

Héctor Ordóñez ✦ Amanda López ✦ Iván Delgado

Agroecosistemas Cafeteros

Caracterización y Evaluación



Editorial
Universidad de Nariño

èditorial
Universidad de **Nariño**

Agroecosistemas
Cafeteros
Caracterización y Evaluación

Agroecosistemas Cafeteros

Caracterización y Evaluación

Héctor Ramiro Ordóñez Jurado
Amanda López Coral
Iván Andrés Delgado Vargas

editorial
Universidad de **Nariño**

Ordóñez Jurado, Héctor Ramiro

Agroecosistemas cafeteros : caracterización y evaluación / Héctor Ramiro Ordóñez Jurado, Amanda López Coral, Iván Andrés Delgado Vargas —1ª. Ed.-- San Juan de Pasto : Editorial Universidad de Nariño, 2026.

203 páginas : ilustraciones, fotografías, tablas

Incluye Referencias bibliográficas p. 174 - 201

ISBN: 978-628-7864-72-6 Impreso

ISBN: 978-628-7864-73-3 Digital

1. Cultivo de café 2. Sistemas de producción cafeteros—Tipificación 3. Sistemas cafeteros—Vegetación arbórea asociada 4. Agroecosistemas cafeteros—Nariño (Colombia) 5. Diversidad de especies leñosas—Sistemas cafeteros 6. Sistemas de producción de café—sustentabilidad 7. Cuantificación de carbono—Producción de café 8. Producción de café—Colombia—Impacto en el cambio climático. I. López Coral, Amanda II. Delgado Vargas, Iván Andrés

633.7386158 O656a – SCDD-Ed. 22



SECCIÓN DE BIBLIOTECA

Agroecosistemas Cafeteros - Caracterización y Evaluación

© Editorial Universidad de Nariño

© Héctor Ramiro Ordóñez Jurado

Amanda López Coral

Iván Andrés Delgado Vargas

ISBN Impreso: 978-628-7864-72-6

ISBN Digital: 978-628-7864-73-3

DOI: <https://doi.org/10.22267/lib.udn.067>

Primera edición

Corrección de estilo: Luz Elida Vera Hernández

Diseño y diagramación: Angie Gabriela Ordoñez Chaves

Portada intervenida con apoyo de inteligencia artificial mediante OpenAI ChatGPT

Fecha de publicación: Mayo 2026

San Juan de Pasto - Nariño - Colombia

Prohibida la reproducción total o parcial, por cualquier medio o cualquier propósito, sin la autorización escrita de sus Autores o de la Editorial Universidad de Nariño

Agradecimientos

Agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigaciones e Interacción Social (VIIS) de la Universidad de Nariño, por el apoyo financiero y por su compromiso con el fortalecimiento de la investigación académica.

De igual manera, se reconoce de manera especial a las familias cafeteras, quienes, mediante la transmisión de sus conocimientos, saberes tradicionales y experiencias, contribuyeron de forma significativa al desarrollo de esta obra.

Se extiende un especial reconocimiento a los ingenieros agroforestales, investigadores y demás colaboradores del proyecto, por su valioso acompañamiento, aportes técnicos y dedicación a lo largo de la ejecución de la investigación.

Se agradece al grupo de Investigación en Producción de Frutales Andinos (GPFA) de la Universidad de Nariño, por su respaldo institucional, orientación científica y apoyo permanente durante las diferentes etapas del proceso investigativo.

Contenido

Prólogo	10
---------------	----

Capítulo 1

Tipificación de los Sistemas Cafeteros	16
1.1 Introducción	17
1.2 Marco Conceptual	18
1.2.1. Sistemas de Producción	18
1.2.2 Tipificación de los Sistemas de Producción	19
1.3 Tipificación de Sistemas de Café	21
1.3.1 Información Secundaria	22
1.3.2 Tamaño de Muestra	23
1.3.3 Información Primaria	23
1.3.4 Elaboración de la Base de Datos	24
1.3.5 Selección de Variables	24
1.3.6 Determinación de los Sistemas de Producción	25
1.3.7 Características Generales de los Sistemas Productivos Identificados	28
Conclusiones	42

Capítulo 2

Diversidad Florística e Importancia Cultural de la Vegetación Arbórea en Los Sistemas Cafeteros	43
2.1 Introducción	44
2.2 Marco Conceptual	46
2.2.1 Cultivo del Café	46
2.2.2 Agroecosistemas Cafeteros	47
2.2.3 Biodiversidad en los Ecosistemas Cafeteros	48
2.2.4 Sombra en el Cultivo del Café	49
2.2.5 Especies Leñosas Asociadas al Sistema Productivo de Café ..	52
2.2.6 Efecto de los Árboles sobre la Producción de Café	53
2.3 Diversidad de Especies Leñosas en Sistemas Cafeteros	54
2.3.2 Índice de Importancia Cultural de las Especies Leñosas (IIC) en Sistemas Cafeteros	60
Conclusiones	67

Capítulo 3

Evaluación de la Sustentabilidad en Sistemas de Producción de Café (<i>Coffea arabica</i> L.)	69
3.1 Introducción	70
3.2 Marco Conceptual	71
3.2.1 Evaluación de la Sustentabilidad	71
3.2.2 Sustentabilidad en la Agricultura	73
3.2.3 Sustentabilidad y sus Dimensiones	74
3.2.4 Indicadores de Evaluación	76
3.3 Evaluación de la Sustentabilidad de Agroecosistemas Cafeteros ..	77
3.3.1 Índice General de Sustentabilidad (IGS)	78
Conclusiones	140

Capítulo 4

Captura y Almacenamiento de Carbono de los Sistemas de Producción de Café (<i>Coffea arabica</i> L.)	141
4.1. Introducción	142
4.2 Marco Conceptual	144
4.2.1 La Agricultura frente al Cambio Climático	144
4.2.2 La Producción de Café en Colombia y el Impacto del Cambio Climático	146
4.2.3 Fijación de Carbono	148
4.2.4 Captura y Almacenamiento de Carbono	149
4.2.5 Carbono en Biomasa Aérea	150
4.2.6 Carbono en la Biomasa Bajo el Suelo	152
4.2.7 Carbono Orgánico del Suelo	153
4.2.8 Cuantificación de Biomasa para Estimar Carbono	155
4.3 Cuantificación del Carbono en Sistemas Productivos <i>Coffea arabica</i> L.	159
4.3.1 Fase de Campo	159
4.3.2 Tratamientos	159
4.3.3 Métodos para Determinar Biomasa Aérea	160
4.3.4 Unidades de Muestreo y Tamaño de Subparcelas	161
4.3.5 Variables Evaluadas	162

4.3.6 Determinación de Biomasa en Plantas de Café y Árboles de Sombra	163
4.3.7 Estimación de Carbono	164
4.3.8 Carbono Almacenado en el Suelo	165
4.3.9 Total de Carbono en el Sistema	166
Conclusiones	172
Referencias	174

PRÓLOGO

En Colombia y particularmente en el departamento de Nariño, el café, trasciende su condición de cultivo para convertirse en un tejido vivo, que entrelaza historia, cultura y naturaleza. Este grano, ha sido protagonista de transformaciones sociales, económicas y ambientales, desde los sistemas tradicionales bajo sombra, herencia de prácticas ancestrales hasta los monocultivos intensivos, impulsados por la Revolución Verde. No obstante, en las últimas décadas, estos sistemas productivos, han enfrentado desafíos críticos: prácticas agrícolas insostenibles, fluctuaciones climáticas exacerbadas por el calentamiento global y presiones socioeconómicas, que amenazan su viabilidad a largo plazo.

A lo largo de este manuscrito, exploramos, cómo los Sistemas Agroforestales cafeteros, además de conservar ecosistemas frágiles, se erigen como pilares de resiliencia para las comunidades rurales; estos sistemas, no solo preservan la biodiversidad, sino que también mitigan los efectos del cambio climático al actuar como sumideros de carbono, posicionándose, como aliados clave en la lucha contra el aumento de gases de efecto invernadero. Combinando investigaciones científicas rigurosas con el conocimiento ancestral de los caficultores, proponemos un replanteamiento del futuro del café, bajo un enfoque integral, donde la sustentabilidad ambiental, el bienestar social y la viabilidad económica, converjan en un modelo de desarrollo sustentable.

Los sistemas cafeteros asociados con leñosas, emergen como una solución prometedora en un contexto global, urgido por acciones concretas, frente a la crisis climática; al adoptar este modelo, no solo se garantiza la continuidad de un cultivo emblemático, sino que se fortalece un legado, donde el café sigue siendo sinónimo de vida, tradición y progreso, para las futuras generaciones.

Este trabajo, se realizó en varios municipios cafeteros del departamento de Nariño; surge como testimonio de la evolución del cultivo y, sobre todo, como una guía práctica para reconciliar la productividad con la conservación. A través de cuatro capítulos interconectados, analizamos: Tipificación de Sistemas Agroforestales: caracterización de las prácticas predominantes y su evolución histórica; Diversidad florística: el rol de las especies asociadas en la estabilidad ecológica y productiva; Sostenibilidad: evaluación de la capacidad de estos sistemas para equilibrar rendimiento y conservación y Secuestro de carbono: cuantificación del potencial de los sistemas café-árboles, para capturar y almacenar carbono.

Capítulo 1: Tipificación de los Sistemas Cafeteros. El sector cafetero colombiano, se caracteriza, por su heterogeneidad, determinada por la diversidad de sistemas de producción, contextos ambientales y realidades socioeconómicas; comprender esta complejidad, resulta fundamental, para formular recomendaciones técnicas efectivas y políticas públicas diferenciadas. En este marco, la Tipificación de Sistemas Cafeteros, emerge como una herramienta metodológica clave, ya que permite clasificar, caracterizar y validar, dichos sistemas, bajo un enfoque integral, que trasciende el análisis agronómico tradicional e incorpora las dimensiones ambiental, social y económica.

Este estudio empleó técnicas estadísticas multivariantes, para identificar cuatro sistemas predominantes: Café Bajo Sombra, Café Bajo Semisombra, Café Asociado con Plátano y Café a Libre Exposición Solar. Estas tipologías, no solo reflejan distintas estrategias productivas, sino también adaptaciones a presiones climáticas, fluctuaciones del mercado y tradiciones culturales.

Un aspecto relevante, es la relación, entre el manejo del sombrío y la sostenibilidad, donde los sistemas diversificados con árboles nativos e introducidas, presentan ventajas en conservación de suelos, biodiversidad y resiliencia climática, aunque con rendimientos moderados. Por el contrario, los monocultivos intensivos, si bien logran mayor productividad a corto plazo, enfrentan riesgos, como erosión, degradación de suelos

y alta dependencia de insumos externos; esta dicotomía, evidencia tensiones entre productividad y sustentabilidad, lo que plantea, la necesidad de modelos de asistencia técnica, que equilibren ambos aspectos.

La tipificación de estos agroecosistemas cafeteros, no solo facilita la comprensión de las dinámicas locales, sino que también, ofrece una base para políticas públicas contextualizadas y estrategias de desarrollo rural, adaptadas a las necesidades específicas de los productores. Al analizar las ventajas y limitaciones de cada sistema, este Capítulo, invita a reflexionar sobre el futuro del sector cafetero, donde la innovación técnica debe ir de la mano con la preservación de los recursos naturales y el bienestar de las comunidades.

Capítulo 2: Diversidad Florística e Importancia Cultural de la Vegetación Arbórea en los Sistemas Cafeteros. Desde sus orígenes, la caficultura en Colombia, ha estado indisolublemente ligada a la presencia de árboles. Este Capítulo, explora esa relación ancestral, donde los cafetales no eran meros cultivos, sino sistemas vivos, dinámicos y biodiversos; bajo el dosel de especies nativas, como el guamo (*Inga* spp.), los cítricos (*Citrus* spp), el aguacate (*Persea americana* Mill) y el plátano (*Musa paradisiaca* L.), estos árboles no solo ofrecían sombra al café, sino que enriquecieron el suelo, mitigaron plagas y garantizaron seguridad alimentaria a las comunidades.

Sin embargo, este equilibrio dinámico se fracturó, con la llegada de la Revolución Verde en la década de 1970, con el impulso hacia el monocultivo; promovido en nombre de la eficiencia y el rendimiento, trajo consigo, consecuencias ambientales y sociales profundas: suelos degradados, pérdida acelerada de biodiversidad y una marcada reducción en los servicios ecosistémicos que antes sostenían no solo los cafetales, sino también las comunidades que dependían de ellos. Frente a este panorama, el Capítulo analiza, cómo en regiones cafeteras de Nariño, los caficultores resisten, adaptan y reinventan sus prácticas; últimamente, estos productores combinan saberes tradicionales con evidencia científica, para diseñar Sistemas Agroforestales más resilientes, donde los árboles recuperan su papel protagonista.

Un aporte central de este Capítulo, es el análisis del Índice de Importancia Cultural (IIC), una herramienta que cuantifica el valor multifuncional de la vegetación arbórea en los cafetales. Más allá de su función ecológica como reguladores microclimáticos o protectores de fuentes hídricas, estos árboles emergen, como pilares económicos y culturales: proveen frutos, madera, medicina y, sobre todo, un sentido de identidad. Los árboles en los cafetales, no son un accesorio, son aliados indispensables en la construcción de sistemas alimentarios justos, biodiversos y sustentables.

Capítulo 3: Evaluación de la Sustentabilidad en Sistemas de Producción de Café. La sustentabilidad, se ha convertido en un eje central para el futuro de la caficultura; surge como una respuesta rigurosa y multidimensional a esa urgencia, integrando enfoques ambientales, económicos y sociales, para evaluar la viabilidad de los sistemas cafeteros. Su objetivo, es analizar su capacidad para perdurar sin comprometer los recursos naturales ni el bienestar de las comunidades que dependen de ellos.

A través de un marco metodológico, que combina indicadores cuantitativos y cualitativos, se diagnostica el estado actual de los sistemas productivos y se proponen estrategias para su transición hacia modelos más resilientes y equitativos, integrando el conocimiento tradicional y agentes de cambio hacia una producción sustentable.

Se analizan los sistemas cafeteros, mediante indicadores ambientales (como biodiversidad, calidad del suelo y uso de agroquímicos), económicos (rentabilidad) y sociales (bienestar de las familias cafeteras). Se aplica el Índice General de Sustentabilidad (IGS), una herramienta integral, que permite comparar el desempeño de cada sistema. Los resultados demuestran, que los sistemas diversificados, como el Café Bajo Sombra, ofrecen mayores beneficios ecológicos y resiliencia, mientras que los monocultivos, enfrentan desafíos como la degradación del suelo y la dependencia de insumos externos.

Se subrayan, la necesidad de equilibrar productividad con prácticas sostenibles, promoviendo técnicas agroecológicas, como el manejo integrado de sombra y la reducción de pesticidas, para garantizar la viabilidad a largo plazo del sector. Para lograr lo anterior, no solo un diagnóstico técnico integral, es suficiente, sino también, es imprescindible integrar saberes tradicionales y científicos, en la construcción de una caficultura verdaderamente sustentable.

Capítulo 4: Captura y Almacenamiento de Carbono en los Sistemas de Producción de Café. Este Capítulo, surge como una contribución científica clave, para entender el papel de los agroecosistemas cafeteros en la mitigación del cambio climático. A través de una investigación rigurosa, se analiza la capacidad de diferentes sistemas de producción de café desde monocultivos hasta Sistemas Agroforestales, con especies, como el guamo (*Inga densiflora Benth.*), el limón tahití (*Citrus limon*) *Citrus x latifolia* Tanaka Ex Q. Jiménez, y el carbonero (*Albizia carbonaria* Britton) para actuar como sumideros de carbono, tanto en su biomasa aérea como en el suelo.

El estudio se desarrolló en el municipio de Consacá, Nariño, mediante metodologías no destructivas y ecuaciones alométricas validadas; se cuantificó el carbono almacenado en diferentes estratos (hojarasca, biomasa vegetal y suelo), demostrando que los Sistemas Agroforestales, superan significativamente a los cultivos de Café a Libre Exposición en su capacidad de secuestro de carbono.

Los resultados, no solo aportan evidencia científica sobre la importancia de estos sistemas en la captura de carbono, sino que también ofrecen herramientas prácticas para agricultores, tomadores de decisiones y actores del sector. La adopción de estas prácticas, no solo contribuye a mitigar el cambio climático, sino que también fortalece la resiliencia de los caficultores, mejora la biodiversidad y promueve la sustentabilidad de los paisajes rurales.

A través de este estudio, se evalúa la eficiencia de distintos Arreglos Agroforestales, demostrando, que las asociaciones de café con especies arbóreas superan ampliamente a los monocultivos tradicionales en capacidad de almacenamiento de carbono. Los hallazgos son contundentes: estos sistemas no solo secuestran mayores cantidades de carbono en biomasa y suelo, sino que también incrementan la biodiversidad, mejoran la fertilidad del terreno y protegen a los productores frente a fenómenos climáticos extremos.

Finalmente, este libro, es el fruto de años de investigación y colaboración con comunidades cafeteras e instituciones académicas mediante pasantías y trabajos de grado; su objetivo es ser una herramienta para técnicos, investigadores y productores comprometidos con una caficultura más justa y resiliente, en un contexto de cambio climático y mercados globales.

Héctor Ramiro Ordóñez Jurado I.F., Ph.D.
Editor

Capítulo 1
**Tipificación de los
Sistemas Cafeteros**

1.1 Introducción

En la mayoría de los casos, las recomendaciones y la transferencia de tecnología ofrecidas a los agricultores, frecuentemente no han sido apropiadas, ya que las investigaciones que las sustentan, suelen realizarse sin considerar la diversidad de circunstancias y los contextos económicos, sociales, culturales y ambientales. En consecuencia, estas propuestas resultan poco pertinentes, para las condiciones específicas de cada productor, por ello, se requiere un enfoque sistémico, que permita analizar la realidad de manera integral, identificando las distintas combinaciones de estos factores en el ámbito rural y su relación con los tipos de sistemas productivos (Pokorny *et al.*, 2011; Escobar & Berdegúé, 1990).

Las explotaciones agropecuarias en fincas, presentan un alto grado de heterogeneidad, a pesar de compartir un entorno natural, económico, sociopolítico e institucional similar; estas desarrollan componentes e interacciones, que generan estructuras y propiedades distintivas, las cuales las asemejan entre sí, pero las diferencian de sistemas ubicados en otros contextos, lo que complica la toma de decisiones (Barrera *et al.*, 2021; Escobar & Berdegúé, 1990).

Debido a que el estudio individualizado de cada finca en una región resulta inviable en la práctica, se hace necesario, clasificarlas o agruparlas según criterios específicos (Álvarez *et al.*, 2019). Para ello, es fundamental identificar los grupos coexistentes, considerando tanto los aspectos que definen los sistemas de producción, como sus respuestas, frente a innovaciones tecnológicas (Ávila *et al.*, 2000).

Las fincas cafeteras, presentan una gran variabilidad en aspectos, como el área sembrada, los sistemas de siembra, los programas de fertilización y, en general, en todas las actividades relacionadas con la producción y la

postcosecha; estas diferencias pueden deberse a factores agroclimáticos, socioeconómicos y tecnológicos, lo que dificulta la estandarización de prácticas agrícolas. Por esta razón, es fundamental tipificar y caracterizar las fincas desde un enfoque físico y social, con el objetivo de agruparlas en conjuntos relativamente homogéneos, identificar las diferencias entre ellos y definir sus principales características (Ordóñez-Jurado *et al.*, 2019; Criollo *et al.*, 2016). Esta clasificación permite, diseñar estrategias de manejo más eficientes, adaptadas a las condiciones específicas de cada grupo, lo que contribuye a mejorar la productividad y sostenibilidad del sector cafetero.

Una vez agrupados los sistemas de producción, su caracterización y análisis, constituyen herramientas metodológicas fundamentales, para determinar su distribución espacial, cuantificar sus atributos clave y evaluar las interacciones que condicionan su funcionamiento, proceso que permite identificar diferencias significativas entre sistemas, mediante la descripción sistemática de sus propiedades estructurales, dinámicas y relacionales (Leonel *et al.*, 2023; Merma & Julca, 2012).

Además, facilitan la generación de diagnósticos precisos, lo cual, es esencial para la planificación estratégica, la optimización de recursos y la implementación de mejoras sostenibles, en las unidades productivas (Nicholls *et al.*, 2015). En la caracterización de los sistemas productivos de café, es fundamental analizar variables ambientales, sociales y económicas que contribuyan al desarrollo sustentable de este cultivo.

1.2 Marco Conceptual

1.2.1. Sistemas de Producción

Bertalanffy, (1998) en la Teoría General de Sistemas, se refiere a los sistemas, como un conjunto de elementos, que tienen relaciones entre ellos, los cuales conservan dicho sistema directa o indirectamente, unido a tal punto, de volverse un conglomerado estable que persigue un objetivo común. En el enfoque de la Teoría General de los Sistemas, el término Finca, se

emplea como sinónimo de sistema agropecuario; el Sistema Finca, es uno de los niveles de una jerarquía del sistema agrícola y como cualquier sistema, tiene características de estructura y función (Hart, 1990). De acuerdo con Gallego *et al.*, (2004), la Finca, se define, como una unidad funcional, compuesta de elementos físicos, bióticos y socioeconómicos, sin que sean claramente identificables, con una dimensión espacio y tiempo real.

Un Sistema de Producción, es un conjunto de actividades, que un grupo humano organiza, dirige y realiza de acuerdo con sus objetivos, cultura y recursos, utilizando prácticas con respuesta al medio ambiente (Miranda y Carranza, 2013). El Sistema de Producción Agrícola por sus diversas transformaciones ambientales, culturales y sociales, demanda procesos de adaptabilidad de cultivos, determinada por la zona agrícola, específicamente, se reorganizan los productos, procesos, mercado y la tecnología del proceso de producción (Aldaz *et al.*, 2020).

1.2.2 Tipificación de los Sistemas de Producción

La Tipificación, permite conocer la organización de la complejidad de los diversos grupos de sistemas de producción existente en la agricultura; estos deben considerarse y analizarse por separado. En este sentido, Goswami *et al.*, (2014) lo definen, como un método que busca identificar la enorme diversidad en los sistemas de producción, mediante el ordenamiento o clasificación de la realidad. Escobar *et al.*, (2019) indican, que la Tipificación, es una de las herramientas, que permite agrupar los productores por características comunes de manejo, producción y tecnificación de un cultivo; es contemplada, como una herramienta de utilidad para el diseño de programas más eficientes de investigación y transferencia de tecnología para la producción agrícola.

1.2.3 Técnicas para realizar la Tipificación.

Para determinar la tipología de los sistemas productivos de las fincas y sistemas productivos, existe una gran diversidad de metodologías, de las cuales, el investigador debe seleccionar aquellas que considere más adecuadas y sobre todo, a su objetivo; la de uso más frecuente, se basa en análisis estadísticos, como las Técnicas de Análisis Multivariante, mediante el análisis de componentes principales, correspondencia múltiple, análisis factorial y análisis clúster (Valerio *et al.*, 2004; Goswami *et al.*, 2014). En este método, se emplea generalmente, un gran número de variables y técnicas, que permiten estudiar una población de individuos y así reducir la dimensionalidad de la información y agruparlos de acuerdo con características determinantes.

Los primeros trabajos empíricos realizados en el tema de la Tipificación y caracterización de Sistemas de Producción Agropecuarios en América Latina, se remontan a finales de la década de 1980, cuando se crearon las Redes de Investigación de Sistemas de Producción; algunas de las más importantes son: la Red de Investigación en Sistemas de Producción de América Latina (RISPAL) y la Red Internacional de Metodología de Investigación de Sistemas de Producción (Red Internacional de Metodología de Investigación de Sistemas de Producción–RIMISP, 1995).

1.2.4. Caracterización y Validación.

Una vez los sistemas de producción agrupados (Tipificados) como resultado del método aplicado, los resultados deben ser validados, mediante su contrastación con el marco teórico original y con los objetivos del proyecto, al igual que contrastados, con la percepción del equipo de investigación y los productores. Cada agrupación de fincas, estará relacionado con la estructura, tecnología, relaciones sociales, valores, planificación y objetivos de las personas que integran el sistema (Madry *et al.*, 2013).

La Caracterización, es una etapa determinante, para desarrollar el método de investigación en sistemas de producción y consiste, en establecer un conjunto de variables, que distinguen a una zona o unidad de producción en particular y que la hace diferente a otras (Malagón y Prager, 2001), además, se considera el tamaño de la unidad productiva y los recursos económicos disponibles, se deben considerar, la forma de manejo del sistema de producción, la racionalidad que se le imprime al desarrollo de la actividad, la concepción en el uso de los recursos y las diferencias impuestas por las pautas culturales

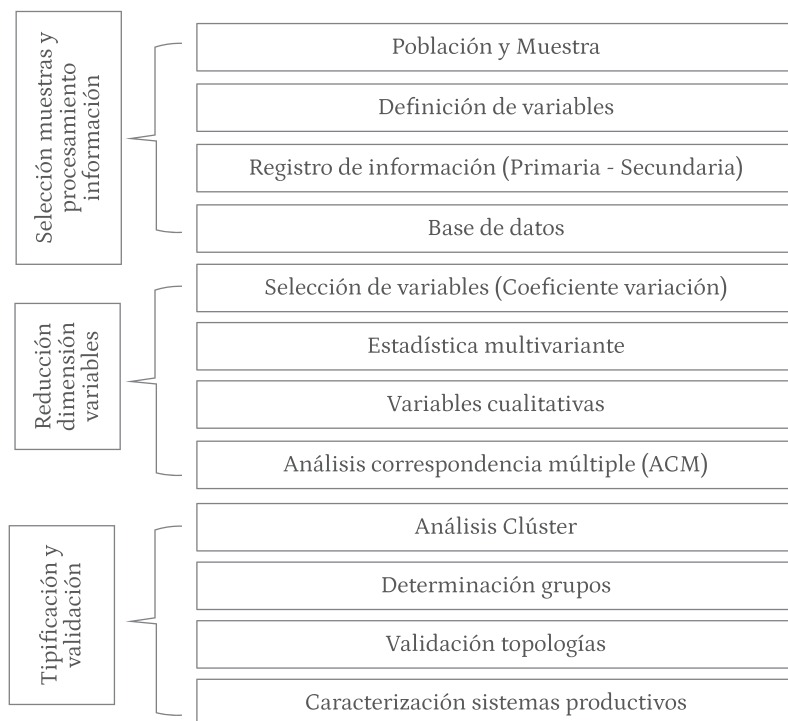
La Validación, permite contrastar los tipos definidos con los objetivos de la investigación, Escobar & Berdegú, (1990); Valerio *et al.*, (2004) mencionan, que esta puede realizarse de forma empírica o estadísticamente. El Método Empírico, es realizado por el investigador u otras personas conocedoras de los sistemas estudiados, capaces de contrastar los tipos obtenidos con los existentes en la realidad; la forma Estadística, consiste en realizar la Tipificación, mediante el uso de técnicas estadísticas y comparando los resultados finales, además, Köbrich *et al.*, (2003) indican que es importante que estos grupos formados sean verdaderos y no simplemente impuestos a los datos por el método que es usado para la clasificación.

1.3 Tipificación de Sistemas de Café

La Tipificación de los Sistemas de Producción de Café, se realizó en el municipio de La Unión, departamento de Nariño, para lo cual, fue necesario en principio, definir las fincas, siguiendo las recomendaciones de Escobar y Berdegú, (1990), Valerio *et al.*, (2004), Pokorny *et al.*, (2011), Farfán e Hincapié (2011), Leonel *et al.*, (2024). Esta metodología, se adaptó a los objetivos de la presente investigación, como se indica en la figura 1.1.

Figura 1.1.

Diagrama de la Metodología para la Tipificación y Caracterización de los Sistemas de Producción de Café, adaptado de Valerio et al., (2004).



Nota. La figura muestra el diagrama de la Metodología para la Tipificación y Caracterización de los Sistemas de Producción de Café, adaptado de Valerio et al., (2004).

