

**Ruta estratégica hacia la sostenibilidad cafetera: aplicación de bonos por
captura de carbono en el municipio de Quinchia Risaralda**

Leidy Tatiana Jaramillo Montes

Asesor

Alexander Salazar Montoya

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Maestría en Desarrollo Rural

2026

Resumen

Este trabajo de grado aplicado busca llenar el vacío de conocimiento existente debido a la limitada cantidad de estudios locales que analicen, desde una perspectiva integral, la vinculación directa de pequeños caficultores a los mercados de carbono evaluando la efectividad de los Sistemas Agroforestales. Para abordar esta necesidad el presente trabajo de grado aplicado tiene como objetivo general establecer la ruta estratégica para la aplicación de bonos por captura de carbono en el municipio de Quinchía, Risaralda, mediante la estimación del potencial de mitigación en los sistemas de producción de café. Se empleó un enfoque metodológico mixto que partió de la identificación de una población inicial de 1.036 productores activos en el programa Asómbrate, integrando la medición de biomasa mediante inteligencia artificial y teledetección satelital a través de la plataforma ACORN para validar el crecimiento forestal. Los resultados cuantitativos, obtenidos tras el análisis de desempeño en la muestra seleccionada, certificaron una estimación final de 473 toneladas de CO₂(CRUs) capturadas durante el periodo comprendido entre 2021 y 2024. Esta materialización de la adicionalidad ambiental generó un pago total de \$33.749.600 COP, consolidando un modelo de comercio justo que garantiza la transferencia del 80% del valor del bono directamente al productor. Se concluye que la implementación técnica de Sistemas Agroforestales (SAF) es determinante para fortalecer la resiliencia económica y la sostenibilidad del pequeño caficultor, al validar que la agregación de minifundios permite democratizar el acceso a mercados de servicios ambientales y diversificar los ingresos rurales.

Palabras clave: Sistemas agroforestales, caficultura sostenible, bonos de carbono, captura de carbono, desarrollo rural.

Abstract

This applied thesis seeks to fill the existing knowledge gap due to the limited number of local studies that analyze, from a comprehensive perspective, the direct link between small coffee farmers and carbon markets by evaluating the effectiveness of agroforestry systems. To address this need, this applied thesis aims to establish a strategic roadmap for the application of carbon credits in the municipality of Quinchía, Risaralda, by quantifying the mitigation potential in coffee production systems. A mixed-methods approach was employed, beginning with the identification of an initial population of 1,036 producers active in the Asómbrate program. Biomass measurement was integrated using artificial intelligence and satellite remote sensing via the ACORN platform to validate forest growth. The quantitative results, obtained after performance analysis of the selected sample, confirmed a final quantification of 473 tons of CO₂ (CRUs) captured during the period between 2021 and 2024. This realization of environmental additionality generated a total payment of COP \$33,749,600, consolidating a fair trade model that guarantees the transfer of 80% of the bond value directly to the producer. It is concluded that the technical implementation of Agroforestry Systems (AFS) is crucial for strengthening the economic resilience and sustainability of small coffee farmers, validating that the consolidation of smallholdings democratizes access to environmental service markets and diversifies rural incomes.

Keywords: Agroforestry systems, Sustainable coffee farming, Carbon credits, Carbon sequestration, Rural development.

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| Introducción..... | 11 |
| Justificación | 16 |
| Objetivos..... | 19 |
| Objetivo General | 19 |
| Objetivos Específicos | 19 |
| Problema de investigación..... | 20 |
| Descripción del problema..... | 20 |
| Formulación del problema | 22 |
| Hipótesis planteadas | 22 |
| Marco referencial..... | 23 |
| Antecedentes | 23 |
| Marco Teórico | 28 |
| Generalidades de los de sistemas agroforestales en el sistema productivo de café. | 28 |
| Contexto en Colombia..... | 28 |
| Clasificación de los sistemas agroforestales | 29 |
| Interacciones y beneficios de los (SAFC) (árbol-suelo-cultivo):..... | 30 |
| Conservación del suelo y agua | 30 |
| Captura de carbono y mitigación del cambio climático | 30 |
| Mejora de la fertilidad del suelo y reducción de químicos..... | 31 |
| Beneficios económicos y sociales adicionales | 31 |
| Consideraciones para el establecimiento y manejo:..... | 31 |

| | |
|---|----|
| Marco conceptual | 33 |
| Sostenibilidad en la caficultura | 33 |
| Desarrollo rural sostenible..... | 33 |
| Emisiones de CO2 en fincas cafeteras | 34 |
| Etapa de cultivo | 34 |
| Cambio y ocupación del uso del suelo | 35 |
| Uso de maquinaria y transporte..... | 35 |
| Tratamiento de subproductos (pulpa y mucílago)..... | 36 |
| Tratamiento de aguas residuales..... | 36 |
| Demanda energética para el secado..... | 37 |
| Sistemas agroforestales (SAF) como estrategia de sostenibilidad | 37 |
| Reducción de la huella de carbono | 38 |
| Beneficios ambientales..... | 39 |
| Agricultura de carbono..... | 39 |
| Agricultura y mercados de carbono..... | 40 |
| El mercado de carbono | 40 |
| Quién compra y quién vende carbono | 40 |
| Beneficios económicos..... | 41 |
| Adaptación al cambio climático y resiliencia: | 41 |
| Variabilidad climática | 42 |
| Agroecología y certificación orgánica | 42 |
| Adopción de tecnologías y transferencia del conocimiento | 42 |

| | |
|--|----|
| Programa asómbrate | 43 |
| Pagos por bonos de carbono | 44 |
| Solidaridad Latinoamérica..... | 44 |
| Mercado voluntario de carbono..... | 44 |
| Marco Legal..... | 45 |
| Huella ambiental de producto (HAP) y reglas de categoría (RCHAP)..... | 45 |
| ISO 14040/44 | 45 |
| ISO 14046 | 45 |
| ISO 14025 | 45 |
| Protocolo de gases de efecto invernadero (GHG Protocol) | 45 |
| Water Footprint Network (WFN)..... | 46 |
| Guías del IPCC (Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático) | 46 |
| Regulaciones y exigencias de mercados clave (Unión Europea) | 46 |
| Requisitos generales de sanidad y seguridad | 47 |
| Pautas de etiquetado | 47 |
| Marcos y programas nacionales en Colombia para la sostenibilidad cafetera | 47 |
| Estrategia ambiental de la Federación Nacional de Cafeteros (FNC)..... | 47 |
| Documento guía "Huella Ambiental del Café en Colombia" | 47 |
| Acciones nacionalmente apropiadas de mitigación (NAMA) Colombia | 48 |
| Buenas prácticas agrícolas (BPA) | 48 |
| Regulación y mecanismos para bonos por captura de carbono a través de sistemas agroforestales | 48 |

| | |
|---|----|
| Sistemas agroforestales cafeteros colombianos (SAFC) | 48 |
| Marco regulatorio y financiero | 49 |
| Marco Contextual | 50 |
| Programa "Cultivar para comer y para compartir" | 50 |
| Diversificación en las fincas..... | 50 |
| Economía colaborativa y trueque | 50 |
| Casos de éxito y valor agregado..... | 51 |
| Contexto de sostenibilidad más amplio..... | 51 |
| Metodología..... | 52 |
| Ubicación | 52 |
| Fundamentos metodológicos..... | 53 |
| Objetivo 1 | 54 |
| Criterios de selección | 54 |
| Ser productor de café en sistemas agroforestales..... | 54 |
| Poseer entre 0.5 y 10 hectáreas de tierra (área en café)..... | 54 |
| Ser propietario de tierra agrícola o demostrar la sana tenencia de la tierra..... | 55 |
| Identificación de productores y fincas..... | 56 |
| Objetivo 2 | 58 |
| Criterio de inclusión práctico. | 59 |
| Identificación del componente arbóreo | 59 |
| Estructura y arreglo del sistema agroforestal | 60 |
| Linderos y franjas de bosque..... | 60 |

| | |
|--|----|
| Alineación programática y fuente de información | 60 |
| Objetivo 3 | 61 |
| Metodología para la estimación y análisis de factores | 61 |
| Monetización y mecanismo de transferencia de valor | 64 |
| Esquema de comercialización. La plataforma ACORN actúa como el puente conector entre los pequeños agricultores y el mercado internacional. Su modelo de negocio se distingue por un esquema de comercio justo, garantizando que el 80% del valor final de venta de cada CRU sea transferido directamente al productor, maximizando así el impacto económico en la economía rural (Rabobank Acorn, 2024)..... | 65 |
| Resultados y discusión..... | 68 |
| Objetivo 1 | 68 |
| Resultados del proceso de verificación de elegibilidad..... | 68 |
| Tenencia de la tierra | 68 |
| Sistema de producción..... | 69 |
| Dimensión del predio | 69 |
| Exclusividad en mercados de carbono | 69 |
| Identificación cuantitativa de la población participante | 71 |
| Visualización de género | 72 |
| Discusión | 72 |
| Objetivo 2 | 73 |
| Definición de la Muestra Final..... | 75 |
| Criterio de Desempeño..... | 76 |

| | |
|--|----|
| Caracterización del Componente Arbóreo | 77 |
| Variable Temporal (Edad)..... | 78 |
| Arreglos Espaciales y Estructura del Paisaje | 79 |
| Sistemas Perimetrales (Linderos)..... | 79 |
| Arbolado Disperso (Intercalado)..... | 79 |
| Perfil Socio-Productivo y de Tenencia..... | 81 |
| Indicador de Minifundio (Tamaño)..... | 81 |
| Seguridad Jurídica y Exclusividad (Enfoque Declarativo) | 81 |
| Discusión | 81 |
| Objetivo 3..... | 82 |
| Estimación satelital y filtro de desempeño..... | 84 |
| Identificación de Casos de Alto Impacto (Umbral >10 CRUs)..... | 86 |
| Periodicidad de pago y condiciones de comercialización | 87 |
| Desempeño Económico Significativo | 87 |
| Validación de la Adicionalidad Ambiental | 88 |
| Contextualización y Estimación de la captura de carbono | 89 |
| Autonomía del productor y retiro voluntario..... | 91 |
| Discusión | 92 |
| Lista de tablas | 11 |
| Lista de Figuras | 12 |
| Conclusiones..... | 96 |
| Recomendaciones | 98 |

| | |
|---|-----|
| Para los productores y asociaciones locales | 98 |
| Para Solidaridad Network y el Programa Asómbrate: | 98 |
| Para la Academia y Futuras Investigaciones: | 99 |
| Referencias Bibliográficas..... | 100 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 <i>Depósitos y stocks de carbono en el planeta</i> | 38 |
| Tabla 2 <i>Caracterización técnica y ubicación geográfica</i> | 70 |
| Tabla 3 <i>Resumen de cumplimiento de criterios de elegibilidad</i> | 71 |
| Tabla 4 <i>Identificación cuantitativa de productores registrados en Quinchía – Risaralda</i> .. | 72 |
| Tabla 5 <i>Caracterización técnica del sistema productivo</i> | 74 |
| Tabla 6 <i>Capturas de CRUs generadas</i> | 76 |
| Tabla 7 <i>Especies forestales identificadas</i> | 77 |
| Tabla 8 <i>Caracterización dendrométrica y espacial del componente arbóreo en (SAFC) ..</i> | 78 |
| Tabla 9 <i>Clasificación de arreglos espaciales y tipologías de Sistemas Agroforestales Cafeteros (SAFC) en Quinchía, Risaralda</i> | 80 |
| Tabla 10 <i>Desempeño y liquidación de los casos de alto impacto (>10 CRUs) en Quinchía, Risaralda</i> | 86 |
| Tabla 11 <i>Estimación y liquidación de incentivos por captura de carbono - nodo Quinchía (2021-2024)</i> | 91 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 <i>Emisiones de CO2 en fincas cafeteras</i> | 37 |
| Figura 2 <i>Departamento Risaralda – Municipio Quinchia</i> | 52 |
| Figura 3 <i>Participación de productores en el programa "asombrate Café"</i> | 58 |
| Figura 4 <i>Ejemplo de lote georreferenciado mediante captura de geometría de alta precisión</i> | 62 |
| Figura 5 <i>Programa ACORN</i> | 67 |
| Figura 6 <i>Interfaz del tablero de control "asómbrate Café" para la caracterización y trazabilidad de predios en Quinchía, Risaralda</i> | 84 |
| Figura 7 <i>Visualización de indicadores de gestión y consolidado de ventas de unidades de remoción de Carbono (CRUs) en el tablero de control "asómbrate Café"</i> | 85 |
| Figura 8 <i>Infografía</i> | 94 |

Introducción

En el contexto actual de constante transformación social, tecnológica y económica, donde la caficultura colombiana desempeña un rol socioeconómico fundamental, representando el 4% del Producto Interno Bruto (PIB) y siendo el sustento de más de 550.000 familias, en su mayoría pequeños productores. (Gmünder, 2020), resulta imperativo analizar los distintos factores que inciden en su desarrollo sostenible. La creciente exigencia de políticas y empresas respecto a la información que respalda las declaraciones ambientales en la producción agrícola, como la iniciativa de la Comisión Europea sobre el "mercado único para productos verdes" y los estudios de Huella Ambiental de Producto (HAP), hace fundamental la comprensión de estos elementos (Union Europea, 2023). Esta comprensión permite no solo interpretar los fenómenos contemporáneos, sino también proponer soluciones efectivas que respondan a las necesidades emergentes. Este documento tiene como propósito presentar un análisis detallado sobre la contribución del programa Asómbrate al desarrollo rural sostenible de pequeños productores de café en Colombia, a través de la implementación de sistemas agroforestales y la venta de bonos de carbono, considerando sus implicaciones y posibles proyecciones a futuro.

El sector agrícola colombiano, si bien es pilar fundamental de la economía y la identidad cultural del país, enfrenta desafíos persistentes como la volatilidad de los precios, los impactos del cambio climático, la degradación ambiental y el acceso limitado a mercados justos y tecnologías innovadoras (Juárez-Sánchez, 2016). En este contexto, el programa Asómbrate, impulsado por Solidaridad Network, emerge como una iniciativa innovadora que busca mejorar las condiciones socioeconómicas de los agricultores mediante la mitigación del cambio climático y la conservación de la biodiversidad. Para

lograrlo, la organización brinda acompañamiento técnico integral, capacitaciones e insumos que garantizan el éxito de los Sistemas Agroforestales (SAF) bajo un modelo de agricultura climáticamente inteligente (Solidaridad Latinoamericana, 2025). Esta base agronómica permite a los pequeños productores acceder a los mercados internacionales de carbono utilizando tecnología de punta, como teledetección satelital e Inteligencia Artificial, lo cual reduce drásticamente los costos operativos de medición y certificación. En consecuencia, se consolida un esquema de comercio justo que asegura que hasta el 80% del valor de los bonos (con un mínimo de 20 euros por CRU) sea transferido directamente al caficultor (Asómbrate, 2025). El enfoque adoptado en este trabajo se basa en una revisión teórica, complementada con datos actuales y estudios de caso que ilustran la realidad del problema abordado. Se ha procurado mantener una visión crítica y reflexiva que permita no solo describir, sino también evaluar y cuestionar las dinámicas observadas. Además, se destaca la importancia de integrar distintas disciplinas para enriquecer la perspectiva analítica, utilizando metodologías de evaluación de impacto ambiental, como las que se describen en la Guía de Huella Ambiental del Café en Colombia, que enfatizan la calidad y representatividad de los datos (Gmünder, 2020).

A lo largo del documento, se desarrollarán los principales conceptos relacionados con los Sistemas Agroforestales Cafeteros Colombianos (SAFC) y su rol en la sostenibilidad ambiental y socioeconómica. Estos sistemas, al integrar diversas especies arbóreas, no solo mejoran la conservación del suelo y promueven un control natural de plagas que reduce la dependencia de agroquímicos, sino que resultan fundamentales para la mitigación climática. (Altieri, M, 1999). Los (SAFC) logran reservas de carbono significativamente mayores en comparación con los monocultivos a libre exposición solar

(F, Farfan, 2013). Asimismo, esta transición hacia una agricultura climáticamente inteligente se ha vuelto un requisito indispensable para cumplir con normativas internacionales, como la regulación de cero deforestaciones (EUDR). Facilitando el acceso de los pequeños productores a mercados de bonos ambientales y de comercio justo (Solidaridad Latinoamericana, 2025).

Justificación

La elección de este tema responde a la necesidad de comprender con mayor profundidad una problemática que, en la actualidad, tiene un impacto significativo en distintos ámbitos de la sociedad: la sostenibilidad de la caficultura colombiana y el acceso de sus pequeños productores a mercados de valor agregado bajo un contexto de crecientes exigencias ambientales. La contribución del programa Asómbrate a este desafío trasciende el ámbito teórico para generar beneficios socioeconómicos directos en los pequeños productores (Solidaridad Latinoamericana, 2025). Este impacto tiene un potencial escalable enorme, considerando que la caficultura es el sustento de más de 550.000 familias a nivel nacional (Gmünder, 2020).

Además, la implementación de estos modelos dialoga directamente con las políticas públicas e institucionales, facilitando la adaptación del país a estrictas normativas internacionales, como las exigencias de la Unión Europea sobre café libre de deforestación (connectAmericas, 2024). Por ello, su estudio resulta relevante para estructurar propuestas que favorezcan su abordaje efectivo. La caficultura colombiana es un pilar socioeconómico fundamental que representa el 4% del PIB nacional (DANE, 2025). No obstante, el sector debe adaptarse urgentemente a las crecientes exigencias internacionales que demandan el respaldo de las declaraciones ambientales, impulsadas por normativas como el "mercado único para productos verdes" de la Comisión Europea y los estudios de Huella Ambiental de Producto (HAP) (connectAmericas, 2024). Analizar y mitigar esta huella ambiental se ha vuelto imperativo, posicionando a los Sistemas Agroforestales Cafeteros (SAFC) como una estrategia indispensable para la sostenibilidad y competitividad del cultivo (Farfán, 2013). Además, existe una limitada cantidad de investigaciones locales que analicen este

fenómeno desde una perspectiva integral, que combine la evaluación de programas específicos como Asómbrate con la implementación de sistemas agroforestales y su impacto en la generación de bonos de carbono para el desarrollo rural sostenible de pequeños productores. Si bien existen guías para el cálculo de la huella ambiental del café en Colombia y estudios de caso que han recolectado información de fincas cafeteras, la dificultad para garantizar continuamente la calidad y representatividad de los datos, así como las diferencias metodológicas entre estudios generan vacíos en el conocimiento y en la formulación de estrategias adecuadas para enfrentar estos desafíos. Este trabajo de grado aplicado busca aportar evidencia empírica y reflexión crítica, con el fin de enriquecer el debate y fomentar la toma de decisiones informadas sobre la efectividad de programas que vinculan directamente a los productores con mercados de carbono utilizando tecnología avanzada para reducir costos, y que promueven prácticas de agricultura climáticamente inteligente (Asómbrate, 2025).

