certificación en Costa Rica. *Luna Azul*, 35, 60–77. <https://revistasoj.s.ucaldas.edu.co/index.php/lunazul/article/view/1726>

United States Environmental Protection Agency. (2016). *Understanding Global Warming*. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>

Universidad Nacional Autónoma de México. (2018). *Dendrometría en parques y jardines*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). https://repositorio-uapa.cuaieed.unam.mx/repositorio/moodle/pluginfile.php/1583/mod_resource/content/1/contenido/index.html

Vega Orozco, G., Ordoñez Espinosa, C. M., Suarez Salazar, J. C. y López Pantoja, C. F. (2014). Almacenamiento de carbono en arreglos agroforestales asociados con café (*Coffea arabica*) en el sur de Colombia. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 5(1), 213–221. <https://doi.org/10.22490/21456453.956>

Winrock International. (2014). *AFOLU Carbon Calculator. The Agroforestry Tool: Underlying Data and Methods*. https://afolucarbon.org/static/documents/AFOLU-C-Calculator-Series_AF.pdf

Anexos**Anexo A***Instrumento de toma de datos en unidades productivas***Instrumento de toma de datos.**

Estimado productor.

Mi nombre es Alberto Domínguez, soy estudiante de la carrera de Ingeniería en Ambiente y Desarrollo de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. Esta encuesta forma parte de mi proyecto especial de graduación por medio del cual estoy realizando una investigación sobre “Análisis de emisiones de gases de efecto invernadero a partir de la implementación de prácticas sostenibles en el cultivo de café”. Agradezco su tiempo y colaboración para responder las siguientes preguntas.

La información brindada es confidencial y solo se utilizará para fines académicos.

Fecha: _____

Nombre: _____

Rol en la finca: _____

Generalidades de la finca

1. Nombre de finca:
2. Altura de la finca:
3. Tamaño total de la finca:
4. Cantidad de lotes en la finca:
5. Tamaño de lotes de la finca:

Sistema productivo de café

1. Área dedicada al cultivo de café:
2. Densidad de plantación:

3. Edad de la plantación de café:
4. Variedades de café cultivadas:
5. Método de cultivo predominante:
 - i. A pleno sol
 - ii. Sombra parcial
 - iii. Sombra completa
6. Productividad o rendimientos:
7. Frecuencia de renovación de plantación:

Prácticas productivas

1) Fertilizantes inorgánicos que utiliza:

Tipo	Cantidad	Frecuencia de aplicación

2) Abonos orgánicos que utiliza:

Tipo	Cantidad	Frecuencia de aplicación
Compost		

Bokashi		
Pulpa de café seca		
Otro		

3) Pesticidas inorgánicos que utiliza:

Tipo	Cantidad	Frecuencia de aplicación

4) Biopesticidas que utiliza:

Tipo	Cantidad	Frecuencia de aplicación

5) Sobre los cercos vivos:

- i. Longitud:
- ii. Especies y edad estimada por especie:

6) Sobre la labranza:

- i. Tipo de labranza:
- ii. Frecuencia de labranza:

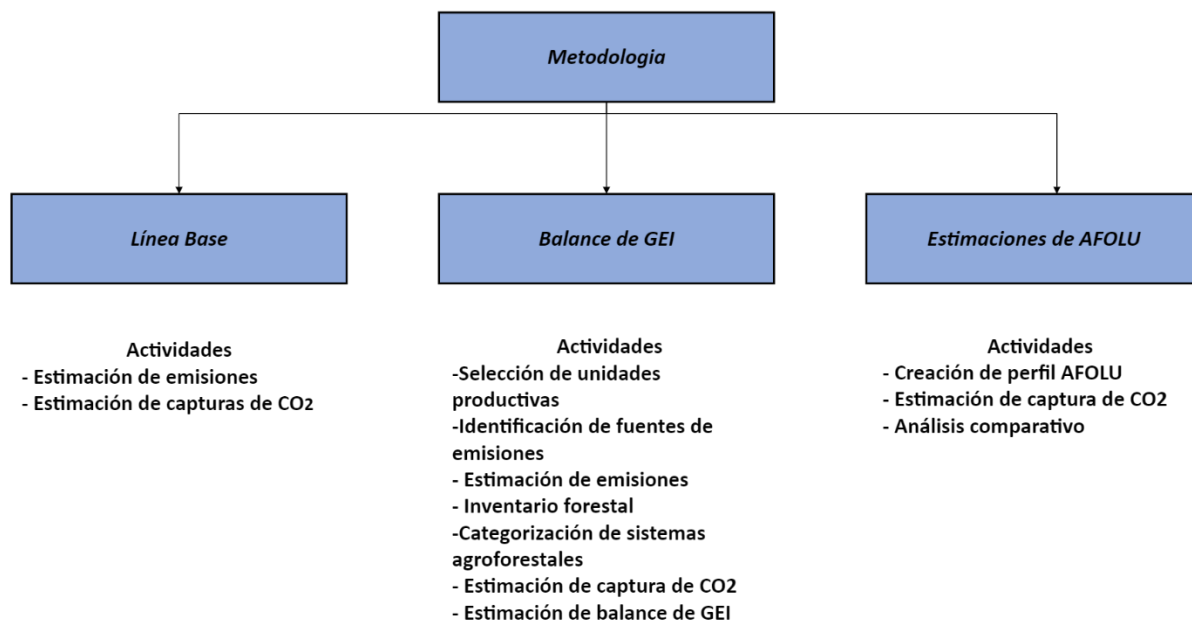
7) Sobre el uso de equipo:

- i. Tipo de equipo utilizado (por ejemplo, chapeadora):
- ii. Tipo de combustible utilizado:
- iii. Cantidad de combustible utilizado:
- iv. Tipo de aceite utilizado:

Cantidad de aceite utilizado:

Anexo C

Macro secciones de la metodología desarrollada en el estudio



Anexo D*Contenido de carbono en la unidad productiva La Colmena*

Fuente de biomasa	Carbono acumulado total (t C)	CO ₂ acumulado total (t CO ₂)	Captura anual (t CO ₂)
Sombra	33.82	124.13	7.88

Nota. Área de unidad productiva 1.43 ha.

Anexo E*Contenido de carbono en la unidad productiva Los Cascabeles*

Fuente de biomasa	Carbono acumulado total (t C)	CO ₂ acumulado total (t CO ₂)	Captura anual (t CO ₂)
Cerco vivo	1.97	7.68	0.85
Sombra	73.66	270.34	13.01
Total	75.63	278.02	13.86

Nota. Área de unidad productiva 1.39 ha.

Anexo F*Contenido de carbono en la unidad productiva Llano Largo*

Fuente de biomasa	Carbono acumulado total (t C)	CO ₂ acumulado total (t CO ₂)	Captura anual (t CO ₂)
Sombra	21.51	78.95	10.34

Nota. Área de unidad productiva 1.37 ha.

Anexo G*Contenido de carbono en la unidad productiva San José Obrero*

Fuente de biomasa	Carbono acumulado total (t C)	CO ₂ acumulado total (t CO ₂)	Captura anual (t CO ₂)
Cerco vivo	3.58	13.13	1.46
Sombra	0.07	0.26	0.12
Total	3.65	13.39	1.58

Nota. Área de unidad productiva 0.61 ha.

Anexo H

Captura de carbono anual por árbol de cada especie

Especies encontradas	Captura anual C (kgC)	CO ₂ anual (kgCO ₂)
<i>Liquidambar styraciflua</i>	48.82	179.16
<i>Acrocarpus fraxinifolius</i>	18.66	68.47
<i>Pinus oocarpa</i>	10.62	38.99
<i>Syzygium jambos</i>	7.88	28.90
<i>Spondias mombin</i>	7.86	28.84
<i>Mangifera indica</i>	6.14	22.54
<i>Inga vera</i>	5.45	20.01
<i>Gliricidia sepium</i>	5.36	19.68
<i>Bursera simaruba</i>	4.59	16.86
<i>Grevillea robusta</i>	4.08	14.96
<i>Citrus sinensis</i>	3.40	12.49
<i>Inga sp</i>	3.28	12.06
<i>Ardisia escallonioides cersil</i>	2.82	10.36
<i>Quercus corrugata</i>	2.28	8.36
<i>Clusia salvinii</i>	2.18	7.99
<i>Swietenia macrophylla</i>	2.05	7.54
<i>Citrus paradisi</i>	1.60	5.89
<i>Nothofagus spp</i>	1.33	4.89
<i>Clethra macrophylla</i>	1.32	4.84
<i>Persea sp</i>	1.30	4.79
<i>Myroxylon balsamum</i>	1.15	4.23
<i>Cordia alliodora</i>	1.14	4.19
<i>Quercus sp</i>	1.11	4.09
<i>Caliandra calotirsus</i>	0.95	3.47
<i>Psidium guajava</i>	0.88	3.22
<i>Byrsonima crassifolia</i>	0.86	3.15
<i>Quercus oleoides</i>	0.77	2.83
<i>Sapindus saponaria</i>	0.75	2.75
<i>Piper nigrum</i>	0.51	1.88
<i>Tabebuia donnel-smithii</i>	0.44	1.62
<i>Casimiroa edulis</i>	0.32	1.18

Anexo I*Densidad de árboles en las unidades productivas*

Sistema productivo	Densidad de árboles (árboles/ha)
Sistema agroforestal dinamico (La Colmena)	506
Sistema agroforestal con cerco vivos (Los Cascabeles)	823
Árboles de sombra (Llano Largo)	233
Cerco vivos y árboles dispersos (San José Obrero)	152