1.3.1 Información Secundaria

Consistió en la recopilación de información sobre la región, como el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio, la encuesta cafetera y los estudios realizados en la zona por el Comité de Cafeteros de Nariño (CCN, 2014).

1.3.2 Tamaño de Muestra.

Para determinar el Tamaño de Muestra, se revisaron las estadísticas de la Federación Nacional de Cafeteros y el Comité de Cafeteros de Nariño, Seccional La Unión, lo que permitió conformar un marco muestral de 6187 fincas; la unidad muestral correspondió a cada finca cafetera, asumiendo un error del 10% y una probabilidad del 95%. Para determinar el tamaño de muestra y por tratarse de una población finita, se utilizó la fórmula de Murray y Larry, (2005).

$$n = \frac{Z_a^2 \cdot N \cdot p \cdot q}{i^2(N-1) + Z_a^2 \cdot p \cdot q}$$

Donde

n: tamaño muestral

N: tamaño de la población

z: valor correspondiente a la Distribución de Gauss, $z_a = 0,05 = 1,96$

p: prevalencia esperada del parámetro a evaluar, q:1-p (si p=70%;q=30 %)

i: error que se prevé cometer si es del 10 %, i = 0,1

Con base en este marco y para tener una mayor confiabilidad en la información, se estableció un tamaño de muestra de 104 fincas cafeteras. La población objeto de estudio, estuvo conformada por fincas que cumplan las siguientes características: 1) ubicadas entre los 1400 y 1800 msnm; 2) preferiblemente que tengan establecida la misma variedad; 3) con edades superiores a dos años, es decir que estén en fase productiva y 4 con una densidad de siembra superior a 2500 plantas de café por hectárea.

1.3.3 Información Primaria.

Para Tipificar los Sistemas de Producción de Café, se elaboró un formato de encuesta, con los ítem requeridos para obtener los datos requeridos en el cálculo de los valores de las variables seleccionadas. La aplicación de la encuesta, se realizó mediante entrevista personal, teniendo en cuenta,

que, en la mayoría de las fincas cafeteras, es común encontrar diferentes sistemas de manejo del cultivo, desde monocultivos de café hasta agroecosistemas con una alta biodiversidad de especies leñosas utilizadas como sombra; fue necesario verificar en campo, algunos predios para observar las técnicas generales y relevantes de manejo que permitan caracterizar su variabilidad.

Los datos utilizados para elaborar la encuesta, permitiran Tipificar los Sistemas de Producción de Café, se elaboró, a partir de la información y resultados de investigaciones realizadas a nivel local, nacional e internacional: Escobar y Berdegué, (1990), Ávila *et al.*, (2000), Duarte (2005), Porras (2006), Farfán & Hincapie (2011), además, en la construcción de la misma, se consideró algunas variables, como el tipo de sombra y las especies asociadas, que es un indicador sensible de las posibles prácticas de manejo, que el caficultor comúnmente realiza; en cada finca se identificó el sistema productivo, más relevante, el cual se constituyó, en la unidad de análisis de estudio.

1.3.4 Elaboración de la Base de Datos

Se integró la información de todas las encuestas, para construir una base de datos o matriz. Así mismo, se identificaron aquellas variables, que efectivamente, pudieran contribuir al análisis de la Tipificación, eliminando información inútil o redundante.

1.3.5 Selección de Variables

Para facilitar la agrupación de los Sistemas de Producción de Café, los datos de todas las variables, fueron conjuntados en una sola matriz, para lo cual, fue necesario la determinación del Coeficiente de Variación (CV%) de cada una de las variables. Este proceso permitió, descartar aquellas que presenten bajo poder discriminatorio en la construcción de los grupos; que una variable sea considerada como importante desde un punto de vista teórico, no garantiza que tenga una varianza razonable dentro de

la muestra de los sistemas evaluados. Para la construcción de los grupos, se consideraron, las variables que presentaron un CV superior al 30%, siendo estas las más representativas para Tipificar y caracterizar los Sistemas de Producción de Café. Autores como, Miranda y Carranza, (2013), utilizaron como criterio de selección, las variables que presentan un Coeficiente de Variación superior al 50%, mientras que Ávila *et al.*, (2000) utilizan como criterio de selección, un Coeficiente de Variación, entre 60 y 70%.

Las variables seleccionadas fueron: Variedad cultivada, distancia de siembra de árboles café, especies asociadas y sombra, riqueza especies de arvenses, fertilizantes gr/árbol/año, aplicación de insecticidas, herbicidas y fungicidas, evidencia procesos erosivos, materia orgánica (mg kg^{-1}), carbono %, Hojarasca (cm), Cobertura de suelo y producción de café pergamino seco (arrobas), entre otras.

1.3.6 Determinación de los Sistemas de Producción

Para determinar los Sistemas de Producción, se utilizó la Técnica Estadística Multivariante, denominada Análisis Clúster o Análisis de Conglomerados por el Método Jerárquico de Ward, el cual, permite establecer grupos homogéneos de los sistemas de producción y a la vez heterogéneos entre los mismos, obteniéndose como resultado, un diagrama de árbol o dendrograma. Teniendo en cuenta que las variables cuantitativas se expresan en unidades diferentes: peso, longitud, área, volumen, años, también tenemos datos cualitativos y esto dificulta enormemente la interpretación los resultados. Se realizó la transformación de las variables, mediante la asignación de un nuevo valor, de acuerdo con los rangos previamente definidos para cada variable en particular.

En la determinación de los grupos, no existen criterios definidos, sobre cuál es el número ideal, ni conceptualmente y aún más estadísticamente, aunque es conocido, entre menor es el número formado, las características que identifica cada grupo son más cercanas, en cambio, a medida que se van formando los grupos, éstos son menos homogéneos (Escobar

y Berdegú, 1990), las distancias para las que se forman los grupos iniciales, son menores que las de los grupos finales. Para definir las variables que presenten una mayor variabilidad, se realizó un Análisis de Correspondencia Múltiple; según el ACM, el 48,19% de la variabilidad total, se puede explicar a través de tres factores (Tabla 1.1); el primer factor contribuye con el 23,86% está conformado, principalmente, por las variables tipo de sombra, productos maderables y altura mínima árboles de sombrío; el segundo (15,41%), por las variables: distancia siembra plátano, precio racimo plátano y porcentaje sombra y el tercer factor explica el 8,92%, de la variabilidad observada, lo conforman básicamente, en su mayor proporción por el tipo de sombra, sistema secado café y presencia de especies frutales.

Tabla 1.1

Análisis de Correspondencia Múltiple de Sistemas de Producción de Café.

Componente	Valor Propio	Porcentaje Contribución	Porcentaje Acumulado
1	0,3531	23,86	23,86
2	0,2281	15,41	39,27
3	0,1320	8,92	48,19
4	0,1136	7,67	55,86
5	0,0676	4,57	60,43
6	0,0631	4,27	64,69
7	0,0601	4,06	68,75

Nota. Estudio de la sustentabilidad de los sistemas de producción de café mediante indicadores, en el municipio de La Unión Nariño. Ordóñez-Jurado, (2014).

La conformación de la tipología de los Sistemas de Producción de Café, se presenta en la tabla 1.2. En esta se describen: la asociación de café con sombra de leñosas (S1) representa el 24,0% de los sistemas de producción; el 34,6% corresponde al sistema de cultivo café semisombra (S2); el sistema de café asociado con musáceas, especialmente plátano (S3) representa el 18,3% y el cultivo de café sin sombra (S4) representa al 23,1% de la población estudiada (Ordóñez-Jurado, 2014).

Tabla 1.2.*Agrupamiento de los Sistemas de Producción de Café, Municipio La Unión.*

Grupo	Número	%	Denominación
1	25	24,0	S1
2	36	34,6	S2
3	19	18,3	S3
4	24	23,1	S4
Total	104	100	

Café sombra (S1), café semisombra (S2), café-plátano (S3) y café sin sombra (S4).

Nota. Estudio de la sustentabilidad de los sistemas de producción de café mediante indicadores, en el municipio de La Unión Nariño. Ordóñez-Jurado (2014).

En la región cafetera colombiana, según FNC - CENICAFÉ, (2013) se han identificado, áreas homogéneas, en características de suelo, relieve y clima denominadas ecotopos cafeteros, que definen, el entorno o el ambiente principal de los Sistemas de Producción de Café. Bajo las anteriores consideraciones, se reportan los siguientes sistemas de producción: tradicional, tecnificado, con semisombra y con sombra; autores como Porras, (2006) al comparar los sistemas de manejo en fincas de café orgánico y convencional en Costa Rica, definió catorce tipologías; León, (2006) en la determinación de la tipología de hogares cafeteros del departamento de Caldas, el análisis le permitió conformar cuatro tipos de hogares; Ávila et al., (2000) propone ocho sistemas de fincas cafeteras al evaluarlas, por su extensión, cobertura y productividad. Moguel y Toledo, (1999) en Centroamérica, indican cinco tipos básicos de sistemas de producción cafeteros, los cuales varían de acuerdo con la cantidad de sombrero y el tipo de dosel: cultivo rústico, policultivo tradicional, policultivo comercial, monocultivo bajo sombra, cultivo a plena exposición.

En la región, la actividad cafetera de Nariño, se desarrolla en fincas productivas heterogéneas en términos de extensión, distancias de siembra, tecnología aplicada, organización, estructura familiar y fundamentalmente,

en el uso y manejo del componente sombra (Ordóñez-Jurado *et al.*, 2019). Esto ha influido directamente, en el comportamiento de las variables consideradas de las dimensiones económica, social y ambiental. En este sentido, se encontró que existen muchos modelos de sistemas de manejo, desde el sistema tradicional (policultivo) caracterizado por la alta presencia del componente leñoso y cultivos agrícolas hasta monocultivos, en donde se ha eliminado completamente todo tipo de vegetación leñosa considerada como sombrío. Como lo afirman Dussán et al., (2006) entre las características de la caficultura en el país, es su amplia heterogeneidad, situación que ha llevado a una amplia gama de sistemas de producción del grano.

1.3.7 Características Generales de los Sistemas Productivos Identificados

La caracterización de los sistemas productivos identificados, se elaboró tomando como punto de partida, las principales características y actividades de manejo y producción que realizan los caficultores, tanto dentro como fuera del sistema. En la tabla 1.3, se presentan algunas características relevantes de los Sistemas de Producción de Café.

Variedad: Independientemente del sistema, los agricultores utilizan, las Variedades Colombia y Castillo variedad regional. Según el CCN, (2014) estas han ido sustituyendo a las Variedades Caturra y Borbón, debido a que estas son susceptibles a la roya (*Hemileia vastatrix*), a los efectos adversos del clima y algunas plagas como la broca del café (*Hypothenemus hampei*).

Distancia de Siembra: Al comparar las distancias de siembra, se encontró que no hay un patrón establecido por sistema, aunque se puede indicar, que estas son más cortas en los sistemas que no presentan componentes asociados (café sin sombra), si lo comparamos con el sistema café con sombra; en este último, la presencia del componente arbóreo, no permiten aumentar las densidades de siembra, debido al espacio que ocupan. En las últimas dos décadas, como lo indican los resultados de las encuestas, algunos caficultores, se han adherido a prácticas de cultivo intensivo como el monocultivos (hasta de 10.000 plantas/ ha⁻¹), igualmente aún subsisten, sistemas de manejo con densidades menores de 3.500 plantas de café.ha⁻¹.

Tabla 1.3

Características de los Sistemas de Producción de Café, La Unión - Nariño

VARIABLE	S1	S2	S3	S4
Variedad cultivada en mayor escala	Colombia Castillo	Colombia Castillo	Colombia Castillo	Colombia Castillo
Distancia siembra café	1,2x1,3; 1,2X1,5 1,3X1,8; 1,2x2,0	1,2x1,3; 1,2x1,5 1,4x1,5; 1,4x1,8	1,2x1,2; 1,2x1,3 1,2x1,4; 1,4x1,4	1,0x1,2; 1,2x1,3 1,1x1,1; 1,3x1,3
Arboles ha-1	215	128	48	28
Especies asociadas y sombra	Guayacán, cítricos, plátano, banano, guamo, higuerón, balso, guadua, matarratón, guineo, yarumo, arrayan, aguacate, guayabo.	Cítricos, plátano, banano, guamo, cachimbo, nogal, carbonero, guineo aguacate.	Plátano en línea y individuos aislados de Cítricos y banano	Cítricos, aguacate, banano
Fertilizantes químicos aplicados	17-6-18-2 2 a 3 veces año-1, en ocasiones adicionan urea	17-6-18-2 2 a 3 veces año-1, en ocasiones adicionan urea	17-6-18-2 2 a 3 veces año-1, en ocasiones adicionan urea	17-6-18-2 2 a 3 veces año-1, en ocasiones adicionan urea

VARIABLE	SISTEMA	S1	S2	S3	S4
gr/árbol/año		70 - 180	100 - 200	100 - 300.	120 - 360
Insecticidas		No aplica	No aplica	Lorsban	Lorsban
Fungicidas		Oxicloruro de Cobre, Lorsban (rara vez)	Oxicloruro de Cobre, Lorsban (rara vez)	Oxicloruro de Cobre, Lorsban	Oxicloruro de Cobre, Lorsban
Herbicidas		No aplica	No aplica	Glifosato	Glifosato
Evidencia procesos erosivos		Presencia de cobertura vegetal. No hay evidencia erosión.	Presencia de cobertura vegetal, salpicadura. No hay evidencia erosión.	Erosión muy baja, presencia de raicillas	Formación corrientes agua, arrastre sedimento (erosión moderada)
Cobertura suelo (después limpia)		Suelo cubierto (90%)	Suelo parcialmente cubierto (70%)	Moderadamente cubierto (35%)	Suelo parcialmente desnudo (<20%)

Nota. Características de los Sistemas de Producción de Café. Esta Investigación.

Árboles de Sombrío y Especies Asociadas. Los sistemas productivos, que en su estructura tiene el componente leñoso, la función de la mayoría, están basados en la economía familiar, en donde la producción del sistema es más diversificada que los sistemas estructuralmente simples (café sin sombra y café asociado con musáceas); esa diversificación representa, una estrategia de reducción de la vulnerabilidad de los sistemas productivos frente a los impactos externos, como la inestabilidad de los precios del café y a los efectos negativos que conlleva el cambio climático. En este sentido, Rice y Ward, (1997) indican, que la diversificación de las fincas de café, juega un rol importante económico y social a medida que ayude en la generación de ingresos adicionales y aporten en el autoconsumo de la familia.

Algunos productores, indican que, el uso del sombrío en cafetales, es importante y la consideran como una práctica agroecológica, que favorece la biodiversidad y la presencia de agentes de control biológico. Duarte, (2005) indica, que la mayoría de las fincas, buscan diversificar el cafetal con especies frutales y leñosas, como estrategia de reducción del riesgo económico, presentándose un mayor nivel de autoconsumo por parte de la familia. Dónde, los productos de los frutales, son utilizados para autoconsumo y la venta, a fin de obtener ingresos adicionales al cultivo del café; los productos de las especies leñosas, se utilizan para uso en la finca: combustible, construcciones, delimitación de los predios y rara vez, la madera se transforma y o vende en el mercado local.

Uso de Fertilizantes: Se utilizan diversas fórmulas en los fertilizantes, esta varía según las recomendaciones que realizan la FNC, la UMATA y fundamentalmente, las casas comerciales; en el año de estudio, se aplicó la fórmula 17-6-18-2. En ocasiones, adicionan úrea, se realizan 1 a 3 aplicaciones año⁻¹. Lo que difiere son las dosis; en el sistema café-sin sombra, las dosis son superiores, si se comparan con el sistema café con semi-sombra y sombra (Ordóñez-Jurado, 2014). Usualmente, la pulpa que se origina del proceso del beneficio del café, es separada del agua, esta mediante procesos de compostaje, se transforma en abono, el cual se utiliza en el mismo cultivo.

Prácticas de Manejo del Cultivo. En cuanto a utilización de insecticidas, herbicidas y fungicidas, si difiere en los diferentes sistemas; los sistemas con sombra, no aplican insecticidas ni herbicidas, el uso de los mismos, es más frecuente a medida que disminuye el porcentaje de sombra, café-plátano (S3) y café sin sombra (S4). Es común la utilización de fungicidas, en la mayoría de las fincas, lo que varían, son las dosis de aplicación

Procesos Erosivos. Se encontró, que las prácticas de manejo, la intensidad y frecuencia de las mismas, influyen en la estabilidad del sistema, así, en el sistema café sin sombra, se evidencia la formación de corrientes de agua y arrastre de sedimento (erosión moderada), en cambio en el sistema café-plátano, la erosión es baja y en los sistemas café semisombra y sombra no se observó síntomas de erosión (Ordóñez-Jurado, 2014).

1.3.7.1 Café Sombra (tradicional) de Leñosas.

La sombra que recibe el cultivo del café, proviene de árboles maderables y frutales; la intensidad está determinada por la arquitectura del árbol, forma y desarrollo de las copas, tipo de follaje, distribución espacial y el manejo silvicultural dado al árbol. El uso del sombrío en los sistemas de cultivo de café, modifica el microclima del agroecosistema, lo cual influye, en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Si bien puede generar una reducción en el rendimiento productivo, también aporta múltiples beneficios agronómicos y ambientales. Según Farfán, (2014) y Farfán *et al.*, (2013) el sombrío disminuye la evapotranspiración, reduce los requerimientos hídricos del cultivo, incrementa el aporte de materia orgánica al suelo, disminuye el riesgo de erosión y mejora la resiliencia del sistema, frente a la variabilidad climática, contribuyendo así a una mayor sustentabilidad.

La utilización del sombrío, altera el microclima del cultivo, modifica el crecimiento y el desarrollo de las plantas, puede causar efectos negativos sobre el rendimiento, como lo afirma Farfán, (2014) la producción es menor, pero con grandes ventajas, como la disminución de la evapotranspiración, los requerimientos de agua son menores, existe mayor

aporte de materia orgánica, menor riesgo de erosión y mayor sustentabilidad ante la variabilidad climática, entre otras.

Una característica de este sistema es: las plantas de café están establecidas con distancias de siembra irregulares, aunque en algunas fincas, es posible encontrar cultivos con trazado definido (Figura 1.2); igualmente, aún subsisten sistemas de manejo con densidades menores de 3.000 plantas de café por hectárea. Según la FNC, (1993) estos sistemas, se caracterizan, porque la regulación de la luz incidente, proviene de cualquier especie arbórea permanente, con una densidad superior a 50 árboles por hectárea; también puede darse, la regulación por cualquier especie arbustiva semipermanente, con más de 750 sitios por hectárea. Al evaluar el componente leñoso con Diámetro a la Altura del Pecho (DAP 1,30 m) mayores de 5 cm., se encontró una densidad promedio de 215 individuos por hectárea, con una riqueza promedio de 11 especies leñosas (Ordóñez-Jurado *et al.*, 2019).

Figura 1.2

Cultivo del Café Bajo Sombra, Municipio de La Unión Nariño.



Nota. La figura muestra plantas de café establecidas con distancias de siembra irregulares, aunque en algunas fincas, es posible encontrar cultivos con trazado definido. Esta Investigación.

Se encontró, una alta diversidad de especies nativas y en algunos casos especies introducidas, entre las más importantes se tienen: Guamo macheto (*Inga densiflora Benth*), guamo rabo de mico (*Inga codonantha*), aguacate (*Persea spp.*), balso (*Ochroma pyramidale (Cav. Ex Lam.) Urb.*), guayacán (*Lafoensia speciosa Kunth*) DC. (L.) C.F. Gaertn.), limón (*Citrus lemon Osbeck*), nacedero (*Trichantera gigantea Humboldt & Bonpland*) Nees, arrayan (*Myrcianthes spp*), cachimbo (*Erythrina poepigiana (Walp.) O.F.Cook*), Chachafruto (*Erythrina edulis Micheli*), naranja (*Citrus spp*), matarratón (*Glycidia sepium (Jacq.) Kunth ex Walp.*), yarumo (*Cecropia spp*), eucalipto (*Eucalyptus globulus Labill*), guadua (*Guadua angustifolia Kunth*), además de *Musa spp* (guineo y plátano) entre otras. Los componentes de la estructura vertical del sistema, presentan diferentes edades y alturas, esto conlleva a la presencia de varios estratos, lo cual coincide, con los estudios realizados por la FNC - Cenicafe (2013), al afirmar que los sistemas de café bajo sombra multiestrato, son sistemas de manejo agrícola, en el cual, existen varios estratos o niveles de altura; frecuentemente, el estrato alto, es conformado por árboles maderables, seguidos por especies frutales, en el medio se encuentra el cafeto y el estrato bajo está compuesto por coberturas vivas.

En este sistema de cultivo, es común observar, algunas áreas con muy poca sombra y otras con demasiado sombrío; el promedio de sombra es 48,4%, superior a los requerimientos de las normas internacionales de los programas de café con la denominación de “Especial” establecido por Rainforest Alliance, Smithsonian Migratory Bird Center, quienes establecen como porcentaje de sombreamiento mínimo para el café, un 40%. El porcentaje de sombra recomendado para la zona por Farfán y Jaramillo, (2009) al considerar el número de horas de brillo solar al año y la ubicación con respecto a la línea ecuatorial, es de 30,5%, en cambio el reportado en esta investigación, es muy superior, lo que puede afectar la producción, como lo indican los resultados reportados por Detlefsen, (1988) al aumentar la densidad de siembra del sombrío de *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken (114 a 344 árboles ha⁻¹), encontró reducciones hasta el 50% de la producción, al compararlo con la obtenida a plena exposición solar.

En los cultivos de café con sombra, el cubrimiento que hacen las arvenses sobre el suelo, es menor que los otros sistemas en estudio. Lo anterior, lo valoran los productores, al afirmar que el sombrío tiene la facultad de regular o controlar el crecimiento y desarrollo de las arvenses, mayormente especies heliófilas, economizando los costos de deshierbe, reduciendo en un 50 % esta actividad en el año, por lo tanto, reduciendo la competencia con el cultivo de café (Escobar, 2007; Cardona-Calle & Sadeghian-Khalajabadi, 2005).

1.3.7.2 Café Semisombra.

Al igual que el anterior, la FNC, (1993) define este sistema de producción, en función del componente arbóreo, como regulador de la luz solar (Figura 1.3); generalmente, se emplean especies arbóreas como el guamo, nogal o el chachafruto, entre otros, con una densidad entre 20 y 50 árboles por hectárea, o cualquier especie arbustiva semipermanente (plátano o banano) con un número de plantas entre 300 y 750 sitios por hectárea.

Figura 1.3

Cultivo del Café (Semisombra), Municipio de La Unión - Nariño



Nota: la figura muestra, el sistema de producción, en función del componente arbóreo, como regulador de la luz solar. Esta investigación.

Generalmente, se emplean las mismas especies arbóreas nativas e introducidas, que el sistema café bajo sombra, con la diferencia de presentar una menor densidad por unidad de área. Entre las especies se destacan las siguientes: *Inga spp*, *Erythrina edulis*, *Cordia alliodora*, *Erythrina poeppigiana*, *Glyricidia sepium* y frutales como los cítricos *Citrus spp* y *Persea americana*, entre otros. Además, se utilizan especie arbustiva semipermanente, como *Musa paradisiaca* y *Musa spp* (Ordóñez-Jurado, 2014). Los productos obtenidos de estas asociaciones agroforestales, son importantes para las familias cafeteras, como estrategias de autoconsumo y reducción del riesgo económico, a través del comercio de los mismos.

Los sistemas de café con sombra y semisombra, que en su estructura presentan sombra diversificada, tienen como objetivo, optimizar los efectos benéficos de las interacciones que ocurren entre los componentes arbóreos y los cultivos, aprovechando al máximo el rendimiento total de un área, a fin de obtener la mayor diversidad de productos, disminuir las necesidades de insumos externos y reducir los impactos ambientales (Farfán, 2014). Estos agroecosistemas, se resalta la importancia de los árboles, porque contribuyen al mantenimiento del banco de genes; la mayoría de estas especies son de hoja caduca, garantizando una continua incorporación de biomasa muerta al suelo, lo cual se refleja con un espesor promedio de la hojarasca de 2,4 cm (Ordóñez-Jurado, 2014). La altura promedio de los cinco árboles más altos, es de 9,9 m; considerando la altura de todas las especies, forman varios estratos, es así, la posición sociológica del estrato superior, lo conforman las especies maderables, el estrato medio está constituido por especies leguminosas como los guamos, algunos frutales y el grupo de la familia de las musáceas, seguidos por los árboles de café y un estrato inferior, constituido por las arvenses.

Por la estructura de las especies utilizados como sombra, la radiación solar que llega a los pisos inferiores del sistema en promedio, es de 22,4%, permitiendo el establecimiento de especies arvenses, las cuales contribuyen a la estabilidad de los suelos, al disminuir el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo; la mayoría de las especies arvenses son de hoja

ancha como: *Bidens pilosa* L., *Ipomea purpurea* (L.) Roth), *Siegesbeckia journaliensis* Kunth, *Arachis pintoii* (Krapov. & W.C.Greg), *Panicum trichoides* L. y *Commelina diffusa* Burm. La producción por hectárea oscila entre 90 y 150 arrobas de café pergamino seco (c.p.s.). Asimismo, el sistema de café con sombra presenta un factor de rendimiento de 87 a 88, y la relación entre café cereza y café pergamino seco es de 4,8, lo cual se debe a la similitud en diversos aspectos con este sistema (Ordóñez-Jurado, 2014).

1.3.7.3 Café Asociado con Musáceas (plátano).

Moreno *et al.*, (2005) indican que, en Colombia, el sistema de producción de plátano intercalado con café, es viable, dadas las condiciones de clima y suelo favorables para ambos cultivos, lo cual ha facilitado, que la zona cafetera colombiana sea la mayor productora de plátano del país. Aspectos similares se presentan en la zona de estudio, en donde la modalidad de café-plátano representa el 18,27% de las asociaciones de los agroecosistemas cafeteros. Este manejo se ha implementado en los últimos 15 años; el porcentaje es bajo, si se compara con el área cultivada con plátano en Colombia, donde se encuentra asociado con café, frutales y otros cultivos.

El sistema de producción de café asociado con plátano en el municipio de la Unión (Figura 1.4), presenta las siguientes características: las distancias de siembra son: 1,2x1,2; 1,2x1,3 y 1,2x1,4 m; en cambio las distancias del cultivo del plátano son diversas; por lo general se manejan franjas con un promedio de 7,0 m entre surcos y 3,0 m entre plantas, además en algunas fincas se cuenta con algunos individuos de especies frutales como *Citrus sinensis*, *Citrus limón*, *Persea americana* y rara vez se puede encontrar árboles leguminosos remanentes como *Inga spp* y algunas plantas de *Manihot esculenta* (Ordóñez-Jurado, 2014).

Figura 1.4

Cultivo del Café Asociado con Plátano, Municipio de La Unión - Nariño.



Nota: la figura muestra, sistema de producción de café asociado con plátano en el municipio de la Unión. Esta investigación.

El cultivo del plátano, para su normal producción necesita, prácticas de manejo, como limpiezas de arvenses, la cual se realiza con herbicidas; las prácticas de manejo tanto del cultivo de plátano como de café, hacen que el suelo, presente una baja cobertura vegetal, así mismo se observa presencia de raicillas, con signos bajos de erosión. Aunque el impacto negativo, producto de las intensas prácticas de manejo de cultivo sea menor que el sistema café sin sombra, los productores, son conscientes de la presencia de arvenses, cada vez más agresivas y competitivas y gastos que conlleva el mantenimiento del cafetal, sin considerar la contribución negativa, al cambio climático.

Los rendimientos promedio del café del sistema, es de 131,25 arrobas (c.p.s. ha⁻¹), superior al sistema café sombra y semisombra, pero inferior al café cultivado sin sombra. La producción del plátano, por lo general, está destinada a satisfacer la demanda local, incluyendo los municipios del departamento de Nariño y una pequeña cantidad a los mercados de la ciudad de Pasto. El precio del racimo es muy variable, dependiendo de la oferta de plátano procedente de la república del Ecuador o en su defecto de los departamentos del Quindío y Valle del Cauca.