Finalmente, este proyecto aplicado se justifica por su potencial impacto en el campo académico y profesional. Por un lado, los hallazgos obtenidos servirán como base para el diseño de nuevas líneas de estudio en el ámbito del desarrollo rural y la sostenibilidad (Robayo, D, 2025). Por otro lado, aportarán evidencia clave para la elaboración de programas, políticas públicas e intervenciones que respondan de manera más eficiente a las necesidades climáticas y socioeconómicas detectadas en el territorio (Blackman, A., & Rivera, J, 2011). El análisis sistemático de Asómbrate proporcionará información científica valiosa para Solidaridad Network y organizaciones afines, permitiendo refinar el acompañamiento técnico, las capacitaciones y los insumos que se brindan a los productores (Asómbrate, 2025). También ayudará a comprender cómo estos programas facilitan el

cumplimiento de regulaciones internacionales como la normativa de la Unión Europea sobre café libre de deforestación (Federación Nacional de Cafeteros, 2024). De esta manera, se busca generar valor agregado y elementos diferenciadores para los productos en el mercado, contribuyendo a una caficultura colombiana más resiliente y competitiva a nivel global (Blackman, A., & Rivera, J, 2011).

Objetivos

Objetivo General

Establecer la ruta estratégica para la aplicación de bonos por captura de carbono en el municipio de Quinchía, Risaralda, mediante la estimación del potencial de captura de carbono en los sistemas de producción de café.

Objetivos Específicos

Identificar los productores y fincas cafeteras del Municipio de Quinchia Risaralda, que cumplen con los criterios y condiciones en esquemas de bonos por captura de carbono.

Caracterizar las fincas cafeteras con sus Sistemas Agroforestales (SAF) con potencial de captura de carbono en el municipio de Quinchía, Risaralda.

Estimar la captura de carbono generada por los Sistemas Agroforestales (SAF) en el municipio de Quinchía, Risaralda, a través de análisis satelital, para su respectiva compensación económica por bonos de carbono.

Problema de investigación

Descripción del problema

El desarrollo rural en Colombia enfrenta una compleja intersección de desafíos socioeconómicos, ambientales y climáticos que impactan directamente la sostenibilidad de los pequeños productores agrícolas. Históricamente, un sector clave como el café ha estado expuesto a la volatilidad de precios en los mercados internacionales, lo que se traduce en ingresos inestables y, a menudo, insuficientes para las familias campesinas. Esta vulnerabilidad económica se agrava por la limitada adopción de prácticas agrícolas sostenibles, lo que lleva a la degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad y una menor resiliencia de los sistemas productivos ante eventos climáticos extremos (Gmünder, 2020).

Sumado a lo anterior, el cambio climático representa una amenaza creciente y palpable. Los productores de café son particularmente sensibles a las variaciones en los patrones de lluvia, el aumento de temperaturas y la incidencia de plagas y enfermedades, factores que afectan directamente la productividad y la calidad de sus cosechas. Si bien los sistemas agroforestales (SAF) han demostrado ser una estrategia eficaz para mitigar estos impactos, al promover la captura de carbono, mejorar la salud del suelo y diversificar los ingresos, su implementación a gran escala por parte de pequeños agricultores es un reto (Asómbrate, 2025). Esto se debe a barreras como la falta de conocimiento técnico especializado, el acceso limitado a financiamiento para las inversiones iniciales y la ausencia de mercados claros y justos que valoren los servicios ecosistémicos que estos sistemas proporcionan.

En este escenario, la brecha entre el potencial de los servicios ecosistémicos generados por los (SAF) y la capacidad de los pequeños productores para monetizarlos es

significativa. A pesar de la existencia de mercados voluntarios, el monitoreo forestal tradicional resulta costoso y exige complejas inspecciones de verificación y certificación; en consecuencia, estos altos costos de transacción se convierten en barreras de entrada que excluyen a la mayoría de los pequeños agricultores de acceder directamente a dichos mecanismos (FONC, Dirección Ambiental, 2023). Esto deja sin aprovechar una importante fuente de ingresos que podría no solo complementar sus actividades productivas, sino también incentivar la adopción y mantenimiento de prácticas agrícolas más sostenibles. El programa asómbrate busca abordar precisamente esta problemática al conectar a pequeños productores con el mercado de bonos de carbono. Sin embargo, surge la pregunta de hasta qué punto este tipo de iniciativas logran superar las barreras estructurales mencionadas, asegurar una participación equitativa y generar un impacto transformador y duradero en la calidad de vida de los agricultores y en la sostenibilidad ambiental de sus territorios (Solidaridad Latinoamericana, 2025).

Esto cobra especial relevancia en el municipio de Quinchía, Risaralda, donde este proyecto ha sido implementado y donde, además, la (Alcaldía, 2024) ha establecido en su plan de desarrollo 2024-2027 el objetivo de hacer uso de los recursos naturales sin agotar su base, promoviendo la conservación, restauración de áreas estratégicas, la conectividad ecológica y la adaptación y mitigación al cambio climático (Salazar-Duque, Y, 2018). Es fundamental comprender cómo se articulan las metodologías de asómbrate con estas prioridades locales y si realmente están contribuyendo a un desarrollo rural más justo y resiliente en Quinchía.

Formulación del problema

¿Cómo contribuye el programa asómbrate, a través de sus criterios de selección de fincas, metodologías de implementación de sistemas agroforestales y estrategias de sistematización de información, al desarrollo rural sostenible y a la mitigación del cambio climático para los pequeños productores de café en el municipio de Quinchía, Risaralda, en el marco de los objetivos de sostenibilidad con la aplicación de bonos por captura de carbono?

Hipótesis planteadas

H₀=La participación de los caficultores en Quinchía Risaralda, en el programa "Asómbrate " no solo proporciona un beneficio económico adicional a través de la venta de bonos de carbono, sino que también fomenta la adopción y mejora de prácticas de agricultura climáticamente inteligente (ACI) y aumenta su resiliencia frente al cambio climático.

H₁=Los caficultores del municipio de Quinchía, Risaralda, que cumplen con los criterios de elegibilidad del programa "asómbrate" (especialmente ser productores en sistemas agroforestales con árboles plantados hace 5 años o menos), demuestran un potencial significativamente mayor de captura de carbono por hectárea en comparación con aquellos que no cumplen con aquellos requisitos.

Marco referencial

Antecedentes

El cultivo del café en Colombia se inició a principios del siglo XVIII, con una expansión comercial significativa a partir de la década de 1850. Este sector posee una gran importancia socioeconómica en el país, ya que el café arábico cultivado representa actualmente el 4% del Producto Interno Bruto (PIB) (DANE, 2025). Un aspecto crucial de la caficultura colombiana es que sustenta a más de 548.000 productores a nivel nacional, operando generalmente en sistemas agrícolas mixtos que integran el café con otras actividades productivas (UPRA, 2023). En este escenario, es fundamental destacar que aproximadamente el 96% de las fincas pertenecen a pequeños caficultores que poseen cinco o menos hectáreas de tierra (UPRA, 2023). (Gmünder, 2020) Actualmente, el área total dedicada a este cultivo abarca cerca de 842.000 hectáreas, extendiendo su impacto productivo a 23 departamentos del país (UPRA, 2023).

La globalización ha generado una transformación significativa en la forma en que las sociedades interactúan, comparten información y desarrollan sus economías. Esta interconexión ha traído consigo múltiples beneficios, como el acceso a nuevas tecnologías y mercados, pero también ha planteado desafíos importantes en términos de identidad cultural, sostenibilidad y equidad. Comprender estos efectos resulta clave para formular estrategias que permitan un desarrollo más equilibrado y justo.

Para garantizar una actividad agrícola sostenible a largo plazo, socialmente responsable y amigable con el medio ambiente, es esencial una gestión adecuada de los recursos. En respuesta a esta necesidad, la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC) ha implementado una estrategia ambiental cuyo objetivo es alcanzar un equilibrio

entre el progreso económico, la mejora de la calidad de vida de los productores y la conservación de los recursos ambientales (Gmünder, 2020). Esta estrategia se enfoca principalmente en la adaptación y mitigación del cambio climático y los riesgos asociados, así como en la gestión eficiente de los recursos ambientales (Gmünder, 2020).

Paralelamente a los esfuerzos de los productores para establecer prácticas de gestión ambientalmente responsables, ha habido una creciente demanda de políticas y empresas por datos que respalden las declaraciones ambientales en la producción agrícola. En los últimos años, también han surgido diversas iniciativas y estudios relacionados con la producción sostenible del café. Los análisis cuantitativos y basados en el ciclo de vida de la cadena de suministro del café han demostrado ser herramientas eficaces para medir, controlar, minimizar y comunicar la potencial huella ambiental de esta producción (Gmünder, 2020).

En el año 2013, la Comisión Europea lanzó la iniciativa denominada “mercado único para productos verdes”, la cual incluyó una fase de prueba con estudios de Huella Ambiental de Producto (HAP) para diversas categorías, entre ellas el café. Estos estudios consisten en un método basado en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que permite estimar los impactos ambientales más relevantes de los bienes o servicios. Durante este proceso, la Federación Nacional de Cafeteros (FNC), a través de Cenicafé, formó parte de la secretaría técnica y contribuyó directamente al desarrollo de la metodología para medir la huella ambiental del café (Gmünder, 2020).

La Unión Europea se consolida como el principal mercado mundial para el café, concentrando el 44% del consumo total, con un promedio de 4,67 kilos anuales por ciudadano (connectAmericas, 2024). Esta alta demanda de importación ha impulsado a la UE a establecer normas unificadas y sumamente exigentes para el ingreso de productos a

sus 28 países miembros. Entre estos requisitos destaca la medición de la huella de carbono en la cadena de suministro cafetera; un esfuerzo de estandarización que responde directamente a la creciente exigencia de gobiernos y corporaciones por contar con datos rigurosos que respalden las declaraciones de sostenibilidad ambiental en el sector agrícola (CEPAL, 2012). Es así como la necesidad de medir la huella de carbono se convierte en un aspecto crucial para la comercialización del café colombiano en el mercado europeo, en línea con estas exigencias y tendencias hacia la sostenibilidad ambiental (connectAmericas, 2024).

En respuesta a las exigencias de la UE, la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC) ha liderado un "trabajo interdisciplinario e interinstitucional" para asegurar el cumplimiento y el acceso de los caficultores colombianos al mercado europeo. El 29 de abril zarparon hacia la Unión Europea los primeros contenedores de Café de Colombia con la certificación libre de deforestación. Un contenedor de café, exportado por la gerencia comercial de la (FNC), incluyó café de 57 productores en 64 fincas del Huila, cuya producción se confrontó con la base de datos de Global Forest Watch para demostrar la ausencia de deforestación. Adicionalmente, la (FNC) acompañó a la exportadora RaCafé en el proceso de validación y certificación para la exportación de otro contenedor libre de deforestación con café de cafeteros del Quindío. Estos primeros lotes totalizaron más de 40.250 kilos de café certificado Rainforest Alliance libres de deforestación. Este hito representa un paso significativo en el compromiso de la caficultura colombiana con la sostenibilidad, asegurando la continuidad de la comercialización de "el mejor café del mundo" en mercados internacionales, conforme a las crecientes demandas ambientales (Federacion Nacional de Cafeteros, 2024).

Los sistemas agroforestales son un conjunto de prácticas de manejo del cultivo que combinan especies arbóreas con el café o en la arborización de las fincas, con el objetivo primordial de la conservación del suelo y el agua, y el aumento y mantenimiento de la producción. La agroforestería es definida como un sistema de manejo sostenible de los cultivos y del suelo, que busca incrementar los rendimientos de manera continua, integrando la producción arbórea con cultivos de valor económico de forma simultánea o secuencial, y aplicando prácticas compatibles con la cultura local, no solo son una opción viable para la producción de café en ambientes desafiantes, sino que son un requisito fundamental para una caficultura socialmente responsable y amigable con el medio ambiente a largo plazo, en línea con las crecientes demandas globales de sostenibilidad (Farfan, 2013).

La creciente demanda global de productos agrícolas sostenibles, especialmente desde mercados clave como la Unión Europea, ha generado un antecedente fundamental para la implementación de la caficultura climáticamente inteligente en Colombia. Organizaciones como Solidaridad Latinoamérica han centrado sus esfuerzos en esta línea, promoviendo modelos que no solo son económicamente viables, sino que también fortalecen la resiliencia ambiental y contribuyen a la mitigación del cambio climático (Solidaridad Latinoamericana, 2025).

La Fundación Solidaridad Latinoamérica define la "Agricultura Climáticamente Inteligente" como la implementación de "modelos productivos rentables que mejoran la resiliencia de los productores al cambio climático, la captura de carbono y conservan bosques". Esta es una respuesta estratégica para mejorar los medios de vida de los productores y fomentar una producción en armonía con el medio ambiente. Las soluciones

ofrecidas por Solidaridad incluyen asistencia técnica, financiación, colaboración sectorial y abastecimiento sostenible, enfocadas en la mejora continua y la adopción de prácticas sostenibles (Solidaridad Latinoamericana, 2025).

Marco Teórico

Generalidades de los de sistemas agroforestales en el sistema productivo de café.

Un sistema agroforestal (SAF) es un conjunto de prácticas de manejo del cultivo donde se combinan especies arbóreas en asociación con el café o en la arborización de las fincas. El objetivo fundamental de los Sistemas agroforestales en café (SAFC) es el manejo y la conservación del suelo y el agua, el aumento y mantenimiento de la producción, y la garantía de la sostenibilidad y el fortalecimiento del desarrollo social y económico de las familias (Farfan, 2013)

Contexto en Colombia

Aunque es común ver plantaciones de café con exposición solar total, una parte significativa (37%) de las 877.144 hectáreas de cafetales en Colombia son sistemas agroforestales de sombra o semisombra (UPRA, 2023). Estos sistemas resultan particularmente útiles como una estrategia de adaptación basada en ecosistemas, ya que contribuyen a regular el microclima, retener la humedad en regiones con deficiencias hídricas y mitigar la erosión en suelos limitados (Villarreyna, Avelino, & Cerda, 2020).

Según Farfan (2013) para que un sistema sea clasificado como agroforestal, debe cumplir con las siguientes condiciones fundamentales (F, Farfan, 2013).

Existencia de al menos dos especies de plantas que interactúan biológicamente.

Al menos una especie debe ser leñosa perenne.

Al menos una de las especies debe ser manejada con fines agrícolas.

Deben aplicarse prácticas de manejo compatibles con las prácticas culturales de la población local.

Clasificación de los sistemas agroforestales

Para Farfan (2013), la clasificación de los sistemas agroforestales puede ser simple o compleja. La clasificación simple se basa en el análisis estructural del sistema, considerando la presencia, el arreglo y la disposición de los componentes.

Según el arreglo (espacial y temporal): Se refiere al orden de los componentes en el espacio y en el tiempo (F, Farfan, 2013).

Mixto: Los componentes no están dispuestos geoméricamente y aparecen de manera irregular (ej., caficultura tradicional) (F, Farfan, 2013).

Zonal: Los componentes están arreglados geoméricamente dentro del lote, buscando un nivel de sombra óptimo (ej., sombra establecida de forma sistemática con especies como Inga, Albizzia, y Erythrina) (F, Farfan, 2013).

Simultáneo: Los componentes están presentes al mismo tiempo en la parcela (F, Farfan, 2013).

Secuencial: Los componentes no están presentes simultáneamente, sino que se suceden.

Según la disposición (estratificación) (F, Farfan, 2013).

Estratos simples: Solo una capa de árboles (ej., café con una sola especie de sombrío) (F, Farfan, 2013).

Multiestratos: Varias capas de árboles con diversas especies simultáneamente (F, Farfan, 2013).

Densa: Componentes estrechamente juntos (F, Farfan, 2013).

Dispersa: Componentes separados entre sí (F, Farfan, 2013).

Interacciones y beneficios de los (SAFC) (árbol-suelo-cultivo):

Los sistemas agroforestales asociados a café (SAFC) generan interacciones que pueden ser positivas, neutras o negativas (F, Farfan, 2013). Las interacciones positivas y los beneficios incluyen:

Conservación del suelo y agua

Moderación del microclima (regulación de temperatura y humedad) (F, Farfan, 2013).

Reducción de la evapotranspiración (F, Farfan, 2013).

Protección contra la erosión por viento y agua (menor impacto de las gotas de lluvia y escorrentía superficial) (F, Farfan, 2013).

Mejora de la estructura del suelo, drenaje, aireación, y retención de humedad y nutrientes (F, Farfan, 2013).

Captura de carbono y mitigación del cambio climático

Aumento de las reservas de carbono en la biomasa y el suelo, reduciendo las emisiones netas de CO₂, los sistemas agroforestales cafeteros (SAFC) tienen una reserva de carbono significativamente mayor (promedio de 30.2 tC/ha) en comparación con los sistemas de exposición solar (10.5 tC/ha) (Carvajal-Agudelo, 2020).

Contribuyen a la reducción de GEI al disminuir la necesidad de riego y la degradación del suelo (Carvajal-Agudelo, 2020).

Mejora de la fertilidad del suelo y reducción de químicos

Bajo el reciclaje de nutrientes los árboles acceden a nutrientes lixiviados en capas profundas y los devuelven a la superficie a través de la hojarasca (actúan como "bombas de nutrientes") (F, Farfan, 2013).

Aporte de materia orgánica que enriquece el suelo y mejora su fertilidad (F, Farfan, 2013).

Fijación de nitrógeno atmosférico por especies arbóreas leguminosas, reduciendo la necesidad de fertilizantes sintético (F, Farfan, 2013).

Control natural de plagas, enfermedades y arvenses al promover la diversidad y suprimir el crecimiento de malas hierbas, lo que disminuye la dependencia de pesticidas y herbicidas (F, Farfan, 2013).

Aumentan la biodiversidad promoviendo un hábitat para una mayor diversidad de flora y fauna (F, Farfan, 2013).

Beneficios económicos y sociales adicionales

Existencia de al menos dos especies de plantas que interactúan biológicamente, con la diversificación de la producción (madera, frutos, leña).

Mayor longevidad del cultivo y producción más estable.

Acceso a mercados de cafés especiales que ofrecen mejores precios.

Adaptación de la caficultura a las variaciones climáticas.

Consideraciones para el establecimiento y manejo:

La selección y el diseño de un sistema agroforestal cafetero (SAFC) implica definir los objetivos del sistema, identificar las características del sitio (suelos, clima, altitud,

topografía), seleccionar especies de árboles adecuadas que se adapten a esas condiciones y proporcionen los productos y servicios deseados, y planificar las prácticas de manejo para mantener los niveles de sombra óptimos (generalmente entre 35% y 45%). Un sombrero excesivo (>50%) puede reducir la productividad del café. La implementación de estas prácticas forma parte de las buenas prácticas agrícolas (BPA) que buscan minimizar el impacto negativo en el medio ambiente y promover una caficultura sostenible.