1.3.7.4 Café Sin Sombra.

Dependiendo de las condiciones agroecológicas, es posible implementar cultivos de café a plena exposición (Criollo *et al.*, 2016); mediante este sistema, se hacen más eficientes los factores de producción, por lo tanto, es posible obtener altas producciones de café por hectárea y aumentar la rentabilidad del agricultor (Ramírez *et al.*, 2013); sin embargo, la implementación de este sistema de cultivo requiere, constante disponibilidad hídrica y de recursos económicos, para suplir las exigencias de insumos que requiere el cultivo. A nivel nacional, con la intensificación del cultivo del café a partir de la década del 60, en los municipios cafeteros del departamento de Nariño, sucedió de igual manera, se empezaron a utilizar variedades, que toleran exposición directa o parcial al sol, esto ocasionó la eliminación de las especies leñosas (árboles maderables y frutales), como se indica en la figura 1.5. Lo anterior conllevó, al aumento en la densidad de siembra; se encontró en promedio 6.411 árboles ha⁻¹.

De acuerdo a lo anterior, la FNC, (1993) indica que, en sistemas cafeteros a plena exposición solar, la regulación de la luz incidente proviene de cualquier especie arbórea permanente inferior a 20 árboles ha⁻¹ o inferior a 300 especies arbustivas semipermanentes. Para FNC – Cenicafé, (2013) los sistemas de manejo del café sin sombra, está caracterizado por densidades de siembra altas, sembradas con un trazo uniforme; en la zona de estudio, en unos sistemas se encontró, que la implementación del sistema, se limitó solamente a la eliminación de la cobertura arbórea, dejando algunos individuos de manera aislada; las especies más utilizadas son, naranja, limón, aguacate y guamos. En estos agroecosistemas, el uso excesivo de insecticidas, fungicidas, herbicidas y fertilizantes de síntesis química, ha conllevado a la disminución de la oferta ambiental, por la contaminación y del suelo y agua, erosión del suelo, incidencia de plagas y enfermedades, pérdida de la biodiversidad, lo cual, incide directamente en la capacidad productiva de estos sistemas productivos.

Figura 1.5

Cultivo del Café Sin Sombra, Municipio de La Unión Nariño



Nota: la figura muestra, intensificación del cultivo del café, eliminación de las especies leñosas (árboles maderables y frutales. Esta investigación.

Como no se cuenta con especies de sombrío o estos son aislados, el aporte de biomasa se da principalmente, por los árboles de café, razón por la cual, es notoria la disminución de la capa de hojarasca (1,09 cm.) si se compara con el sistema café con sombra; se encuentran sitios sin ningún tipo de mulch, esto conlleva, a que estos después de la aplicación de herbicidas quede el suelo parcialmente desnudo. Para argumentar lo anterior, Alcántara *et al.*, (2003) indican que este resultado puede estar relacionado a la aplicación de herbicidas en el cafetal, ya que el herbicida tiene una acción de quema de la cobertura viva y muerta del suelo.

Así mismo, la incidencia de los rayos solares al piso inferior del sistema, es notoria, permitiendo el establecimiento de especies arvenses como: *Eleusine indica* (L.) Gaertn, *Cyperus rotundus* L., *Equisetum* sp, *Cynodon dactylon* (L.) Pers, *Chloris radiata* (L.) Sw, *Torulinu odoratum* (L.) S.S.Hooper y *Digitaria sanguinalis* (L.) Scop. López-Sarmiento *et al.*, (2012) en la Estación Experimental La Catalina (Pereira, Risaralda), encontraron en un lote sembrado con café Variedad Castillo a libre exposición solar, que el 70% de las arvenses, fueron de hoja ancha y el 30% de Gramíneas y Ciperáceas. Como lo indica, Escobar, (2007) en otras regiones, los productores son conscientes del impacto del cafetal a pleno sol, con la aparición

de arvenses, cada vez más agresivas y competitivas y por consiguiente de mayores gastos en el mantenimiento del cafetal.

La producción promedio de café en arrobas (c.p.s. ha⁻¹), es de 184,25 arrobas (c.p.s. ha⁻¹), es alto, si lo comparamos con los otros sistemas de producción; éste aumento está relacionado con el incremento de los insumos externos, utilizados como los abonos químicos y pesticidas para el control de plagas y enfermedades, como el Oxicloruro de Cobre, alto 100, Glifosato y dosis altas de fertilizantes químicos. Existe consenso de los productores, en el efecto de los agroquímicos, sobre la contaminación del suelo, agua, alteración de la biodiversidad, la calidad del café y la sustentabilidad de la producción agrícola a lo largo plazo. Al respecto, Wilson y Tisdell, (2001) afirman, que el uso de pesticidas y herbicidas, puede causar daños a la salud humana, reducir la productividad del cultivo, generar costos asociados al tratamiento de enfermedades humanas, pérdida de la producción por infestación de plagas o enfermedades y aumentar los costos de producción y la dependencia externa.

De acuerdo a los resultados de la investigación e información de los técnicos de las instituciones vinculadas al cultivo del café, los caficultores que en sus fincas manejan el café sin sombra y algunas asociaciones con plátano, como respuesta a las pérdidas de las últimas cosechas, están promoviendo el asocio del cultivo del café con especies leñosas, especialmente leguminosas, con el fin de mitigar el efecto de la variación climática.

Conclusiones

La actividad cafetera, se desarrolla en fincas productivas heterogéneas, en términos de extensión, distancias de siembra, tecnología aplicada, organización, estructura familiar y fundamentalmente, en el uso y manejo del componente sombra; esta situación ha llevado, a una amplia gama de tipologías de los sistemas de producción del cultivo del café.

Por las diferentes condiciones donde se implementa el cultivo del café, este sistema de producción, presenta diferentes variaciones y adaptaciones; dichas particularidades, permitieron diferenciar claramente, cuatro grupos o unidades productivas, estadísticamente distintas: (S1) café con sombra, (S2) café semisombra, (S3) café asociado con plátano y (S4) café sin sombra. En estos sistemas productivos, la variabilidad dentro de los grupos es mínima y entre los grupos la máxima.

Capítulo 2

**Diversidad Florística e Importancia
Cultural de la Vegetación Arbórea
en Los Sistemas Cafeteros**

2.1 Introducción

En Colombia, el cultivo del café, ha dado lugar, a un tejido social de incalculable valor, consolidándose como uno de los sectores agrícolas más importantes del país; este sector, no solo es el que más contribuye a la generación de ingresos, sino que también representa una de las actividades, que mayor demanda de mano de obra genera en las zonas rurales (Federación Nacional de Cafeteros [FNC], 2013; FNC, 2024). En sus inicios, la caficultura se caracterizó, por el cultivo de café bajo el dosel de árboles nativos, un sistema que integraba policultivos compuestos por especies maderables, frutales y arbustivas; sin embargo, a partir de la década de 1970, impulsados por la llamada Revolución Verde, tanto instituciones como productores, promovieron un cambio significativo en los sistemas de cultivo. Este proceso, llevó a la eliminación de los policultivos y a la adopción de variedades de café altamente productivas, adaptadas a la exposición solar directa, como resultado, se consolidó el monocultivo cafetero, reemplazando las prácticas tradicionales de sombrero y cultivos asociados (Farfán, 2014; FNC, 2024).

Al aumentar la productividad agrícola, mediante el uso de tecnologías modernas, como fertilizantes químicos, pesticidas y variedades de cultivos de alto rendimiento, tuvo un impacto profundo en la caficultura (Altieri & Nicholls, 2000), como resultado, se consolidó el monocultivo cafetero, reemplazando las prácticas tradicionales de sombrero y cultivos asociados. Este cambio permitió, incrementar la producción de café, pero también generó desafíos ambientales, como la pérdida de biodiversidad, la degradación de los suelos y una mayor vulnerabilidad a plagas y enfermedades que, aunado a lo anterior, han afectado negativamente los servicios ecosistémicos, provocando procesos de degradación ambiental, especialmente en las fuentes hídricas, debido al uso desmedido de agrotóxicos y fertilizantes aplicados en grandes cantidades, para mantener los rendimientos económicos (Perfecto et al., 2005; Moguel & Toledo, 1999).

Las asociaciones de café con árboles, se implementan, de acuerdo con las condiciones locales y los intereses de los propietarios, adoptando diversas configuraciones como linderos, cercos vivos, árboles dispersos, cultivos en callejones o barreras rompevientos (Montagnini y Metzel, 2015). Estos sistemas productivos, caracterizados por su alta heterogeneidad, generan múltiples beneficios ambientales y productivos, entre ellos destacan la diversificación de productos, la reducción de la dependencia de insumos externos, la recuperación y mantenimiento de la fertilidad del suelo, el reciclaje de nutrientes, la mejora de las propiedades físicas del suelo y la absorción de nutrientes acumulados en el subsuelo, los cuales retornan a la superficie a través de la hojarasca (Sánchez *et al.*, 2007). Este proceso, no solo enriquece el suelo, sino que también favorece a los microorganismos responsables de la descomposición de la materia orgánica, promoviendo así, un ciclo biológico más eficiente.

Asimismo, la biomasa producida por el componente leñoso, contribuye a reducir la evaporación, protege el suelo de la erosión y controla la proliferación de plantas arvenses, lo que fortalece la sustentabilidad del sistema (Nair *et al.*, 2021). Además, estos sistemas agroforestales, han demostrado ser una estrategia efectiva para la mitigación del cambio climático, ya que incrementan el secuestro de carbono, tanto en la biomasa como en el suelo. La integración de árboles en los sistemas agrícolas, no solo mejora la resiliencia de los ecosistemas, sino que también proporciona beneficios económicos y sociales a las comunidades rurales, al diversificar sus fuentes de ingresos y mejorar la seguridad alimentaria.

Aunque, la incorporación de árboles de sombra en los sistemas cafeteros contribuye a la diversificación y mejora la provisión de diversos servicios ecosistémicos, también se han documentado interacciones negativas. Estas interacciones adversas, se deben principalmente, al desconocimiento del potencial de cada especie arbórea y a la implementación de prácticas silviculturales inadecuadas (Ordóñez *et al.*, 2021). El uso inapropiado de especies de sombra, puede generar problemas de interferencia con la planta de café, por el sombrío excesivo; además, de dificultar las operaciones de cosecha, también genera competencia por recursos esenciales,

como la luz solar, el espacio y los nutrientes, lo que afecta significativamente el rendimiento del cultivo. Por lo tanto, es fundamental conocer las especies arbóreas compatibles y aplicar prácticas de manejo adecuadas para maximizar los beneficios y minimizar los impactos negativos en los agrosistemas cafeteros.

En este Capítulo, se hace énfasis, en la evaluación de la diversidad florística y la importancia cultural de la vegetación arbórea, en los sistemas cafeteros del municipio de La Unión (Nariño), a través de las percepciones y el conocimiento local de los productores, sobre la importancia de los árboles en sus fincas, siendo el agricultor, un agente de gran relevancia por su amplio conocimiento, por tanto, surge la necesidad de rescatar el conocimiento tradicional del componente leñoso, para aportar al diseño de sistemas con especies potenciales y conocidas, como estrategia para el desarrollo sustentable.

2.2 Marco Conceptual

2.2.1 Cultivo del Café

Colombia, es reconocida, por su alta producción y tradición cafetera, de la cual dependen 545 mil familias; genera 730 mil empleos directos en la zona rural del país y corresponde al 18% de la actividad económica del sector agrícola (FNC, 2020). Un mercado en constante crecimiento, que impulsa a los caficultores, a adoptar prácticas orientadas al aumento de la producción, muchas veces en detrimento de la calidad y sostenibilidad de los recursos naturales. Se desarrolla principalmente, en zonas tropicales montañosas, donde las condiciones climáticas favorecen la diversidad ambiental (Lagos-Burbano *et al.*, 2021), donde las altitudes oscilan entre los 1.200 y 2.000 msnm; el café requiere condiciones climáticas específicas para su óptimo desarrollo, requiriendo una temperatura media anual entre 17 °C y 23 °C. y una precipitación anual distribuida de manera uniforme en el rango de 1.600 a 1.800 mm/año (FNC, 2022).

En el departamento de Nariño, el sector cafetero se desarrolla bajo diversos sistemas de manejo, destacándose diferentes modelos de producción; uno de los más relevantes es el sistema tradicional, caracterizado por una alta presencia de componentes leñosos y cultivos agrícolas, donde predominan las asociaciones agroforestales. Este modelo está estrechamente vinculado, a la agricultura familiar, la cual puede contribuir significativamente a garantizar la seguridad alimentaria y la generación de ingresos adicionales (Ordóñez-Jurado, 2014; Lagos Burbano *et al.*, 2019); además, permite alcanzar un equilibrio entre la producción, la reducción de la dependencia de agroquímicos y la restauración ecológica del ecosistema, promoviendo así, la conservación del medio ambiente.

2.2.2 Agroecosistemas Cafeteros

Los Agroecosistemas, son entendidos, como ecosistemas complejos, cuyas propiedades están determinadas por sus componentes y las interrelaciones entre ellos; en estos sistemas, el ser humano ha intervenido, con el objetivo de implementar procesos orientados a suplir los requerimientos de alimentos de las poblaciones, así como para generar otros bienes y servicios derivados de las actividades agrícolas (Sarandón y Florez, 2014). Ante este panorama, la Agroecología, como ciencia, propone un nuevo paradigma científico para el desarrollo de la agricultura, es de naturaleza transdisciplinaria, ya que integra conocimientos de diversas disciplinas y abarca un conjunto de prácticas agrícolas sostenibles, así como un movimiento social. Su aplicación se extiende, a los sistemas agroalimentarios, desde la producción de alimentos hasta su consumo; además, no se limita a maximizar la producción de un solo componente, sino que busca optimizar el agroecosistema en sus dimensiones económica, social y ecológica (Altieri & Nicholls, 2000; Wezel *et al.*, 2020).

En la búsqueda de alternativas, para mitigar los efectos negativos del cambio climático y promover la agricultura sustentable, la diversidad de especies, se presenta como una estrategia clave para diseñar arreglos agroecológicos en sistemas productivos de café. La incorporación de

árboles y cultivos asociados, ofrece múltiples beneficios, entre los que destacan: la mejora de la fertilidad del suelo, la reducción de la erosión y el incremento de la materia orgánica; un ejemplo notable, son las leguminosas, cuya implementación es ampliamente recomendada, debido a su rápido crecimiento, capacidad para proporcionar sombra, contribuir a la restauración del suelo, controlar la erosión, conservar la biodiversidad y fijar nitrógeno mediante la descomposición de la biomasa y los nódulos de las raíces después de la poda (Criollo-Escobar *et al.*, 2020; Ordóñez-Jurado *et al.*, 2019).

2.2.3 Biodiversidad en los Ecosistemas Cafeteros

La Biodiversidad, o Diversidad Biológica, se define, como la amplia variedad de seres vivos que habitan en el planeta Tierra, incluyendo los procesos ecológicos en los que participan, su historia evolutiva y los cambios que han experimentado a lo largo de millones de años en interacción con su entorno natural y sus elementos. Este concepto, no solo abarca la variedad de especies, sino también la diversidad genética dentro de cada especie y la diversidad de ecosistemas (Blasco & López, 2020). El valor fundamental de la Biodiversidad radica, en que es el resultado de un proceso histórico natural que se ha desarrollado durante miles de millones de años; por esta razón, la Diversidad Biológica, tiene un valor intrínseco y el derecho de continuar su existencia. Los seres humanos, como producto y parte integral de esta diversidad, tienen la responsabilidad de protegerla y respetarla (Manson *et al.*, 2018).

En el contexto global, la implementación de prácticas de monocultivo, ha llevado al reemplazo de la biodiversidad natural, por un número limitado de especies cultivadas, generando una dependencia de insumos externos para mantener los rendimientos económicos, lo que ha puesto en riesgo, la agrobiodiversidad y, en consecuencia, la seguridad alimentaria de muchas comunidades; este problema se agudiza, durante los períodos de fluctuación de los precios en los mercados internacionales (Altieri & Nicholls 2007).

La región cafetera de Nariño, se caracteriza por su alta diversidad florística y una estructura compleja, con múltiples estratos vegetales; la mayoría de las especies leñosas presentes, son nativas de la región, mientras que otras provienen de rangos geográficos y ecológicos similares; estos sistemas de producción agroforestal, basados en el cultivo tradicional de café, funcionan como verdaderos bancos de germoplasma, albergando una alta diversidad biológica nativa. En este contexto, el café, es solo uno de los componentes de la composición florística y la estructura del agroecosistema; estudios recientes, indican, que las especies más utilizadas en estos sistemas, son los guamos (*Inga*) y frutales (*Citrus*); además, es común la asociación café-plátano-banano, debido a su fácil adaptación (Criollo-Escobar *et al.*, 2016; Ordóñez *et al.*, 2021).

Una de las formas de conservar la Biodiversidad, es el establecimiento de sistemas productivos de café bajo diferentes niveles de sombra, conllevando a nuevas oportunidades y tendencias en los mercados nacionales e internacionales; de igual forma, a mantener la sustentabilidad ambiental, económica y social a mediano y largo plazo (Sánchez *et al.*, 2007), además, reduce la necesidad de insumos químicos, como fertilizantes y pesticidas, disminuyendo el impacto ambiental (Moguel & Toledo, 1999).

2.2.4 Sombra en el Cultivo del Café

La adaptación y el comportamiento del cultivo de café en relación con el uso de árboles de sombrío, han sido estudiados por diversos autores. Farfán y Jaramillo, (2009) señalan, que, en zonas con condiciones edafoclimáticas favorables, como disponibilidad de agua, humedad adecuada y alta nubosidad, es recomendable cultivar el café a libre exposición solar, por el contrario, en regiones con condiciones adversas para el cultivo, como una distribución irregular de lluvias, suelos con baja retención de humedad, limitaciones físicas o alta radiación solar, se recomienda el uso de sombrío, para mitigar estos factores adversos.

La reducción del rendimiento en la producción de café, depende del porcentaje de sombra, que se maneje en el cafetal, Farfán, (2014) indica, que, en regiones donde se utiliza el sistema de sombrío, si este supera el 40%, se observa una disminución en la productividad del cultivo. Sin embargo, algunos investigadores sugieren, que estas pérdidas pueden ser compensadas por el precio que alcanza el café, especialmente de altura en mercados diferenciados, así como por los productos adicionales que se obtienen de los árboles asociados (Delgado-Vargas *et al.*, 2022). Por lo tanto, el manejo del sombrío debe ser óptimo, manteniendo un número adecuado de árboles que permita equilibrar el rendimiento del café, la resiliencia del sistema y su sustentabilidad a largo plazo.

En el departamento de Nariño, el cultivo del café, está asociado con árboles u otras especies, en la mayoría de los casos funcionan como sombra; sin embargo, estos árboles generalmente, no están dispuestos bajo un diseño espacio-temporal definido, sino que se distribuyen de manera irregular en el terreno, en ubicaciones irregulares o dispersas al azar (Ordoñez *et al.*, 2021). A pesar, de la distribución irregular de las especies utilizadas como sombrío, estas asociaciones contribuyen a la conservación biológica, ya que mantienen, en gran medida, las funciones del ecosistema primario que reemplazan.

Las especies acompañantes se manejan, con el propósito de generar productos adicionales, como dendroenergéticos, madera, frutas y otros subproductos destinados al autoconsumo o a la venta. Es común, que, durante la etapa inicial de crecimiento del cultivo de café, se utilicen especies acompañantes para proteger las plantas jóvenes en el primer año; entre los cultivos se encuentran: yuca (*Manihot esculenta* Crantz), lulo (*Solanum quitoense*) Lamarck, tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav.), maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.) y plátano (*Musa paradisiaca* L.); algunas de estas especies funcionan como sombrío transitorio, mientras que otras, ocupan el espacio hasta que las plantas de café cubren completamente las calles: este sistema no solo favorece el desarrollo del café, sino que

también contribuye a la diversificación productiva y a la sustentabilidad del agroecosistema (Ordóñez-Jurado, 2014; Lagos-Burbano *et al.*, 2019).

En los sistemas de asociación de árboles con café, es posible identificar dos grandes tipos: el primero, son aquellos que se basan principalmente, en el uso de árboles de servicio, como *Inga spp.* y *Erythrina spp.*; el segundo, aquellos que incorporan árboles de producción maderable o frutal, como *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken y *Citrus spp.* Teniendo en cuenta lo anterior y la importancia de las leñosas perennes en los sistemas agroforestales cafeteros, el propósito principal del productor, es optimizar la producción de café, integrando prácticas que mejoren tanto el rendimiento como la sostenibilidad del sistema productivo (Farfán & Jaramillo, 2009; Delgado-Vargas *et al.*, 2022).

En la zona cafetera de Nariño, es común observar árboles maderables y frutales utilizados como sombrío permanente no regulado; esto genera áreas con niveles de sombra, que varían desde muy escasa y en algunos sitios excesiva, superiores a los recomendados para el cultivo de café (Delgado-Vargas *et al.*, 2022). La densidad y distribución del sombrío, dependen de la localidad; el dosel de los árboles varía según el espaciamiento de las especies utilizadas, además, en el establecimiento y manejo del sombrío en la mayoría de los casos, no consideran las condiciones climáticas de la región. La implementación árboles se debe principalmente, a factores como la velocidad de crecimiento, e interés para las familias, además es importante destacar, que algunos de estos árboles son producto de la regeneración natural (Pinoargote *et al.*, 2017).

No obstante, según la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (FHIA, 2004) el uso y manejo adecuado de los árboles de sombra, tiene como objetivo, evitar extremos que pueden ser perjudiciales para el cultivo; por ejemplo, un exceso de sombra, puede limitar la producción de café, mientras que una exposición excesiva al sol, puede reducir la vida productiva de la plantación y aumentar la demanda de insumos agrícolas.

2.2.5 Especies Leñosas Asociadas al Sistema Productivo De Café.

Muchas de estas leñosas perennes, son asociadas y manejadas en las fincas, de manera tradicional; estas asociaciones agroforestales, según la FAO, (2021) son sistemas y tecnologías de uso de la tierra, en los que las perennes leñosas (árboles, arbustos, palmeras, bambúes, entre otros) coexisten en la misma unidad de manejo, con cultivos agrícolas o animales, bajo un arreglo espacial y temporal. La presencia de especies leñosas en el cultivo del café, se caracteriza por constituir sistemas de producción multifuncionales, que diversifican y mantienen la producción; además, contribuyen a múltiples beneficios en términos de funciones ambientales, productivas, socioeconómicas, biológicas, etológicas, protectoras y estéticas, entre otras. Estas leñosas perennes son utilizadas por los agricultores, para obtener diversos beneficios, como el sombrío para los cultivos, la conservación de la biodiversidad, la presencia de agentes de control biológico, el control de arvenses, el aporte de materia orgánica al suelo, la conservación de suelos, la alimentación familiar y animal, la elaboración de artesanías y la obtención de combustible, entre otros (Lagos-Burbano *et al.*, 2019; Ordóñez-Jurado *et al.*, 2019; Farfán, 2014).

En las zonas de vocación cafetera del departamento de Nariño, se han identificado diversas especies leñosas de gran importancia ecológica y productiva, estas especies se encuentran distribuidas en diferentes configuraciones, como barreras vivas, árboles dispersos, linderos, asociaciones y franjas; entre las especies más destacadas se encuentran *Albizia carbonaria* Britton (carbonero), *Cedrela odorata* L. (cedro), *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken (nogal), *Ochroma piramydale* (Cav. Ex Lam.) Urb. (balso), *Guadua angustifolia* Kunth (guadua), *Erythrina edulis* Triana ex Micheli (chachafruto), *Lafoensia acuminata* Ruiz & Pav.) DC. (guayacán), *Trichantera gigantea* (Humboldt & Bonpland) Nees, (nacedero), *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp. (matarratón), *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F.Cook (cachimbo) y frutales como *Inga sp* (guamo), *Musa paradisica* L. (plátano), *Musa sp.* (banano), *Musa sp.* (guineo), *Citrus sinensis* (L.) Osbeck (naranja), *Citrus sp.* (limón) y *Persea americana* Mill. (aguacate) (Ordóñez *et al.*, 2021).

La reintroducción de especies leñosas en los sistemas cafeteros, es una práctica reciente, que se está retomando, debido a que, en las décadas anteriores, la influencia de la Revolución Verde y la asistencia técnica de instituciones gubernamentales, los cafetales tradicionales, fueron reemplazados en gran medida, por sistemas de agricultura convencional, basados en el monocultivo del café (Ordóñez-Jurado, 2014; Delgado-Vargas *et al.*, 2022).

2.2.6 Efecto de los Árboles sobre la Producción de Café

La sombra de los árboles sobre los rendimientos del cultivo de café, no es el único factor que influye en la productividad del sistema. Según Villarreyana *et al.*, (2020) los efectos observados, no son atribuibles exclusivamente a la presencia de sombra, sino también al diseño y manejo del sistema agroforestal. Lo anterior implica, que los impactos negativos pueden evitarse o mitigarse, mediante una selección adecuada de los árboles de sombra, considerando las condiciones locales, como la densidad de plantación y las especies utilizadas. Además, prácticas como la poda regulada, pueden ayudar a controlar la sombra excesiva, optimizando así las condiciones para el crecimiento y producción del café.

Investigaciones de Perfecto *et al.*, (2005); Manson *et al.*, (2018); Jurado *et al.*, (2020) destacan, que el uso de árboles de sombra en los sistemas cafeteros, no solo contribuye a la diversificación de los agroecosistemas, sino que también mejora la provisión de servicios ecosistémicos, como la conservación del suelo, la regulación del microclima y el mantenimiento de la biodiversidad. Las tasas de crecimiento de los árboles asociados a los cafetales, se ven significativamente beneficiadas, por la fertilización aplicada a los cafetos; estas tasas de crecimiento son considerablemente más altas, en comparación con las reportadas en plantaciones forestales puras (Jiménez *et al.*, 2012). Este fenómeno se atribuye, a la sinergia generada en los sistemas agroforestales, donde los nutrientes aportados a los cafetos, también son aprovechados por los árboles asociados, promoviendo un crecimiento más acelerado.

No obstante, es fundamental destacar, que un manejo inadecuado de las especies arbóreas, puede generar interacciones negativas dentro del sistema cafetalero, como es, la selección inapropiada de árboles, puede provocar una competencia directa por recursos esenciales como el agua, la luz solar y los nutrientes del suelo, lo cual repercute negativamente en el desarrollo del cafeto y, por ende, en su productividad (Farfán, 2014; DaMatta & Rodríguez, 2007). Un sombrío excesivo, puede favorecer el desarrollo de plagas y enfermedades, dificultar las operaciones de cosecha y, en casos extremos, la caída de ramas, puede causar daños físicos al cultivo (Villarreyna *et al.*, 2020).

2.3 Diversidad de Especies Leñosas en Sistemas Cafeteros

El estudio realizado por Ordóñez *et al.* (2021) analizó la diversidad florística y la importancia cultural de las especies leñosas en sistemas cafeteros. La investigación se llevó a cabo, en fincas cafeteras del municipio de La Unión, ubicado en el departamento de Nariño, Colombia; las fincas se localizan en un rango altitudinal que oscila entre los 900 y 2.200 msnm, la zona se caracteriza por una temperatura media de 19 °C, una precipitación media anual de 2.116 mm y brillo solar promedio de 4,9 horas por día. En cuanto a las condiciones edáficas, los suelos de la región son superficiales, de origen volcánico, con bajo contenido de materia orgánica, fertilidad media natural y una alta susceptibilidad a la erosión.

Para identificar las especies leñosas, de uso común y de importancia cultural en los sistemas de producción de café, fue necesario definir las fincas, para ello, se utilizó información proporcionada por el Comité de Cafeteros de Nariño, Seccional La Unión, (2018). En el municipio de La Unión, se reportaron un total de 6.187 fincas cafeteras, las cuales, ocupan un área de 5.087 hectáreas dedicadas al cultivo de café.

Población y Tamaño de la Muestra. La población está conformada por las fincas cafeteras, que están ubicadas en tres rangos altitudinales (Tabla 2.1). La unidad muestral correspondió, a cada finca cafetera, la cual se constituyó como la unidad de análisis del estudio.

Tabla 2.1.*Rangos Altitudinales, para Muestreo Especies Leñosas Sistemas Cafeteros*

Rango	Altitud (msnm)
1	<1.500
2	1.500 – 1.800
3	>1.800

Nota. Población conformada por las fincas cafeteras, que están ubicadas en tres rangos altitudinales. Esta investigación.

Se recopiló y analizó información secundaria, relacionada con el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del municipio, la encuesta cafetera y los estudios realizados en la zona por instituciones públicas y privadas vinculadas al sector cafetero. Para la recolección de información primaria, se aplicó una encuesta, que incluyó preguntas relacionadas con las especies leñosas presentes en los sistemas de cultivo de café; se hizo especial énfasis en el nombre regional de las especies, sus usos (medicinal, forraje, leña, control de erosión, artesanal, proteína animal, entre otros), así como su importancia a nivel de la finca. Estos aspectos se consideraron indicadores sensibles de las prácticas de manejo, que los caficultores suelen implementar; la encuesta fue aplicada a 100 productores, seleccionados de manera aleatoria y distribuidos de forma proporcional en tres rangos altitudinales.

2.3.1 Diversidad de Especies Leñosas.

Para identificar las especies leñosas presentes en los sistemas de producción de café y de uso en las fincas, se utilizó la base de datos del herbario de la Universidad de Nariño (PSO) y los herbarios virtuales de Trópicos® (<http://www.tropicos.org>) y la Universidad Nacional de Colombia (<http://www.biovirtual.unal.edu.co>).

2.3.1.1 Diversidad Alfa

Riqueza de Especies. La forma más sencilla de medir la biodiversidad, es contar el número de especies diferentes (conocido como Riqueza Específica) o el número de individuos de una especie (conocido como Abundancia); estas mediciones pueden aplicarse en diferentes escalas, desde una finca hasta un país entero (Manson *et al.*, 2018). Para determinar la riqueza de especies en cada rango altitudinal, se realizó el conteo del número de especies presentes.

En los tres rangos altitudinales donde se cultiva café, se identificaron 59 especies arbóreas de uso común, que interactúan con este cultivo. Estas especies están distribuidas en 32 familias botánicas y 46 géneros (Tabla 2.2); la familia Fabaceae fue la más representativa, con once especies, seguida por Rutaceae, con siete especies. Otras familias destacadas incluyen Myrtaceae y Bignoniaceae, con cuatro especies cada una, y Lauraceae, con tres especies.

Tabla 2.2.

Especies Identificadas en Tres Rangos Altitudinales Municipio La Unión Nariño.

Nombre Común	Nombre Científico	Familia
Acacia negra	<i>Acacia melanoxylon</i> R. Br.	Fabaceae
Achiote	<i>Bixa orellana</i> ; L	Bixaceae
Aguacate	<i>Persea americana</i> ; Mill	Lauraceae
Aguacatillo	<i>Persea caerulea</i> ; (Ruiz & Pav.) Mez	Lauraceae
Arrayan	<i>Myrcianthes rhopaloides</i> (Kunth) McVaugh	Myrtaceae
Balso	<i>Ochroma pyramidale</i> ; (Cav. ex Lam.) Urb.	Malvaceae
Cacao	<i>Theobroma cacao</i> L.	Malvaceae
Cachimbo	<i>Erythrina poeppigiana</i> (Walp.) O.F. Cook.	Fabaceae
Cajeto o crecedor	<i>Delostoma integrifolium</i> D. Don	Bignoniaceae
Carambolo	<i>Averrhoa carambola</i> ; L	Oxalidaceae
Carbonero gigante	<i>Albizia carbonaria</i> Britton	Fabaceae
Cascarillo	<i>Ladenbergia oblongifolia</i> (Humb.&Bonpl.) L. A	Rubiaceae

Nombre Común	Nombre Científico	Familia
Cedro	<i>Cedrela odorata</i> L.	Meliaceae
Chachafruto	<i>Erythrina edulis</i> Triana ex Micheli.	Fabaceae
Chilco	<i>Escallonia paniculata</i> (Ruiz & Pav)	Escalloniaceae
Chirimoya	<i>Annona cherimola</i> ; Mill., Gard	Annonaceae
Ciprés	<i>Cupressus lusitanica</i> ; Miller	Cupressaceae
Cordoncillo	<i>Piper aduncum</i> L.	Piperaceae
Cucharo	<i>Myrsine guianensis</i> (Aubl.) Kuntze	Myrsinaceae
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i> ; Labill	Myrtaceae
Gualanday	<i>Jacaranda caucana</i> ;	Bignoniaceae
Guamo churima	<i>Inga marginata</i> Wild.	Fabaceae
Guamo macheto	<i>Inga densiflora</i> ; L	Fabaceae
Guamo rabo mono	<i>Inga codonantha</i> Pittier	Fabaceae
Guanabana	<i>Annona muricata</i> L.	Annonaceae
Guayaba	<i>Psidium guajava</i> ; L	Myrtaceae
Guayacan	<i>Lafoensia acuminata</i> (Ruiz & Pav.) DC.	Lythraceae
Hobo	<i>Spondias purpurea</i> ; L	Anacardiaceae
Jigua	<i>Nectandra acutifolia</i> k (Ruiz & Pav.)	Lauraceae
Leucaena	<i>Leucaena leucocephala</i> ; (Lam.) de Wit,	Fabaceae
Limón Común	<i>Citrus limon</i> ; L	Rutaceae
Limón Mandarino	<i>Citrus limonia</i> ; L	Rutaceae
Limón rugoso	<i>Citrus medica</i> ; L	Rutaceae
Limón taiti	<i>Citrus x latifolia</i> ; Tanaka ex Q. Jiménez	Rutaceae
Mandarina	<i>Citrus reticulata</i> ; Blanco	Rutaceae
Mango	<i>Mangifera indica</i> ; L	Anacardiaceae
Mano de oso	<i>Oreopanax incisus</i> (Willd. ex Schult.) D. & P.	Araliaceae
Matarratón	<i>Gliricida sepium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp	Fabaceae
Moringa	<i>Moringa oleifera</i> ; Lam	Moringaceae
Nacedero	<i>Thichanthera gigantea</i> (Humboldt & Bonpland)	Acanthaceae
Naranja	<i>Citrus x sinensis</i> (L.) Osb.	Rutaceae
Níspero	<i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl	Rosaceae
Nogal cafetero	<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.)	Boraginaceae

Nombre Común	Nombre Científico	Familia
Pelotillo	<i>Viburnum pichinchense</i> Benth.	Caprifoliaceae
Pichuelo	<i>Senna pistaciifolia</i> (Kunth) H.S. Irwin & Barneby	Fabaceae
Pino	<i>Pinus patula</i> Schltdl. & Cham.	Pinaceae
Pomo	<i>Syzygium jambos</i> L.	Myrtaceae
Quillotoco	<i>Tecoma stans</i> (L.) Juss. ex Kunth	Bignoniaceae
Roble	<i>Quercus humboldtii</i> Kotschy ex A. DC.	Fagaceae
Samán	<i>Samanea saman</i> ; (Jacq.) Merr.	Fabaceae
Sauce llorón	<i>Salix humboldtiana</i> ; Willd	Salicaceae
Sauco	<i>Sambucus nigra</i> L.	Caprifoliaceae
Tomate de árbol	<i>Solanum betaceum</i> ; Cav. Anales Hist	Solanaceae
Tulipan	<i>Spathodea campanulata</i> ; P. Beauv	Bignoniaceae
Urapan	<i>Fraxinus chinensis</i> ; Roxb	Oleaceae
Vainillo (velero)	<i>Senna spectabilis</i> (DC.) H.S. Irwin & Barneby	Caesalpiniaceae
Yarumo	<i>Cecropia peltata</i> ; L	Urticaceae
Zapote	<i>Quararibea cordata</i> (Humb. & Bonpl.) Vischer	Sapotaceae

Nota. Especies arbóreas de uso común, que interactúan con este cultivo. Ordóñez *et al.* (2021).

En los tres rangos altitudinales evaluados, se observó una similitud en el número de especies, pero no en las especies compartidas. El rango inferior a 1.500 m. presentó 36 especies, el rango entre 1.500 y 1.800 m. registró 35 especies y el rango superior a 1.800 m. contó con 34 especies; de las especies leñosas utilizadas en las fincas cafeteras, 32 son nativas y 27 son introducidas, muchas de las cuales se encuentran naturalizadas, que equivale al 45,8% de las especies leñosas. En la presente investigación, se incluyeron árboles presentes en diferentes agroecosistemas de la finca cafetera, como cercos vivos para la delimitación del cultivo, barreras rompevientos, protección de fuentes hídricas y áreas de restauración ecológica. Estas especies, cumplen diversas funciones ecosistémicas, como la provisión de sombra, la generación de dendroenergía, la protección de suelos, la producción de forrajes, el suministro de alimentos para

el ser humano y la conservación de áreas con relevancia ambiental.

La FHIA, (2004) indica que, en las regiones cafeteras, el mayor número de especies, se encuentra en zonas bajas, ya que los productores buscan controlar las altas temperaturas presentes en el sistema de producción. Por su parte, Farfán y Jaramillo, (2009) mencionan, que la presencia de especies utilizadas como sombrío en el cultivo de café, disminuye a medida que aumenta la altitud, debido al incremento de la nubosidad, la cual actúa como sombra natural. Lo anterior, se debe a que, en las zonas de mayor altitud, el exceso de sombra puede generar una disminución en la producción del café.

2.3.1.2 Diversidad Beta

Índice de Similitud de Jaccard (Cj). Para comparar la diversidad entre rangos altitudinales, se utilizó el Índice de Jaccard, que mide la semejanza entre ecosistemas.

$$Cj = \frac{c}{a+b-c}$$

Dónde: (a): número de especies presentes en el ecosistema A; (b): número de especies presentes en el ecosistema B; (c): número de especies compartidas por las comunidades.

En la Tabla 2.3, se presenta la similitud de las especies arbóreas identificadas en los tres rangos altitudinales, correspondiente a los sistemas productivos de café; los resultados indican una baja similitud entre los rangos altitudinales; el valor más alto de similitud se observó entre los rangos I y II, los cuales comparten 24 especies, lo que equivale al 33,8% de su composición florística, por otro lado, la similitud entre los rangos I y III fue menor, con un 24,2%, solo comparten 17 especies. La baja similitud, en la diversidad de especies entre los rangos altitudinales puede atribuirse a las condiciones climáticas, factores edáficos y al manejo del sistema.

Tabla 2.3.

Índice de Jaccard (Cj) para las Especies Arbóreas en Tres Rangos Altitudinales en Sistemas Productivos de Café.

Índice de Jaccard			
Rangos (msnm)	I (<1.500)	II (1.500-1.800)	III (>1.800)
I (<1.500)	1		
II (1.500-1.800)	33,8%	1	
III (>1.800)	24,2%	26%	1

Nota. Similitud de las especies arbóreas identificadas en los tres rangos altitudinales. Ordóñez *et al.* (2021).

La disimilitud encontrada, posiblemente se debe, al manejo específico que los productores realizan en el cultivo, el cual, varía según la zona. Esto se explica, porque el conocimiento de los productores, en gran medida, es empírico y se basa en costumbres tradicionales (Criollo-Escobar *et al.*, 2020). La similitud entre especies, es alta, cuando estas son propias de la región o comparten características geográficas similares, por lo tanto, se considera que cada rango altitudinal presenta prácticas culturales diferentes, lo que influye directamente, en el manejo de la finca cafetera.

2.3.2 Índice de Importancia Cultural de las Especies Leñosas (IIC) en Sistemas Cafeteros

Los productores cafeteros, según las condiciones culturales, sociales, ambientales y económicas, definen el manejo, uso y preferencia que le dan a cada especie arbórea. Para determinar la importancia cultural de las especies, existen diversos índices, basados en la asignación de valores para cada uso, desde el Índice de Importancia Cultural (IIC), propuesto originalmente por Turner, (1988), hasta los actuales, que incluyen ciertas modificaciones; estos índices generalmente, se basan, en entrevistas y en la diversidad de usos de las plantas (Briceño *et al.*, 2017; Sánchez *et al.*,

2017). De acuerdo con lo anterior, se plantea la necesidad, de establecer el nivel de importancia de las especies de una manera más objetiva, evaluando su significado cultural, a través de una puntuación, que se obtiene, de la asignación de valores a los factores que contribuyen a su significancia (Turner, 1988).

Por medio del conocimiento local, es posible identificar las especies arbóreas de mayor importancia cultural de un agroecosistema; este índice se determina mediante la integración de la Intensidad de uso (Iu), Frecuencia de mención (Fm) y Valor de uso (Vu), lo que permite reconocer, qué especies son las más conocidas por sus habitantes, mediante un valor, usos o beneficios (ambientales, medicinales alimenticios, culturales); se determina mediante las siguientes fórmulas aplicadas por Figueroa, (2000); Sánchez *et al.*, (2017):

$$Iu = \frac{\text{Número de usos de la Sp.x}}{\text{Número total de usos para todas las especies}} * 100$$

$$Fm = \frac{\text{Número de menciones de la sp.x para todos los usos}}{\text{Número total de menciones de todas las especies para todos los usos}} * 100$$

$$Vu = \frac{\text{Número de menciones de la sp.x para un usos}}{\text{Número total de menciones de todas las especies para un uso}} * 100$$

$$Vut = \sum (Vux + Vuy + Vuz + \dots \dots Vun)$$

$$IIC = \frac{(Iuz + Fmz + Vutz)}{300}$$

Dónde: Intensidad de uso (Iuz): Porcentaje de uso en los que aparece una especie; Frecuencia de mención (Fmz): Sumatoria de menciones para una especie, todos los usos y todos los informantes; Valor de uso (Vutz): Porcentaje de usos en los que aparece una especie para un uso determinado.

Para el registro de las especies de importancia según los productores, se asignaron 22 usos, cada uno identificado con una clave para facilitar su síntesis. En la determinación del Índice de Importancia Cultural, se definieron las siguientes categorías de uso: Madera (Ma), Leña (Le), Carbón

(Ca), Tutores y Postes (Ca), Reforestación Protectora (Rp), Control de Erosión y Protección de Suelos (Ce), Ornamental (Or), Fruto (Fh), Abono Verde (Av), Rituales y Medicinal (Me), Alimento para Animales Domésticos y Fauna (Af), Cerca Viva (Cv), Silvopastoreo (Si), Proteína Animal (Pp), Asociación con Cultivos (Ac), Alimento Humano (Ah), Artesanal (Ar), Aserrió (As), Colorante (Cl), Construcción (Ct), Edificación de Viviendas (Cu), Tratamiento y Prevención de Enfermedades (Ps), Psicotrópicas (Ps), Tóxicos (Tx) y otros, que incluye especies con usos específicos.

Teniendo en cuenta las variables de intensidad de uso, frecuencia de mención y valor de uso de las especies identificadas en los rangos altitudinales, los resultados se presentan en la Tabla 2.4. Se observó, que, en altitudes inferiores a 1.500 msnm, las especies *I. densiflora* y *T. gigantea*, registraron los valores más altos en intensidad de uso, con un 4,41%. En cuanto a la frecuencia de mención y el valor de uso, las especies más relevantes fueron *C. sinensis* y *T. gigantea*, con porcentajes de 12,87% y 22,73%, respectivamente.

En el rango altitudinal II (1.500-1.800 msnm), se destacan las especies *I. densiflora* y *C. reticulata*, con una intensidad de uso del 4,08%. Asimismo, la especie *C. sinensis* se considera la más importante, debido a su alto valor de uso y frecuencia de mención. En altitudes superiores a 1.800 msnm, sobresale *I. densiflora*, ya que presenta la mayor intensidad de uso (5,45%) y el valor de uso más elevado (24,95%). Por otro lado, la especie *P. americana* es la más mencionada en este rango altitudinal. De acuerdo con la percepción de los productores, las especies leñosas mencionadas, son de interés, debido a su contribución en múltiples usos, tales como el suministro de leña, el control de la erosión y la provisión de alimento para humanos, fauna y fines medicinales. Esto se relaciona con lo reportado por Paz *et al.* (2015), quienes destacan, que, dentro de la flora útil de los cafetales, las plantas comestibles y medicinales, cumplen un papel fundamental, al satisfacer necesidades primordiales del ser humano, como la alimentación y la salud.

Tabla 2.4.

Importancia Cultural de Especies Leñosas en los Tres Rangos Altitudinales Cafeteros, Municipio de La Unión, Nariño.

Rangos (msnm)	Especies	Iu%	Fm%	Vut%	ICC%
I (<1500)	Thichanthera gigantea	4,41	11,06	22,73	12,73
	Citrus x sinensis	3,52	12,87	14,86	10,42
	Inga densiflora	4,41	9,12	11,48	8,33
	Cordia alliodora	2,64	0,77	19,54	7,65
	Persea americana	3,96	8,84	9,48	7,43
II (1500-1800)	Citrus sinensis	3,27	13,97	14,30	10,51
	Inga densiflora	4,08	11,00	12,27	9,12
	Thichanthera gigantea	3,27	7,14	11,33	7,24
	Citrus reticulata	4,08	6,64	6,87	5,86
	Lafoensia acuminata	3,67	2,48	11,38	5,84
III (>1800)	Inga densiflora	5,45	16,02	24,95	15,47
	Persea americana	44,6	17,18	17,73	13,12
	Citrus sinensis	4,46	13,80	14,89	11,05
	Trichanthera gigantea	4,46	7,80	19,29	10,51
	Eucalyptus globulus	2,48	2,00	20,20	8,23

Nota: Variables de intensidad de uso, frecuencia de mención y valor de uso de las especies identificadas en los rangos altitudinales. Ordóñez *et al.* (2021).

La preferencia por determinadas especies leñosas, especialmente aquellas asociadas al cultivo de café, coincide con investigaciones realizadas en diversas regiones cafetaleras. Salamanca, (2017) reportó, que los propietarios de fincas, prefieren utilizar como sombra especies de los géneros *Inga*, *Citrus sinensis*, *Chrysophyllum odoratum*, *Persea americana* y *Psidium guajava*; estas especies son valoradas, por proporcionar condiciones óptimas para el cultivo de café, aumentar la productividad, ofrecer alimento tanto para la fauna silvestre como para los seres humanos y generar productos secundarios de

múltiples usos, como madera, leña, abonos verdes y frutos, entre otros. Zapata, (2019) menciona, que las especies *C. sinensis*, *I. edulis* y *C. alliodora*, fueron las de mayor importancia ecológica en los cafetales de los municipios de Pacho, Rioseco y Tibacuy, en Cundinamarca; esto estaría relacionado, con las preferencias de los productores, asociadas al uso y a las características de las especies, las cuales determinan interacciones favorables en asociación con el café. En los estudios regionales sobre biodiversidad en las zonas cafeteras de Colombia, Sánchez *et al.*, (2013) identificaron, que las especies más frecuentes utilizadas como sombrío en cafetales convencionales, varían según la región. En Santander, la especie predominante fue *Inga edulis*, con un 28% de presencia, mientras que, en la región de El Cairo, *Inga codonantha* fue la más utilizada, con un 73%; estos resultados evidencian la predominancia del género *Inga* en las zonas evaluadas.

En el paisaje cafetero del municipio de La Unión, la utilización de especies maderables para el sombrío del cultivo de café, es una práctica común. Según Ordóñez-Jurado, (2014) en algunas fincas cafeteras de esta región, el sombrío está compuesto por especies de importancia comercial, como *C. sinensis*, *C. reticulata* y *P. americana*, principalmente, debido a que generan ingresos adicionales para los productores; también se encuentran especies como *Inga* sp., *G. sepium*, que, aunque no son consideradas comercialmente importantes, cumplen un papel fundamental en el ecosistema y en el manejo agroforestal del cultivo.

La importancia cultural, de las especies leñosas presentes en las fincas cafeteras, se determinó, mediante la sumatoria de tres indicadores: la Intensidad de uso (Iu), la Frecuencia de mención (Fm) y el Valor de uso (Vu), tal como se detalla en la Tabla 2.5. La especie *I. densiflora*, registró el mayor valor porcentual en relación con la sumatoria del Índice de Importancia Cultural (ICC) en los tres rangos altitudinales, con un 32,92%; le siguió *C. sinensis* con un 31,98%; en orden descendente, se ubicaron *T. gigantea* y *P. americana*, con 30,49% y 26,27%, respectivamente.

Tabla 2.5.

Índice de Importancia Cultural (ICC) de las Especies Leñosas en Fincas Cafeteras en Tres Rangos Altitudinales

Especies	Rangos altitudinales (m.s.n.m.)			% ICC	Orden ICC
	(I) <1.500	(II) 1.500-1.800	(III) >1.800		
<i>Inga densiflora</i>	8,33	9,12	15,47	32,92	1
<i>Citrus sinensis</i>	10,42	10,51	11,05	31,98	2
<i>Thichanthera gigantea</i>	12,73	7,24	10,51	30,49	3
<i>Persea americana</i>	7,43	5,72	13,12	26,27	4
<i>Citrus reticulata</i>	6,82	5,86	5,14	17,81	5
<i>Psidium guajava</i>	6,00	5,37	5,07	16,44	6
<i>Cordia alliodora</i>	7,65	4,59	2,94	15,18	7
<i>Mangifera indica</i>	6,93	5,56	1,79	14,27	8
<i>Citrus limon</i>	3,85	7,37	2,62	13,84	9
<i>Eucalyptus globulus</i>		2,96	8,23	11,19	10
<i>Ochroma pyramidale</i>	3,51	3,47	3,95	10,93	11
<i>Lafoensia acuminata</i>	2,09	5,84	2,52	10,45	12
<i>Erythrina edulis</i>	0,70	5,21	2,98	8,89	13
<i>Inga codonantha</i>	4,18	3,63		7,81	14
<i>Cecropia peltata</i>	1,60	3,31	2,55	7,46	15
<i>Citrus x latifolia</i>	2,28	4,38		6,66	16
<i>Erythrina poeppigiana</i>	5,58	0,71		6,29	17
<i>Citrus medica L.</i>	2,51	3,57		6,08	18
<i>Eriobotrya japonica</i>		3,45	2,61	6,05	19
<i>Inga marginata</i>	2,91	2,97		5,88	20

Nota: Importancia cultural, de las especies leñosas presentes en las fincas cafeteras. Ordóñez *et al.* (2021).

Estos resultados, reflejan la relevancia del uso de especies leñosas en las fincas cafeteras, particularmente, para funciones como el sombrío del cultivo de café, la delimitación de predios, la protección de suelos y la

alimentación humana y animal, entre otros. Estas prácticas contribuyen significativamente, a la seguridad alimentaria de las poblaciones locales. Estudios realizados en diversas regiones cafetaleras, han corroborado la importancia de las especies del género *Inga*, particularmente, por su uso como árboles de sombrío en los cultivos de café; estos árboles, no solo proporcionan sombra, sino que también contribuyen significativamente al aporte de materia orgánica al suelo. Según investigaciones, los suelos bajo sistemas de sombrío con *Inga*, reciben aproximadamente 2,5 veces más materia orgánica en comparación con los cultivos expuestos directamente al sol; este incremento en la materia orgánica, mejora las propiedades físicas del suelo, aumenta la retención de humedad y la reducción de la densidad aparente, factores que favorecen el desarrollo óptimo del cultivo de café (Cardona-Calle & Sadeghian-Khalajabadi, 2005).

Farfán *et al.*, (2013), Cardona-Calle & Sadeghian-Khalajabadi, 2005) afirman, que el guamo (*Inga spp.*) ha sido ampliamente utilizado, como árbol de sombra en cultivos perennes, especialmente en el cultivo de café; entre las especies más destacadas se encuentran *Inga densiflora* e *Inga edulis*, las cuales son valoradas por los múltiples servicios ecosistémicos que brindan. Estas especies actúan como barreras rompevientos, regulan la radiación solar y la temperatura y reducen la demanda de agua en los sistemas agrícolas. Además, el guamo tiene un importante valor socioeconómico y ecológico: su madera se utiliza como fuente de leña, en construcción y en carpintería, mientras que sus frutos son aprovechados tanto para la alimentación humana como para la fauna silvestre.

Los productores mencionaron, que *C. sinensis*, es una especie frutal, que se establece deliberadamente en las fincas cafeteras; este cultivo ha sido uno de los más tradicionales en la zona durante muchos años, la fruta es consumida regularmente por los habitantes de la región y una parte de ella, se comercializa en los mercados locales. Lo anterior, convierte a *C. sinensis*, en una estrategia clave para la diversificación de las fincas. Al respecto, Sosa *et al.*, (2004) indican, que, en la diversificación de las fincas cafeteras, los cítricos, desempeñan un papel económico y social

importante, contribuyendo a la generación de ingresos adicionales, al autoconsumo familiar y al mejoramiento de la calidad del café.

De acuerdo con la percepción y el conocimiento local de los productores, la especie *T. gigantea*, tiene una importancia cultural significativa, debido a sus múltiples usos, como forraje para animales, especialmente, para especies menores, protección y control de la erosión, uso medicinal, alimento para la fauna silvestre y su papel en el mejoramiento productivo del cultivo de café. Además, como señalan Ricaurte *et al.*, (2014), esta especie contribuye a la conservación de la humedad del suelo, proporciona mulch a través de la caída natural de su follaje y reduce significativamente la pérdida de suelo por erosión.

Los agricultores manifiestan, una marcada preferencia por la inclusión de árboles en los sistemas de cultivo de café, debido a los múltiples beneficios que estos proporcionan. Según estudios recientes, la dependencia de los recursos forestales, es particularmente significativa, en comunidades rurales, donde los árboles no solo contribuyen a la subsistencia diaria, sino que también desempeñan un papel crucial en la seguridad alimentaria y la generación de ingresos (Angelsen *et al.*, 2014).

Conclusiones

La presencia de especies leñosas utilizadas comúnmente en los agroecosistemas cafeteros, particularmente como sombrío para el cultivo de café, varía significativamente entre diferentes rangos altitudinales, esta variación se debe a las características específicas de cada lugar, como el clima, la temperatura, el tipo de sistema de cultivo, la fertilidad del suelo, el contenido de humedad y otros factores ambientales, como la exposición al brillo solar y la nubosidad; a parte de lo anterior, son importantes los conocimientos empíricos o tradicionales de los productores, factores que influyen en la selección e implementación de especies leñosas asociadas a los sistemas cafeteros de la región.

La riqueza de especies leñosas, encontrada en cada rango altitudinal, fue notablemente alta, lo que indica, que los productores manejan una diversidad de especies, principalmente para proporcionar sombrío al café; este manejo tiene como objetivo mejorar la calidad del producto y garantizar la durabilidad del cultivo. La ausencia de sombrío en los cafetales, puede generar riesgos significativos, como el daño por altas temperaturas, la reducción del ciclo de vida del cultivo y el aumento en el uso de insumos agrícolas.

Entre las especies leñosas identificadas, *I. densiflora*, *C. sinensis*, *T. gigantea* y *P. americana*, se destacan por su importancia cultural, ecológica y socioeconómica para los caficultores de la región; las especies fueron valoradas, por su Frecuencia de Mención, Intensidad de Uso y Valor de Uso, dentro de los rangos altitudinales estudiados; su relevancia radica, no solo en su contribución al equilibrio ecológico del sistema productivo, sino también en los ingresos adicionales que generan a través de la producción de frutos y madera. Estas especies son fundamentales, para la sustentabilidad del sistema cafetero, ya que combinan beneficios ambientales y económicos.

A photograph of a coffee plantation on a hillside. The foreground is filled with dense green coffee bushes, some of which have small red coffee cherries. In the background, a steep, green hill rises under a bright blue sky with scattered white clouds. A few banana trees are visible on the left side of the hill. The overall scene is vibrant and natural.