Marco conceptual

Sostenibilidad en la caficultura

La producción sostenible de café trasciende únicamente la rentabilidad económica para adaptarse a la conservación ambiental y el bienestar social de las comunidades productoras. Esta concepción ha evolucionado hacia enfoques holísticos, donde el desarrollo rural sostenible se erige como un pilar fundamental para la resiliencia del sector cafetero y la mejora de las condiciones de vida de los agricultores. La sostenibilidad en la caficultura implica el uso responsable de los recursos para garantizar la producción a largo plazo sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones. Además, se enfoca en asegurar condiciones laborales justas y la participación de los agricultores en la toma de decisiones productivas, especialmente relevantes en países productores de café con desafíos de desigualdad social. (Altieri, M, 1999)

Desarrollo rural sostenible

El desarrollo rural sostenible se define como el proceso que conduce al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de vida y al bienestar social, sin agotar la base de los recursos naturales renovables, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlos. Este concepto integra dimensiones económicas, sociales y ambientales, enfocándose en la capacidad de las comunidades rurales para mantener y mejorar sus medios de vida a lo largo del tiempo. En el contexto cafetero, esto implica generar oportunidades de diversificación productiva, asegurar el acceso a mercados justos y fortalecer las instituciones locales. La organización internacional del café (OIC) destaca que el desarrollo rural busca la creación de empleo, la mejora de la infraestructura y el acceso a servicios básicos, fomentando la resiliencia ante cambios externos como el cambio

climático o las fluctuaciones del mercado. Las prácticas agrícolas, por fin, deben considerar sus impactos económicos para los productores, las mejoras en la calidad de vida de las comunidades y la salud del medio ambiente, buscando un equilibrio entre estas dimensiones. (Blackman, A., & Rivera, J , 2011)

Emisiones de CO₂ en fincas cafeteras

La "Huella Ambiental del Café" es un método que estima los impactos ambientales relevantes a lo largo de todo el ciclo de vida del producto, desde el cultivo hasta su consumo. Las emisiones de carbono, que son un componente clave de esta huella, se refieren a la liberación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), durante las diferentes etapas de la producción en la finca (Carvajal-Agudelo, 2020).

Las principales fuentes de estas emisiones en las fincas cafeteras se pueden agrupar en dos grandes etapas:

Etapas de cultivo

Esta fase es la que más contribuye a la huella ambiental del café verde, representando casi el 80% del total de los impactos en la mayoría de las categorías analizadas, incluido el cambio climático. Las principales fuentes de emisión en esta etapa son:

Aplicación de fertilizantes:

Los fertilizantes nitrogenados sintéticos y orgánicos liberan óxido nitroso (N₂O), un gas con un potencial de calentamiento global mucho mayor que el CO₂, la aplicación de urea y cal libera dióxido de carbono (CO₂) fósil al aire, así como también se producen

emisiones de amoníaco (NH_3) al aire, que contribuyen a la acidificación y a la formación de material particulado. (Gmünder, 2020)

Cambio y ocupación del uso del suelo

La conversión de tierras, como bosques o pastizales, a cafetales puede liberar grandes cantidades de carbono que estaban almacenadas en la biomasa y el suelo. El análisis de la huella de carbono suele considerar los cambios de uso de suelo ocurridos en los últimos 20 años (Gmünder, 2020).

Incluso un cambio en la práctica de cultivo, como pasar de sistemas agroforestales (con sombra) a sistemas de exposición solar, puede generar emisiones netas de carbono, ya que se reduce la biomasa arbórea que almacena CO_2 . Los sistemas agroforestales tienen una reserva de carbono de biomasa considerablemente mayor (30,2 tC/ha) que los de exposición solar (10,5 tC/ha) (Hernández-Núñez, 2021).

Uso de maquinaria y transporte

El consumo de combustibles fósiles (gasolina y diésel) para maquinaria como segadoras, equipos de fumigación, motosierras para la renovación y vehículos para el transporte de insumos y productos dentro de la finca genera emisiones de CO_2 . (FONC, Dirección Ambiental, 2023).

Aplicación de pesticidas

La producción de pesticidas tiene una huella de carbono asociada, y su aplicación en el campo puede generar emisiones directas que contribuyen a la toxicidad humana y la ecotoxicidad (FONC, Dirección Ambiental, 2023).

Etapa de procesamiento postcosecha

Esta etapa, que ocurre en la finca o en plantas cercanas, también genera importantes emisiones de GEI, especialmente en el procesamiento por vía húmeda, que es común en Colombia (FONC, Dirección Ambiental, 2023).

Tratamiento de subproductos (pulpa y mucílago)

La pulpa del café, que representa una parte importante del peso del fruto, se descompone después del despulpado. Durante su almacenamiento o compostaje, especialmente en condiciones anaeróbicas (sin oxígeno), se generan emisiones de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) (FONC, Dirección Ambiental, 2023).

Tratamiento de aguas residuales

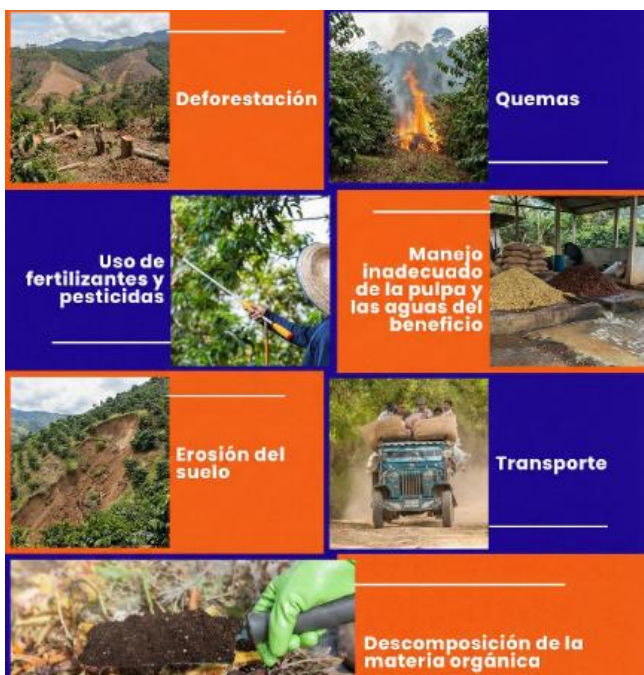
El agua utilizada para lavar y despulpar el café arrastra materia orgánica. Si estas aguas residuales se liberan sin tratamiento o se almacenan en fosas sépticas o lagunas, también producen emisiones de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O). La cantidad de emisión varía según el método de tratamiento del agua (FONC, Dirección Ambiental, 2023).

Demanda energética para el secado

El secado mecánico del café en silos o guardiolas a menudo utiliza combustibles como carbón, diésel o gas propano, cuya combustión libera CO₂ a la atmósfera (FONC, Dirección Ambiental, 2023). Ver figura 1 Emisiones de CO₂ en fincas cafeteras (Ver figura 1).

Figura 1

Emisiones de CO₂ en fincas cafeteras



Nota. Fuentes de degradación y manejo de residuos en sistemas Cafeteros. Tomado de: (Carbon Farming Academy, 2025).

Sistemas agroforestales (SAF) como estrategia de sostenibilidad

Los sistemas agroforestales, al integrar árboles y arbustos con el cultivo del café, son reconocidos por sus múltiples beneficios, ofreciendo una alternativa de agricultura sostenible y climáticamente inteligente (Gmünder, 2020).

Reducción de la huella de carbono

Sembrando árboles en los lotes de café y los linderos, un manejo de sombra correcto protege contra la erosión y al hacerlo menos gases de efecto invernadero (GEI) son liberados a la atmosfera, si las prácticas de gestión se adoptan de manera amplia se estima que el sector agrícola pueda capturar 5,5-6 GT de CO₂ para 2030, alrededor del 90% de este potencial podría lograrse a través de los sumideros de carbono bosques y alrededor del 10% a partir de la reducción de emisiones, al integrar sistemas agroforestales al interior del sistema productivo de café se contribuye con la disminución de la huella de carbono y se obtienen beneficios productivos, económicos y sociales (Carbon Farming Academy, 2025). Ver tabla 1.

Tabla 1
Depósitos y stocks de carbono en el planeta

| Principales depósitos | Detalle / componente | Stock de carbono (Pg)* | Procesos que participan |
|-----------------------|---------------------------|------------------------|--|
| Litósfera | Rocas sedimentarias | 50.000.000 | Meteorización rocas, Vulcanismo (CO ₂) Fabricación de cemento |
| Mares y océanos | CO ₂ disuelto | 38.000 | Precipitación CO ₂ Ca |
| Combustibles fósiles | Carbón | 4.000 | Combustión CO ₂ |
| | Petróleo y gas | 1.000 | Combustión CO ₂ |
| Suelo | Materia orgánica | 1.550 | Oxidación (29 Pg/año) |
| | Materia inorgánica | 950 | Oxidación (29 Pg/año) |
| Atmósfera | CO ₂ | 750 | Efecto invernadero, Cambio climático |
| | Metano (CH ₄) | 10 | Efecto invernadero, Cambio climático |
| Biosfera | Biomasa | 610 | Fotosíntesis (60 Pg/año), Respiración (30 Pg/año), Fermentación (1 Pg/año) |

* Pg (Petagramo) = 10¹⁵ gramos. Equivalencia: 2,12 Pg = 1 ppm de concentración atmosférica de CO₂.

Nota. La tabla resume los principales depósitos de carbono en la Tierra (litósfera, mares y océanos, combustibles fósiles, suelo, atmósfera y biosfera), indicando para cada uno el stock aproximado de carbono y los procesos que intervienen (por ejemplo: meteorización, precipitación de carbonatos, combustión, oxidación, fotosíntesis, respiración y efecto invernadero). En conjunto, muestra que la mayor parte del carbono está almacenada en

rocas y océanos, mientras que la atmósfera y la biosfera contienen stocks mucho menores, pero participan activamente en flujos que afectan el clima (Carbon Farming Academy, 2025).

Beneficios ambientales

Contribuyen a la regulación del microclima, la mejora de la humedad del suelo y la conservación de la biodiversidad. Permiten el control de la economía del agua, mitigando los efectos de los déficits hídricos, y contribuyendo a mantener la fertilidad del suelo, reducir la erosión y reciclar nutrientes. Los sistemas agroforestales (SAF) también tienen un potencial significativo para la captura y almacenamiento de carbono, lo cual es un servicio ambiental cada vez más valorado, especialmente en el contexto de la mitigación del cambio climático. Además, actúan como hábitat para animales y plantas, y pueden albergar una alta riqueza de especies (Gmünder, 2020).

Agricultura de carbono

Modelo que permite a las y los productores agrícolas convertirse en vendedores de carbono, la persona agricultora empieza a vender un nuevo producto en el mercado: el CO₂ que capturan sus árboles, para que esto suceda se requiere tener sistemas agroforestales en la finca, los árboles son vitales para frenar el cambio climático además de todos los beneficios agroecológicos cuando realizan la fotosíntesis transforman el aire contaminado CO₂ en aire puro oxígeno O₂ que es el elemento que todos respiramos y en biomasa natural, los árboles almacenan carbono en sus ramas, tallos, raíces, hojas y frutos; la mayor parte del carbono se almacena en la madera del árbol (raíces, tronco y ramas), conocido como biomasa natural, cuanto más carbono almacene el árbol más crecerá (Carbon Farming Academy, 2025).

Agricultura y mercados de carbono

Los bonos de carbono son una forma de asignar un valor monetario a aquellas acciones que contribuyen a reducir, eliminar o evitar emisiones GEI, y que escalan la acción climática. Un bono de carbono, de hecho, representa una tonelada métrica equivalente de gases de efecto invernadero que, habiendo ya sido emitidos a la atmósfera, son absorbidos o capturados (removidos de la atmósfera), o bien cuya emisión se evita por completo. Estos bonos pueden ser vendidos y comprados en mercados de carbono. La Unidad de Captura de Carbono, o CRU por sus siglas en inglés, es un tipo de bono de carbono que mide el carbono capturado o absorbido, a diferencia de otros bonos que miden emisiones evitadas. Los CRU provienen de prácticas de agricultura baja en emisiones de carbono, sistemas agroforestales, o de la restauración de bosques, y deben cumplir con un marco de certificación y una metodología que pueda ser verificada por un tercero independiente (Solidaridad Latinoamericana, 2025).

El mercado de carbono

El mercado de carbono es un sistema de comercio diseñado para gestionar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a escala global.

Su arquitectura fundamental fue establecida a partir del Protocolo de Kioto con el objetivo de permitir que Estados, organizaciones, empresas y consumidores compensen su impacto ambiental (Carbón Farming Academy, 2025).

Quién compra y quién vende carbono

Este mercado opera mediante la compraventa de reducciones o secuestros de emisiones. La unidad de intercambio y medida utilizada es el crédito de carbono (Carbón Farming Academy, 2025).

Compradores: Son aquellas entidades (generalmente empresas o instituciones) que necesitan compensar su huella ambiental para cumplir con normativas o metas corporativas de sostenibilidad, adquiriendo créditos para subsanar sus emisiones.

Vendedores: Son entidades o proyectos que desarrollan actividades ambientales enfocadas en capturar o reducir el CO₂ (dióxido de carbono) de la atmósfera. Estos proyectos generan los créditos que luego se comercializan.

En esencia, el mercado facilita un mecanismo económico para asignar un valor a la reducción de emisiones, incentivando la inversión en prácticas y tecnologías más sostenibles.

Beneficios económicos

Aunque normalmente se esperaba menor utilidad de los árboles en los cafetales, los sistemas agroforestales (SAF) pueden ofrecer ganancias adicionales derivadas de la explotación de las especies usadas para la arborización (madera, frutos, látex, entre otros). La diversificación productiva inherente a los (SAF) puede generar flujos de caja continuos, mejorando la seguridad económica de las familias caficultoras. Además, pueden mejorar la calidad del grano de café y reducir los costos de mantenimiento al mejorar la fertilidad del suelo y el ciclo de nutrientes (Farfan, 2013).

Adaptación al cambio climático y resiliencia:

Los cafetales arborizados están mejor protegidos contra heladas y crean un ambiente más adecuado para el cultivo, mitigando los efectos de fenómenos extremos como lluvias excesivas o fuertes vientos al prevenir la erosión del suelo y reducir la necesidad de fertilizantes. El alargamiento del período de maduración del fruto permite mayor flexibilidad en la cosecha (Gmünder, 2020).

Variabilidad climática

La variabilidad climática, reflejada en cambios en los patrones de temperaturas y lluvias, contribuye a la desatención de los cafetales por parte de los productores. Esto, a su vez, repercute negativamente en sus condiciones económicas y alimentarias. El uso de árboles de sombra es una práctica clave en la adaptación al cambio climático en cafetales, siendo esta una alternativa para los cafeteros, en el caso de Huehuetla los productores de café perciben directamente los cambios en el clima. Siendo este un punto clave, ya que su experiencia y observación son un motor para la adaptación (Juárez-Sánchez, 2016).

Agroecología y certificación orgánica

La agroecología es un enfoque que combina principios ecológicos con prácticas agrícolas, promoviendo la biodiversidad, el uso sostenible del suelo y la minimización de insumos químicos. Estas prácticas no solo tienen beneficios ecológicos, sino que también fortalecen la seguridad alimentaria y nutricional de las comunidades rurales. La certificación orgánica, como proceso que garantiza que los productos han sido cultivados sin el uso de pesticidas y fertilizantes sintéticos, no solo puede aumentar el acceso a mercados premium, sino que también mejora la salud del suelo y del ecosistema. La agroecología y la certificación orgánica se presentan como elementos clave para una caficultura verdaderamente sostenible (Blackman, A., & Rivera, J, 2011).

Adopción de tecnologías y transferencia del conocimiento

La adopción de tecnologías sostenibles requiere un enfoque contextualizado, adaptando innovaciones exitosas a las condiciones socioeconómicas y ambientales locales. La transferencia tecnológica debe estar acompañada de procesos participativos que consideren el conocimiento local y las capacidades de las comunidades. La innovación

abierta y colaborativa facilita estos procesos, promoviendo un aprendizaje continuo entre investigadores, productores y organizaciones. Fortalecer las relaciones entre productores, cooperativas y organizaciones es crucial para implementar cambios sostenibles, ya que las iniciativas de sostenibilidad en el cultivo de café pueden verse como innovaciones sociales que buscan mejorar el bienestar de la comunidad cafetalera. La implementación exitosa de la agroecología, por ejemplo, requiere un entorno político favorable con políticas públicas específicas, financiamiento adecuado y programas de extensión agrícola (Gmünder, 2020).

Programa asómbrate

Asómbrate es un programa de Solidaridad Network, diseñado para impulsar la sostenibilidad en la producción de café y cacao. Se trata de dar a pequeños productores la posibilidad de vender las capturas de carbono que hacen los árboles en sus cultivos en los mercados internacionales (Asómbrate, 2025).

El uso de tecnología de punta en la agricultura, como satélites y modelos de inteligencia artificial, permite que la medición del CO₂ capturado y la certificación del CO₂ capturado se vuelvan más económicas. Al reducir los costos del proceso, más dinero puede llegar directamente al productor.

Solidaridad proporciona a los agricultores un amplio apoyo, que incluye acompañamiento técnico, capacitaciones, suministros y asesoramiento para una implementación exitosa de sistemas agroforestales. Queremos asegurarnos de que los agricultores tengan todas las herramientas necesarias para aprovechar al máximo esta oportunidad en el mercado (Asómbrate, 2025).

Pagos por bonos de carbono

El programa Asómbrate, de Solidaridad Network, ofrece pagos a pequeños productores de café y cacao por la captura de carbono en sus cultivos mediante sistemas agroforestales. Estos pagos son una forma de recompensar a los productores por su contribución a la mitigación del cambio climático y les permite diversificar sus ingresos.

En mercados voluntarios, los precios de los créditos de carbono pueden variar su precio pudiéndose pagar hasta US\$20 por tonelada de CO2 capturada, es decir, por un crédito de carbono, dependiendo de factores como la credibilidad del proyecto, su impacto ambiental y social, y las preferencias de los compradores (Asómbrate, 2024).

Solidaridad Latinoamérica

Solidaridad es una organización internacional sin fines de lucro con más de 50 años de experiencia en desarrollo de cadenas de valor inclusivas y sostenibles, es una organización en red conformada por siete centros regionales ubicados en Latinoamérica, Norteamérica, África Occidental, África Central y Oriental, África Meridional, Europa y Asia. Cada uno de estos centros es responsable de aportar a las estrategias globales de la organización, así como de desarrollar e implementar su propia estrategia de programas. Esta estructura organizacional ha sido diseñada para maximizar la cooperación internacional para el desarrollo, la capacidad, transparencia, el rendimiento y el impacto (Solidaridad Latinoamericana, 2025).

Mercado voluntario de carbono

Es dirigido a sectores y zonas geográficas que se encuentran por fuera de la cobertura del control de emisiones según el Protocolo de Kioto, adecuándose más a proyectos pequeños, del sector agrícola y forestal (Carbon Farming Academy, 2025).

Marco Legal

Huella ambiental de producto (HAP) y reglas de categoría (RCHAP)

La Comisión Europea lanzó en 2013 la iniciativa del "mercado único para productos verdes", que incluyó estudios de HAP para categorías como el café (Gmünder, 2020). Los estudios de HAP se basan en el análisis del ciclo de vida (ACV) para estimar los impactos ambientales de los productos. Las RCHAP para el café complementan esta guía, proporcionando especificaciones a nivel de categoría de producto para enfocar el estudio en aspectos clave y asegurar la relevancia, reproducibilidad y consistencia de los resultados. La guía sobre la Huella Ambiental del Café en Colombia se basa en el borrador de las RCHAP para el café (Gmünder, 2020).