Capítulo 3

**Evaluación de la Sustentabilidad en
Sistemas de Producción de Café**
(Coffea arabica L.)

3.1 Introducción

El cultivo de café en Colombia, abarca un área total de 583.698 hectáreas, distribuidas en 603 municipios y 23 departamentos; las principales variedades cultivadas incluyen Castillo, Colombia, Caturra, Típica, Borbón, Tabí, Maragogipe y Catuai, con una producción anual de 14.572 sacos de 60 kg; respecto al sistema de cultivo, el 67% del área está expuesta al sol, el 30% bajo semisombra y solo el 3% en sombra (Federación Nacional de Cafeteros [FNC], 2019; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MinAgricultura], 2020). No obstante, la actividad cafetera tradicional, ha enfrentado desafíos ambientales y sociales, agravados por prácticas de manejo inadecuadas, entre estas se destacan, el establecimiento de monocultivos intensivos en zonas de ladera y el uso indiscriminado de agroquímicos, lo que ha generado problemas de inequidad social, contaminación hídrica y degradación de suelos (Loaiza *et al.*, 2014; Machado & Ríos, 2016).

Entre los principales desafíos del sector agrario, se encuentran, la necesidad de realizar un diagnóstico integral de los agroecosistemas; frente a esto, la evaluación de la sustentabilidad, se posiciona como una herramienta clave para obtener una visión holística del estado de los sistemas productivos. Diversos autores, como Astier *et al.*, (2008), Sarandón *et al.*, (2014), Schuschny & Soto de la Rosa, (2009) han desarrollado metodologías, para evaluar la evolución de los agroecosistemas, permitiendo que agricultores, investigadores y extensionistas, identifiquen su condición actual y realicen una planificación, monitoreo y seguimiento adecuados. Para evaluar la sustentabilidad de los sistemas agrarios desde un enfoque sistémico, es fundamental, desarrollar metodologías que integren las dimensiones social, económica y ambiental, considerando su interacción dinámica en contextos específicos (Binder *et al.*, 2010; Sarandón y Flórez, (2014). Autores como Cieza & Sarandón, (2023), Lovell *et al.*, (2002) destacan, que

la evaluación a nivel de finca, es clave para identificar barreras técnicas, ecológicas y sociales, así como para proponer soluciones adaptativas. No obstante, enfoques más recientes, amplían esta perspectiva, incorporando escalas territoriales y criterios de resiliencia climática.

Para diagnosticar y evaluar el estado de un sistema agrícola, una alternativa consiste, en la construcción de indicadores, basados en valoraciones cualitativas y cuantitativas, así como en metodologías que determinan Índices de Sustentabilidad. Estos métodos sintetizan la información, en un valor numérico único, denominado Indicador (Astier *et al.*, 2008; Schuschny & Soto de la Rosa, 2009). Los indicadores e índices, permiten una comprensión integral del sistema de producción, facilitando la toma de decisiones, orientadas a mantener o incrementar la productividad, reducir los riesgos e incertidumbres y fortalecer los servicios ecosistémicos y sociales, sin comprometer su viabilidad económica (Astier *et al.*, 2008; Sarandón & Flores, 2014). Por la complejidad en la estructura y composición de los sistemas cafeteros, se requiere un análisis integral de los mismos, identificando parámetros sensibles y fácilmente cuantificables, en términos de sustentabilidad. El objetivo de este enfoque, es subsanar vacíos de información, que afectan la toma de decisiones, garantizando pertinencia social, económica y ambiental; además, busca reconocer y fortalecer prácticas agroecológicas, que promuevan la sustentabilidad de los sistemas productivos (Altieri *et al.*, 2011).

3.2 Marco Conceptual

3.2.1 Evaluación de la Sustentabilidad

Si el concepto de Sustentabilidad es intrínsecamente complejo, su evaluación representa, un desafío aún mayor, ya que implica, la integración de tecnología, inversión financiera, conocimiento especializado y la aplicación de prácticas ecológicas; además, exige una reflexión profunda, sobre transformaciones éticas y filosóficas, en torno a las necesidades humanas y la responsabilidad colectiva, hacia la conservación de la biodiversidad, la diversidad cultural y los ecosistemas (Sachs, 2015). El

análisis de los sistemas agrarios, desde la perspectiva de la Sustentabilidad, se enfoca principalmente, a escala de finca (Lovell *et al.*, 2002), lo permite identificar con claridad, las limitaciones de la producción agrícola. Este enfoque facilita, el análisis de las principales barreras técnicas, ecológicas y sociales, que afectan a los sistemas productivos (Altieri & Nicholls, 2007).

La implementación de los Principios de la Agricultura Sustentable, requiere marcos de evaluación integrales, que incorporen indicadores multidimensionales. Actualmente, existe una creciente necesidad, de desarrollar metodologías, que permitan evaluar el desempeño de los sistemas socioambientales, con el fin de orientar decisiones y políticas hacia el manejo sustentable de los recursos naturales (Masera *et al.*, 1999). Para medir la Sustentabilidad en el sector agropecuario, es fundamental, contar con herramientas que reflejen la viabilidad social, económica y ambiental de los sistemas de producción. Los marcos de evaluación, son propuestas metodológicas, que guían el proceso de análisis a través de etapas estructuradas; estos parten de atributos y objetivos generales, aplicables a diversos sistemas de manejo y sirven como base, para derivar criterios e indicadores específicos (Sarandón *et al.*, 2014; Masera *et al.*, 1999).

Entre los principales marcos y metodologías para evaluar la Sustentabilidad agropecuaria, se destacan:

- MESMIS (Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales mediante Indicadores de Sustentabilidad)
- SAFE (Sustainability Assessment of Farming and the Environment Framework)
- FESLM (Framework for the Evaluation of Sustainable Land Management)
- MOTIFS (Monitoring Tool for Integrated Farm Sustainability)
- PER (Presión-Estado-Respuesta)
- IICA-GTZ (Marco teórico para la definición de indicadores de sustentabilidad)

- GRI (Global Reporting Initiative)
- MCDA (Análisis de Decisiones Multicriterio)
- SEAMLESS (System for Environmental and Agricultural Modelling; Linking European Science and Society)
- MESILPA (Metodología para la Evaluación de Sustentabilidad a partir de Indicadores Locales en Programas Agroecológicos)

Estas metodologías ofrecen, enfoques diversos para abordar la complejidad de los sistemas agroecológicos. Por lo tanto, para una adecuada aplicación de los marcos de evaluación, resulta fundamental, adoptar un enfoque sistémico; este enfoque, aplicado a la agricultura, se fundamenta, en la Teoría General de los Sistemas (Bertalanffy, 1998) la cual busca, ofrecer una respuesta integral que considere de manera holística, el proceso productivo.

3.2.2 Sustentabilidad en la Agricultura

La Agricultura Sustentable, es un modelo de producción agrícola, que busca garantizar rendimientos estables, a largo plazo, mediante el uso de tecnologías y prácticas de manejo, que optimicen la eficiencia biológica del sistema (Altieri, 2002). Según Ghosh y Braun, (2020) este enfoque integra, la conservación de los recursos naturales con innovaciones técnicas e institucionales, asegurando la satisfacción de las necesidades humanas sin comprometer a las generaciones futuras. Estudios recientes destacan, que su implementación requiere adaptarse a contextos locales, combinando conocimientos tradicionales con avances científicos (Wezel *et al.*, 2020).

La Agricultura Sustentable, surge como respuesta a la necesidad de desarrollar sistemas alternativos de producción agropecuaria, que sean compatibles con las demandas de la sociedad contemporánea. Estos sistemas buscan minimizar el impacto ambiental, garantizar viabilidad económica y promover equidad social (FAO, 2022). Su adopción, se ha acelerado debido a las críticas hacia la agricultura convencional, cuyos efectos negativos incluyen: sobreexplotación de recursos no renovables, pérdida de biodiversidad, contaminación de suelos y recursos hídricos,

aumento de la pobreza rural, migración forzada y concentración de la tierra, exposición a agroquímicos y disminución de la calidad nutricional de los alimentos (Altieri, 2002).

El principal motivo del surgimiento de la agricultura sustentable, fue y sigue siendo la necesidad de abordar desafíos globales interconectados, como la seguridad alimentaria, la erradicación de la pobreza rural y la conservación de los recursos naturales (FAO, 2022). Además, la Agricultura Sustentable busca: garantizar sistemas alimentarios resilientes ante el cambio climático, promover equidad social mediante el acceso justo a recursos para pequeños productores y minimizar el uso de agroquímicos.

3.2.3 Sustentabilidad y sus Dimensiones

Los Agroecosistemas, son sistemas complejos y multidimensionales, que requieren un enfoque integral para su evaluación, para ello, investigadores como Masera *et al.*, (1999) han propuesto, Indicadores de Sustentabilidad, que permiten analizar su estado. Estos indicadores, integran dimensiones claves (social, económica y ambiental), como se ilustra en la Figura 3.1 las cuales constituyen los pilares del desarrollo sustentable. Algunos autores amplían este marco, incluyendo dimensiones adicionales.

Figura 3.1.

Dimensiones Ambiental, Económica y Social Pilares del Desarrollo Sustentable



Nota: Indicadores, integran dimensiones claves (social, económica y ambiental). Adaptado de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2009).

La dimensión ambiental en los agroecosistemas, se estructura, a partir de un conjunto interrelacionado de factores edafoclimáticos (como el suelo, el clima y el agua) y ecológicos (como la biodiversidad, los ciclos biogeoquímicos y los servicios ecosistémicos). Estudios recientes evidencian, que este tipo de análisis, no solo permite evaluar los impactos inmediatos de los modelos de producción convencionales, como la degradación del suelo, la contaminación y la fragmentación de hábitats, sino que también, facilita la proyección de escenarios de Sustentabilidad a largo plazo, a través del uso de indicadores, como la huella ecológica, la capacidad de secuestro de carbono y la diversidad funcional (Altieri & Nicholls, 2000; Astier *et al.*, 2008; IPBES, 2019). Además, enfoques agroecológicos emergentes destacan el papel de las redes tróficas y los paisajes multifuncionales en la mitigación de estos impactos (Tittonell, 2019).

Desde la dimensión económica, los Agroecosistemas Sustentables, son aquellos que garantizan una producción rentable y estable en el tiempo, mediante el uso eficiente y racional de los recursos naturales y económicos (Masera *et al.*, 1999). En este contexto, el desarrollo económico, debe impulsarse de manera sostenible y equitativa, considerando los impactos sociales y ambientales a largo plazo; para evaluar esta dimensión, se emplean indicadores convencionales orientados a medir la rentabilidad de fincas o proyectos (Duarte, 2005). Un sistema económicamente sustentable, debe generar ingresos suficientes, para que las personas productoras mantengan y aumenten sus ganancias, mejoren sus procesos productivos y promuevan una distribución equitativa de sus productos (Cieza & Sarandón, 2023).

La Dimensión Social, se fundamenta en la búsqueda de equidad, abarcando las relaciones humanas, las formas de organización, las interacciones sociales, la distribución justa de los beneficios del desarrollo, así como, la responsabilidad política y la participación en la toma de decisiones; a diferencia de las dimensiones ambiental y económica, más desarrolladas y cuantificables, las variables de la Dimensión Social, suelen ser cualitativas y presentan un alto nivel de complejidad, lo que dificulta su medición

precisa. Esta disparidad, ha llevado, a que sea la dimensión más subvalorada en los análisis de sustentabilidad, por ello, es fundamental, priorizar esfuerzos para mejorar su evaluación integral (Cieza & Sarandón, 2023; Masera *et al.*, 1999).

3.2.4 Indicadores de Evaluación

En las últimas décadas, la búsqueda de metodologías para evaluar la Sustentabilidad de los Agroecosistemas, ha captado el interés de diversos actores, quienes inicialmente priorizaron herramientas basadas en indicadores económicos; sin embargo, con el surgimiento del paradigma de la Sustentabilidad, se ha ampliado el enfoque, hacia indicadores integrados, que incorporan perspectivas de la economía ambiental y, en menor medida, de la economía ecológica (Altieri *et al.*, 2011; Tonolli, 2019). Aunque se han desarrollado estudios puntuales en sistemas agrícolas tradicionales con resultados alentadores, estos son insuficientes, para caracterizar y evaluar los agroecosistemas de manera integral; persisten desafíos metodológicos, como la falta de estandarización de indicadores y la escasa integración de dimensiones social y ambiental (Sarandón *et al.*, 2014). Además, la mayoría de las evaluaciones, carecen de escalabilidad, lo que limita su aplicabilidad en contextos regionales o globales (IPBES, 2019; Wezel *et al.*, 2020).

Según sus características, los indicadores pueden clasificarse, en Cuantitativos o Cualitativos. Los Indicadores Cuantitativos, miden propiedades observables y se expresan numéricamente, lo que permite realizar comparaciones objetivas y seguimiento en el tiempo. Por su parte, los Indicadores Cualitativos, evalúan aspectos subjetivos o atributos difíciles de cuantificar directamente, como percepciones, valores o prácticas sociales, proporcionando una visión complementaria del funcionamiento de los sistemas (Sarandón & Flores, 2014). Una vez definidos y aplicados los indicadores, es necesario establecer la metodología para la recolección de datos, así como para su seguimiento y monitoreo; la elección del tipo de indicador más adecuado, dependerá de la escala de medición, que puede abarcar desde

una parcela hasta regiones extensas, como una cuenca hidrográfica. Para su evaluación, pueden emplearse diversos métodos, incluyendo revisiones bibliográficas, mediciones directas, modelos de simulación, encuestas, entrevistas (formales e informales) y técnicas grupales, los cuales permiten obtener datos tanto cualitativos como cuantitativos (Masera *et al.*, 2000).

3.3 Evaluación de la Sustentabilidad de Agroecosistemas Cafeteros

Según Ordóñez-Jurado, (2014) se desarrolló una metodología, para evaluar la Sustentabilidad de Agroecosistemas Cafeteros en el municipio de La Unión, Nariño. La investigación se centró en fincas que cumplían los siguientes criterios:

- Ubicadas entre 1.400 y 1.800 msnm.
- Preferiblemente con una misma variedad de café.
- Con un área mínima de 0,5 hectáreas.
- Cultivos con más de dos años en producción.
- Fincas que mantuvieran registros productivos.
- Condiciones edáficas y topográficas similares.
- Densidad de siembra superior a 2.500 plantas por hectárea.

De acuerdo a lo anterior, reporta los sistemas de producción de café, en cuatro grupos:

1. Café con sombra de árboles leñosos.
2. Café bajo semisombra.
3. Café asociado con plátano.
4. Café a pleno sol (Sin sombra).

Mediante visitas de campo, se confronta y valida la información de los cuatro sistemas cafeteros, con el objetivo de calcular el Índice General de Sustentabilidad (IGS), para lo cual, se seleccionaron aleatoriamente cuatro fincas por cada sistema de producción.

3.3.1 Índice General de Sustentabilidad (IGS)

La Sustentabilidad de los sistemas de producción de café, fue evaluada, mediante el Índice General de Sustentabilidad (IGS); este análisis se realizó en tres dimensiones: ambiental, económica y social, integrando variables e indicadores específicos, en subíndices para cada dimensión, los cuales conformaron finalmente el IGS. Para la selección de las variables e indicadores, se revisó literatura especializada en Sustentabilidad Agraria, con énfasis en el sector cafetero y la consulta a expertos en el cultivo del café e investigaciones realizadas. Además, se complementó la información, con encuestas aplicadas a los productores; estas variables fueron preseleccionadas, por su relevancia en la evaluación de los procesos productivos del café y su capacidad para reflejar la Sustentabilidad integral del sistema. En total, se registraron 42 variables, distribuidas de la siguiente manera:

- 22 variables para la Dimensión Ambiental
- 11 variables para la Dimensión Económica
- 9 variables para la Dimensión Social.

3.3.1.1 Descripción de las Variables de Evaluación

3.3.1.1.1 Variables Dimensión Ambiental

Las Variables Ambientales, fueron medidas dentro de las parcelas de café, a través de metodologías y muestreos específicos (Tabla 3.1).

Tabla 3.1.

Variables de la Dimensión Ambiental Preseleccionadas para Evaluar la Sustentabilidad de los Sistemas de Producción de Café.

Variable	Unidad de medida	Denominación
Riqueza especies leñosas	No. especies ha ⁻¹	RL
Diversidad florística leñosas	Índice Shannon	DL
Riqueza especies arvenses	No. especies m ²	RA

Variable	Unidad de medida	Denominación
Macroinvertebrados	No. especies m ²	RM
Diversidad macrofauna	Índice Shannon	DS
Uso de agroquímicos	L-kgha-1año ⁻¹	UA
Prácticas de conservación	No. Prácticas	PS
Sanidad cultivo broca	%	SC
Profundidad horizonte A	Cm	PA
Cobertura de arvenses	%	CA
Espesor hojarasca	Cm	EH
pH	-	pH
Materia orgánica	%	MO
Fósforo	mg kg ⁻¹	P
Calcio	cmol(+)kg ⁻¹	Ca
Magnesio	cmol(+)kg ⁻¹	Mg
Potasio	cmol(+)kg ⁻¹	K
Aluminio	cmol(+)kg ⁻¹	Al
Nitrógeno total	%	N
Carbono orgánico	%	C
Densidad aparente	gr cm ⁻³	Da
Porosidad	%	PO

Nota: Variables Ambientales, medidas dentro de las parcelas de café. Ordóñez-Jurado (2014).

- **Riqueza Especies Leñosas y Diversidad Florística (RL y DL):**
La Diversidad Florística, se considera un indicador ecológico clave, aunque también puede analizarse desde una perspectiva socioeconómica. Una mayor riqueza de árboles y otras especies vegetales, incrementa la biodiversidad en las fincas, al proporcionar recursos como sombra, frutos, néctar, polen, madera y otros productos, que sustentan una amplia variedad de macro y microorganismos; además, estos sistemas diversificados, ofrecen múltiples bienes y servicios ecosistémicos, contribuyendo a

la soberanía y seguridad alimentaria, ya que sus productos forman parte de la dieta local (Chazdon *et al.*, 2020; Cardona-Calle & Sadeghian-Khalajabadi, 2005).

El muestreo se llevó a cabo, siguiendo la Metodología de Inventario Rápido propuesta por Gentry, (1982) con modificaciones adaptadas al estudio; en cada sistema de producción de café, se establecieron cuatro parcelas de 50×5m (250 m² cada una, 1.000 m² en total), donde se registraron todos los individuos leñosos con un Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) ≥ 5,0cm. Para analizar la Diversidad Florística de las especies leñosas, se emplearon Indicadores Fitosociológicos, como la Composición Florística y el Índice de Diversidad de Shannon-Wiener (H'). Este índice evalúa, tanto la riqueza de especies (número de especies presentes) como la abundancia relativa de cada una (proporción de individuos por especie) en el área de estudio).

$$H' = -\sum P_i \ln P_i$$

Donde $P_i = n/N$; n = número de individuos de la especie i ; N = total de individuos de la población y $\ln$ = logaritmo natural.

- **Riqueza Especies Arvenses (RA).** Las Arvenses, son plantas que crecen espontáneamente en áreas cultivadas y no cultivadas, destacándose por su alta resistencia y adaptabilidad; generalmente, carecen de valor económico, pueden competir con los cultivos por recursos esenciales como agua, luz, nutrientes y espacio e incluso, inhibir su crecimiento, mediante la liberación de compuestos alelopáticos (Monteiro y Santos, 2022). Estas plantas se clasifican en dos grupos: malezas (especies altamente competitivas) y arvenses nobles (con bajo desarrollo radicular o foliar, que les permite coexistir sin afectar significativamente los cultivos) (Arcila *et al.*, 2007). Para evaluar la Biodiversidad Herbácea en las cuatro parcelas de evaluación de la vegetación leñosa, se establecieron en cada una, con dos subparcelas de

1×1m; las especies encontradas, fueron identificadas, mediante su nombre local y confirmadas taxonómicamente en el Herbario PSO de la Universidad de Nariño.

- **Macroinvertebrados (RM y DS).** En el estudio de los sistemas productivos de café, es de importancia, los componentes que se encuentran por encima y por debajo de la superficie del suelo, los cuales conforman redes complejas y dinámicas, e influye en las interacciones bióticas y abióticas (Quiroz - Guerrero *et al.*, 2021). Uno de los componentes clave del suelo, es la Macrofauna Edáfica, conformada por invertebrados de tamaño superior a 2 mm., fácilmente identificables a simple vista, como lombrices, hormigas, escarabajos y otros artrópodos. Su actividad, modifica propiedades físicas del suelo, como la aireación, la infiltración y la estructura, mejorando así su fertilidad y funcionalidad ecológica (Lavelle *et al.*, 2006).

Para evaluar la macrofauna en diferentes sistemas de cultivo de café, se empleó el protocolo TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility) (Anderson & Ingram, 1989). Se extrajeron monolitos de suelo de 25 cm × 25 cm × 30 cm de profundidad, divididos en cuatro estratos:

1. Mantillo (capa orgánica superficial)
2. Superficial (0-10 cm)
3. Medio (10-20 cm)
4. Profundo (20-30 cm)

En cada sistema, se realizó un muestreo aleatorio en tres épocas climáticas: lluvias, sequía y transición. La recolección, se efectuó manualmente: los monolitos se colocaron sobre láminas de plástico, se separaron por estratos y los individuos se almacenaron en recipientes etiquetados. Las lombrices, se fijaron en formaldehído al 5% y el resto de macroinvertebrados en alcohol etílico al 70%. La identificación taxonómica (orden y familia) se realizó en el Laboratorio de Entomología de la Universidad

de Nariño y la densidad poblacional, se expresó como individuos/m². La Diversidad se calculó mediante el Índice de Shannon-Wiener.

- **Uso de Agroquímicos L-kgha⁻¹año⁻¹ (UA).** Los Pesticidas, son sustancias de origen químico o biológico, diseñadas para controlar plagas, malezas y enfermedades en cultivos agrícolas. Aunque su uso ha contribuido al aumento de la productividad agrícola, su alta toxicidad, representa un riesgo significativo para la salud humana, la biodiversidad y los ecosistemas (Sharma *et al.*, 2019). Según su función, se clasifican principalmente, en insecticidas, fungicidas y herbicidas. En este estudio, mediante encuestas, se consultó a los productores, sobre el uso de estos agroquímicos, cuantificando su aplicación en litros o kilogramos por hectárea al año (L·kg·ha⁻¹·año⁻¹). Los datos reportados, se contrastaron con los registros de campo, proporcionados por los agricultores para garantizar su veracidad.
- **Prácticas de Conservación Asociadas a la Producción de Café (PS).** Las prácticas de manejo del cultivo de café, deben planificarse de manera integral, considerando tanto las labores de producción en el campo como las actividades de recolección y procesamiento del grano en la finca. El objetivo principal, es mantener el equilibrio en los agrosistemas, conservar la calidad de los suelos, proteger las fuentes de agua y garantizar la seguridad de los trabajadores (Puerta, 2013). Estas prácticas contribuyen, a la Sustentabilidad ambiental, mejoran la productividad y la calidad del café a largo plazo (Moguel & Toledo, 1999). Esta variable, comprende el número de acciones o tareas implementadas por el productor, en el sistema productivo, incluye la conservación de suelos, manejo de aguas y salud del cultivo.
- **Sanidad del Cultivo, Broca del Café, *Hypothenemus hampei* (SC).** Para evaluar la infestación por *Hypothenemus hampei* (broca del café), se consideró el nivel de daño económico, como parámetro de referencia. El muestreo se realizó en 30 sitios distribuidos

- aleatoriamente dentro del lote. En cada sitio, se seleccionó un árbol y, de este, una rama en la zona productiva, con entre 30 y 100 frutos (unidad de muestreo). Se cuantificaron los frutos verdes dañados y los frutos verdes infestados, expresando el resultado como porcentaje de infestación (Trujillo *et al.*, 2006).
- **Profundidad Horizonte A (PA).** En cada sistema de producción de café estudiado, se seleccionó aleatoriamente, un punto representativo para la construcción de una calicata de dimensiones estándar (80 × 80 cm de ancho y largo). La excavación se realizó de manera sistemática, hasta alcanzar el horizonte B del suelo, identificado mediante criterios morfológicos, como color, textura y estructura (Bautista *et al.*, 2023). La profundidad del horizonte A, se midió con un decámetro, registrándose desde la superficie del suelo hasta el límite inferior claramente diferenciable del horizonte A.
 - **Cobertura de Arvenses (CA).** Hace referencia a aquellas, que crecen de manera espontánea en áreas de cultivo, donde interfieren con el desarrollo de las especies cultivadas; su presencia afecta, la productividad, al competir por recursos, como agua, luz, nutrientes y espacio, además de posibles efectos alelopáticos (Blanco & Leyva, 2007). Para cuantificar la Cobertura de Arvenses (%), se empleó el Método de la Cuadrícula, se utilizó un marco de 50 × 50 cm, subdividido en 25 cuadrículas de 10 × 10 cm; la cuadrícula se colocó aleatoriamente entre las calles del cultivo, registrando la superficie del suelo cubierta por biomasa de arvenses. Las evaluaciones se realizaron aproximadamente 30 días después del control de malezas (deshierbe o aplicación de herbicidas). En cada sistema de manejo se muestrearon 5 puntos, cuyos valores se promediaron para obtener el porcentaje de cobertura.

- **Espesor de Hojarasca (EH).** La Hojarasca, es la biomasa sintetizada por los productores primarios, que retorna al suelo como parte de su ciclo vegetativo, ya sea en forma de exudados radicales y foliares o como restos orgánicos estructurados (hojas, ramas, frutos, flores, etc.), constituyendo la hojarasca (Salazar, 2008). En cada sistema de producción, se establecieron aleatoriamente, 10 puntos de muestreo; en cada uno, se midió el espesor de la hojarasca (en centímetros) utilizando una regla graduada. Finalmente, se calculó el promedio por sistema.
- **Nutrientes del Suelo (Análisis Físico y Químico).** En cada sistema de producción de café, se recolectaron muestras de suelo utilizando un barreno; para garantizar la representatividad, se tomaron aleatoriamente 10 submuestras entre los surcos de café, hasta una profundidad de 20 cm; estas submuestras se homogeneizaron, para obtener una muestra compuesta de aproximadamente 1 kg; las muestras se almacenaron en bolsas plásticas debidamente etiquetadas y se transportaron al Laboratorio de Suelos de la Universidad de Nariño para su análisis. Se evaluaron las siguientes propiedades químicas (pH, materia orgánica, fósforo, calcio, magnesio, potasio, aluminio, nitrógeno, carbono) y físicas del suelo (textura, densidad aparente, densidad real y porosidad); la evaluación se realizó mediante métodos y técnicas estándares de laboratorio.

3.3.1.1.2 Variables Dimensión Económica.

El análisis económico, se basó en variables calculadas, a partir de costos directos de producción, siguiendo metodologías ampliamente utilizadas en estudios agropecuarios. Cabe destacar, que, para este cálculo, no se incluyeron conceptos, como la depreciación de los materiales empleados en el manejo productivo ni el valor de la tierra, los cuales, suelen considerarse en enfoques de costos completos. Se utilizaron los siguientes indicadores (Tabla 3.2).

Tabla 3.2

Variables de la Dimensión Económica Preseleccionadas para Evaluar la Sustentabilidad de los Sistemas de Producción de Café.

Variable	Unidad medida	Denominación
Producción café	arrobas (c.p.s. ha ⁻¹)	PC
Calificación café	valor	CC
Margen bruto	(\$)ha ⁻¹	MB
Relación (B/C)	valor	BC
Costo producción	(\$)ha ⁻¹	CP
Ingresos	(\$)ha ⁻¹	IN
Factor rendimiento	%	FR
Costos fertilizantes	(\$)ha ⁻¹	CF
Relación café cereza/c.p.s	valor	RC

Nota: Variables calculadas, a partir de costos directos de producción. Esta investigación.

Los costos fijos, se estimaron con base en información de fuentes secundarias, incluyendo informes sectoriales, bases de datos gubernamentales y estudios previos; esta se complementó, con datos primarios recolectados, a través de encuestas aplicadas directamente a los productores, lo que permitió validar y ajustar las cifras.

- **Producción Café (PC)** arrobas (c.p.s. ha⁻¹). La producción de café, se cuantificó en arrobas de café pergamino seco por hectárea por año (arrobas c.p.s ha⁻¹año⁻¹); esta información, incluye tanto el café destinado a la comercialización como el utilizado para el consumo familiar del productor. Los datos fueron proporcionados directamente por los caficultores, mediante entrevistas y registros de producción.

- **Calificación del Rendimiento (CC).** Hace referencia a la producción de café, que sale en promedio por ha., bien sea para consumo o para venta; el promedio de cada finca, se relaciona con el promedio local, con una producción promedia por ha. a nivel local de 105 arrobas.
- **Margen Bruto/ha (MB):** Diferencia entre el Ingreso Bruto (IB) y los Costos Variables (CV). El Ingreso Bruto, es el valor total de la producción, aprovechada tanto para venta como para consumo familiar. El MB, indica si la producción de café paga sus costos de operación y se refiere a la ganancia obtenida con la producción de café. La información fue suministrada por los productores.

$$MB = IB - CV$$

- **Relación Beneficio Costo, (BC):** Resulta de dividir, el Ingreso Bruto (IB) entre el Costo Total de Producción (CP), el mismo indica, la retribución que se obtiene por unidad monetaria de inversión.

$$B/C = IB/CP$$

- **Costo de Producción por Hectárea (CP).** Se calcularon todos los insumos, labores y procesos necesarios para el manejo y producción de una hectárea de café, incluyendo mantenimiento del cultivo, cosecha, beneficio y uso de insumos agrícolas. Los datos primarios, fueron proporcionados directamente por los productores locales, adicionalmente, se consultaron fuentes secundarias como los registros oficiales del Comité de Cafeteros de Nariño y estudios previos sobre costos de producción, en el sector agropecuario, específicamente, los informes de Fedesarrollo y Agronet.
- **Ingresos (IN).** Se revisaron los registros que maneja el propietario obtenidos por la venta y consumo de café, aunque no se cuenta con información suficiente de otros productos obtenidos directamente del sistema, durante un año cafetero.

- **Factor de Rendimiento (FR).** El Factor de Rendimiento, se define, como la cantidad de café pergamino que es necesario para obtener un saco de 70 Kg de café excelso en el proceso de tri-lla; para determinar este valor, se consideraron las facturas de venta de cada productor y se complementó con la información suministrada por los compradores del grano.
- **Costos de Fertilizantes (CF).** Algunas fincas evaluadas, llevan registros de compras de insumos, en cambio, otras no cuentan con suficiente información; para determinar el costo de la apli-cación de fertilizantes, fue necesario determinar la cantidad de fertilizantes aplicados al cultivo y mediante el valor comercial del bulto de 50 kg, se calculó el valor de la fertilización de cada sistema de producción.
- **Relación Café Cereza/Café Pergamino Seco (RC).** Este indica-dor, se determinó a través del peso de café en cereza y el peso seco del mismo, datos suministrados por cada productor y revisión de fuentes secundarias como la Cooperativa de Caficultores y Em-presas de Nariño.

3.3.1.1.3 Variables Dimensión Social.

La Dimensión Social, se conceptualiza, como la capacidad del caficul-tor, para establecer relaciones efectivas con otros actores (tanto en su comunidad rural como en contextos urbanos), facilitando el desarrollo de sus habilidades, el acceso a recursos y el intercambio de beneficios y experiencias colectivas. Para su evaluación, se definieron las variables descritas en la Tabla 3.3, junto con sus respectivas escalas de valoración.

Tabla 3.3

Variables de la Dimensión Social Seleccionadas para Evaluar la Sustentabilidad de los Sistemas de Producción de Café.

Variable	Determinación	Escala	Denominación
Alimentos producidos sistema	categoría	1 - 5	AP
Dependencia insumos	categoría	1 - 5	DI
Participación organizaciones	categoría	1 - 5	PR
Capacidad administrativa	categoría	1 - 5	CD
Satisfacción necesidades básicas	categoría	1 - 5	SN
Participación integración familiar	categoría	1 - 5	PF
Autoestima del caficultor	categoría	1 - 5	AC
Impacto proyecto comunidad	categoría	1 - 5	IC
Grado escolaridad	categoría	1 - 5	GE
Medio transporte	categoría	1 - 5	MT
Administración, decisiones finca	categoría	1 - 5	AF

Nota: Variables de la Dimensión Social junto con sus respectivas escalas de valoración. Esta investigación.

- **Alimentos Producidos en el Sistema (AP).** Para evaluar este indicador, se tuvieron en cuenta, los productos alimenticios que aporta el sistema para consumo familiar y venta (Tabla 3.4).

Tabla 3.4

Valoración de los Alimentos Producidos en los Sistemas de Producción de Café

Característica	Rango	Calificación
Cantidad alimentos producidos en el sistema (para consumo familiar o venta)	>8,0	5
	6,0 – 8,0	4
	4,0 – 6,0	3
	2,0 – 4,0	2
	< 2,0	1

Nota: Productos alimenticios que aporta el sistema para consumo familiar y venta. Esta investigación.

- **Dependencia Insumos Externos (DI).** Que productos de consumo alimenticio se compran en los mercados y no son producidos en la finca, pero si se producen en la región (Tabla 3.5).

Tabla 3.5

Valoración de la Autosuficiencia Alimentaria de los Sistemas de Producción de Café

Característica	Rango	Calificación
Porcentaje (%) alimentos consumidos, que no son producidos en la finca	<20,0	5
	20,0 – 40,0	4
	40,0 – 60,0	3
	60,0 – 80,0	2
	> 80,0	1

Nota: Productos de consumo alimenticio que se compran en los mercados y no son producidos en la finca, pero si se producen en la región. Esta investigación.

- **Participación en Organizaciones (PR).** En la Tabla 3.6, se presenta la valoración de la participación del caficultor y los integrantes de la familia en las organizaciones comunitarias locales o regionales. Se considera, los procesos en virtud de los cuales, la familia asume responsabilidades en cuanto a su propio bienestar y los de la comunidad y la capacidad de contribuir a su propio desarrollo; esta información se obtuvo mediante comunicación verbal y la aplicación de una encuesta.

Tabla 3.6.

Valoración de la Participación de las Organizaciones Comunitarias

Característica	Valoración	Calificación
Todos los integrantes participan	Muy alta	5
Padres, alguno de los hijos	Alta	4
Padre y/o madre y alguno de los hijos	Moderada	3
Solo un integrante de la familia participa	Baja	2
No hay integración, ninguno participa	Muy baja	1

Nota: Valoración de la participación del caficultor y los integrantes de la familia en las organizaciones comunitarias locales o regionales. Cárdenas et al. (2005)

- **Capacidad Administrativa (CD).** En la Tabla 3.7, se indica la capacidad administrativa del caficultor, se valoró estimando la habilidad para: programar, organizar, liderar, coordinar, evaluar y documentar labores de la finca.

Tabla 3.7.

Valoración de la Capacidad Administrativa de los Productores de Café

Característica	Valoración	Calificación
Aplica con todos los criterios	Muy alta	5
Aplica con cuatro de ellos	Alta	4
Aplica con tres de ellos	Moderada	3
Aplica con dos criterios	Baja	2
Aplica con uno o ningún criterio	Muy baja	1

Nota: Capacidad administrativa del caficultor. Esta investigación.

- **Satisfacción Necesidades Básicas (SN).** Para evaluar la satisfacción de necesidades básicas (SN), se utilizaron indicadores directamente relacionados con cuatro dimensiones esenciales: vivienda, servicios sanitarios, educación e ingreso mínimo. La valoración se realizó según los criterios presentados en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8

Valoración de la Satisfacción de Necesidades Básicas de las Familias Productoras de Café

Característica	Valoración	Calificación
Cumple con todas las necesidades básicas satisfechas	Muy alta	5
Alta satisfacción de las necesidades básicas	Alta	4
Moderada satisfacción necesidades básicas	Moderada	3
Baja satisfacción de las necesidades básicas	Baja	2
Ninguna necesidad básica satisfecha	Muy baja	1

Nota: Satisfacción de necesidades básicas (SN). Esta investigación

- **Participación e Integración Familiar (PF).** Se consideró la participación activa de los integrantes de la familia, en el apoyo, seguimiento y contribución con decisiones que conlleven al avance y buen desempeño de los sistemas de producción presentes en la finca (Tabla 3.9).

Tabla 3.9

Participación e Integración Familiar en el Manejo de los Sistemas Producción de Café

Característica	Valoración	Calificación
Todos participan	Muy alta	5
Padres, alguno de los hijos	Alta	4
Padre y/o madre y alguno de los hijos	Moderada	3
Solo uno participa	Baja	2
Ninguno participa	Muy baja	1

Nota: Participación activa de los integrantes de la familia. Cárdenas *et al.* (2005).

- **Autoestima del Caficultor (AC).** Es importante determinar el nivel de motivación; lo anterior conlleva, a un mayor nivel de producción y de satisfacción. Se determinó mediante observación y diálogo con el caficultor (Tabla 3.10).

Tabla 3.10

Valoración de la Autoestima de los Productores de Café

Característica	Valoración	Calificación
Actitud optimista	Muy alta	5
Convivencia armonica con otros agricultores	Alta	4
Anulación en presencia otros agricultores	Moderada	3
Enfrenta barreras continuas	Baja	2
Pesimismo (defensivo u ofensivo)	Muy baja	1

Nota: Nivel de motivación. Esta investigación.

- **Impacto del Proyecto Agrícola (IC).** Las prácticas de manejo implementadas en el sistema de café, pueden tener impacto positivo, negativo o ninguno, en la población cafetera del lugar; se determinó a través de observación y entrevista, (Tabla 3.11).

Tabla 3.11

Valoración del Impacto de los Sistemas de Producción de Café

Característica	Valoración	Calificación
Muy alto impacto de las prácticas la región	Muy alta	5
Alto impacto de las prácticas en la región	Alta	4
Moderado impacto de las prácticas la región	Moderada	3
Bajo impacto de las prácticas en la región	Baja	2
Ningún impacto de las prácticas en la región	Muy baja	1

Nota: Impacto en el sistema de café. Esta investigación.

- **Grado de Escolaridad (GE).** El nivel educativo, es un instrumento que sirve para reducir la pobreza y la desigualdad y sienta las bases, que contribuyen a un crecimiento sustentable. Es necesario conocer el nivel de escolaridad de los caficultores responsables del manejo del cultivo, la valoración se realizó como se indica en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12*Evaluación del Grado de Escolaridad de los Productores de Café*

Característica	Nivel escolaridad	Calificación
Nivel educativo bajo	Primaria	1
Nivel educativo medio	Secundaria	2
Nivel educativo medio	Técnico	3
Nivel educativo superior	Universitario	4
Nivel educativo muy superior	Otro	5

Nota: Nivel de escolaridad de los caficultores responsables del manejo del cultivo. Esta investigación.

- **Medio de Transporte (MT).** El transporte tanto del caficultor como de su familia, son fundamentales en su bienestar e igualmente, contribuye en el fortalecimiento del sistema productivo; la evaluación comprendió la tenencia y el desplazamiento de la familia y los productos e insumos, desde la finca a la cabecera municipal y viceversa (Tabla 3.13).

Tabla 3.13

Valoración del Medio de Transporte de las Familias Productoras de Café

Medio transporte	Característica	Calificación
Público	Muy bajo	1
Caballo	Bajo	2
Bicicleta (propio)	Medio	3
Motocicleta (propio)	Alto	4
Carro (propio)	Muy alto	5

Nota: Transporte tanto del caficultor como de su familia. Esta investigación.

- **Administración y Toma de Decisiones en la Finca (MF).** Se tiene en cuenta, la permanencia en la finca, la responsabilidad que generan las diferentes actividades y las decisiones que se tomen, en un determinado momento (Tabla 3.14).

Tabla 3.14

Valoración del Manejo de las Fincas Cafeteras

Manejo finca	Calificación
Mayordomo	1
Propietario - mayordomo	2
Hijos	3
Propietario	4
Propietario – hijos	5

Nota: Permanencia en la finca. Esta investigación.

3.1.2 Análisis de las Variables de Evaluación.

A partir de la información recopilada mediante encuestas, muestreos de campo, revisión de registros de los productores y consulta de fuentes secundarias, los resultados promedio de las fincas para cada sistema de producción de café, se presentan en las Tablas 3.15 (ambiental), 3.19 (económica) y 3.20 (social).

Tabla 3.15

Resultados de las Variables de la Dimensión Ambiental, en los Sistemas de Producción de Café

Sistema	Unidad de medida	S1	S2	S3	S4
Variable					
RL	No. especies ha ⁻¹	10,75	8	3,75	1,75
DL	Índice Shannon	2,16	1,94	0,87	0,58
RA	No. especies m ²	8,75	9,75	12,75	14
RM	No. especies m ²	1512	1148	1136	1052
DM	Índice Shannon	1,92	1,55	1,52	1,35
UA	L-kgha ⁻¹ año ⁻¹	6	6,25	8	10,1
PS	No. Prácticas	5	4,75	2,75	2,75
SC	%	0,65	0,48	0,65	0,53
PA	Cm	46,5	49,5	28,25	36,25
CA	%	32,75	42,25	49	55,25
EH	Cm	3,95	2,35	1,73	1,09
pH	-	5,23	5,08	5,12	5,34
N	%	0,32	0,29	0,25	0,27
MO	mg kg ⁻¹	7,21	6,14	5,96	5,58
P	cmol(+)kg ⁻¹	34,6	29,48	31,68	29,18
K	cmol(+)kg ⁻¹	0,36	0,42	0,57	0,43
Ca	cmol(+)kg ⁻¹	4,3	4,21	4,49	6,12
Mg	cmol(+)kg ⁻¹	1,49	1,33	1,44	1,29
Al	%	9,85	0,81	0,89	0,78
C	%	4,18	3,56	3,46	3,24
DA	gr cm ⁻³	1,06	1,1	1,07	1,02
PO	%	59,25	59,43	60,7	56,55

Nota: Resultados promedio de las fincas para cada sistema de producción de café. Esta investigación.

- **Riqueza Especies Leñosas (RL).** Se consideraron todos los individuos a partir de 5,0 cm de DAP (Figura 3.2). Las especies arbóreas más abundantes, pertenecen principalmente, al grupo de las leguminosas, destacándose las especies del género *Inga*; inclusive, se reportaron algunos individuos remanentes en los sistemas café sin sombra y café plátano. Estas especies arbóreas, desempeñan funciones ecológicas fundamentales en los agroecosistemas, entre sus principales aportes se encuentran, la fijación biológica de nitrógeno, la provisión de cobertura vegetal y la conservación del suelo, lo cual contribuye directamente, a la sostenibilidad y resiliencia de los sistemas productivos (Perfecto *et al.*, 2005; Farfan, 2014).

Figura 3.2

Registro de Especies Leñosas y Arvenses, Sistemas de Producción de Café



Nota: Especies arbóreas mas abundantes en los sistemas café sin sombra y café plátano. Esta investigación.

- **Riqueza Especies Leñosas (RL).** Entre las especies vegetales registradas, tanto nativas como introducidas, se identificaron: guamo *Inga spp*, balsa *Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb., chachafruto *Erythrina edulis* Micheli, guayacán *Lafoensia acuminata*, nacedero *Trichantera gigantea* (Humboldt & Bonpland) Nees, arrayan *Myrcianthes sp*, cachimbo *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F.Cook, matarratón *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex

Walp., nogal *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken y frutales como: limón *Citrus lemon* (L.) Osbeck, naranja *Citrus sp.* y aguacate *Persea americana* Mill. entre otros.

El análisis reveló, que el sistema café bajo sombra, presenta la mayor riqueza de especies, seguido por el sistema café bajo semisombra, mientras que los sistemas café-plátano y café sin sombra, registraron una diversidad significativamente menor. En cuanto al número de individuos por hectárea, el sistema café con sombra, mostró la mayor densidad (215 árboles ha⁻¹), en contraste con el café sin sombra, que presentó la menor (28 árboles ha⁻¹). Estos resultados coinciden parcialmente, con lo reportado por la FNC, (1993) la cual señala, que los sistemas cafeteros tradicionales con sombra, superan los 50 árboles por hectárea; sin embargo, difieren en el caso del café sin sombra, donde este estudio registró, una densidad inferior a 30 árboles ha⁻¹, mientras que la FNC, (1993) menciona, valores cercanos a 20 árboles ha⁻¹.

- **Diversidad Florística (DL):** Mediante el Índice de Shannon (Tabla 3.16), que relaciona las especies con su abundancia, se determinó, que el sistema más diverso fue el café con sombra (promedio = 2,16), seguido por café con semisombra (1,94), café-plátano (0,87) y café sin sombra (0,58). Los resultados confirman, que los sistemas de producción bajo sombra y semisombra presentan mayor riqueza de especies y diversidad florística en comparación con los sistemas convencionales (sin sombra).

Tabla 3.16

Riqueza de Especies (Leñosas, Arvenses y Macrofauna) e Índice de Diversidad según Shannon en Sistemas de Producción de Café

Sistema	S1	S2	S3	S4
Variable				
Diversidad florística leñosas	2,16	1,94	0,87	0,58
Individuos ha-1 leñosas	215	128	48	28

Variable	Sistema	S1	S2	S3	S4
Riqueza especies arvenses		8,75	9,75	12,75	14
Macrofauna		1512	1148	1136	1052
Índice macrofauna		1,92	1,55	1,52	1,35

Nota: Relacion de las especies con su abundancia. Esta investigación.

- **Riqueza Especies Arvenses (RA).** El registro incluyó, tanto arvenses nobles como agresivas, presentes en todos los sistemas de producción evaluados (Tabla 3.16); en promedio, los sistemas de café sin sombra, presentaron la mayor riqueza de especies (14), mientras que los sistemas de café con sombra (8,8) y café con semi-sombra (9,8) mostraron valores menores. Este comportamiento, fue inverso al observado en la riqueza de especies leñosas de sombrío, lo que coincide con lo reportado por Cardona-Calle & Sadeghian-Khalajabadi, (2005) quienes señalan, que el sombrío reduce la presencia de herbáceas. La menor composición en sistemas con sombra y semisombra, sugiere, que la diversidad de arvenses disminuye al aumentar la densidad de árboles de sombra. Entre las especies arvenses identificadas destacan: *Bidens pilosa* L., *Ipomoea purpurea* (L.) Roth, *Sigesbeckia jorullensis* Kunth, *Arachis pintoi* Krapov. & W.C.Greg., *Panicum trichoides* Sw, *Commelina difusa* Birmania, *Eleusine indica* (L.) Gaertn, *Cyperus rotundus* L., *Equisetum* sp., *Cynodon dactylon* (L.) Pers., *Chloris radiata* (L.) Sw., *Torulinium odoratum* (L.) S.S.Hooper y *Digitaria sanguinalis* (L.) Scop.
- **Población de Macroinvertebrados (RM).** En la Figura 3.3, se presenta el proceso de muestreo, incluyendo la extracción de un monolito y la recolección de macrofauna; la densidad promedio de macroinvertebrados en los sistemas evaluados fue de 1512 individuos/m² (máximo) en cultivos de café con sombra y 1052 individuos/m² (mínimo) en cultivos de café sin sombra (Tabla 3.16).

Figura 3.3

Metodología utilizada (Monolito) para la Evaluación de la Macrofauna



Nota: Extracción de un monolito y la recolección de macrofauna. Esta investigación.

En los sistemas de producción basados en monocultivo, se ha observado una disminución en la abundancia y diversidad de la comunidad de macrofauna edáfica, este fenómeno está asociado al control intensivo de malezas, mediante herbicidas y a la remoción de árboles de sombra para expandir las áreas de cultivo. La eliminación de la cobertura arbórea en sistemas agrícolas, genera impactos negativos en el hábitat de la macrofauna, reduciendo su biodiversidad, debido a la pérdida de recursos alimenticios y a la alteración del microclima del suelo, factores clave para su supervivencia y estabilidad ecológica (Wen *et al.*, 2025; Urbano *et al.*, 2019; Lavelle *et al.*, 2006)

- **Diversidad Macroinvertebrados (DM).** La eliminación de la cobertura arbórea en los sistemas agrícolas, tiene efectos negativos significativos, sobre el hábitat de la macrofauna, ya que reduce su biodiversidad al disminuir la disponibilidad de recursos alimenticios y modificar el microclima del suelo, factores fundamentales para su supervivencia y el equilibrio ecológico. En la Tabla 3.16, se presenta la diversidad de la macrofauna calculada mediante el Índice de Shannon, al igual

que la diversidad florística. Este parámetro mostró un comportamiento similar, con la mayor diversidad (1,92) en el sistema de café bajo sombra y valores menores en el sistema de café a pleno sol (1,35). La pérdida de diversidad en sistemas de producción convencionales, conduce al deterioro de funciones clave del ecosistema edáfico, como la descomposición de materia orgánica, el ciclaje de nutrientes, la regulación de la estructura del suelo y el microclima, factores que determinan su fertilidad y capacidad productiva (Muñoz-Rodríguez y Santacruz-Ortiz, 2024; FAO *et al.*, 2021).

- **Uso de agroquímicos kg ha⁻¹año⁻¹ (UA).** La aplicación de agroquímicos, como fungicidas, herbicidas e insecticidas (expresados en L o kg ha⁻¹ año⁻¹), según, tabla 3.17, es significativamente mayor en los sistemas de café sin sombra en comparación con aquellos que presentan mayor diversidad florística. Estudios demuestran, que los sistemas agroforestales con sombra, reducen la dependencia de insumos químicos debido a un mejor control natural de plagas y enfermedades (Cerdeira *et al.*, 2017).

Tabla 3.17

Variables Asociadas al Manejo de los Sistemas de Producción de Café.

Variable	Sistema	S1	S2	S3	S4
Uso agroquímicos kg-lthalaño ⁻¹ UA		6	6,25	8	10,1
Prácticas de conservación PS		5	4,75	2,75	2,75
Sanidad cultivo broca (%) SC		0,65	0,48	0,65	0,53
Cobertura de arvenses (%) CA		32,75	42,25	49	55,25
Espesor hojarasca (cm) EH		3,95	2,35	1,73	1,09

Nota: Aplicación de agroquímicos, como fungicidas, herbicidas e insecticidas (expresados en L o kg ha⁻¹ año⁻¹). Esta investigación.

Estudios realizados en cultivos de café en Brasil, indican, que el uso prolongado de agroquímicos, especialmente herbicidas, reduce los niveles de materia orgánica en el suelo. Además, incrementa la densidad aparente, la compactación y la desestructuración del suelo, lo que deriva en erosión laminar y formación de costras superficiales (Alcântara & Ferreira, 2000).

- **Prácticas de Conservación Asociadas a la Producción de Café (PS).** Esta variable, cuantificó el número de acciones de conservación, implementadas por los productores, en sus sistemas de cultivo, abarcando tres dimensiones: conservación de suelos, manejo de aguas y salud del cultivo. Como se evidencia en la Tabla 3.17, el promedio de prácticas aplicadas varió según el sistema de producción: café sin sombra (2,75), café asociado con plátano (2,75), café bajo semisombra (4,75) y café bajo sombra (5,0).

Los sistemas con mayor cobertura arbórea (sombra y semisombra), mostraron una adopción significativamente mayor de prácticas de conservación de suelo y agua en comparación con los sistemas monocultivo (sin sombra) o asociados con plátano. Este patrón, coincide con los hallazgos en los sistemas bajo sombra, donde la diversidad estructural, favorece sinergias entre componentes ambientales y productivos.

- **Sanidad del Cultivo, Broca del Café *Hypothenemus hampei* Ferrari (SC).** Durante la evaluación realizada en la época de cosecha principal (mayo), no se encontraron diferencias significativas en la presencia de la broca entre los sistemas analizados (Tabla 3.17). El rango de infestación osciló entre 0,48% (café bajo semisombra) y 0,65% (café asociado con plátano). Cabe destacar, que estos niveles no representan un daño económico, como señala Bustillo, (2006) el umbral tolerable durante la cosecha, es del 5%.

La baja incidencia de la broca (< 1%) en todos los sistemas de producción evaluados, puede atribuirse al manejo cultural implementado por

los productores y las instituciones del sector; esta observación coincide con lo reportado por Guharay et al., (2001), quienes destacan como estrategias clave:

- El mantenimiento de sombra parcial, para favorecer el desarrollo del hongo entomopatógeno *Beauveria bassiana*.
- La diversificación de la sombra, para incrementar la presencia de depredadores naturales.
- El control cultural, mediante la recolección y eliminación de granos infestados en el cafetal.
- **Profundidad Horizonte A (PA).** En cada sistema de producción de café, se construyó una calicata, hasta alcanzar el horizonte B (Figura 3.4), con valores máximos y mínimos promedios de 49,50 cm y 28,25 cm (sistema semisombra y café asociado con plátano).

Figura 3.4

Medición Horizonte A, Sistemas de Producción de Café



Nota: Construcción de calicata en sistema de producción de café. Esta investigación.

Para evaluar la profundidad efectiva, se pueden considerar suelos superficiales, aquellos con espesor de 10 cm; suelos con profundidad media, aquellos con profundidad entre 10 cm y menor de 30 cm y suelos profundos,

con espesor mayor a 30 cm (Arcila *et al.*, 2007), considerando estos aspectos, algunos de los sistemas café asociado con plátano y café sin sombra, presentan limitaciones para el normal desarrollo de la planta.

- **Cobertura de Arvenses (CA).** El porcentaje de cobertura de arvenses, depende principalmente, del manejo agronómico (como limpiezas manuales o aplicación de herbicidas) y de la cantidad de radiación solar que filtra el dosel de los árboles y el cultivo asociado (Figura 3.5). La ocupación de arvenses, es mayor en sistemas con tendencia al monocultivo y disminuye progresivamente con el incremento de la cobertura del estrato arbóreo (Tabla 3.17). Los valores registrados oscilan entre 32,75 % y 55,25 %, por debajo de los rangos mínimos (60 %) y máximos (80 %) recomendados para el manejo del cultivo de café (Valencia, 1986; Valencia y Carrillo, 1983; Valencia, 1999). Esta reducción podría atribuirse a dos factores: (a) el efecto de prácticas de manejo intensivo y (b) en el caso de sistemas de café asociado con árboles, la alta densidad de sombra proyectada por el estrato arbóreo sobre los niveles inferiores del cultivo.

Figura 3.5

Manejo de Arvenses, Suelo cubierto con Arvenses y Manejado con Herbicidas en los Sistemas de Producción de Café



Nota: Cobertura de arvenses y manejoado con herbicidas. Esta investigación.

- **Espesor de Hojarasca (EH).** La cobertura arbórea influye significativamente, en el espesor de hojarasca, siendo mayor en el sistema café con sombra (3,95 cm.); este valor disminuye progresivamente, conforme se reduce el componente arbóreo: café semisombra (2,35 cm.), café-plátano (1,73 cm.) y café sin sombra (1,09 cm.) (Tabla 3.17). En el sistema café con sombra, la ausencia de herbicidas, podría explicar el mayor espesor de hojarasca, ya que estos productos afectan la cobertura vegetal viva y muerta del suelo (Alcântara & Ferreira, 2000).

Además, la cobertura arbórea en sistemas agroforestales, puede aportar entre 5 y 20 toneladas de hojarasca y ramas, dependiendo de las especies utilizadas (Heuveland *et al.*, 1985). La hojarasca, juega un papel clave en la fertilidad del suelo, ya que, mediante la actividad microbiana, favorece los procesos de descomposición y mineralización, liberando nutrientes que son reabsorbidos por las plantas (Altieri, 2002). Asimismo, contribuye a reducir la pérdida de nutrientes y la erosión del suelo.

- **Variables Químicas y Físicas del Suelo.** Las muestras de suelos tomadas en campo (Figura 3.6), se analizaron en el Laboratorio de Suelos de la Universidad de Nariño, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.18.

Figura 3.6

Toma de Muestras de Suelos en los Sistemas de Producción de Café



Nota: Muestras de suelos tomadas en campo. Esta investigación.