ISO 14040/44

Establecen los principios y el marco para el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), esencial para la evaluación de la huella ambiental (Gmünder, 2020).

ISO 14046

Define los principios, requisitos y directrices para la huella hídrica (Gmünder, 2020).

ISO 14025

Proporciona directrices para Declaraciones Ambientales Tipo III, las cuales presentan datos ambientales cuantificados utilizando parámetros predeterminados (Gmünder, 2020).

Protocolo de gases de efecto invernadero (GHG Protocol)

Es fundamental para la contabilidad y el informe de la huella de carbono de la cadena de valor corporativa (Alcance 3), cubriendo emisiones indirectas en toda la cadena (Gmünder, 2020).

Water Footprint Network (WFN)

Ofrece metodologías para calcular las huellas hídricas azul, verde y gris, que son indicadores de inventario (cantidades de agua) diferentes a los indicadores de impacto de la ISO 14046 y HAP (Gmünder, 2020).

Guías del IPCC (Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático)

Proveen factores de emisión y metodologías para el cálculo de GEI, como las emisiones de N₂O y CO₂ relacionadas con la aplicación de fertilizantes y los cambios en el uso del suelo (Gmünder, 2020).

Regulaciones y exigencias de mercados clave (Unión Europea)

Dado que la Unión Europea es el principal mercado de café a nivel mundial, sus regulaciones son críticas para los exportadores colombianos (connectAmericas, 2024).

Regulación de café libre de deforestación: La UE ha implementado normativas que exigen que el café importado no provenga de zonas deforestadas, buscando mitigar el cambio climático y conservar la biodiversidad (connectAmericas, 2024). Esta regulación busca la trazabilidad y transparencia en la cadena de suministro para demostrar la ausencia de deforestación reciente (típicamente en los últimos 20 años) (Gmünder, 2020). La Federación Nacional de Cafeteros (FNC) ha liderado esfuerzos para cumplir con este requisito, utilizando sistemas de información cafetera y bases de datos como Global Forest Watch, y certificaciones como Rainforest Alliance (Federacion Nacional de Cafeteros, 2024).

Requisitos generales de sanidad y seguridad

El café debe cumplir con estrictas normas de higiene en todas las etapas de producción y no debe contener plaguicidas por encima de límites específicos (ej., no más de 1 mg de carbofurano por kg de granos) (connectAmericas, 2024).

Pautas de etiquetado

Los productos deben incluir la denominación de venta, lista de ingredientes (incluyendo aditivos y alérgenos), cantidad neta, fecha de vencimiento, nombre y dirección del fabricante/envasador/vendedor en la UE, lugar de origen (si es relevante), indicaciones de conservación/uso y el lote (connectAmericas, 2024).

Marcos y programas nacionales en Colombia para la sostenibilidad cafetera

A nivel nacional, diversas entidades y programas guían la sostenibilidad del sector cafetero.

Estrategia ambiental de la Federación Nacional de Cafeteros (FNC)

Esta estrategia busca equilibrar el progreso económico, la calidad de vida del productor y la gestión eficiente de los recursos ambientales, con un enfoque en la adaptación y mitigación del cambio climático (Gmünder, 2020).

Documento guía "Huella Ambiental del Café en Colombia"

Desarrollada por entidades como Quantis, CNPMLTA, AGROSAVIA y la FNC a través de Cenicafé. Esta guía técnica estandariza el cálculo de la huella ambiental del café en Colombia conforme a los requisitos de la HAP, proporcionando metodología, datos predeterminados e indicadores, especialmente para el cultivo y procesamiento (Gmünder, 2020).

Acciones nacionalmente apropiadas de mitigación (NAMA) Colombia

Presenta estadísticas sobre la producción de café y la cuantificación de gases de efecto invernadero (GEI), sirviendo como referencia para comparaciones y metas nacionales (Gmünder, 2020).

Buenas prácticas agrícolas (BPA)

Son pautas para la producción de café que buscan la calidad, eficiencia, mejora de la vida de los caficultores, satisfacción del consumidor y beneficios ambientales a largo plazo. Promueven la protección de la biodiversidad, la fertilidad del suelo y la reducción de la contaminación mediante la gestión racional de químicos, fertilizantes y residuos orgánicos (Gmünder, 2020). Las BPA incluyen medidas durante la germinación, etapa de plántula, establecimiento del cultivo, crecimiento vegetal y producción, y procesamiento post-cosecha (Gmünder, 2020). Destacan prácticas como el uso de semillas certificadas, aplicación racional de fungicidas y fertilizantes, gestión integrada de plagas y arvenses, riego controlado, conservación de suelos y el uso de sistemas agroforestales con sombra (Gmünder, 2020).

Regulación y mecanismos para bonos por captura de carbono a través de sistemas agroforestales

Sistemas agroforestales cafeteros colombianos (SAFC)

Estos sistemas combinan especies arbóreas con el café, contribuyendo significativamente a la sostenibilidad. Las funciones clave incluyen la moderación del microclima, la reducción de la erosión, la mejora de la estructura y fertilidad del suelo, el reciclaje de nutrientes y la captura y almacenamiento de carbono en la biomasa y el suelo (Gmünder, 2020). Los sistemas agroforestales cafeteros (SAFC) tienen una reserva de

carbono significativamente mayor que los sistemas a plena exposición solar (promedio de 30.2 tC/ha vs. 10.5 tC/ha) (Gmünder, 2020).

Marco regulatorio y financiero

EUDR y pagos por servicios ambientales (PSA), la creciente presión para adoptar prácticas sostenibles en la caficultura es impulsada por la variabilidad climática y las exigencias de los mercados internacionales. La nueva normativa EUDR (European Union Deforestation Regulation) de la Unión Europea, en vigor desde 2023, prohíbe la comercialización de café proveniente de zonas deforestadas o degradadas después del 31 de diciembre de 2020, exigiendo trazabilidad y cumplimiento legal. Esta regulación representa un reto considerable para los caficultores, quienes deben adaptar sus sistemas de producción y verificar sus prácticas. La caracterización de los sistemas agroforestales (SAF) en Caldas y Risaralda es fundamental para visibilizar cómo estas prácticas contribuyen a satisfacer los requisitos de cero deforestaciones y fortalecen la posición de los caficultores en el mercado internacional (Union Europea, 2023).

En este contexto, los incentivos por servicios (PSA), específicamente los pagos por captura de carbono (CRU), emergen como un mecanismo innovador para fomentar la sostenibilidad y la mejora de ingresos. Programas como "Asómbrate", desarrollado por Solidaridad Latinoamérica y certificado por Plan Vivo, buscan promover la implementación de sistemas agroforestales (SAF) y compensar a los caficultores por la captura de carbono adicional generado. El análisis de la experiencia de caficultores que ya han recibido estos incentivos permitirá documentar la efectividad de los (SAF) en la captura de carbono y evaluar el impacto de estas compensaciones en la diversificación de ingresos y la toma de decisiones a nivel de finca (Solidaridad Latinoamericana, 2025).

Marco Contextual

En relación con la producción de café, Quinchía es un ejemplo de iniciativas que buscan fomentar la seguridad alimentaria y la economía colaborativa entre los caficultores:

Programa "Cultivar para comer y para compartir"

Solidaridad promueve este lema entre más de 1.500 caficultores en siete municipios de Risaralda, incluyendo Quinchía, como parte del programa "Café del Futuro" (Solidaridad Latam, 2020). El objetivo es que cada vereda conforme un núcleo de producción sostenible a través de la diversificación de cultivos y la economía colaborativa (Solidaridad Latam, 2020).

Diversificación en las fincas

La estrategia brinda asistencia e insumos para el cultivo de huertas caseras a familias y grupos veredales en Quinchía. Además del café, se fomenta que cada finca tenga cultivos adicionales como hortalizas, árboles frutales, frijol, maíz, aguacate, plátano y banano, así como especies menores (cerdos, gallinas ponedoras y pollos de engorde), esto busca garantizar la alimentación familiar y generar excedentes (Solidaridad Latam, 2020).

Economía colaborativa y trueque

Los excedentes de producción permiten a los caficultores acceder a otros productos mediante el trueque o la venta a precios justos entre vecinos (Solidaridad Latam, 2020). Un claro ejemplo de esto es "la tienda de los precios justos" en Quinchía, un establecimiento que permanece abierto gran parte del día donde los caficultores intercambian productos como maíz por yuca, y frijol por plátano, además de vender sus excedentes de la huerta a precio de costo para asegurar que nadie pase hambre (Solidaridad Latam, 2020).

Casos de éxito y valor agregado

La familia Bartolo en Quinchía es un ejemplo de economía familiar centrada en el cultivo de café, donde hijos y nietos continúan el legado. Además, se destaca la innovación en la caficultura de Quinchía, como el caso de Hoover Adolfo Trejos Uribe, quien desarrolló "Coffté", una bebida a partir del extracto de pulpa de café con vainilla, canela y jengibre, buscando mayor rentabilidad (Federación Nacional de Cafeteros Risaralda, 2023).

Contexto de sostenibilidad más amplio

A nivel nacional, la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC) ha liderado esfuerzos en sostenibilidad, incluyendo estrategias ambientales que buscan equilibrar el progreso económico, la calidad de vida de los productores y la conservación ambiental (Gmünder, 2020). Organizaciones como Solidaridad, presente en Colombia, apoyan a productores de café y cacao climáticamente inteligentes para acceder a mercados de bonos de carbono mediante programas como "asómbrate". Esto implica el uso de sistemas agroforestales y asistencia técnica, iniciativas que reflejan un enfoque integral hacia una caficultura más sostenible en Colombia, de la cual Quinchía es parte activa (Asómbrate, 2025).

Metodología

Ubicación

Figura 2

Departamento Risaralda – Municipio Quinchía



Fuente: (Salazar-Duque, Y, 2018) Localización Geográfica del Municipio de Quinchía.

El departamento de Risaralda, ubicado en la región andina de Colombia, está compuesto por 14 municipios, incluyendo su capital Pereira y destacadas localidades cafeteras como Quinchía y Santuario (Solidaridad Latam, 2020). Limita con los departamentos de Antioquia, Caldas, Tolima, Quindío y Chocó. Risaralda es una región clave para la caficultura, donde operan importantes iniciativas de desarrollo como el programa “Café del Futuro” de Solidaridad, el cual promueve la seguridad alimentaria y la economía colaborativa entre más de 1.500 caficultores en siete de sus municipios (Solidaridad Latam, 2020). La gestión del sector está coordinada a nivel regional por el Comité Departamental de Cafeteros de Risaralda, con sede en Pereira (Federacion Nacional de Cafeteros Risaralda, 2023).

El municipio de Quinchía, conocido como la “Villa de los Cerros” por las imponentes elevaciones que lo rodean, se encuentra a más de 91 kilómetros de Pereira.

(Federacion Nacional de Cafeteros Risaralda, 2023) Su economía local se sustenta en una rica tradición que combina la producción de café con la minería artesanal de oro (Federacion Nacional de Cafeteros Risaralda, 2023). En Quinchía se desarrollan proyectos de economía colaborativa para fortalecer la seguridad alimentaria, como la “tienda de los precios justos”. En este establecimiento, los caficultores intercambian productos como maíz por yuca o frijón por plátano, y venden a precio de costo los excedentes de sus huertas para asegurar que no falte alimento en la comunidad (Solidaridad Latam, 2020). Este modelo fomenta la diversificación de cultivos en las fincas más allá del café, incluyendo hortalizas, frutales y especies menores, fortaleciendo la economía familiar y el tejido social (Solidaridad Latam, 2020).

Fundamentos metodológicos.

El presente proyecto aplicado se enmarca en la línea de Desarrollo Rural de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA) de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) (Robayo, D., 2025). Esta línea de investigación, tal como es promovida por la ECAPMA, se centra en la construcción de conocimiento desde y para el territorio rural colombiano, impulsando la sostenibilidad y resiliencia de los productores rurales, y manteniendo un enfoque primordial en el territorio rural de Colombia y sus actores (Robayo, D, 2025).

Para lograr una comprensión integral de la ruta estratégica, la aplicación de bonos por captura de carbono y los criterios de participación en el programa "asómbrate" dentro del contexto de la caficultura de Quinchía, Risaralda, esta investigación adoptó un enfoque mixto. Este enfoque combinó elementos cualitativos para explorar percepciones y procesos,

y elementos cuantitativos para medir y evaluar el cumplimiento de los criterios específicos, permitiendo así una visión holística y robusta del fenómeno estudiado.

Objetivo 1

Identificar los productores y fincas cafeteras del municipio de Quinchia Risaralda.

Criterios de selección

Se identificó a los productores y fincas cafeteras del municipio de Quinchía, Risaralda, que cumplían con los criterios y condiciones en esquemas de bonos por captura de carbono; teniendo en cuenta los criterios de elegibilidad del programa "asómbrate" como variables clave de evaluación. Requisitos fundamentales para determinar la idoneidad de los caficultores para acceder a este esquema y comercializar la captura de carbono realizada por los árboles en sus cultivos en mercados internacionales (Asómbrate, 2025).

Ser productor de café en sistemas agroforestales

Esta variable fue crucial ya que los sistemas agroforestales cafeteros (SAFC) son la base de la agricultura climáticamente inteligente promovida por Solidaridad Network a través de programas como "asómbrate". Los (SAFC) contribuyen significativamente a la captura y almacenamiento de carbono en la biomasa arbórea y el suelo, a la conservación del suelo y el agua, y al aumento de la biodiversidad. Además, moderan el microclima, reducen la evapotranspiración y protegen el suelo contra la erosión. La evaluación de esta variable implicó la verificación de la presencia y gestión de árboles de sombra en el cafetal (Asómbrate, 2025).

Poseer entre 0.5 y 10 hectáreas de tierra (área en café)

Este rango de tamaño de finca delimitó la investigación a pequeños y medianos productores, que representan una parte significativa de la caficultura colombiana (cerca del

96% de las fincas son pequeños productores con 5 o menos hectáreas) (Gmünder, 2020).

El programa "asómbrate" se enfocó en apoyar el acceso de pequeños productores a los mercados de carbono.

Ser propietario de tierra agrícola o demostrar la sana tenencia de la tierra

La seguridad jurídica sobre la tierra era un requisito esencial para la participación a largo plazo en programas de bonos de carbono, ya que garantiza la continuidad de las prácticas sostenibles y la titularidad de los derechos sobre el carbono capturado (Asómbrate, 2025). El programa no solicitó de manera proactiva copias de escrituras o certificados de tradición al momento del registro, confiando inicialmente en la palabra del caficultor. La presentación de esta documentación se vuelve necesaria únicamente en situaciones puntuales, como en el caso de un cambio de propietario para la correcta asignación del beneficio económico o, de manera crucial, durante los procesos de auditoría, validación y verificación externa (Rabobank Acorn, 2024). Estos procesos son indispensables para que la plataforma ACORN, a través de certificadores como Plan Vivo, pueda garantizar la credibilidad, transparencia y eficacia de los proyectos, asegurando que los beneficios climáticos y comunitarios sean reales y estén correctamente asignados (Rabobank Acorn, 2024). La Documentación validada para la propiedad de la tierra se certifica con escritura o certificado de tradición, sana tenencia; sana posesión firmada y autenticada por la Junta de acción comunal.

Tener árboles en cultivo bajo sombra que hayan sido plantados hace 5 años o menos

Esta condición fue fundamental para la adicionalidad en la contabilidad de carbono. Al enfocarse en árboles de reciente establecimiento, se asegura que la captura de carbono sea una consecuencia directa de la intervención del programa, incentivando nuevas

prácticas de siembra agroforestal y la reforestación, y no simplemente la contabilización de reservas de carbono preexistentes (Gmünder, 2020). Este criterio busca identificar el potencial de absorción de carbono adicional.

Tener una finca ubicada en el municipio de Quinchía, Risaralda

Este criterio establece el límite geográfico del estudio y la elegibilidad para el programa dentro de una región específica donde Solidaridad opera en Colombia (asómbrate, 2025).

No estar vinculado a ningún otro esquema de venta de captura de carbono

Este requisito evita la doble contabilización de los créditos de carbono, garantizando la exclusividad y la integridad del programa "asómbrate" en relación con otros mecanismos de compensación ambiental.

La evaluación de estas seis características, de manera conjunta, permitieron identificar a los caficultores en Quinchía, Risaralda, que no solo cumplían con los criterios formales de elegibilidad del programa "asómbrate", sino que también demostraron el potencial para contribuir activamente a la captura de carbono y a la sostenibilidad ambiental de la caficultura, en línea con los principios de la agricultura climáticamente inteligente.

Identificación de productores y fincas

De acuerdo con los registros oficiales del Comité Municipal de Cafeteros de Quinchía, con corte a diciembre de 2025, la caficultura se consolida como el eje estructurante del desarrollo rural en la zona. El municipio cuenta con un total de 3,450 caficultores, quienes gestionan un área productiva de 3,113 hectáreas. Cabe destacar que la totalidad de estos productores posee la cédula cafetera, lo que garantiza su adscripción

formal al Sistema de Información Cafetera (SICA). Esta vinculación institucional no solo facilita el acceso a programas de extensión rural y bienes públicos gremiales, sino que también representa un indicador de la sólida organización social y la formalización de la propiedad cafetalera en el territorio quinchiano (FNC, 2025).

Para la selección de los productores incluidos en el proyecto aplicado, se consideraron aquellos que se encuentran debidamente registrados en el programa “asómbrate café”. Este criterio asegura que la muestra de análisis esté compuesta por los 1036 predios activos y validados (Solidaridad, 2025).

Para la selección de la muestra de fincas, se utilizó un criterio de rendimiento acumulado de capturas de carbono. De un total de 43 caficultores que registraron la generación de CRUs, se priorizaron 28 fincas que obtuvieron el mayor número de unidades de captura de carbono (CRUs) totales generadas durante el período comprendido entre 2021 y 2023. Esta metodología asegura que la muestra esté conformada por los predios más productivos en términos de mitigación de carbono, lo que es fundamental para el análisis de los beneficios y la viabilidad del programa. (Ver figura 3).

Figura 3

Participación de productores en el programa "asómbrate Café"



Nota: La presente infografía muestra el total de productores agrícolas que participan en el programa "asómbrate Café". Se registra un total de 1036 predios inscritos, de los cuales 755 son hombres y 281 por mujeres, el programa interviene en un área total de 1049 hectáreas en el Departamento de Risaralda municipio Quinchia. Tomado de (Solidaridad, 2025).

Objetivo 2

Caracterización de las fincas con sistemas agroforestales cafeteros (SAFC).

Para cumplir con el objetivo específico, se realizó la caracterización de las fincas cafeteras y sus sistemas agroforestales (SAF), esto permitió entender los factores que influyen en la captura de carbono. Se evaluó cada lote de café que cumplía con las condiciones de un

(SAF), definido como una asociación deliberada de especies leñosas perennes con el cultivo, un sistema agroforestal cafetero (SAFC) se define como un conjunto de prácticas donde se combinan especies arbóreas con el cultivo de café, con el fin de manejar y conservar el suelo y el agua, y garantizar la sostenibilidad (Federación Nacional de Cafeteros, 2024).

Características fundamentales

Presencia y composición del componente arbóreo

Criterio de inclusión práctico. En campo, se seleccionaron los lotes de café que cuentan con más de 15 árboles, ya sean forestales o frutales. Este criterio fue fundamental para identificar las fincas con un sistema agroforestal establecido.

Identificación del componente arbóreo. El registro de las especies presentes en los sistemas agroforestales (forestales maderables, forrajeras y frutales) se realizó mediante recorridos in situ. Este proceso contó con el acompañamiento permanente del caficultor, quien, partiendo de su conocimiento del predio, suministró la información taxonómica vernácula (nombres comunes) y funcional de los individuos asociados al cultivo para su registro en los instrumentos de recolección.

Edad del componente arbóreo. Se documentó la antigüedad de los árboles mediante consulta directa al caficultor. Esta variable es determinante para validar el criterio de adicionalidad exigido por el programa de captura de carbono, el cual prioriza plantaciones recientes (establecidas, por ejemplo, en los últimos 5 años) para garantizar la efectividad en la remoción de CO₂.

Estructura y arreglo del sistema agroforestal

Linderos y franjas de bosque

Se caracterizó la configuración espacial del componente arbóreo, evaluando las distintas tipologías de asocio presentes en la zona cafetera. La metodología contempló la identificación de arreglos en linderos (cercas vivas con especies maderables o frutales), árboles intercalados sistemáticamente entre los surcos de café (policultivos), árboles dispersos de sombra o sombrío permanente, y la presencia de fragmentos de bosque o parches de vegetación natural. Esta aproximación permitió registrar la diversidad de diseños agroforestales, desde barreras perimetrales hasta socios complejos dentro del lote, y su potencial contribución a la captura de carbono. Contexto para potenciales mercados de carbono:

Alineación programática y fuente de información

La caracterización se ajustó a los criterios de elegibilidad del programa Asómbrate (Solidaridad, 2025), focalizándose en pequeños propietarios de Quinchía (0.5 a 10 ha) con sistemas agroforestales cafeteros (SAFC) establecidos recientemente (<5 años) y sin vinculación a otros mercados de carbono. Para el análisis cuantitativo, se integraron los datos de la plataforma ACORN en un tablero de control (Power BI), lo que permitió filtrar

sistemáticamente el desempeño de los productores y seleccionar 28 productores con generación activa de Unidades de Remoción de Carbono (CRUs) para el proyecto aplicado.

Objetivo 3

Estimar la captura de carbono generada por los Sistemas Agroforestales (SAF) en el municipio de Quinchía, Risaralda, a través de análisis satelital, para su respectiva compensación económica por bonos de carbono.

Metodología para la estimación y análisis de factores

Para estimar la captura de carbono y evaluar el potencial de generación de bonos (CRUs) en los sistemas agroforestales cafeteros (SAFC) de Quinchía, se ejecutó una estrategia que integró la recolección de datos primarios con los estándares de la plataforma ACORN. El proceso inició con la verificación *in situ*, donde se levantó la información de línea base de cada finca; esta etapa fue determinante no solo para validar el cumplimiento de los criterios de elegibilidad del programa, sino para identificar las variables biofísicas que influyen en la capacidad de almacenamiento de carbono del sistema.

Georeferenciación. Para el levantamiento espacial de los predios se llevaron a cabo visitas técnicas individualizadas. Aunque en una fase inicial se emplearon unidades GPS Garmin (2020-2021), el proceso se estandarizó en 2022 implementando la aplicación ODK Collect en dispositivos móviles. El procedimiento metodológico para la delimitación del polígono consistió en utilizar la función GeoShape para capturar la geometría del lote. Para asegurar una alta exactitud cartográfica, era un requisito técnico indispensable verificar directamente en el equipo celular que el margen de precisión del GPS no fuera superior a 4 metros al momento de tomar las coordenadas. Una vez garantizada esta métrica, se procedió a marcar un punto en cada una de las esquinas y a registrar puntos adicionales en

los trayectos con cambios topográficos (como inclinaciones o curvas). Este riguroso nivel de detalle perimetral permitió conformar una 'verdad de terreno' exacta y realizar el envío remoto de la información a los servidores, utilizando la cédula del productor como identificador único. (Ver figura 4).

Figura 4

Ejemplo de lote georreferenciado mediante captura de geometría de alta precisión



Nota: Esta imagen ilustra el resultado del proceso estandarizado de levantamiento de predios descrito. El polígono verde representa la geometría del lote capturada con alta precisión durante una visita técnica, utilizando la función GeoShape de la aplicación ODK Collect en dispositivos móviles. Esta información georreferenciada es enviada remotamente a los servidores para realizar análisis espaciales. (Solidaridad, 2025).

Instrumento de recolección digital. Para optimizar la captura y sistematización de la información, se implementaron formularios digitales a través de la herramienta ODK (Open Data Kit). La aplicación de este instrumento siguió los principios del muestreo estratificado, una estrategia consistente con las recomendaciones para el manejo de datos en paisajes cafeteros heterogéneos (Gmünder, 2020).

El proceso abarcó desde la formalización del consentimiento informado y el registro de datos personales del productor, hasta la caracterización técnica del predio.

Específicamente, se levantaron variables sobre el tamaño de la finca y la producción, y se ejecutó un inventario forestal exhaustivo de las especies de sombra, insumo crítico para los posteriores cálculos de biomasa según los modelos propuestos por (F, Farfan, 2013).

Validación, carga y modelamiento en plataforma. La información recolectada en campo fue sometida a un estricto protocolo de control de calidad antes de su procesamiento final. En una primera instancia, un equipo centralizado de monitoreo y evaluación verificó la consistencia de los datos y la topología de los polígonos, asegurando que las áreas delimitadas cumplieran con los estándares de elegibilidad del programa.

Una vez depurada y aprobada, la información se migró a la plataforma ACORN de Rabobank (Asómbrate, 2025). En esta etapa, los datos de campo actúan como "verdad de terreno", insumo indispensable que la plataforma integra con sus modelos de teledetección satelital e Inteligencia Artificial. Esta sinergia tecnológica permite monitorear remotamente el crecimiento de la biomasa y estimar con precisión las Unidades de Remoción de Carbono (CRUs) generadas anualmente (Asómbrate, 2025).

Metodología de estimación y selección. El cálculo de las reservas de carbono se basó en el modelo de la plataforma ACORN, que utiliza teledetección satelital e IA para medir el crecimiento de biomasa en los periodos 2021-2023. Este sistema, certificado por Plan Vivo, convierte cada tonelada de CO₂ capturado en una Unidad de Remoción de Carbono (CRU), optimizando los costos para garantizar que el 80% del ingreso retorne al caficultor (Rabobank Acorn, 2024). El proceso de estimación y monetización se fundamenta en la optimización de los altos costos tradicionales de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV). Para lograrlo, la plataforma ACORN emplea teledetección satelital y modelos de Inteligencia Artificial que miden anualmente el crecimiento de la biomasa

arbórea de forma remota. Una vez validado este crecimiento, cada tonelada de CO₂ secuestrada equivale a una Unidad de Remoción de Carbono (CRU), la cual es certificada de forma rigurosa bajo el estándar internacional Plan Vivo. Al digitalizar y automatizar esta medición, los costos de certificación se reducen drásticamente, estructurando un modelo de negocio equitativo que garantiza que el 80% de los ingresos por la venta de cada CRU retorne directamente al caficultor. El 20% restante se distribuye para cubrir estrictamente los costos de transacción, la administración tecnológica de la plataforma y el acompañamiento técnico continuo en campo (Asómbrate, 2025).

Cabe precisar que las bases de datos espaciales y la totalidad de la información productiva recolectada son de acceso y propiedad exclusiva de la organización; por consiguiente, el tratamiento de esta data se realiza bajo estrictos protocolos de privacidad y está destinado únicamente para los fines de modelamiento satelital, validación del crecimiento de biomasa y certificación dentro del esquema de bonos de carbono.

A partir de los reportes generados por Rabobank, se utilizó una herramienta de visualización en Power BI para sistematizar los datos. Esta fase fue determinante para seleccionar la muestra de análisis, filtrando aquellos productores que demostraron no solo cumplimiento agronómico, sino también efectividad en la mitigación climática mediante la emisión validada de bonos de carbono.

Monetización y mecanismo de transferencia de valor

La materialización de la transacción financiera fue posible gracias a la articulación institucional entre Rabobank – ACORN y su socio implementador local, Solidaridad. Estas organizaciones facilitaron la comercialización de los bonos certificados en el mercado

voluntario, consolidando un esquema que benefició social, ambiental y económicamente a las familias de pequeños agricultores (Carbon Farming Academy, 2025).

Metodológicamente, la estimación del carbono secuestrado por los sistemas agroforestales cafeteros (SAFC) (determinada según los procedimientos descritos en los objetivos 1 y 2) constituyó la base verificable del proceso. Esta cifra técnica fue el insumo indispensable para respaldar la emisión de los créditos, transformando la captura física de CO₂ en un activo financiero transable (Carbon Farming Academy, 2025).

Unidad de medida y tipo de crédito. La métrica base para la estimación es la tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}). En el marco del programa, cada tonelada secuestrada y verificada se convierte en una unidad de remoción de carbono (CRU). A diferencia de los esquemas tradicionales de reducción de emisiones, las CRUs se calculan a partir de las remociones netas de biomasa (crecimiento de los árboles), certificadas bajo estándares internacionales para su comercialización en el mercado voluntario de carbono (Carbon Farming Academy, 2025).

Esquema de comercialización. La plataforma ACORN actúa como el puente conector entre los pequeños agricultores y el mercado internacional. Su modelo de negocio se distingue por un esquema de comercio justo, garantizando que el 80% del valor final de venta de cada CRU sea transferido directamente al productor, maximizando así el impacto económico en la economía rural (*Rabobank Acorn, 2024*).

La monetización de los servicios ecosistémicos bajo este esquema se caracteriza por su variabilidad financiera. El precio de cada Unidad de Remoción de Carbono (CRU) responde al comportamiento de la oferta y la demanda en el mercado internacional, partiendo de un piso mínimo de 20 euros por tonelada. En este sentido, la liquidación anual

transferida a cada caficultor fue diferente y estuvo condicionada por dos variables adicionales. Por un lado, un componente macroeconómico determinado por las fluctuaciones en la tasa de cambio del euro (€) frente al peso colombiano (COP) en los periodos de liquidación. Por otro lado, el desempeño agronómico individual, ya que el pago es estrictamente proporcional a la captura de carbono generada en cada finca. De este modo, los predios que lograron un manejo óptimo de sus sistemas agroforestales y demostraron un mayor desarrollo de biomasa acumularon más CRUs, maximizando así el 80% de rentabilidad que retorna directamente al productor.

El sistema de pagos fue concertado entre el socio local y la persona productora agrícola (Carbon Farming Academy, 2025). Ver figura 5.

Figura 5

Programa ACORN



Nota: El diagrama ilustra el mecanismo de la iniciativa ACORN, que conecta a los agricultores con el mercado internacional de bonos de carbono. El proceso describe los cuatro participantes clave (Agricultores, Rabobank, Socio Local y Compradores) y define el Carbon Removal Unit (CRU) como la unidad de medida utilizada, equivalente a 1 tonelada de CO₂ capturada. El CRU es la base para el pago que el socio local (Solidaridad) entrega al agricultor. Tomado de (Carbon Farming Academy, 2025)

Resultados y discusión

Objetivo 1

Identificar los productores y fincas cafeteras del municipio de Quinchia Risaralda.

Para dar cumplimiento al primer objetivo específico, se realizó la depuración y verificación de la base de datos de productores registrados en el programa Asómbrate en el municipio de Quinchía, Risaralda. Este proceso permitió consolidar la muestra definitiva de estudio.

Resultados del proceso de verificación de elegibilidad

Validación geográfica y de tenencia. El filtro inicial se centró en la ubicación y la seguridad jurídica de los predios.

Ubicación geográfica. Se confirmó que el 100% de los predios seleccionados se encuentran ubicados dentro de la jurisdicción del municipio de Quinchía, Risaralda, cumpliendo con el criterio de delimitación territorial del estudio.

Tenencia de la tierra

En cuanto al régimen de propiedad, se validó la "sana tenencia" de la tierra. Los 28 productores identificados acreditaron su condición de propietarios (mediante escritura pública o documento de compraventa), cumpliendo con el requisito indispensable para la titularidad de los derechos sobre el carbono capturado.

Perfil productivo (pequeños productores). El análisis de las características productivas permitió confirmar la alineación de la muestra con el perfil de "pequeño caficultor":

Sistema de producción

Se identificó que la totalidad de los participantes son productores activos de café bajo sistemas agroforestales (SAF), integrando el componente arbóreo con el cultivo principal.

Dimensión del predio

La verificación de áreas arrojó que las fincas seleccionadas poseen una extensión de café establecida entre 0.5 y 10 hectáreas. Con un promedio general de 1.6 ha". Este hallazgo ratifica que la población objetivo corresponde a la economía campesina de pequeña escala.

Exclusividad en mercados de carbono

Finalmente, para garantizar la integridad ambiental de los resultados se identificaron aquellos que no generaran una doble contabilidad, se verificó, bajo un enfoque declarativo, que ninguno de los productores seleccionados estuviera vinculado simultáneamente a otro esquema de venta o compensación de carbono. Esto aseguró la exclusividad de los participantes para el análisis de captura bajo el estándar del programa ACORN.

La identificación de los sistemas caracterizados en Quinchía se destaca por una estructura multiestrato. El estrato bajo está dominado por el café en etapa productiva, mientras que el estrato medio y alto está compuesto por especies de sombra diversificada. Se identificó una tendencia hacia el uso de *Cordia alliodora* (Nogal Cafetero) por su valor maderable y su arquitectura de copa estrecha que permite el paso de luz filtrada, y de

especies del género *Inga spectabilis* (Guamos) por su capacidad de fijación de nitrógeno al suelo. Esta combinación no solo optimiza el potencial de captura de carbono del predio, sino que mejora la calidad térmica del grano de café, alineándose con las exigencias del estándar ACORN para la generación de unidades de eliminación de carbono (CRUs). (Ver tabla 2)

Tabla 2
Caracterización técnica y ubicación geográfica

| ID | Municipio | Vereda | Area SAF | Diseño SAF |
|----|--------------|----------------|----------|---|
| 1 | Quinchia Rda | Cedral | 2,8 | Café + <i>Cordia alliodora</i> + <i>Inga spectabilis</i> + <i>Citrus limón</i> |
| 2 | Quinchia Rda | Buenos Aires | 2,1 | Café + <i>Cordia alliodora</i> + <i>Inga spectabilis</i> + <i>Citrus limón</i> |
| 3 | Quinchia Rda | El Guamo | 2,7 | Café + <i>Cordia alliodora</i> + <i>Inga spectabilis</i> + <i>Citrus limón</i> |
| 4 | Quinchia Rda | Santa Elena | 0,4 | Café + <i>Cordia alliodora</i> + <i>Citrus limón</i> |
| 5 | Quinchia Rda | Santa Elena | 0,6 | Café + <i>Persea americana</i> + <i>Trichanthera gigantea</i> + <i>Inga spectabilis</i> |
| 6 | Quinchia Rda | Villa Rica | 1,1 | Café + <i>Inga spectabilis</i> + <i>Persea americana</i> |
| 7 | Quinchia Rda | Villa Rica | 1,5 | Café + <i>Inga spectabilis</i> + <i>Persea americana</i> |
| 8 | Quinchia Rda | Rio Grande | 1,3 | Café + <i>Inga spectabilis</i> + <i>Persea americana</i> |
| 9 | Quinchia Rda | Rio Grande | 3,7 | Café + <i>Cordia alliodora</i> + <i>Persea americana</i> + <i>Inga spectabilis</i> + <i>T. gigantea</i> |
| 10 | Quinchia Rda | Batero | 1 | <i>T. gigantea</i> |
| 11 | Quinchia Rda | Cruces | 3 | Café + <i>Persea americana</i> + <i>Trichanthera gigantea</i> + <i>Inga spectabilis</i> |
| 12 | Quinchia Rda | Santa Sofía | 1,4 | Café + <i>Cordia alliodora</i> + <i>Persea americana</i> + <i>Inga spectabilis</i> + <i>T. gigantea</i> |
| 13 | Quinchia Rda | El Naranjo | 0,6 | <i>T. gigantea</i> |
| 14 | Quinchia Rda | Quinchia Viejo | 2,9 | Café + <i>Inga spectabilis</i> + <i>Persea americana</i> |
| 15 | Quinchia Rda | El Lago | 4,3 | Café + <i>Cordia alliodora</i> + <i>Citrus limón</i> |
| 16 | Quinchia Rda | Santa María | 0,8 | Café + <i>Cordia alliodora</i> + <i>Inga spectabilis</i> + <i>Citrus limón</i> |
| 17 | Quinchia Rda | Primavera | 2 | Café + <i>Persea americana</i> + <i>Trichanthera gigantea</i> + <i>Inga spectabilis</i> |
| 18 | Quinchia Rda | La Loma | 0,8 | Café + <i>Cordia alliodora</i> + <i>Citrus limón</i> |
| 19 | Quinchia Rda | Opirama | 1,6 | Café + <i>Cordia alliodora</i> + <i>Inga spectabilis</i> + <i>Citrus limón</i> |
| 20 | Quinchia Rda | Cedral | 2,7 | Café + <i>Cordia alliodora</i> + <i>Citrus limón</i> |
| 21 | Quinchia Rda | El Lago | 1,8 | Café + <i>Inga spectabilis</i> + <i>Persea americana</i> |
| 22 | Quinchia Rda | Opirama | 1,4 | Café + <i>Persea americana</i> + <i>Trichanthera gigantea</i> + <i>Inga spectabilis</i> |
| 23 | Quinchia Rda | Opirama | 0,5 | Café + <i>Inga spectabilis</i> + <i>Persea americana</i> |
| 24 | Quinchia Rda | Santa Elena | 1,1 | Café + <i>Inga spectabilis</i> + <i>Persea americana</i> |
| 25 | Quinchia Rda | La Ciénaga | 0,9 | Café + <i>Cordia alliodora</i> + <i>Citrus limón</i> |
| 26 | Quinchia Rda | El Higo | 0,8 | Café + <i>Inga spectabilis</i> + <i>Persea americana</i> |
| 27 | Quinchia Rda | Los Medios | 1,1 | Café + <i>Persea americana</i> + <i>Trichanthera gigantea</i> + <i>Inga spectabilis</i> |
| 28 | Quinchia Rda | El Retiro | 1,5 | Café + <i>Cordia alliodora</i> + <i>Citrus limón</i> |
| | | | | Café + <i>Inga spectabilis</i> + <i>Persea americana</i> |
| | | | | Café + <i>Inga spectabilis</i> + <i>Persea americana</i> |

Nota: La información de esta tabla es de carácter declarativo, suministrada directamente por los caficultores, mientras que la determinación exacta del área y límites del Sistema

Agroforestal (SAF) se establece estrictamente mediante la medición técnica del polígono, garantizando la precisión cartográfica del estudio.

Fuente: Elaboración propia con base en datos suministrados por el programa asómbrate (2025).