Tabla 3.18

Resultados de las Variables de la Dimensión Ambiental, Asociadas al Suelo, de los Sistemas de Producción de Café

Sistema	S1	S2	S3	S4
Variable				
pH	5,23	5,08	5,12	5,34
N (%)	0,32	0,29	0,25	0,27
MO (%)	7,21	6,14	5,96	5,58
P (mg kg ⁻¹)	34,6	29,48	31,68	29,18
K (cmol(+)kg ⁻¹)	0,36	0,42	0,57	0,43
Ca (cmol(+)kg ⁻¹)	4,3	4,21	4,49	6,12
Mg (cmol(+)kg ⁻¹)	1,49	1,33	1,44	1,29
Al (cmol(+)kg ⁻¹)	0,85	0,81	0,89	0,78
C (%)	4,18	3,56	3,46	3,24
DA (gr cm ⁻³)	1,06	1,1	1,07	1,02
PO (%)	59,25	59,43	60,7	56,55

Café sombra (S1), café semisombra (S2), café-plátano (S3) y café sin sombra (S4)

Nota: Resultados de las Variables de la Dimensión Ambiental, Asociadas al Suelo. Esta investigación.

- **pH del Suelo.** El sistema café sin sombra, registra los valores más altos de pH con 5,34 y el valor más bajo se presentó en el sistema café semisombra con 5,08 como se indica en la Tabla 3.18. Sadeghian *et al.*, (2004) en estudios realizados en Colombia, encontraron que los cafetales tecnificados (con aplicación de fertilizantes y fungicidas), se caracterizaron por su mayor acidez, asociada a bajos contenidos de Ca y Mg y altos de Al intercambiable, pero sin acercarse a niveles considerados tóxicos.
- **Contenidos de Nitrógeno (N).** En la tabla 3.18, se registraron contenidos mínimos promedios de N de 0,25% (café-plátano) y máximos de 0,32% (café con sombra); de acuerdo a lo anterior,

algunas fincas presentan limitantes en este elemento, si se comparan con los óptimos recomendados por (Valencia y Carrillo, 1983 y Valencia, (1999).

- **Materia Orgánica del Suelo (MO).** (Tabla 3.18), los sistemas de producción café sin sombra y café plátano, presentan menores promedios de contenido de materia orgánica (5,58% y 5,96%) en comparación con el sistema café con sombra (7,21%) y café semi-sombra (6,14%). Para la estandarización de los datos, se consideró el rango óptimo para el desarrollo normal del cultivo del café (8 – 14%) definido por Valencia (1986); Valencia y Carrillo, (1983).
- **Contenidos de Fósforo (P).** Los contenidos mínimos y máximos de P en los suelos de los agroecosistemas café sombra y sin sombra con 34,60 mg kg⁻¹ y 29,18 mg kg⁻¹, respectivamente (Tabla 3.18). Sadeghian, (2009) encontró una reducción significativa, en el rendimiento, cuando los niveles de éste en el suelo son bajos (menor a 10 mg.kg⁻¹).
- **Contenidos de Potasio (K).** En los suelos, se registraron valores promedios mínimos de 0,36 cmol₍₊₎kg⁻¹ (sistema café con sombra) y máximos de 0,57 cmol₍₊₎kg⁻¹ café-plátano (Tabla 3.18). Según lo determinado por Valencia, (1986), Valencia y Carrillo, (1983) y Valencia, (1999) algunos de los valores encontrados, no están en el rango óptimo determinado para el desarrollo normal del cultivo del café (0,3 y 0,4 cmol₍₊₎kg⁻¹).
- **Contenidos de Calcio (Ca).** En la tabla 3.18, se presentan los valores de Ca, en los sistemas de producción de café. Los contenidos mínimos y máximos promedios de Ca en los suelos de café estudiados fueron de 4,21 cmol₍₊₎kg⁻¹ y 6,12 cmol₍₊₎kg⁻¹ correspondiente a los sistemas de café semisombra y sin sombra. Con estos valores reportados, no se presenta deficiencias de este elemento

- **Contenidos de Magnesio (Mg).** En los los sistemas de producción de café, se registraron los siguientes valores: 1,29, 1,33, 1,44 y 1,49 $\text{cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$, reportados en su orden, en los sistemas café sin sombra, café semisombra, café-plátano y café con sombra (Tabla 3.18). Por lo observado en estos sistemas, la mayoría de las fincas se encuentran en los niveles óptimos que para el Mg está entre 0,6 y 1,2 $\text{cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$, (Valencia, 1986; Valencia y Carrillo, 1983 y Valencia, 1999).
- **Contenidos de Aluminio (Al).** Se registró el mínimo valor promedio 0,78 $\text{cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ en el sistema café sin sombra y el contenidos máximo de Al con 0,89 $\text{cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ en el sistema café-plátano (Tabla 3.18). Se puede indicar, que los promedios de las concentraciones de aluminio en los sistemas considerados, están en de los niveles tolerables 0,0 – 1,0 $\text{cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$; (Valencia, 1986; Valencia y Carrillo, 1983 y Valencia, 1999).
- **Contenidos de Carbono Orgánico en el Suelo (C).** Los resultados de carbono orgánico del suelo (Tabla 3.18), se registraron los siguientes valores: 3,24% (café sin sombra), 3,46% (café-plátano), 4,18% (café con sombra) y 3,56% (café semisombra). Los valores más bajos en estos sistemas, se deben a la menor cantidad de materia orgánica del suelo, como lo afirman Han *et al.*, (2006), la aplicación de fertilizantes afecta la dinámica del carbono orgánico del suelo.
- **Densidad Aparente (Da).** La densidad aparente del suelo fluctuó entre 1,02 gr cm^{-3} y 1,10 gr cm^{-3} , correspondiente a los sistemas café sin sombra y café semisombra, respectivamente (Tabla 3.18); no se presentaron diferencias estadísticas significativas. Schroth *et al.*, (2001) demuestran, que, en cafetales a pleno sol, la densidad aparente de los suelos aumenta y el porcentaje de la porosidad se reduce, situación que afecta el desarrollo y distribución de las raíces del cafetal y por ende la distribución de la macrofauna en el suelo.

- **Porosidad Total (PO).** Comprende los macroporos, mesoporos y microporos de los suelos; la porosidad total, no presentó diferencias significativas, los valores oscilaron entre de 56,55 % (café sin sombra), 59,25% (café con sombra), 59,43% (café semisombra) y 60,7% (café-plátano). Para Carvalho *et al.*, (2004) y Muñoz-Rodríguez *et al.*, (2020), los sistemas agroforestales, presentan una calidad del suelo superior, cuando es comparado con el suelo cultivado convencionalmente; presenta menor densidad aparente, mayor porosidad, menor resistencia a la penetración y mayor agregación de partículas.
- **Producción Café (arrobos c.p.s ha-1año-1), (PC).** En los registros de las fincas y por información del productor, la producción osciló entre 80 y 224 arrobos c.p.s ha⁻¹año⁻¹; los valores más bajos se registraron en el sistema café con sombra y los más altos en el sistema café sin sombra (Tabla 3.19). Estos resultados son menores a los reportados por Posada *et al.* (2006) en la Subestación Experimental El Tambo (Cauca) para la Variedad Castillo; el Tambo con 268,4 arrobos, teniendo en cuenta, que esta es la variedad que se ha implementado en la zona.

Tabla 3.19

Resultados de las Variables de la Dimensión Económica, en los Sistemas de Producción de Café (Año 2013).

Sistema Variable	S1	S2	S3	S4
PC	103,5	106,25	131,25	184,25
CC	0,99	1,02	1,25	1,76
IN	6.156.250	6.656.250	7.828.125	11.515.625
CP	4.381.227,5	4.130.500	4.850.312	7.079.979
MB	1.775.022,5	2.525.750	2.977.813	4.435.646
BC	1,42	1,63	1,6	1,65
FR	87,5	87,5	88	88,75

Sistema Variable	S1	S2	S3	S4
CF	915.750	1.071.000	1.291.000	1.673.000
RC	5	4,78	4,95	5,50

PC: Producción café (**CC**) (arrobas c.p.s ha⁻¹año⁻¹): Calificación café, **IN:** Ingresos, **CP:** Costo producción, **MB:** Margen bruto, **BC:** Relación (beneficio/costo), **FR:** Factor rendimiento, **CF:** Costos fertilizantes y **RC:** Relación café cereza/c.p.s.

Nota: Resultados de las Variables de la Dimensión Económica. Esta investigación.

- **Calificación Café (CC)** (arrobas c.p.s ha⁻¹). Para evaluar esta variable, se consideró el promedio de producción local (105 arrobas c.p.s ha⁻¹año⁻¹) como referencia. El Índice de Productividad, calculado como la relación entre la producción del sistema y el promedio local, mostró, que los valores más bajos corresponden al sistema de café con sombra (0,99), mientras que el más alto se registró en el sistema de café sin sombra (1,76).
- **Ingresos (IN).** De acuerdo con los registros financieros analizados y la información proporcionada por los productores, los sistemas de café bajo sombra, presentan los promedios de ingresos más bajos por ventas directas de café, mientras que el cultivo sin sombra, genera los ingresos más altos (Tabla 3.19). No obstante, como señalan Perfecto *et al.* (2019), esta comparación, no refleja los ingresos complementarios derivados de sistemas agroforestales. Los productores entrevistados destacan, que los sistemas bajo sombra, semisombra y aquellos asociados con plátano, generan recursos adicionales mediante la venta de productos no cafetaleros (frutales, maderables o cultivos intercalados), además de beneficios para el autoconsumo. Lo anterior, es corroborado por Delgado-Vargas y Muñoz-Rodríguez, (2023), que mencionan una diferencia gradual de ingresos entre sistemas agroforestales cafeteos versus un sistema tradicional sin sombra, además, permite monetizar los efectos biológicos y sociales.

- **Costo Producción ha^{-1} (CP).** Respecto al costo de producción por hectárea (CP), los productores tradicionales señalan, la limitación de recursos financieros para invertir en el manejo del cafetal, lo que deriva en menores gastos en mano de obra y agroquímicos en comparación con los sistemas convencionales (café a pleno sol y sistema café-plátano); sin embargo, este indicador debe analizarse en relación con los beneficios productivos, ya que un mayor CP, puede compensarse con una mayor productividad. En los sistemas agroforestales tradicionales, la reducción de insumos externos, no necesariamente implica menor rentabilidad, dado que los servicios ecosistémicos (polinización, control biológico) pueden suplir parcialmente estos costos.
- **Margen Bruto ha^{-1} (MB).** El Margen Bruto (MB), es un indicador económico, que determina si un sistema de producción genera ganancias suficientes para cubrir los gastos operativos; en este estudio, su cálculo consideró exclusivamente, los ingresos por venta de café. Los resultados mostraron que: El sistema café sin sombra registró el MB más alto; el sistema café-plátano ocupó una posición intermedia, los sistemas cafés con sombra y semisombra, presentaron los valores más bajos (Tabla 3.19). Esta variabilidad se explica principalmente, por las diferencias en los rendimientos por hectárea de café pergamino seco (c.p.s.). No obstante, todos los sistemas analizados, mostraron un MB positivo, lo que indica, capacidad para cubrir los costos de producción. Cabe destacar, que estos valores son sensibles a fluctuaciones en el precio internacional del café.
- **Relación (B/C).** La relación entre el total de ingresos obtenidos por la venta del café y los costos de producción, el valor más alto lo presenta, el sistema café sin sombra con un valor de 1,65; en cambio la relación más baja se reporta en el sistema café con sombra (Tabla 3.19). Respecto a los productores de café convencional, a pesar de obtener los mayores ingresos por ha., la relación

- B/C, no es significativa con respecto a los otros sistemas, debido al alto costo que conlleva la producción de café y la dependencia de insumos externos.
- **Factor Rendimiento (FR).** En la Tabla 3.19, se presenta la cantidad de café pergamino seco requerido para producir un saco de 70 kg. de café excelso durante el proceso de trilla; los resultados muestran, que los sistemas de manejo café semisombra y café sombra, presentan la eficiencia de conversión (87,50%), mientras que el sistema café sin sombra registra un factor de rendimiento ligeramente superior (88%)
 - **Costos Fertilizantes (CF).** Para estimar los valores del costo de los fertilizantes, se consideraron los datos suministrados por el productor, la dosis de fertilizante aplicado por árbol y los precios en el mercado; a nivel de sistema, los propietarios que invierten menos en compra de fertilizantes, son los del sistema café con sombra y en el sistema que se invierte más, es el sistema café sin sombra (Tabla 3.19).
 - **Relación Café Cereza/c.p.s. (RC).** Esta variable se determinó, mediante el cociente entre el peso del café en cereza y el peso seco del mismo; el sistema de café bajo semisombra, presentó la relación más baja (4,78), mientras que el sistema sin sombra registró el valor más alto (5,50) (Tabla 3.19). Estos hallazgos coinciden, con lo reportado por Montilla *et al.*, (2008) en un estudio realizado en fincas cafetaleras de los municipios de Manizales, Chinchiná, Palestina y Villamaría (Caldas, Colombia). Los autores evaluaron, nueve lotes de café Variedad *Colombia* con características contrastantes en oferta ambiental, densidad de siembra y manejo agronómico, encontrando relaciones café cereza/café pergamino de 4,94 (café seleccionado) y 4,89 (café sin seleccionar).

Tabla 3.20

Resultados de las Variables de la Dimensión Social en Fincas de los Sistemas de Producción de Café.

SISTEMA	AP	DI	PO	CD	SN	PF	AC	IC	GE	MT	MF
S1	5	5	5	4	5	5	5	5	2	3	5
	5	4	3	4	5	4	4	2	2	5	5
	4	4	3	3	4	2	4	1	1	3	4
	4	4	2	3	4	3	3	1	1	4	5
S2	4	4	2	2	4	3	3	1	1	2	3
	5	5	3	4	5	3	4	4	3	4	5
	4	4	5	4	5	3	5	2	3	4	5
	4	4	3	3	4	4	4	1	1	5	5
S3	2	3	3	3	4	4	4	1	1	5	4
	3	3	1	2	5	3	3	1	1	4	5
	3	3	1	2	3	4	3	1	1	3	4
	2	3	2	3	3	3	3	1	1	5	5
S4	1	1	1	4	5	2	4	1	2	5	1
	2	2	2	4	5	3	5	2	2	5	2
	1	1	1	3	5	2	3	1	3	5	3
	1	2	2	3	4	4	3	1	1	4	5

Dónde: **AP**: Alimentos producidos sistema, **DI**: Dependencia insumos **PO**: Participación organizaciones, **CD**: Capacidad Administrativa, **SN**: Satisfacción necesidades básicas, **PF**: Participación integración familiar, **AC**: Autoestima caficultor, **IC**: Impacto del proyecto comunidad, **GE**: Grado de Escolaridad, **MT**: Medio de Transporte y **MF**: Administración y toma decisiones finca.

Nota: Resultados de las Variables de la Dimensión Social. Esta investigación.

Por su naturaleza, las variables de la dimensión social, valorados en escala de 1 – 5, (Tabla 3.20), tienden a ser cualitativos y difíciles de medir con precisión, por lo que no es sencillo ubicarlos en el marco de evaluación de tipo cuantitativo. Aunque las metodologías para evaluar estos indicadores

con precisión, están mucho menos desarrolladas que los ambientales y económicos, es muy importante dedicar esfuerzos, a fin de cubrir de la mejor manera posible, esta dimensión del análisis (Maser et al., 1999).

- **Alimentos Producidos en el Sistema (AP).** La agrobiodiversidad, definida como el número de especies manejadas para la producción de alimentos que aportan al sustento familiar (consumo y venta), es más alta en el sistema café con sombra, seguido por el sistema café semisombra, debido a la práctica de intercalar cultivos con árboles frutales. En estos sistemas, en promedio, se obtienen más de seis productos, mientras que esta cantidad disminuye en los sistemas café-plátano y café sin sombra; estos agroecosistemas presentan una estructura tendiente al monocultivo (Tabla 3.20).

Las especies más comunes utilizadas por los hogares, como base de su dieta alimenticia incluyen: maíz (*Zea mays* L.), plátano (*Musa paradisiaca* L.), banano (*Musa sp.*), yuca (*Manihot esculenta* Crantz), lulo (*Solanum quitoense* L.), tomate de árbol (*Cyphomandra betacea* Cav.) y papaya (*Carica papaya* L.). Las familias que manejan sistemas de café con sombra y semisombra, presentan menor dependencia de insumos externos, en comparación con los sistemas convencionales, garantizando la seguridad alimentaria y resiliencia económica (Perfecto et al., 2019).

- **Dependencia Insumos, no Producidos en el Sistema (DI).** Los sistemas de cultivo de café, muestran distintos grados de dependencia de insumos externos, especialmente, en el consumo alimenticio de las familias productoras; en los sistemas café con sombra y café semisombra, menos del 40% de los alimentos consumidos provienen del mercado local, ya que una parte se produce en la finca o la región, En contraste, el sistema café sin sombra, adquiere más del 60% de sus alimentos en el mercado, evidenciando una mayor dependencia de recursos externos.

Esta dependencia, representa un riesgo elevado para los productores de sistemas como café sol y café-plátano y los hace más vulnerables por la compra constante de alimentos fuera de la finca, reduciendo la autonomía económica y la sustentabilidad del sistema productivo.

- **Participación Organizaciones (PR).** Se denota, que no existe una diferencia marcada de los integrantes de la familia y el sistema productivo en cuanto a la participación e integración familiar a la comunidad; independientemente del sistema de manejo del cultivo, es destacable la vinculación de todos los miembros de la familia, al asumir responsabilidades para su bienestar y de la comunidad. Con respecto a la integración de la familia cafetera con la sociedad, León, (2006) indica, que el capital social, además está integrado por las redes instauradas por los caficultores en sus instituciones y organizaciones, las cuales trascienden al ámbito cafetero e incluyen la interacción con los diferentes niveles gubernamentales y el resto de la sociedad.
- **Capacidad Administrativa (CD).** Al evaluar la capacidad administrativa del caficultor, considerando la habilidad para programar, organizar, liderar, coordinar, evaluar y documentar labores de la finca, se encontró, que, en ningún sistema, el propietario cumple con todos los criterios de evaluación; la calificación varió entre 2 y 4, (Tabla 3.20), donde 2 indica que tiene una administración baja con limitantes en la administración, en cambio, el valor 4 corresponde a una valoración alta.
- **Satisfacción Necesidades Básicas (SN).** La evaluación de la satisfacción de las necesidades básicas en las familias, se realizó, mediante indicadores vinculados a cuatro dimensiones: vivienda, servicios sanitarios, educación e ingresos mínimos. Los resultados mostraron, un rango entre 3 y 5 (Tabla 3.20), donde: puntuación 3: corresponde a productores con moderada

satisfacción de necesidades básicas; 5, indica que los productores poseen condiciones óptimas en vivienda, salud, educación e ingresos. Esta metodología se alinea, con el enfoque de medición multidimensional de pobreza, ampliamente utilizado en estudios socioeconómicos en América Latina (Schuschny & Soto de la Rosa, 2009).

- **Participación Integración Familiar (PF).** La participación activa de los integrantes de la familia, en el apoyo, seguimiento y contribución con decisiones que conlleven al avance y buen desempeño de los sistemas de producción presentes en la finca, se encontró, que no hay una diferencia marcada con respecto a la evaluación; en la mayoría de las fincas, el manejo lo realizan los padres y alguno de los hijos y en otras el padre y/o madre y alguno de los hijos. En el departamento de Nariño, el cultivo del café, se desarrolla principalmente, en pequeñas unidades de producción familiar, donde el caficultor actúa como su propio jefe y la mayoría de las labores agrícolas, son realizadas por miembros de la misma familia (Leonel *et al.*, 2023).
- **Autoestima del Caficultor (AC).** La motivación del caficultor, es un factor clave en los procesos de desarrollo rural, ya que promueve una mayor participación en alternativas de aprendizaje y la adopción de estrategias adecuadas para el cambio; se observó que la mayoría de los productores poseen habilidades para participar en eventos, mantienen buenas relaciones con otros agricultores y generan expectativas positivas respecto al cultivo de café. En este contexto, Dussán *et al.*, (2006) señalan, que los caficultores han estructurado sus sistemas de producción según su percepción y visión, lo cual influye directamente en la viabilidad de su actividad productiva.
- **Impacto del Proyecto en la Comunidad (IC).** La importancia de las prácticas de manejo implementadas en los sistemas productivos de café y el impacto generado en la población cafetera

del lugar, se vio reflejada, en que la mayoría de las prácticas que se realizan a nivel del cultivo, no han producido ninguna expectativa a nivel de los cafeteros. Lo anterior demuestra, que, en la mayoría de los casos, las prácticas de manejo, se ajustan a los lineamientos formulados por la agricultura convencional, donde sus propuestas últimamente no han tenido ningún impacto; a nivel general, presentan una estabilidad baja en procesos de innovación y empleo de alternativas, que orienten y cambien las actuales prácticas de manejo.

- **Grado de Escolaridad (GE).** El nivel de escolaridad de los caficultores responsables del manejo del cultivo, osciló entre 1 y 3 (Tabla 3.20); la calificación 1, corresponde a productores con un nivel de Educación Primaria, en cambio los calificados con 3, pertenecen a propietarios con un grado educativo a nivel técnico. En la evaluación del grado de escolaridad de las familias cafeteras, se encontró, que la educación en general, muestra bajos niveles de escolaridad, siendo este uno de los factores que reduce las opciones para mejorar las condiciones de vida de los hogares.
- **Medio Transporte (MT).** La evaluación del transporte, comprendió la tenencia y el desplazamiento de la familia y los productos e insumos; los propietarios del sistema café sin sombra y café plátano, la mayoría, el transporte lo hacen a través de carro propio y motocicleta, en cambio los propietarios del sistema café sombra y semisombra, el medio de transporte, es el público, motocicleta y caballo. En la zona de estudio, productores macrofundistas, que en sus fincas manejan sistemas de producción convencional, cuentan con carreteras en condiciones favorables, así como vehículos para transportar sus productos.
- **Administración y Toma de Decisiones en la Finca (MF).** Esta variable se evaluó, considerando la permanencia de la familia en la finca, el grado de responsabilidad en las distintas actividades y

la capacidad de toma de decisiones. Las fincas que implementan sistemas de café con sombra o semisombra, muestran una mayor participación familiar en las labores y procesos productivos, lo cual, fomenta el sentido de pertenencia e involucra a la familia en la producción y comercialización de los productos; en contraste, en las fincas de café sin sombra, se observa una tendencia, en la que el jefe de familia, en algunos casos el mayordomo no asume la mayoría de las labores, lo que con frecuencia implica, la contratación de mano de obra.

3.1.3 Selección del Conjunto Mínimo de Variables (CMV).

Con el objetivo de reducir el número de variables y seleccionar un conjunto mínimo (CMV), para la construcción del Índice General de Sustentabilidad (IGS), se aplicaron técnicas de Análisis Multivariado, según la naturaleza de las variables preseleccionadas. Para las dimensiones económica y ambiental (cuantitativas), se utilizó el Análisis de Componentes Principales (ACP). En el caso de la dimensión social, compuesta por datos cualitativos, se empleó el Análisis de Correspondencia Múltiple (ACM).

3.1.3.1 Análisis de Componentes Principales (ACP).

En la Tabla 3.21 y 3.22, se indica el análisis del ACP, correspondiente a las variables ambientales, donde el 61,57% de la variación total evaluada, está explicada en tres factores (componentes). El primer componente explicó 31,62% de la variabilidad total. Este componente estuvo formado principalmente, por las variables EH, DL, RL, RM y DM, con valores de correlación variable-factor (r_{v-f}) que oscilo entre 0,94 y 0,76.

Tabla 3.21

Valores Propios y Variabilidad Total Explicada por las Variables Ambientales (Componentes Principales)

Componente	Valor Propio	Diferencia	Proporción	Acumulado
1	6,9561	3,3500	31,62	31,62
2	3,6061	0,6220	16,39	48,01
3	2,9841	0,8681	13,56	61,57
4	2,1160	0,5108	9,62	71,19
5	1,6052	0,3000	7,30	78,49

Nota: Análisis del ACP, correspondiente a las variables ambientales. Esta investigación.

El segundo componente explicó el 16,39% de la variabilidad total observada, conformada básicamente por MO ($r_{v-f}=0,83$), P ($r_{v-f}=0,71$) y C ($r_{v-f}=0,71$); la variable que más aportó al tercer componente, que explica el 13,56% de la variabilidad total es Mg ($r_{v-f}=0,70$). El ACP reportó, que la variabilidad está concentrada, principalmente, en las variables biológicas (EH, DL, RL, RA, RM y DM), seguidas por las variables químicas (MO, P, y C).

Tabla 3.22

Peso de las Variables Ambientales en las Tres Primeras Componentes

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Componente
Riqueza especies leñosas	0,89	-0,25	-0,01	1
Diversidad florística leñosas	0,93	-0,31	0,03	1
Riqueza especies arvenses	-0,74	-0,04	0,42	1
Macroinvertebrados	0,78	-0,20	0,13	1
Diversidad macrofauna	0,76	-0,23	0,35	1
Uso de agroquímicos	-0,75	0,15	0,11	1
Prácticas de conservación	0,75	-0,48	-0,19	1
Sanidad cultivo broca	-0,19	-0,48	0,24	2

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Componente
Profundidad horizonte A	0,36	-0,23	-0,57	3
Cobertura de arvenses	-0,70	-0,08	-0,13	1
Espesor hojarasca	0,94	-0,15	0,07	1
pH	0,12	0,37	0,44	3
MO	0,47	0,83	0,07	2
P (disponible)	0,46	0,71	0,36	2
Calcio	0,13	-0,41	0,25	2
Magnesio	-0,13	-0,22	0,70	3
Potasio	-0,16	0,19	-0,51	3
Aluminio	0,17	0,07	-0,59	3
Nitrógeno	0,22	0,70	-0,27	2
Carbono	0,46	0,71	0,36	2
Densidad aparente	0,29	0,45	-0,48	3
Densidad real	0,20	0,15	0,54	3

Nota: Peso de las Variables Ambientales en las Tres Primeras Componentes.

El análisis del ACP (Tabla 3.23 y 3.24) realizado a las variables económicas, se observa que dos componentes principales, explican el 83,85% de la variación total; el primer componente explicó 64,17% de la variabilidad total, formado principalmente por las variables PC ($r_{v-f} = -0,98$), CC ($r_{v-f} = -0,98$), CP ($r_{v-f} = -0,98$) y MB ($r_{v-f} = -0,89$); el segundo componente explica el 19,67% de la variabilidad total observada, conformado por las variables CF ($r_{v-f} = -0,79$) y RC ($r_{v-f} = 0,78$).

Tabla 3.23

Valores Propios y Variabilidad Total Explicada por las Variables Económicas (Componentes Principales)

Componente	Valor Propio	Diferencia	Proporción	Acumulado
1	5,7756	4,0052	64,17	64,17
2	1,7704	0,9976	19,67	83,85

Componente	Valor Propio	Diferencia	Proporción	Acumulado
3	0,7728	0,3087	8,59	92,43
4	0,4641	0,2742	5,16	97,59
5	0,1899	0,1712	2,11	99,70
6	0,0187	0,0103	0,21	99,91
7	0,0084		0,09	100,00

Nota: Valores Propios y Variabilidad Total Explicada por las Variables Económicas. Ordóñez-Jurado (2014).

Tabla 3.24

Peso de las Variables Económicas en las Dos Primeras Componentes

Variable	Factor 1	Factor 2	Componente
Producción café	-0,98	-0,03	1
Calificación café	-0,98	-0,04	1
Ingresos	-0,68	0,22	1
Costo producción ha-1	-0,98	-0,01	1
Margen bruto	-0,89	0,44	1
Relación (Beneficio/Costo)	-0,83	-0,44	1
Factor rendimiento	-0,75	-0,30	1
Costos fertilizantes	-0,34	-0,79	2
Relación café cereza/c.p.s	-0,52	0,78	2

Nota: Peso de las Variables Económicas en las Dos Primeras Componentes. Ordóñez-Jurado (2014).