Para la identificación y filtrado, se consolidó una muestra final de 28 fincas y productores que cumplieron satisfactoriamente con la totalidad de los criterios de elegibilidad. Este grupo constituye la población base sobre la cual se desarrollaron los análisis de caracterización (Objetivo 2) y estimación de carbono (Objetivo 3). Ver tabla 3

Tabla 3

Resumen de cumplimiento de criterios de elegibilidad

| Criterio de selección | Resultado verificado | Cumplimiento |
|-----------------------|-------------------------------|--------------|
| Ubicación | Quinchía, Risaralda | 100% |
| Sistema Productivo | Café con sombra (SAFC) | 100% |
| Tamaño del Lote | Rango: 0.5 - 10 ha (P 1.6 ha) | 100% |
| Tenencia | (escritura/compraventa) | 100% |
| Exclusividad | No vinculada a Programas | |
| Muestra Final | 28 productores seleccionados | 100% |

Nota: En esta tabla se sintetizan los requisitos fundamentales para determinar la idoneidad de los caficultores de Quinchía, Risaralda, en el acceso a esquemas de bonos por captura de carbono.

Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos del proyecto (Asómbrate, 2025)

Identificación cuantitativa de la población participante

Según los registros del programa "Asómbrate Café" con corte a febrero de 2025, se identificó una población total de 1.036 productores activos y validados en el municipio de Quinchía, Risaralda. La caracterización demográfica de este grupo revela la participación de 755 hombres y 281 mujeres propietarios de predios cafeteros. En términos de cobertura

espacial, estos productores representan un área total intervenida de 1.049 hectáreas bajo Sistemas Agroforestales Cafeteros (SAFC) (Solidaridad, 2025) (Ver tabla 4).

Tabla 4

Identificación cuantitativa de productores registrados en Quinchía – Risaralda

| Categoría | Cantidad | Detalle | Porcentaje |
|-------------------------|-----------------|---------------------------------|-------------------|
| Total, predios (fincas) | 1036 | productores activos y validados | 100% |
| Productores hombres | 755 | | 72.9% |
| Productores mujeres | 281 | | 27.1% |
| Área intervenida (ha) | 1049 | área total con SAF en asómbrate | |

Nota. Número de fincas y productores registrados en el programa asómbrate en el Municipio de Quinchía Risaralda (Solidaridad, 2025).

Visualización de género

Como se observa en la distribución general del programa en el municipio, si bien existe una predominancia masculina en la titularidad de los predios (72,9%), la participación femenina general del 27,1% (281 productoras) representa un segmento significativo de mujeres rurales. Al trasladar este análisis a la muestra seleccionada de 28 productores, se evidenció que 6 de estos predios están liderados por mujeres, lo que equivale a una representatividad del 21,4% dentro del grupo de estudio. Esta valoración confirma que, incluso en la muestra de mayor desempeño, el empoderamiento a través de la tenencia de la tierra permite a las caficultoras acceder efectivamente a los mercados internacionales de carbono (Rabobank Acorn, 2024).

Discusión

Estos resultados validan la pertinencia del modelo ACORN para la realidad colombiana descrita por (Gmünder, 2020), quienes señalan que el 96% de las fincas cafeteras en el país pertenecen a pequeños productores con menos de cinco hectáreas. La identificación de un promedio de 1.6 hectáreas en la muestra confirma que la estrategia de

agregación tecnológica es efectiva para democratizar el acceso a mercados que, tradicionalmente, estaban reservados para grandes extensiones de tierra debido a los altos costos de transacción.

Asimismo, el cumplimiento del criterio de "sana tenencia" mediante escritura pública es fundamental. Según (Solidaridad, 2025), la seguridad jurídica es un requisito indispensable para la titularidad de los derechos sobre el carbono y la sostenibilidad a largo plazo de los proyectos de desarrollo rural. La alta participación de productores propietarios en Quinchía contrasta positivamente con la informalidad que suele ser una barrera en otras regiones, facilitando la implementación de lo que Blackman, A., & Rivera, J (2011) denominan certificación de sostenibilidad para el bienestar social (Blackman, A., & Rivera, J, 2011).

Objetivo 2

Caracterizar las fincas cafeteras con sus Sistemas Agroforestales (SAF) con potencial de captura de carbono en el municipio de Quinchía, Risaralda.

Para dar cumplimiento a la caracterización de los sistemas productivos en el municipio de Quinchía, se consolidó la información técnica de 28 unidades muestrales.

Este apartado detalla la configuración agronómica del cultivo de café, integrando variables clave como variedades, densidades de siembra y procesos de postcosecha. (Ver tabla 5).

Tabla 5
Caracterización técnica del sistema productivo

| ID | Variedad | Distancia de siembra | Fertilización | Beneficio | Secado |
|----|------------|----------------------|---------------|-----------|--------|
| 1 | Cenicafé 1 | 1.20*1.50 m | Química | Mecánico | Solar |
| 2 | Cenicafé 1 | 1.20*1.50 m | Química | Mecánico | Solar |
| 3 | Castillo | 1.20*1.40 m | Química | Mecánico | Solar |
| 4 | Cenicafé 1 | 1.20*1.50 m | Química | Mecánico | Solar |
| 5 | Cenicafé 1 | 1.20*1.50 m | Química | Mecánico | Solar |
| 6 | Castillo | 1.20*1.40 m | Química | Mecánico | Solar |
| 7 | Castillo | 1.20*1.40 m | Química | Mecánico | Solar |
| 8 | Castillo | 1.20*1.40 m | Química | Mecánico | Solar |
| 9 | Castillo | 1.20*1.40 m | Química | Mecánico | Solar |
| 10 | Cenicafé 1 | 1.20*1.50 m | Química | Mecánico | Solar |
| 11 | Cenicafé 1 | 1.20*1.50 m | Química | Mecánico | Solar |
| 12 | Castillo | 1.20*1.40 m | Química | Mecánico | Solar |
| 13 | Castillo | 1.20*1.40 m | Química | Mecánico | Solar |
| 14 | Cenicafé 1 | 1.20*1.50 m | Química | Mecánico | Solar |
| 15 | Castillo | 1.20*1.40 m | Química | Mecánico | Solar |
| 16 | Castillo | 1.20*1.40 m | Química | Mecánico | Solar |
| 17 | Cenicafé 1 | 1.20*1.50 m | Química | Mecánico | Solar |
| 18 | Castillo | 1.20*1.40 m | Química | Mecánico | Solar |
| 19 | Cenicafé 1 | 1.20*1.50 m | Química | Mecánico | Solar |
| 20 | Cenicafé 1 | 1.20*1.50 m | Química | Mecánico | Solar |
| 21 | Castillo | 1.20*1.40 m | Química | Mecánico | Solar |
| 22 | Cenicafé 1 | 1.20*1.50 m | Química | Mecánico | Solar |
| 23 | Cenicafé 1 | 1.20*1.50 m | Química | Mecánico | Solar |
| 24 | Cenicafé 1 | 1.20*1.50 m | Química | Mecánico | Solar |
| 25 | Castillo | 1.20*1.40 m | Química | Mecánico | Solar |
| 26 | Castillo | 1.20*1.40 m | Química | Mecánico | Solar |
| 27 | Cenicafé 1 | 1.20*1.50 m | Química | Mecánico | Solar |
| 28 | Cenicafé 1 | 1.20*1.50 m | Química | Mecánico | Solar |

Nota: Esta tabla consolida los parámetros técnicos del componente agrícola para cada una de las unidades de análisis. La información referente a la variedad, distancia de siembra, tipo de fertilización y beneficio fue suministrada por los productores bajo un enfoque declarativo.

Fuente: Elaboración propia con base en datos suministrados por el programa (Asómbrate, 2025).

Es fundamental precisar que, si bien la descripción del manejo fitotécnico y operativo parte de un enfoque declarativo suministrado por los caficultores, la existencia física y la extensión espacial de cada unidad agroforestal fueron validadas mediante la

delimitación técnica de polígonos georreferenciados, constituyendo así la base fáctica para los cálculos de captura de carbono.

Definición de la Muestra Final

Del universo total de 1.036 caficultores activos y validados en el programa Asómbrate en el municipio de Quinchía, Risaralda, se realizó un proceso de depuración para identificar los predios con mayor potencial de análisis, como resultado de este filtro, se consolidó una muestra final de 28 fincas que cumplieron simultáneamente con dos condiciones estrictas:

Criterio Biofísico: Presencia verificada de más de 15 árboles (forestales o frutales) por lote de café medido.

Criterio de Desempeño

Registro efectivo de mitigación climática, evidenciado mediante la captura de, como mínimo, una Unidad de Remoción de Carbono (1 CRU).

Este grupo de 28 predios constituye la base analítica para la caracterización detallada y la estimación de carbono presentada a continuación. (Ver tabla 6)

Tabla 6
Capturas de CRUs generadas

| Nº de Caso | CRUs 2021 | CRUs 2022 | CRUs 2023 inicio 2024 |
|------------|-----------|-----------|-----------------------|
| 1 | 10 | 22 | 1 |
| 2 | 6 | 26 | 2 |
| 3 | 1 | 3 | 1 |
| 4 | 3 | 7 | 1 |
| 5 | 5 | 3 | 1 |
| 6 | 20 | 1 | 1 |
| 7 | 5 | 8 | 1 |
| 8 | 4 | 2 | 1 |
| 9 | 3 | 2 | 1 |
| 10 | 2 | 1 | 1 |
| 11 | 5 | 1 | 1 |
| 12 | 1 | 14 | 1 |
| 13 | 3 | 9 | 1 |
| 14 | 10 | 48 | 1 |
| 15 | 3 | 6 | 1 |
| 16 | 2 | 8 | 2 |
| 17 | 27 | 29 | 1 |
| 18 | 1 | 2 | 1 |
| 19 | 7 | 4 | 1 |
| 20 | 7 | 22 | 1 |
| 21 | 3 | 13 | 3 |
| 22 | 23 | 2 | 1 |
| 23 | 6 | 1 | 1 |
| 24 | 1 | 1 | 1 |
| 25 | 1 | 9 | 1 |
| 26 | 17 | 3 | 1 |
| 27 | 7 | 1 | 1 |
| 28 | 1 | 9 | 1 |

Nota: La tabla consolida las Unidades de Remoción de Carbono, capturadas por las 28 fincas durante el periodo de años 2021 al 2024.

Fuente: Elaboración propia con base en datos suministrados por el programa (Asómbrate, 2025)

Caracterización del Componente Arbóreo

El análisis de la estructura agroforestal en las 28 fincas seleccionadas reveló la existencia de sistemas diversificados. Se evidenció una composición variada de especies, donde coexisten individuos forestales y frutales integrados funcionalmente al cultivo de café. (Ver tabla 7).

Tabla 7

Especies forestales identificadas

| Nombre vulgar | Nombre científico | Tipo de uso |
|-----------------|---------------------------|--------------------|
| Nogal Cafetero | <i>(Cordia Alliodora)</i> | Forestal/maderable |
| Quiebra Barrigo | <i>(Trichanthera</i> | Forrajero/sombra |
| Guamo Churimo | <i>gigantea)</i> | Forestal/sombra |
| Aguacate | <i>(Inga Spectabil)</i> | Frutal/comercial |
| Limón | <i>(Persea americana)</i> | Frutal /comercial |
| | <i>(Citrus Limon)</i> | |

Nota. Especies identificadas con mayor frecuencia en las 28 fincas cafeteras seleccionadas en el municipio de Quinchia donde se generó la captura de 1 o más CRU (Toneladas de carbono equivalente).

Fuente: Elaboración propia con base en datos suministrados por el programa (Asómbrate, 2025).

Variable Temporal (Edad)

La edad del componente arbóreo fue establecida directamente a partir del reporte de los caficultores. Se encontró que los árboles integrados al sistema presentan un rango de edad promedio situado entre los 6 y 20 años. Este hallazgo indica que se trata de sistemas agroforestales cafeteros (SAFC) consolidados, con individuos que ya han superado las etapas críticas de establecimiento y se encuentran en fases activas de acumulación de biomasa. (Ver tabla 8).

Tabla 8

Caracterización dendrométrica y espacial del componente arbóreo en (SAFC)

| ID Caso | Especies asociadas | Arreglo espacial | Rango de edad/años | Estado del sistema |
|---------|--|-------------------|--------------------|--------------------|
| 1-12 | <i>Cordia alliodora, Inga spectabilis, Citrus limon, Persea americana, Trichanthera gigantea</i> | Arbolado disperso | 6-20 | Consolidado |
| 13-15 | <i>Cordia alliodora, Citrus limon, Inga spectabilis, Persea americana</i> | Perimetral | 6-20 | Consolidado |
| 16 | <i>Cordia alliodora, Citrus limón</i> | | 6-20 | Consolidado |
| 17 | <i>Cordia alliodora, Inga spectabilis, Citrus limón</i> | Arbolado disperso | 6-20 | Consolidado |
| 18 | <i>Cordia alliodora, Citrus limón</i> | Perimetral | 6-20 | Consolidado |
| 19-20 | <i>Inga spectabilis, Persea americana, Trichanthera gigantea</i> | Arbolado disperso | 6-20 | Consolidado |
| 21-28 | <i>Inga spectabilis, Persea americana, Cordia alliodora, Citrus limon</i> | Perimetral | 6-20 | Consolidado |
| | | Arbolado disperso | | |

Nota: Esta tabla sistematiza la caracterización de los 28 predios evaluados en Quinchía, Risaralda, clasificando su diseño espacial en arreglos de arbolado disperso o perimetral. La madurez del componente arbóreo, con un rango de edad de 6 a 20 años, confirma la existencia de sistemas agroforestales consolidados con una alta capacidad de acumulación de biomasa y captura de carbono, fundamentales para la generación de activos ambientales en el mercado voluntario.

Fuente: Elaboración propia con base en datos suministrados por el programa (Asómbrate, 2025)

Arreglos Espaciales y Estructura del Paisaje

Respecto a la distribución de los árboles en el espacio, la caracterización permitió identificar dos tipologías de manejo predominantes en las 28 fincas.

Sistemas Perimetrales (Linderos)

Fue el arreglo más frecuente, consiste en la disposición de árboles (principalmente maderables) en los límites de los lotes, formando franjas de bosque que actúan como cortinas rompevientos y conectores ecológicos, sin competir excesivamente por luz con el cultivo principal.

Arbolado Disperso (Intercalado)

El segundo arreglo corresponde a árboles distribuidos aleatoriamente dentro del lote de café, proporcionando una cobertura de sombra directa para la regulación microclimática del cultivo.

La clasificación de las tipologías y arreglos espaciales (Tabla 8) resulta de vital importancia para el mercado voluntario de carbono por tres razones fundamentales. Primero, el diseño espacial determina la capacidad real de acumulación de biomasa de la finca; como se evidenció en la muestra, la simple presencia de un sistema mixto no garantiza automáticamente altos volúmenes de captura (CRUs) si no existe un arreglo técnico que optimice la fotosíntesis sin reducir la productividad del café (Villarreyna, Avelino, & Cerda, 2020).

Segundo, la definición entre arbolado disperso y sistemas perimetrales es un insumo crítico para calibrar la verdad de terreno, permitiendo que los algoritmos de inteligencia artificial y teledetección satelital de plataformas como ACORN modelen y certifiquen el crecimiento de biomasa con alta precisión (Asómbate, 2025).

Finalmente, estos arreglos justifican los co-beneficios ecosistémicos exigidos por los compradores corporativos, demostrando que la disposición de los árboles no solo actúa como un sumidero de CO₂ a largo plazo, sino que reduce la huella de carbono operativa al disminuir la dependencia de fertilizantes sintéticos (Carbon Farming Academy, 2025) (Ver tabla 9).

Tabla 9

Clasificación de arreglos espaciales y tipologías de Sistemas Agroforestales Cafeteros (SAFC) en Quinchía, Risaralda.

| ID Caso | Departamento | Municipio | Vereda | Sistema Productivo | Tipo de sistema |
|---------|--------------|-----------|----------------|--------------------|-------------------|
| 1 | Risaralda | Quinchia | Cedral | SAFC | Arbolado disperso |
| 2 | Risaralda | Quinchia | Buenos Aires | SAFC | Arbolado disperso |
| 3 | Risaralda | Quinchia | El Guamo | SAFC | Arbolado disperso |
| 4 | Risaralda | Quinchia | Santa Elena | SAFC | Arbolado disperso |
| 5 | Risaralda | Quinchia | Santa Elena | SAFC | Arbolado disperso |
| 6 | Risaralda | Quinchia | Villa Rica | SAFC | Arbolado disperso |
| 7 | Risaralda | Quinchia | Villa Rica | SAFC | Arbolado disperso |
| 8 | Risaralda | Quinchia | Río Grande | SAFC | Arbolado disperso |
| 9 | Risaralda | Quinchia | Río Grande | SAFC | Arbolado disperso |
| 10 | Risaralda | Quinchia | Batero | SAFC | Arbolado disperso |
| 11 | Risaralda | Quinchia | Cruces | SAFC | Arbolado disperso |
| 12 | Risaralda | Quinchia | Santa Sofia | SAFC | Arbolado disperso |
| 13 | Risaralda | Quinchia | El Naranjo | SAFC | Perimetral |
| 14 | Risaralda | Quinchia | Quinchia Viejo | SAFC | Perimetral |
| 15 | Risaralda | Quinchia | El Lago | SAFC | Perimetral |
| 16 | Risaralda | Quinchia | Santa María | SAFC | Arbolado disperso |
| 17 | Risaralda | Quinchia | Primavera | SAFC | Perimetral |
| 18 | Risaralda | Quinchia | La Loma | SAFC | Arbolado disperso |
| 19 | Risaralda | Quinchia | Opirama | SAFC | Perimetral |
| 20 | Risaralda | Quinchia | Cedral | SAFC | Perimetral |
| 21 | Risaralda | Quinchia | El Lago | SAFC | Arbolado disperso |
| 22 | Risaralda | Quinchia | Opirama | SAFC | Arbolado disperso |
| 23 | Risaralda | Quinchia | Opirama | SAFC | Arbolado disperso |
| 24 | Risaralda | Quinchia | Santa Elena | SAFC | Arbolado disperso |
| 25 | Risaralda | Quinchia | La Ciénaga | SAFC | Arbolado disperso |
| 26 | Risaralda | Quinchia | El Higo | SAFC | Arbolado disperso |
| 27 | Risaralda | Quinchia | Los Medios | SAFC | Arbolado disperso |
| 28 | Risaralda | Quinchia | El Retiro | SAFC | Arbolado disperso |

Nota: Esta tabla detalla la configuración del paisaje y la distribución del componente leñoso para la muestra seleccionada de 28 fincas cafeteras en el municipio de Quinchía. La caracterización permite diferenciar dos modalidades de manejo predominantes.

Fuente: Elaboración propia con base en datos suministrados por el programa (Asómbrete, 2025)

Perfil Socio-Productivo y de Tenencia

El análisis de las variables estructurales de la finca confirma la vocación campesina de la muestra seleccionada.

Indicador de Minifundio (Tamaño)

Las 28 fincas caracterizadas presentan un área total promedio de 1.6 hectáreas, con una superficie efectiva en café de 1 hectárea promedio. Este resultado valida que el estudio se circunscribe a la economía de pequeños productores, alineándose estrictamente con el perfil objetivo del programa Asómbrate (fincas de 1 a 10 ha).

Cálculo del Promedio de Área (Indicador de Minifundio).

$$\frac{46,4 \text{ hectareas}}{28 \text{ productores}} = 1,6 \text{ hectareas/productor}$$

Seguridad Jurídica y Exclusividad (Enfoque Declarativo)

Tenencia: El 100% de los participantes acreditó su condición de propietarios mediante soporte documental (escritura pública o compraventa), garantizando la titularidad sobre los servicios ambientales.

Exclusividad: Bajo el principio de buena fe y reporte directo, se verificó que ninguno de los 28 productores participa en esquemas paralelos de carbono, asegurando la integridad de la contabilidad de las reducciones para el programa asómbrate.

Discusión

La presencia de especies leguminosas como el Guamo (Inga) coincide con las recomendaciones de Farfan (2013) quien destaca la importancia de estos árboles para la fijación de nitrógeno y el reciclaje de nutrientes, actuando como "bombas de nutrientes" que reducen la dependencia de fertilizantes sintéticos (F, Farfan, 2013). Esto es crucial,

dado que los resultados identifican que la etapa de cultivo es la mayor fuente de emisiones debido al uso de fertilizantes nitrogenados aumentando la emisión de GEI en la huella de carbono del café (Osorio, 2016 - 2017).

No obstante, el hecho de que solo una fracción de los productores haya superado el umbral de alta captura sugiere una brecha en el manejo de la densidad. (F, Farfan, 2013) advierte que, para maximizar los beneficios, se deben mantener niveles de sombra óptimos (35%-45%).

La discusión aquí radica en que la simple presencia de árboles (sistemas mixtos irregulares) no garantiza automáticamente altos volúmenes de biomasa capturable si no hay un diseño técnico o "Zonal" que optimice la fotosíntesis y el crecimiento, tal como se clasifica en la teoría agroforestal.

Objetivo 3

Estimar la captura de carbono generada por los Sistemas Agroforestales (SAF) en el municipio de Quinchía, Risaralda, a través de análisis satelital, para su respectiva compensación económica por bonos de carbono.

Para comprender el alcance de los resultados, es necesario detallar la rigurosa metodología mixta implementada, la cual digitalizó el proceso de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV). En una primera fase, el levantamiento de datos primarios in situ consistió en realizar visitas técnicas para delimitar los polígonos de cada finca con alta precisión espacial y ejecutar un inventario forestal exhaustivo, consolidando así la verdad de terreno

Posteriormente, esta información alimentó la plataforma ACORN, la cual aportó la segunda fase: la validación satelital. Mediante el uso de sensores remotos e Inteligencia Artificial, la

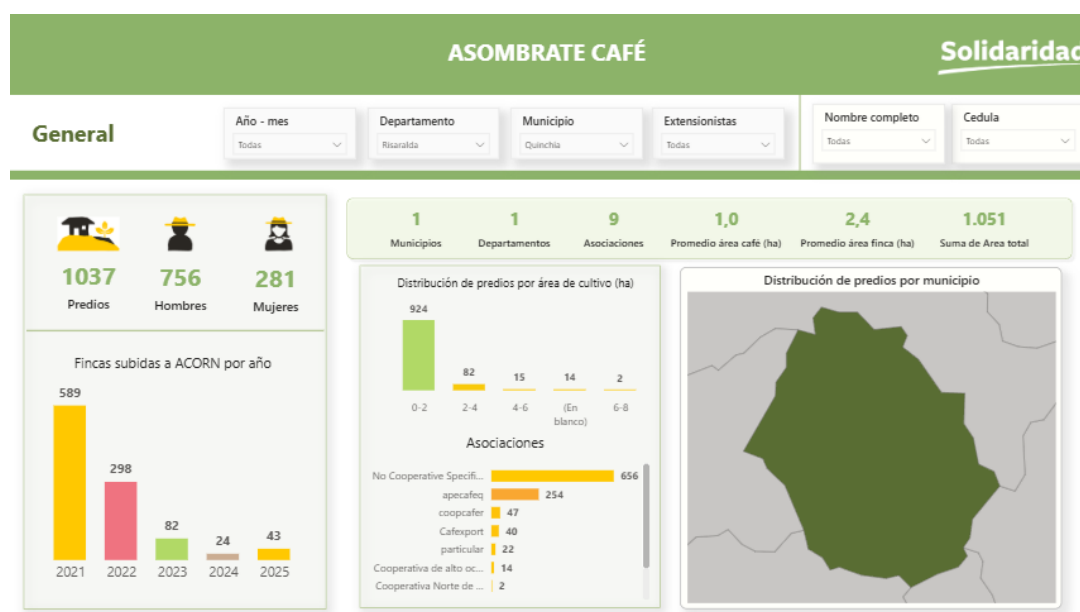
plataforma analizó los polígonos para monitorear el crecimiento anual de la biomasa leñosa de los árboles superiores a 1.5 metros de altura de forma remota.

Esta sinergia entre el trabajo de campo y la tecnología espacial permitió calcular de manera irrefutable el volumen de secuestro, certificando bajo el estándar internacional Plan Vivo que cada tonelada neta de CO₂ extraída de la atmósfera equivale a una Unidad de Remoción de Carbono (CRU) Consolidación de la línea base y georreferenciación.

La primera fase del análisis permitió establecer la "verdad de terreno" para el universo de estudio. Mediante el uso de dispositivos móviles con la aplicación ODK Collect y la función GeoShape, se digitalizó la geometría de los predios, asegurando la trazabilidad requerida por el estándar Plan Vivo. Ver figura 6

Figura 6

Interfaz del tablero de control "asómbrate Café" para la caracterización y trazabilidad de predios en Quinchía, Risaralda



Nota: La imagen presenta la visualización de datos recolectados en campo, donde se integran variables como la distribución de predios por área de cultivo, la ubicación geográfica mediante GeoShape y las métricas de participación por género. Esta plataforma permite consolidar la "verdad de terreno" bajo los estándares de Plan Vivo, facilitando el monitoreo de las fincas vinculadas al programa y asegurando el cumplimiento de los requisitos para los mercados de carbono (Asómbrate, 2025). Estimación satelital y filtro de desempeño.

Una vez migrada la información a la plataforma ACORN, se procedió a la modelación del crecimiento de biomasa para el periodo 2021-2023 mediante teledetección e inteligencia artificial.

Para efectos de esta investigación y garantizando la selección de sistemas con un impacto ambiental significativo, se aplicó un filtro de desempeño riguroso en el tablero de control (Power BI). El criterio de corte establecido fue una captura superior a 10 toneladas de CO₂e. Ver figura 7.

Figura 7

Visualización de indicadores de gestión y consolidado de ventas de unidades de remoción de Carbono (CRUs) en el tablero de control “asómbrate Café”



Nota: La imagen superior muestra el módulo general de caracterización, donde se registra la información geográfica y demográfica de los predios en Quinchía, Risaralda. La imagen inferior detalla el consolidado de ventas, destacando un total de 265 CRUs generadas por 28 predios (22 liderados por hombres y 6 por mujeres). Se observa la trazabilidad de las transacciones hacia compradores internacionales, principalmente Microsoft (265 CRUs), validando el cumplimiento de los filtros de desempeño y la viabilidad comercial del proyecto para el periodo evaluado (Asómbrate, 2025).

Identificación de Casos de Alto Impacto (Umbral >10 CRUs)

Dentro del grupo de 28 productores con captura positiva, el análisis de distribución de frecuencias permitió identificar un segmento de desempeño sobresaliente. Al aplicar un filtro de magnitud de impacto, se consolidó una muestra final de 6 fincas que superaron el umbral de 10 toneladas de CO₂ capturadas (10 CRUs). La determinación de este umbral y la selección de este segmento se fundamentaron en dos criterios específicos: primero, un criterio económico-financiero, ya que superar las 10 CRUs marca el punto en el que los pagos por servicios ambientales actúan como un complemento vital, diversificando la economía del hogar rural y acercando al caficultor a un ingreso digno; y segundo, un criterio técnico-agronómico, el cual evidencia que estos predios lograron una gestión superior del dosel, seleccionando especies clave (como las del género *Inga* o maderables de alto valor) para maximizar la acumulación de carbono en la biomasa leñosa. Este subgrupo no solo representa los casos de mayor éxito en la implementación, sino que valida la hipótesis de la Agricultura Climáticamente Inteligente (ACI), entendida como modelos rentables que mejoran la resiliencia climática y capturan carbono (Ver tabla 10).

Tabla 10

Desempeño y liquidación de los casos de alto impacto (>10 CRUs) en Quinchía, Risaralda

| Nº de Caso | CRUs 2021 | CRUs 2022 | Venta final 2023 inicio 2024 | Total pagado |
|------------|-----------|-----------|------------------------------|--------------|
| 1 | 10 | 22 | 1 | \$ 2.353.600 |
| 6 | 20 | 1 | 1 | \$ 1.557.280 |
| 14 | 10 | 48 | 1 | \$ 4.213.120 |
| 17 | 27 | 29 | 1 | \$ 4.053.760 |
| 22 | 23 | 2 | 1 | \$ 1.840.480 |
| 26 | 17 | 3 | 1 | \$ 1.488.640 |

Nota: La tabla presenta el desglose financiero y de captura de las seis unidades productivas que superaron el umbral de 10 toneladas de CO₂e (CRUs).

Se observa la variabilidad en la generación de biomasa entre los periodos 2021 y 2022, lo cual determinó los montos finales liquidados al inicio de 2024. Estos datos demuestran la viabilidad económica del esquema para pequeños productores con un manejo sobresaliente del componente arbóreo.

Fuente: Elaboración propia con base en datos suministrados por el programa (Asómbrate, 2025).

Periodicidad de pago y condiciones de comercialización

El mecanismo de compensación económica para los productores opera bajo una periodicidad estrictamente anual, supeditada a los resultados del monitoreo satelital del crecimiento de la biomasa arbórea. Para que se efectúe la liquidación, el sistema agroforestal debe haber generado una captura neta de al menos una tonelada de dióxido de carbono, la cual equivale a la emisión de una Unidad de Remoción de Carbono (CRU) certificada. Adicionalmente, es imperativo destacar que el desembolso del pago está condicionado a las dinámicas de la oferta y la demanda en el mercado voluntario internacional; es decir, la transacción y la transferencia de valor al caficultor solo se concretan si existe un comprador corporativo dispuesto a adquirir las CRUs generadas durante ese ciclo anual (Asómbrate, 2025).

Desempeño Económico Significativo

El análisis de los registros evidencia que estas 6 fincas lograron generar un volumen de activos ambientales (CRUs) capaz de representar un ingreso complementario tangible. Dado que el modelo transfiere el 80% del valor al productor, superar la barrera de las 10 CRUs sitúa a estas familias en un escenario donde la compensación por carbono deja de ser simbólica para convertirse en un flujo de caja relevante para la economía del hogar rural.

De la muestra total, 6 productores (14,29%) lograron superar el umbral de las 10 toneladas de captura. Este resultado evidencia que, aunque la mayoría posee sistemas agroforestales, solo una cuarta parte cuenta con la densidad, estructura y tasa de crecimiento de biomasa necesarias para generar volúmenes altos de CRUs en el corto plazo.

Validación de la Adicionalidad Ambiental

Desde la perspectiva biofísica, estas 6 fincas demostraron que sus inversiones en el componente arbóreo (realizadas en los últimos 5 años) han sido efectivas. Al cruzar estos datos con la literatura de referencia, se observa que estas fincas se acercan a los potenciales teóricos de reserva de carbono en biomasa para Sistemas Agroforestales Cafeteros (SAFC) (Andrade, 2008). Los (SAFC) alcanzan promedios de 30.2 tC/ha, distanciándose de manera significativa de los 10.5 tC/ha reportados para sistemas a plena exposición (Farfan, 2013). Esta amplia superioridad de la agroforestería es respaldada por investigaciones como las de Villarreyña, Avelino, & Cerda, (2020), quienes demostraron que las parcelas de café con árboles de sombra acumulan hasta 29.8 toneladas adicionales de carbono por hectárea en su biomasa aérea en comparación con los monocultivos a libre exposición (Villarreyña, Avelino, & Cerda, 2020).

La materialización del beneficio económico para los 6 productores seleccionados se ejecutó bajo el modelo de comercio justo de la plataforma ACORN.

Mecanismo de pago. Se garantizó la transferencia del 80% del valor final de venta de cada CRU directamente al caficultor, cumpliendo con lo establecido en el consentimiento informado.

Variabilidad del ingreso. Dado que el precio de la CRU fluctúa según la oferta y demanda en el mercado voluntario, los ingresos percibidos variaron entre productores,

siendo proporcionales a las toneladas capturadas (>10 ton) y al precio spot del momento de la transacción.

Impacto en el desarrollo rural. El ingreso derivado de la venta de bonos de carbono actuó como un incentivo financiero adicional a la venta del café, validando la hipótesis de que los servicios ecosistémicos pueden diversificar la economía de la finca cafetera familiar.

Contextualización y Estimación de la captura de carbono

El departamento de Risaralda se ha consolidado como un nodo estratégico para el programa, registrando un total de 15,399 CRUs pagadas a 1,536 beneficiarios, donde el municipio de Quinchía aporta significativamente con 1,036 predios vinculados a la iniciativa asómbrate café.

A escala del proyecto de grado aplicado, se analizó el comportamiento específico de la muestra seleccionada, validando la efectividad de los Sistemas Agroforestales existentes. El historial documentado de los productores en Quinchía confirma una tendencia positiva en la generación de servicios ecosistémicos, evidenciando no solo la captura inicial, sino un incremento sostenido en la capacidad de remoción de carbono de un año a otro.

El análisis de los flujos financieros derivados de la venta de unidades de remoción de Carbono (CRUs) evidencia el impacto económico del programa en los 28 caficultores de Quinchía.

La comercialización de las CRUs se realizó en el mercado internacional bajo la divisa euro (€), lo que permitió a los productores beneficiarse de la tasa de cambio frente al peso colombiano (COP). Según los datos consolidados el TRM promedio se observó un

incremento progresivo en la tasa representativa del mercado aplicada a las liquidaciones, pasando de \$4.410 COP en 2021 a \$4.660 COP para el periodo 2023/2024.

El productor recibió el 80% del valor de venta final. El total acumulado de 12.576,00 € se tradujo en una inyección económica de \$33.749.600 COP para el grupo de estudio. Esta relación cambiaria es fundamental, ya que el fortalecimiento del euro frente al peso durante los periodos de liquidación maximizó el ingreso neto del caficultor. El impacto económico promedio se distribuye en una captura promedio de 16,89 toneladas de CO₂ (CRUs) por productor durante el ciclo total. El ingreso promedio en euros fue de 449,14 € por productor y el ingreso promedio en pesos fue de \$1.205.342 COP por productor.

Es importante resaltar que este promedio es una base general, ya que, como se analizó en los casos de alto impacto, algunos productores superaron significativamente esta cifra debido a la densidad de su componente arbóreo.

La estimación de las Unidades de Remoción de Carbono (CRUs) para los años 2021 y 2022 demuestra la materialización de la adicionalidad ambiental en los predios evaluados (Ver tabla 11).

Tabla 11

Estimación y liquidación de incentivos por captura de carbono - nodo Quinchía (2021-2024)

| Periodo | Total CRUs 1 CRU = 1 ton | Pago en euros (80%) | TRM promedio | Total estimado (COP) |
|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 2021 | 184 | 5.232,00 € | \$4.410 | \$12.983.040 |
| 2022 | 257 | 6.496,00 € | \$4.470 | \$18.380.640 |
| 2023/2024 | 32 | 848,00 € | \$4.660 | \$2.385.920 |
| Promedio de cambio de 2024 | 473 | 12.576,00 € | | \$33.749.600 |

Nota. Esta tabla resume los beneficios económicos generados por la remoción de 473 toneladas de CO₂ (CRUs) por parte de 28 caficultores del municipio de Quinchía. Los cálculos consideran un precio base de 20 € por unidad, la transferencia directa del 80% al productor y la conversión a pesos colombianos utilizando la TRM histórica de cada periodo correspondiente a los años 2021 hasta 2024. (Solidaridad, 2025).

Autonomía del productor y retiro voluntario

La participación en el esquema de compensación de la plataforma ACORN se rige bajo el principio de estricta voluntariedad. De acuerdo con los términos contractuales, el caficultor/caficultora conserva en todo momento su autonomía y tiene el derecho de retirarse del programa cuando lo desee. Para hacer efectiva la terminación de su participación, el único requisito procedimental exigido es notificar su decisión por escrito al socio local (Solidaridad Network). Esta flexibilidad procedimental garantiza el respeto

absoluto por la autonomía del campesino, asegurando que el programa no perjudique su propiedad ni limite su libre decisión sobre el manejo y usufructo de su tierra.

El esquema de compensación establece que el periodo determinado para evaluar el desempeño agronómico y efectuar las liquidaciones es estrictamente anual. El pago se realiza directamente al productor mediante transferencia bancaria tras la validación satelital del crecimiento de los árboles, donde cada tonelada de remoción registrada equivale a una Unidad de Remoción de Carbono (CRU). Estas unidades se comercializan a un precio mínimo de 20 euros, transfiriéndose el 80% del valor de venta al titular. No obstante, el monto final está sujeto a variaciones anuales originadas por factores externos del mercado y depende de manera exclusiva del incremento efectivo de la biomasa. En este sentido, la regla técnica es estricta: si los árboles no presentan crecimiento durante el año evaluado, no se pueden generar nuevas unidades. Por consiguiente, la ausencia de desarrollo forestal en este periodo anual anula automáticamente el derecho a percibir el pago durante ese ciclo específico, dado que la cantidad de ingresos a recibir varía cada año dependiendo exclusivamente de los resultados agronómicos del proyecto (Asómbrate, 2025).

Discusión

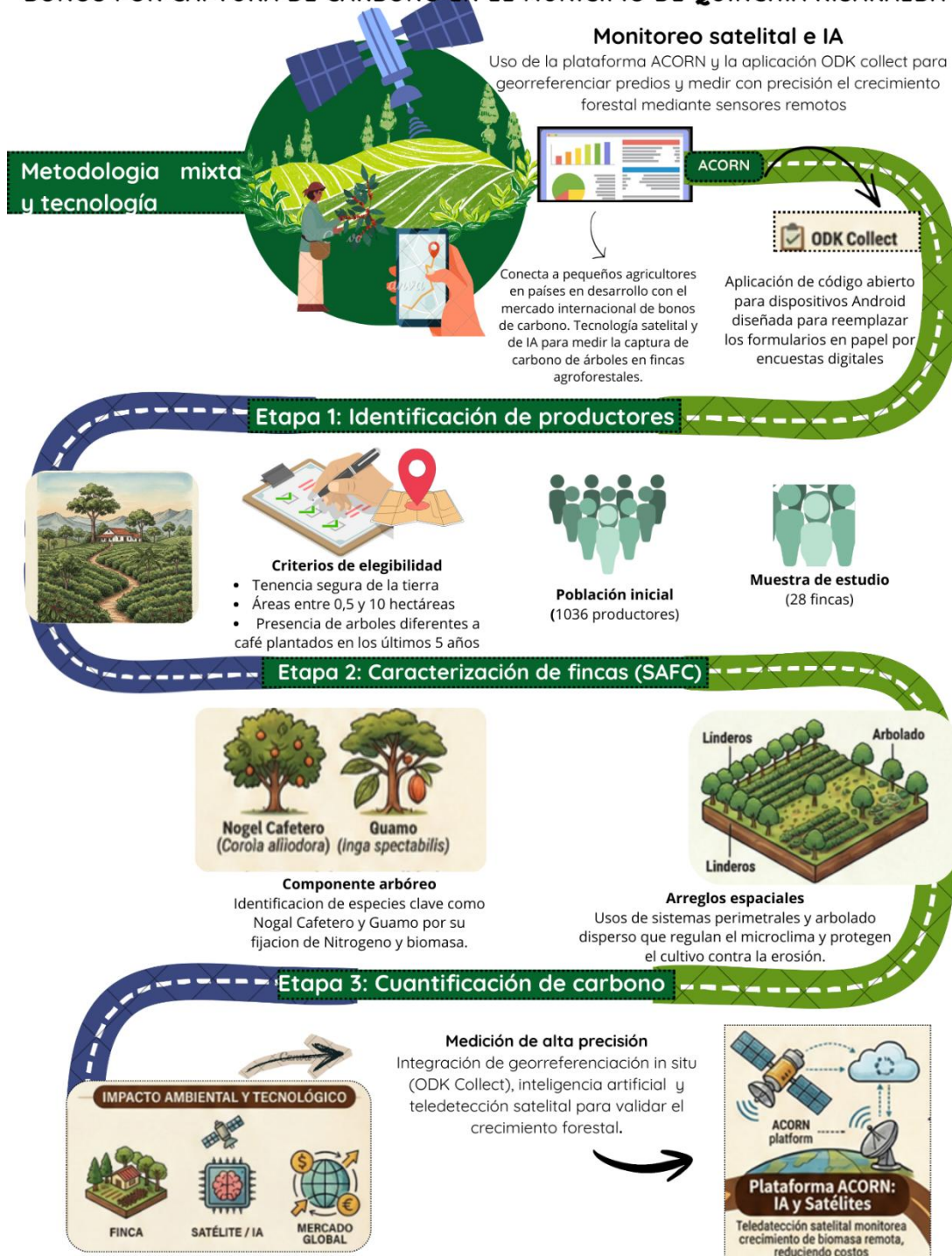
Este resultado económico materializa el concepto de "Agricultura de Carbono" propuesto por la (Carbon Farming Academy, 2025), transformando el servicio ecosistémico en un activo financiero transable. Al comparar la captura obtenida con los datos de (Gmünder, 2020), quienes establecen que los sistemas agroforestales (SAF) tienen una reserva de carbono promedio de 30.2 tC/ha frente a los 10.5 tC/ha de los sistemas a plena exposición, se evidencia que las fincas de Quinchía están transitando hacia una caficultura climáticamente inteligente.

La discusión es relevante al analizar el mecanismo de pago. A diferencia de los mercados tradicionales criticados por la baja transferencia de valor al origen, el esquema de ACORN/Solidaridad cumple con los principios de comercio justo y desarrollo rural sostenible definidos por la OIC (Fairtrade International, 2019), al generar ingresos que mejoran la resiliencia económica frente a la volatilidad de precios del café. Además, la estimación de estas 473 toneladas demuestra que es posible mitigar la huella de carbono del ciclo de vida del producto (HAP) desde la finca, alineándose con las exigencias del mercado europeo sobre productos verdes y libres de deforestación.

Figura 8

Infografía

RUTA ESTRATÉGICA HACIA LA SOSTENIBILIDAD CAFETERA: APLICACIÓN DE BONOS POR CAPTURA DE CARBONO EN EL MUNICIPIO DE QUINCHÍA RISARALDA



Resultados



De 1036 a 28 casos de éxito
Se seleccionó una muestra de 28 fincas para el análisis profundo de captura de carbono.



Los árboles identificados tienen entre 6 y 20 años, asegurando una fase activa de acumulación de carbono y estabilidad del ecosistema.

Inclusión y Equidad de Género

755 Hombres (73%) **281** Mujeres (27%)

Promoviendo el empoderamiento económico rural

Impacto económico y comercio justo

\$33.749.600 COP Pagados

Monto total liquidado a los productores por la venta de bonos en el mercado internacional (compradores como Microsoft y Bain).

80% Directo al Productor:

El modelo garantiza la transferencia del 80% del valor del bono asegurando un pago justo por el servicio ambiental

| Periodo | Total CRUs (Toneladas) | Paga Estimado (COP) | TRM Promedio |
|--------------|------------------------|---------------------|--------------|
| 2021 | 184 CRUs | \$12.983.040 | \$4.410 |
| 2022 | 257 CRUs | \$18.380.640 | \$4.470 |
| 2023/2024 | 32 CRUs | \$2.385.920 | \$4.660 |
| Total | 473 CRUs | \$33.749.600 | |

Pago por Desempeño Verificado:
Cada tonelada (CRU) tiene un precio base de 20 Euros, pagados tras la validación satelital del crecimiento real de los árboles

Conclusiones

Se demostró que el esquema de bonos de carbono, tecnológicamente asistido por la plataforma ACORN, es viable para la economía campesina de minifundio (promedio de 1.6 ha). A diferencia de los mercados de carbono tradicionales que exigen grandes extensiones, este modelo valida que la agregación de pequeños productores con "sana tenencia" de la tierra permite acceder a pagos por servicios ambientales, democratizando un mercado históricamente excluyente.

El pago por captura de carbono se realiza directamente al productor mediante transferencia bancaria tras la validación satelital del crecimiento forestal, donde cada tonelada de remoción registrada se convierte en una Unidad de Remoción de Carbono (CRU) con un precio base de 20 euros. Bajo este modelo, el 80% del valor de venta se transfiere al titular conforme a la información bancaria proporcionada, considerando que el monto anual es variable y que la emisión del incentivo no implica un pago automático ni garantizado cada año, pues la liquidación efectiva depende estrictamente de la comercialización de las unidades y de la existencia de compradores finales en el mercado; por lo tanto, el desembolso queda sujeto tanto al crecimiento comprobado de la biomasa como al éxito en la venta de las CRUs generadas, entendiéndose que la ausencia de desarrollo forestal o la falta de demanda comercial en un periodo determinado exime la obligación de pago en dicho ciclo.

Existe una brecha significativa entre poseer un Sistema Agroforestal (SAF) y generar una rentabilidad significativa en carbono. Aunque el 100% de la muestra cumplía con los criterios de elegibilidad, solo el 14,29% (6 productores) logró superar el umbral de 10 toneladas de CO₂ capturadas (10 CRUs). Esto concluye que la simple presencia de

árboles no garantiza altos ingresos; se requiere una gestión técnica enfocada en la densidad, la renovación y la estructura del dosel para maximizar la biomasa joven, que es la que efectivamente captura carbono adicional.

Las fincas estudiadas actúan como barreras efectivas contra las fuentes de degradación identificadas (erosión, quemas y deforestación). Al validar la captura de carbono en estos predios, se confirma que los sistemas agroforestales (SAF) no solo generan un activo financiero (CRU), sino que mitigan los pasivos ambientales del cultivo tradicional, reduciendo la huella de carbono descrita en el ciclo de vida del café.

El programa evidencia un componente de inclusión social relevante. Con un 27.1% de participación femenina en la titularidad de los predios validados, la venta de bonos de carbono se perfila no solo como una estrategia ambiental, sino como una herramienta de empoderamiento económico para la mujer rural en Quinchía, fortaleciendo el tejido social y la economía colaborativa local.

El ingreso derivado de los bonos de carbono, aunque variable, funciona como un mecanismo de diversificación de ingresos que amortigua la volatilidad de los precios del café. Al transferir el 80% del valor directamente al productor, se valida un modelo de comercio justo que incentiva la permanencia de las familias en el campo y fomenta la adopción de prácticas de Agricultura Climáticamente Inteligente (ACI).

Recomendaciones

Con base en los hallazgos del estudio y con el objetivo de fortalecer la estrategia de desarrollo rural en la región, se sugieren las siguientes acciones:

Para los productores y asociaciones locales

Transición a la agricultura de carbono: Se recomienda cambiar el paradigma de ver el árbol solo como sombra reguladora a verlo como un "cultivo productivo" de biomasa.

Los productores deben enfocar sus esfuerzos en la resiembra y densificación de especies maderables nativas en linderos y lotes, priorizando árboles jóvenes que garanticen la adicionalidad requerida para superar el umbral de las 10 CRUs y aumentar la rentabilidad.

Manejo de residuos para maximizar la huella: Considerando la imagen de fuentes de emisión (quemadas, manejo inadecuado de pulpa), se recomienda integrar el manejo de los subproductos del café (compostaje de pulpa) como parte de la estrategia de la finca.

Reducir las emisiones por metano en el beneficio complementa la captura de los árboles y mejora la calificación ambiental del predio ante compradores internacionales.

Para Solidaridad Network y el Programa Asómbrate:

Asistencia técnica diferenciada: Dado que el 74% de la muestra no alcanzó el alto desempeño de captura, se sugiere implementar un plan de asistencia técnica focalizado en renovación forestal para los productores con árboles envejecidos o baja densidad, ayudándoles a planificar siembras que aumenten su stock de carbono sin comprometer la productividad del café.

Apalancamiento para la regulación EUDR: Se recomienda utilizar la data georreferenciada y la trazabilidad ya lograda por la plataforma ACORN para certificar no solo el carbono, sino el cumplimiento de la norma de "Cero Deforestación" de la Unión

Europea. Esto daría un valor agregado doble al café de Quinchía, abriendo puertas a mercados preferenciales en Europa.

Para la Academia y Futuras Investigaciones:

Estudios longitudinales de ingreso: Se sugiere realizar estudios posteriores que correlacionen la fluctuación del precio internacional del bono de carbono con la estabilidad económica de las familias cafeteras a lo largo de 5 años, para evaluar si este incentivo es suficiente para evitar el cambio de uso del suelo o la migración rural.

Investigación de especies nativas: Profundizar en el potencial de captura específico de las especies locales identificadas (Nogal Cafetero, Guamo Churimo) para crear modelos alométricos locales que afinen aún más la medición satelital en la zona andina colombiana.

Referencias Bibliográficas

- Alcaldía. (Mayo de 2024). *Acuerdo N° 007 de mayo 29 de 2024, adopta el Plan de Desarrollo Quinchía Incluyente y con Oportunidades, para el periodo de gobierno 2024 – 2027*. Obtenido de Alcaldía de Quinchia Risaralda: <https://www.quinchia-risaralda.gov.co/normatividad/acuerdo-n-007-de-mayo-29-de-2024-por-el-cual-se-adopta>
- Altieri, M. (1999). *Bases científicas para una agricultura sustentable*. Obtenido de Montevideo: Nordan Comunidad:
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/55767240/agroecologia_primeraparte.pdf_unidad_1-libre.pdf?1518283829=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAgroecologia_primeraparte_pdf_unidad.pdf&Expires=1756932041&Signature=IlczKzl67PczLkCDOt3NbcwDeVy
- Andrade, H. &. (2008). *researchgate.net/publication*. Obtenido de [Valoracion_biofisica_y_financiera_de_la_fijacion_de_carbono_por_uso_del_suelo_en_fincas_cacaoteras](https://www.researchgate.net/publication/323967480_Valoracion_biofisica_y_financiera_de_la_fijacion_de_carbono_por_uso_del_suelo_en_fincas_cacaoteras):
https://www.researchgate.net/publication/323967480_Valoracion_biofisica_y_financiera_de_la_fijacion_de_carbono_por_uso_del_suelo_en_fincas_cacaoteras_indigenas_de_Talamanca_Costa_Rica
- Asómbrate. (2025). *Asómbrate*. Obtenido de <https://asombrate.org/colombia/#pre-registro>
- Blackman, A., & Rivera, J. (2011). Producer-level benefits of sustainability certification. *Conservation Biology*, 25(6), 1176-1185.
- Carbon Farming Academy. (2025). *Academia de Carbono*. Obtenido de Carbon Farming Academy: <https://colombia.carbonfarmingacademy.org/>

- Carvajal-Agudelo, B. N. (2020). *Captura de carbono en biomasa de sistemas de uso del suelo, municipio de Yopal, Casanare, Colombia. ORINOQUIA* , 24 (1), 13-22.
Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-37092020000100013
- CEPAL. (Noviembre de 2012). *cepal.org*. Obtenido de Huella de carbono y exportaciones de alimentos: guía práctica: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/4013-huella-carbono-exportaciones-alimentos-guia-practica>
- connectAmericas. (2024). Reglas para exportar café a la Unión Europea. *connectAmericas*.
Obtenido de <https://connectamericas.com/es>
- DANE. (2025). *Departamento Administrativo Nacional de Estadística* . Obtenido de Boletín Técnico Cuentas Nacionales - Producto Interno Bruto (PIB) Agropecuario. :
Obtenido de [https://www.dane.gov.co/...](https://www.dane.gov.co/)
- F, Farfan. (2013). Establecimiento de sistemas agroforestales con café. *En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura*. Colombia: (Vol. 2, pp. 44–63). Cenicafé.
- Fairtrade International. (2019). *Criterio de Comercio Justo Fairtrade para Organizaciones de pequeños productores*. Obtenido de Fairtrade America: (Versión 03.04.2019_v2.9). <https://www.fairtrade.net/standards.html>
- Farfan, F. (2013). Establecimiento de sistemas agroforestales con café. *En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura. Cenicafe*. Obtenido de Cenicafe.

- Federacion Nacional de Cafeteros. (29 de abril de 2024). *FONC*. Obtenido de <https://federaciondefcafeteros.org/wp/listado-noticias/los-primeros-lotes-de-cafe-de-colombia-libres-de-deforestacion-se-enviaron-a-la-union-europea/>
- Federacion Nacional de Cafeteros Risaralda. (2023). *Magazin Cafetero*. (F. N. Risaralda, Ed.) Obtenido de <https://risaralda.federaciondefcafeteros.org/quinchia-la-villa-de-los-cerros/>
- FNC. (16 de Diciembre de 2025). *Informacion caficultura en Quinchia Risaralda*. Quinchia Risaralda, Colombia.
- FONC, Dirección Ambiental. (2023). *Dirección Ambiental*. Obtenido de La caficultura y el mercadode carbono: <https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/cum/article/download/1410/1592>
- Gmünder, S. T.-V. (2020). *Huella Ambiental del Café en Colombia*. Obtenido de Cenicafé: <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4243>
- Hernández-Núñez, H.-E. A.-J.-S.-C.-A.-R.-S.-R.-G.-A.-T. (2021). *Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en los Llanos Orientales de Colombia*. *Revista de Biología Tropical*. Obtenido de Scielo: <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v69i1.42959>
https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442021000100352
- Juárez-Sánchez, J. P. (2016). *Vulnerabilidad social y biológica ante el cambio climático*. *Repositorio ECOSUR*.
- Osorio, A. C. (2016 - 2017). *Huella de Carbono del café (Coffea arabica)*. Obtenido de *Huella de Carbono del café (Coffea arabica)*:

<https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/c52ef4cc-7fb0-4a0f-bd0b-6ee4b64a2169/content>

Rabobank Acorn. (2024). *Acorn, Our Certification*. Obtenido de

<https://acorn.rabobank.com/en/our-certification/>

Robayo, D. (2025). *Repositorio Institucional UNAD*. Obtenido de

<https://repository.unad.edu.co/handle/10596/70530>

Salazar-Duque, Y. (2018). Evaluación de la sustentabilidad cultural y ambiental de la

minería tradicional en Quinchía, Risaralda. *Caso de estudio corporación área de*

reserva especial minera (CORPOARE). Revista Luna Azul, (47). doi:129-158 DOI:

10.17151/luaz.2019.47.8.

Solidaridad. (septiembre de 2025). *Acorn - Cafe*. Obtenido de

[https://app.powerbi.com/groups/me/reports/02fa0d4c-9346-4f9a-9a23-](https://app.powerbi.com/groups/me/reports/02fa0d4c-9346-4f9a-9a23-1cff6590d293/ReportSectiondc1ef20c3a21ab90b388?experience=power-bi)

[1cff6590d293/ReportSectiondc1ef20c3a21ab90b388?experience=power-bi](https://app.powerbi.com/groups/me/reports/02fa0d4c-9346-4f9a-9a23-1cff6590d293/ReportSectiondc1ef20c3a21ab90b388?experience=power-bi)

Solidaridad Latam. (3 de Septiembre de 2020). Cultivar para comer y para compartir,

estrategia para que no falte la comida en la familia. Colombia. Obtenido de

[https://solidaridadlatam.org/news/cultivar-para-comer-y-para-compartir-estrategia-](https://solidaridadlatam.org/news/cultivar-para-comer-y-para-compartir-estrategia-para-que-no-falte-la-comida-en-la-familia/)

[para-que-no-falte-la-comida-en-la-familia/](https://solidaridadlatam.org/news/cultivar-para-comer-y-para-compartir-estrategia-para-que-no-falte-la-comida-en-la-familia/)

Solidaridad Latinoamericana. (2025). Obtenido de <https://solidaridadlatam.org/>

TodaColombia. (21 de febrero de 2019). *TodaColombia*. Obtenido de

[https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/risaralda/municipios-](https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/risaralda/municipios-division-politica.html)

[division-politica.html](https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/risaralda/municipios-division-politica.html)

Union Europea. (2023). *European Commission*. Obtenido de

https://environment.ec.europa.eu/topics/forests/deforestation/regulation-deforestation-free-products_en

UPRA. (2023). *agronet*. Obtenido de GOV.CO: [https://agronet.gov.co/noticias/cerca-de-](https://agronet.gov.co/noticias/cerca-de-549000-familias-cafeteras-producen-mas-de-106-millones-de-sacos-de-cafe-cada-ano#:~:text=A%C3%B1o%20En%20Colombia-)

[549000-familias-cafeteras-producen-mas-de-106-millones-de-sacos-de-cafe-cada-](https://agronet.gov.co/noticias/cerca-de-549000-familias-cafeteras-producen-mas-de-106-millones-de-sacos-de-cafe-cada-ano#:~:text=A%C3%B1o%20En%20Colombia-)

[ano#:~:text=A%C3%B1o%20En%20Colombia-](https://agronet.gov.co/noticias/cerca-de-549000-familias-cafeteras-producen-mas-de-106-millones-de-sacos-de-cafe-cada-ano#:~:text=A%C3%B1o%20En%20Colombia-)

[,Cerca%20de%20549.000%20familias%20cafeteras%20producen%20m%C3%A1s](https://agronet.gov.co/noticias/cerca-de-549000-familias-cafeteras-producen-mas-de-106-millones-de-sacos-de-cafe-cada-ano#:~:text=A%C3%B1o%20En%20Colombia-)

[%20de%2010%2C6,caf%C3%A9%20cada%20](https://agronet.gov.co/noticias/cerca-de-549000-familias-cafeteras-producen-mas-de-106-millones-de-sacos-de-cafe-cada-ano#:~:text=A%C3%B1o%20En%20Colombia-)

Villarreyana, R., Avelino, J., & Cerda, R. (2020). Obtenido de Adaptación basada en

ecosistemas: efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en

cafetales: <https://www.redalyc.org/journal/437/43762994016/43762994016.pdf>