3.1.3.2 Análisis de Correspondencia Múltiple (ACM).

El Análisis de Correspondencia Múltiple aplicado a las variables sociales, reveló, que el 54,52% de la variabilidad total, se explica mediante cuatro factores. El primer componente explicó el 19,40% de la variabilidad, mientras que el segundo, tercero y cuarto contribuyeron con el 13,06%, 11,37% y 10,69%, respectivamente (Tabla 3.25). En la formación del primer

factor, destacaron las variables, impacto del proyecto en la comunidad (14,6%) y capacidad administrativa (13,8%). El segundo factor estuvo definido principalmente por dependencia de insumos externos (22,3%), manejo de la finca (16,5%) e integración familiar (16,1%). Por su parte, el tercer factor estuvo representado por alimentos producidos en el sistema (15,3%), y el cuarto factor mostró contribuciones significativas de participación en organizaciones comunitarias (21,7%) y autoestima del caficultor (19,0%) (Tabla 3.26).

Tabla 3.25

Valores Propios y su Contribución a la Varianza Explicada, resultante del ACM, (Variables Sociales)

Componente	Valor Propio	Diferencia	Proporción	Acumulado
1	0,5643	0,1843	19,40	19,40
2	0,3800	0,0492	13,06	32,46
3	0,3308	0,0199	11,37	43,83
4	0,3109	0,0248	10,69	54,52
5	0,2861	0,0489	9,83	64,35
6	0,2372	0,0633	8,15	72,51
7	0,1739	0,0271	5,98	78,49
8	0,1468	0,0194	5,05	83,53

Nota: Valores Propios y su Contribución a la Varianza Explicada. Ordóñez-Jurado (2014).

Tabla 3.26

Peso de las Variables Sociales de las Cuatro Primeras Componentes, Sistemas Producción De Café

Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Comp
Capacidad administrativa	13,8	1,5	5,3	6,4	1
Impacto proyecto comunidad	14,6	1,5	11,9	3,7	1
Satisfacción necesidades básicas	9,2	3,6	5,2	8,5	1
Grado escolaridad	11,7	4,6	0,2	1,2	1

Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Comp
Administración decisiones finca	4,9	16,5	10,5	9,6	2
Dependencia insumos externos	9,8	22,3	16,7	11,7	2
Participación, integración familiar	7,1	16,1	8	5,7	2
Alimentos producidos sistema	9,4	15,1	15,3	11,8	3
Medio transporte	1,2	6,6	12,9	0,5	3
Participación organiz comunitaria	7,9	9,8	13,2	21,7	4
Autoestima del caficultor	10,8	2,4	0,9	19	4

Nota: Peso de las Variables Sociales de las Cuatro Primeras Componentes. Ordóñez-Jurado (2014).

3.1.4 Criterios Considerados para la Selección del CMV.

Para la selección final del Conjunto Mínimo de Variables (CMV) destinado a valorar la sustentabilidad de los sistemas de producción de café, se aplicaron los siguientes criterios:

Valor Estadístico: selección de variables, con los valores más altos en valor propio o peso, según los componentes determinados por la variabilidad explicada en cada dimensión.

Validación Experta: aportes de especialistas en cultivo de café, sobre la relevancia de variables, con incidencia directa en la estabilidad de los agroecosistemas estudiados.

En cuanto a la distribución por dimensiones, se consideraron:

- Variables ambientales: hasta el tercer componente.
- Variables económicas: hasta el segundo componente.
- Variables sociales: hasta el cuarto componente.

Con base en estos criterios, el CMV final, quedó conformado por 21 variables (Tabla 3.27).

Tabla 3.27

Conjunto Mínimo de Variables (CMV) para Evaluar la Sustentabilidad de los Sistemas de Producción de Café

Variables (CMV) Seleccionadas		
Ambiental	Económica	Social
Riqueza especies leñosas	Producción café (arrobas c.p.s ha ⁻¹)	Impacto proyecto comunidad
Diversidad florística leñosas	Calificación café (arrobas c.p.s ha ⁻¹)	Administración y decisiones finca
Riqueza especies arvenses	Costo producción ha ⁻¹	Dependencia insumos externos
Diversidad macrofauna	Relación beneficio costo	Participación integración familiar
Espesor hojarasca	Margen bruto ha ⁻¹	Alimentos producidos sistema
Materia orgánica	Costos fertilizantes	Participación organización comunitaria
Carbono	Relación café cereza/c.p.s	Autoestima caficultor

Nota: Conjunto Mínimo de Variables (CMV) para Evaluar la Sustentabilidad. Ordóñez-Jurado (2014).

3.1.5 Estandarización de los Datos.

Las variables preseleccionadas, presentan valores cuantificados, mediante diferentes unidades de medida (peso, longitud, área, volumen, actitud de los productores, entre otros). Esta heterogeneidad dificulta, la interpretación de los resultados, por lo que se requiere un proceso de estandarización de datos, asignando un nuevo valor escalado; las principales técnicas de estandarización incluyen:

- Sin cambio de magnitud: Conserva la escala original, pero ajusta la distribución.
- Con cambio de magnitud a escala libre: Transforma los datos a un rango flexible.
- Con cambio de magnitud a escala fija: Normaliza los valores dentro de un intervalo predeterminado (Barba-Romero & Pomerol, 1997).

La elección del método, depende del objetivo del estudio y del criterio del investigador. Para la construcción de los subíndices ambiental, económico y social que conformaron el IGS, las variables se estandarizaron, mediante un cambio de magnitud a escala fija. Este proceso consistió, en la normalización de los datos originales a una escala de 0 a 1. Según Farfán e Hincapié, (2011), cada variable fue valorada según su naturaleza, asignándole un valor mínimo (V_{min}), un valor máximo (V_{max}), un rango óptimo (RO) y un grado de pertenencia (Tabla 3.28).

Tabla 3.28

Valores Mínimos (V_{min}) y Valores Máximos (V_{max}) y Grado de Pertenencia utilizados en la Determinación de la Sustentabilidad de los Sistemas de Producción de Café.

INDICADOR	RANGO		Grado Pertenencia
	V_{min}	V_{max}	
Diversidad florística leñosas	0	2,44	1
Riqueza especies leñosas	0	14	1
Riqueza especies arvenses	7	17	1
Diversidad macrofauna	1,19	2,0	1
Espesor hojarasca	0,80	4,5	1
Carbono	2,04	4,18	1
Materia orgánica	8	14	1
Producción café (arrobas c.p.s)	50	300	1
Calificación café (arrobas c.p.s)	0,48	2,86	1
Margen bruto (MB)	1.200.000	6.500.000	1
Relación (Beneficio/Costo)	1,25	1,91	1
Costo producción ha-1	3.262.000	8.800.000	2
Costos fertilizantes	618.000	1.910.000	2
Relación café cereza/c.p.s	4,5	6,0	2
Impacto del proyecto en comunidad	1	5	1
Administración y decisiones en la finca	1	5	1
Dependencia insumos externos	1	5	1

INDICADOR	RANGO		Grado Pertenencia
	Vmin	Vmax	
Participación organizaciones	1	5	1
Alimentos producidos sistema	1	5	1
Participación integración familiar	1	5	1
Autoestima caficultor	1	5	1

Nota: Valores y Grado de Pertenencia utilizados en la Determinación de la Sustentabilidad. Ordóñez-Jurado (2014).

3.1.6 Transformación y Comportamiento de las Variables (CMV).

De acuerdo con las fórmulas o funciones de pertenencia (1, 2 y 3) y las consideraciones planteadas por Sepúlveda y Biograma, (2008), Velásquez *et al.*, (2007), Farfán e Hincapié, (2011) las funciones de pertenencia se aplican, según la relación positiva o negativa de la variable, con la estabilidad del sistema. Si un aumento o disminución en el valor de la variable genera un beneficio para el sistema, se considera una relación positiva (+); por el contrario, si dicho cambio no es beneficioso, la relación se clasifica como negativa (-). Este procedimiento de estandarización de datos, es denominado por diversos autores como “Más es mejor” y “Menos es mejor”.

$$\mu = 0,1 + \left(\left(\frac{V_0 - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} \right) * 0,9 \right); \quad V_0 < L_{\inf} \quad (1)$$

$$\mu = 1,1 - \left(0,1 + \left(\left(\frac{V_0 - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} \right) * 0,9 \right) \right); \quad V_0 > L_{\sup} \quad (2)$$

$$\mu = L_{\inf} \leq V_0 \leq L_{\sup} \quad (3)$$

μ = Grado de pertenencia; valor que toma la variable entre 0 y 1.

V_0 = Valor calculado de la variable

$V_{\min}$ = Valor mínimo asignado a la variable

$V_{\max}$ = Valor máximo asignado a la variable

- (1). Función a aplicar cuando la variable tiene una relación positiva
- (2). Función a aplicar cuando la variable tiene una relación negativa
- (3). Función a aplicar cuando la variable está dentro de los rangos óptimos o adecuados.

Con las consideraciones anteriormente señaladas, los datos estimados (μ) para las fincas que conforman cada sistema de producción, se presentan en las Tablas 3.29, 3.30 y 3.31.

Tabla 3.29.

Variables Ambientales Transformadas (μ), Sistemas de Producción de Café

Sistema	Finca	RL	DL	RA	DM	EH	MO	C
S1	1	1,0	1,0	0,28	1,0	1,0	0,39	0,39
	2	0,74	0,89	0,10	0,92	0,83	0,41	0,41
	3	0,74	0,84	0,46	0,82	0,76	1,0	1,0
	4	0,68	0,86	0,19	0,90	0,88	0,94	0,94
S2	1	0,61	0,85	0,73	0,88	0,46	0,40	0,40
	2	0,74	0,87	0,10	0,41	0,64	0,76	0,76
	3	0,55	0,79	0,37	0,37	0,42	0,28	0,28
	4	0,61	0,75	0,19	0,33	0,39	0,60	0,60
S3	1	0,42	0,49	0,55	0,38	0,35	0,10	0,10
	2	0,36	0,51	0,55	0,57	0,39	0,66	0,67
	3	0,29	0,34	0,91	0,42	0,22	0,64	0,64
	4	0,29	0,35	0,46	0,48	0,34	0,52	0,52
S4	1	0,10	0,10	1,0	0,29	0,11	0,57	0,57
	2	0,23	0,34	0,46	0,10	0,10	0,25	0,26
	3	0,23	0,34	0,82	0,54	0,17	0,51	0,52
	4	0,29	0,48	0,64	0,17	0,29	0,34	0,34

Nota: Variables Ambientales Transformadas (μ). Ordóñez-Jurado (2014).
RL: Riqueza especies leñosas, **DL:** Diversidad florística leñosas, **RA:** Riqueza especies arvenses, **DM:** Diversidad macrofauna, **EH:** Espesor hojarasca, **MO:** Materia orgánica y **C:** Carbono.

Tabla 3.30*Variables Económicas Transformadas (μ), Sistemas de Producción de Café*

Sistema	Finca	PC	CC	CP	MB	BC	CF	RC
S1	1	0,30	0,30	0,87	0,33	0,63	1,0	1,0
	2	0,38	0,38	0,54	0,22	0,20	0,75	0,10
	3	0,28	0,28	0,91	0,10	0,20	0,63	0,70
	4	0,21	0,21	0,95	0,13	0,29	0,79	1,0
S2	1	0,37	0,36	0,74	0,39	0,58	0,61	0,82
	2	0,32	0,32	0,78	0,28	0,44	0,84	1,0
	3	0,24	0,24	1,0	0,30	0,74	0,73	0,70
	4	0,29	0,29	0,91	0,33	0,69	0,56	0,82
S3	1	0,53	0,53	0,43	0,55	0,54	0,66	0,82
	2	0,45	0,45	0,75	0,64	1,0	0,25	0,70
	3	0,24	0,24	0,90	0,18	0,35	0,70	0,70
	4	0,35	0,35	0,88	0,24	0,44	0,52	0,70
S4	1	0,66	0,66	0,42	0,91	0,96	0,46	0,70
	2	0,73	0,72	0,31	1,0	0,95	0,15	0,70
	3	0,40	0,39	0,69	0,41	0,56	0,35	0,10
	4	0,55	0,55	0,10	0,27	0,10	0,10	0,10

Nota: Variables Económicas Transformadas (μ). Ordóñez-Jurado (2014).

PC: Producción café, **CC:** Calificación café, **CP:** Costo producción, **MB:** Margen bruto, **BC:** Relación (beneficio/costo), **CF:** Costos fertilizantes y **RC:** Relación café cereza/c.p.s.

Tabla 3.31

Variables Sociales Transformadas (μ), Sistemas De Producción De Café

Sistema	Finca	AP	DI	PR	PF	AC	IC	MF
S1	1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	2	1,0	0,78	0,55	0,78	0,78	0,33	1,0
	3	0,78	0,78	0,55	0,33	0,78	0,10	0,78
	4	0,78	0,78	0,33	0,55	0,55	0,10	1,0
S2	1	0,78	0,78	0,33	0,55	0,55	0,10	0,55
	2	1,0	1,0	0,55	0,55	0,78	0,78	1,0
	3	0,78	0,78	1,0	0,55	1,0	0,33	1,0
	4	0,78	0,78	0,55	0,78	0,78	0,10	1,0
S3	1	0,33	0,55	0,55	0,78	0,78	0,10	0,78
	2	0,55	0,55	0,10	0,55	0,55	0,10	1,0
	3	0,55	0,55	0,10	0,78	0,55	0,10	0,78
	4	0,33	0,55	0,33	0,55	0,55	0,10	1,0
S4	1	0,10	0,10	0,10	0,33	0,78	0,10	0,10
	2	0,33	0,33	0,33	0,55	1,0	0,33	0,33
	3	0,10	0,10	0,10	0,33	0,55	0,10	0,55
	4	0,10	0,33	0,33	0,78	0,55	0,10	1,0

Nota: Variables Sociales Transformadas (μ). Ordóñez-Jurado (2014).

AP: Alimentos producidos sistema, **DI:** Dependencia insumos **PR:** Participación organizaciones, **PF:** Participación integración familiar, **AC:** Autoestima caficultor, **IC:** Impacto del proyecto comunidad y **MF:** Administración y toma decisiones finca.

Con los datos transformados obtenidos del CMV, se evaluó el grado de desarrollo de cada sistema, mediante una escala de 0 a 1, distribuida en cinco intervalos de calificación (Tabla 3.32).

Tabla 3.32.

Escala para la Valoración del Grado de Desarrollo del CMV y la Sustentabilidad de los Sistemas de Producción de Café

ESTADO DEL SISTEMA	RANGO
OPTIMO	0,81 - 1,0
BUENO	0,61 - 0,80
REGULAR	0,41 - 0,60
CRITICO	0,21 - 0,40
MUY CRITICO	0,0 - 0,2

Nota: Escala para la Valoración del Grado de Desarrollo del CMV y la Sustentabilidad. Esta investigación.

En la Tabla 3.33, se presentan las variables transformadas y valoradas del CMV; al comparar los sistemas productivos de café, se observó que: En el sistema café con sombra, los valores extremos correspondieron a las variables MF (0,95; máximo) y MB (0,20; mínimo); en el sistema café con semisombra, el valor mínimo fue de 0,30 (IC), mientras que el máximo correspondió a la variable MF (0,89); en el sistema café asociado con plátano, la variable IC registró el menor valor (0,10) y MF alcanzó el valor más alto (0,89) y en el sistema café sin sombra, los valores de las variables oscilaron entre 0,16 (IC) y 0,73 (RA). Por lo tanto, los valores más altos y más bajos de la evaluación, serán los que tengan mayor incidencia en el IGS final.

Tabla 3.33

Variables Transformadas, Sistemas de Producción de Café

Sistema	RL	DL	RA	DM	EH	MO	C	PC	CC	CP	MB
S1	0,79	0,90	0,26	0,91	0,87	0,69	0,69	0,29	0,29	0,82	0,20
S2	0,63	0,82	0,35	0,50	0,48	0,51	0,51	0,31	0,30	0,86	0,33
S3	0,34	0,42	0,62	0,46	0,33	0,48	0,48	0,39	0,39	0,74	0,40
S4	0,21	0,32	0,73	0,28	0,17	0,42	0,42	0,59	0,58	0,38	0,65

Continuación Tabla 3.33

Sistema	BC	CF	RC	AP	DI	PR	PF	AC	IC	MF
S1	0,33	0,79	0,70	0,89	0,84	0,61	0,67	0,78	0,38	0,95
S2	0,62	0,69	0,84	0,84	0,84	0,61	0,61	0,78	0,30	0,89
S3	0,58	0,53	0,73	0,44	0,55	0,27	0,67	0,61	0,10	0,89
S4	0,65	0,27	0,40	0,16	0,22	0,22	0,50	0,72	0,16	0,50

Café sombra (S1), café semisombra (S2), café-plátano (S3) y café sin sombra (S4)

Nota: Variables Transformadas. Ordóñez-Jurado (2014).

3.1.7 Comparación de las Dimensiones: Ambiental, Económica y Social

- **Dimensión Ambiental.** Los sistemas que utilizan especies asociadas, ya sea como sombra o intercaladas en el espacio y el tiempo, presentan mayores beneficios en el manejo y conservación de los recursos naturales y el ambiente; estos sistemas garantizan la estabilidad de los suelos, promueven la biodiversidad y proporcionan productos alimenticios adicionales para las familias. Además, se observó, que, a pesar de las recomendaciones de algunas instituciones para sustituir los sistemas tradicionales por métodos convencionales, los productores que tienen sistemas asociados (con especies leñosas como sombrío y cultivos intercalados), han mantenido sus prácticas, en parte, a la preocupación por los posibles efectos negativos que podrían generar en sus fincas. Los sistemas agrícolas cafeteros, con orientación ecológica, presentan niveles altos en los indicadores establecidos en la parte ambiental y social y menores en lo económico.
- **Dimensión Económica.** En términos económicos, el sistema de producción de café sin sombra, registró los valores más altos en comparación con los demás sistemas evaluados; cuatro de las variables analizadas (PC, CC, MB y BC), mostraron una tendencia

de promedios significativamente mayores en su valoración; por el contrario, el sistema de café bajo sombra, presentó los valores más bajos en estas mismas variables. Los sistemas de monocultivo de café, debido a su estructura y función, tienden hacia una simplicidad del agroecosistema; algunos productores argumentan, que este modelo permite un mejor aprovechamiento de los recursos y mayores beneficios económicos a corto plazo, sin embargo, desde una perspectiva ambiental, presentan importantes limitaciones.

- **Dimensión Social.** Esta dimensión, está estrechamente vinculada con la organización y el bienestar del núcleo familiar, así como con el grado de participación en grupos u organizaciones comunitarias dedicadas a la producción cafetera; los mayores niveles de sustentabilidad en esta dimensión, fueron observados entre los productores que emplean sistemas de cultivo bajo sombra y semisombra. Este resultado podría asociarse con: a) una visión orientada a la protección de los recursos naturales, b) una mayor organización interna y c) la estructura operativa implementada por las certificadoras de café, que actúan en la región.

En la región, las certificadoras de café, promueven sistemas productivos sostenibles, que mejoran el bienestar social sin dañar el medio ambiente. Esta vinculación, ha fortalecido los sistemas de producción, facilitando la obtención de café de calidad, incluso en contextos de crisis, como la caída de precios o el cambio climático; como resultado, los productores han desarrollado, una mayor capacidad para enfrentar desafíos dentro del enfoque de desarrollo sustentable.

3.1.8 Comparación de los Sistemas de Producción de Café

- **Café con Sombra.** Se identificó, que las principales debilidades del sistema de café con sombra, consideradas críticas o muy críticas, corresponden a variables económicas (MB, PC, CC y BC), ambientales (RA) y sociales (IC). Por otro lado, el sistema obtuvo

una valoración favorable en ocho de las veintiún variables evaluadas: RL, MO, C, CF, RC, PR, PF y AC; así mismo, destacan calificaciones óptimas en las variables DL, DM y EH (ambiental), CP (económica) y AP, DI y MF (social). Estos resultados reflejan, una estabilidad general del sistema, particularmente, en las dimensiones ambiental y social; sin embargo, las variables económicas, son las que representan el mayor desafío para la sostenibilidad de los productores de café con sombra.

- **Café Semisombra.** Es el único sistema de producción de café, que no presentan puntos muy críticos como en los otros sistemas analizados; en este agroecosistema, son críticas las variables (RA, PC, CC, MB, e IC); la calificación se considera regular en los siguientes aspectos: DM, EH y MO, C. Seis de las variables analizadas, son sustentablemente buenas como: RL, BC, CF, PR, PF y AC. También es destacable, la importancia que adquieren las variables DL, CP, RC, AP, DI y MF, al calificarlas de óptima.
- **Café Asociado con Plátano.** Demuestra una debilidad muy crítica en IC, e igualmente crítica en las variables ambientales RL, EH, lo mismo en la valoración económica (PC, CC y MB); en lo social, es crítica el comportamiento de la variable PR. Así mismo la calificación es regular en DL, DM, MO, C, BC, CF, AP y DI; en la dimensión ambiental, es buena solo la variable RA, lo mismo que las variables económicas CP y RC y las sociales PF y AC.
- **Café Sin Sombra.** El análisis de las variables transformadas, presentan aspectos muy críticos el EH, AP e IC; la valoración es crítica, en las variables ambientales (RL, DL, DM), variables económicas (CP, CF, RC) y sociales (DI y PR). Igualmente, se encontró valoración regular en los parámetros MO, C, PC, CC, PF y MF; en cambio las variables RA, MB, BC y AC, se caracterizan por ser buenos. De las variables evaluadas, ninguna presenta una valoración de óptima. Lo anterior, es el reflejo del manejo del

cultivo convencional, el cual, por su estructura y composición florística, se convierte en un monocultivo, lo que conlleva, al poco aporte de biomasa de los árboles de café; con respecto a los árboles de sombrero, la obtención de productos alimenticios al interior del sistema, es muy bajo.

De acuerdo a lo anterior, son las variables sociales y ambientales, las que están comprometiendo la estabilidad y sustentabilidad de los productores de café convencional; en cambio, el comportamiento de las variables económicas, es superior en comparación con los sistemas y son las que contribuyen a que este sistema mejore su sustentabilidad.

3.1.9 Integración de los Subíndices para la Construcción del IGS.

La sustentabilidad de los sistemas de producción de café, se evaluó mediante el Índice General de Sustentabilidad (IGS), el cual, integra tres subíndices correspondientes a las dimensiones ambiental, económica y social.

3.1.9.1 Ponderación del Grupo de Variables del CMV.

Se aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP), a las 21 variables seleccionadas como parte del conjunto de CMV, con el objetivo de estimar la contribución individual de cada variable dentro del grupo. Los resultados del ACP, indicaron, que los cuatro primeros componentes explicaron el 83,70% de la varianza total (inercia acumulada), por consiguiente, para la ponderación de los subindicadores, se consideraron únicamente las comunalidades asociadas a estos cuatro componentes; estas comunalidades permitieron, definir los pesos específicos de cada subindicador dentro del CMV. En las Tablas 3.34, 3.35 y 3.36 se detallan los siguientes resultados del ACP: ponderaciones de las variables, comunalidades estimadas, vectores propios asociados y coeficientes estandarizados por grupo de variables.

Tabla 3.34

Análisis de Componentes Principales (ACP), Valores Propios y Variabilidad Total Explicada Del CMV

Componente	Valor Propio	Diferencia	Porcentaje	Porcentaje Acumulado
1	10,3377	6,4991	49,23	49,23
2	3,8386	1,6671	18,28	67,51
3	2,1715	0,9450	10,34	77,85
4	1,2285	0,3120	5,85	83,70
5	0,9165	0,1827	4,36	88,06
6	0,7338	0,1744	3,49	91,56
7	0,5594	0,1510	2,66	94,22
8	0,4084	0,1754	1,94	96,16

Nota: Análisis de Componentes Principales (ACP), Valores Propios y Variabilidad Total. Ordóñez-Jurado (2014).

Varianza explicada por cada factor: Factor 1: 10,3377; Factor 2: 3,8386; Factor 3: 2,1715 y Factor 4: 1,2285.

Tabla 3.35

Análisis de Componentes Principales (ACP), Peso del CMV en los Tres Primeros Componentes

Variable	Componente				Componente
	1	2	3	4	
DL	0,91252	0,16777	0,06268	0,19741	1
RL	0,93458	0,21202	-0,00465	0,23535	1
RA	-0,72452	-0,29328	-0,07552	-0,18845	1
DM	0,70035	-0,19116	-0,01544	0,32432	1
EH	0,89894	0,04833	0,04850	0,36319	1
MO	0,37632	-0,74381	-0,37240	0,26540	2
C	0,37500	-0,74526	-0,37127	0,26545	2

Variable	Componente				Componente
	1	2	3	4	
PC	-0,83018	0,40333	-0,02189	0,34291	1
CC	-0,83059	0,40424	-0,01876	0,34202	1
CP	-0,69677	0,34123	0,38887	0,43012	1
MB	-0,73421	0,45125	-0,43854	0,13327	1
BC	-0,41377	0,38315	-0,67205	-0,21787	3
CF	-0,82871	-0,11258	0,17453	0,13294	1
RC	-0,41520	-0,14687	0,67723	0,24979	3
AP	0,91481	0,15640	-0,14490	0,08295	1
DI	0,93909	0,17934	-0,06173	-0,04332	1
PR	0,66144	0,61794	0,04726	-0,11605	1
PF	0,36975	0,49967	0,48977	-0,24605	2
AC	0,18455	0,80655	-0,31506	0,05063	2
IC	0,51889	0,60281	-0,15742	0,14976	2
MF	0,70393	-0,05203	0,45457	-0,21901	1

Nota: Componentes Principales (ACP), Peso del CMV en los Tres Primeros Componentes Ordóñez-Jurado (2014).

Tabla 3.36

Análisis de Componentes Principales (ACP), Comunalidades y Coeficiente de cada Grupo de Variables para el CMV

Variable		Comunalidad	Peso Variable	Coeficiente Grupo Variables
Ambiental	DL	0,90374	0,05142	0,33654
	RL	0,97380	0,05540	
	RA	0,65216	0,03710	
	DM	0,63245	0,03598	
	EH	0,94469	0,05375	
	MO	0,90399	0,05143	
	C	0,90434	0,05145	

Variable		Comunalidad	Peso Variable	Coefficiente Grupo Variables
Económica	PC	0,96994	0,05518	0,34770
	CC	0,97062	0,05522	
	MB	0,95278	0,05421	
	BC	0,81713	0,04649	
	CP	0,93815	0,05338	
	CF	0,74757	0,04253	
	RC	0,71510	0,04069	
Social	AP	0,88922	0,05059	0,31576
	DI	0,91974	0,05233	
	PR	0,83505	0,04751	
	PF	0,68680	0,03908	
	AC	0,78641	0,04474	
	IC	0,67984	0,03868	
	MF	0,75282	0,04283	

Nota: Componentes Principales (ACP), Comunalidades y Coeficiente de cada Grupo de Variables. Ordóñez-Jurado (2014).

3.1.9.2 Agregación de los Subindicadores en las Dimensiones de la Sustentabilidad.

Con los datos obtenidos en el proceso anterior, se construyó, el Índice General de Sustentabilidad (IGS). Este índice integra, subindicadores económicos, sociales y ambientales, mediante la ecuación (4), metodología aplicada en los trabajos por Farfán e Hincapié, (2011); Velásquez et al., (2007).

$$IGS = \left(\left(\frac{\sum_{i=1}^n Va * fi}{\sum_{i=1}^n fi} \right) * Ce \right) + \left(\left(\frac{\sum_{i=1}^n Ve * fi}{\sum_{i=1}^n fi} \right) * Cs \right) + \left(\left(\frac{\sum_{i=1}^n Vs * fi}{\sum_{i=1}^n fi} \right) * Ca \right) \quad (4)$$

IGS = Índice General de Sustentabilidad

Ve = Variables económicas

Vs= Variables sociales

Va = Variables ambientales (peso variable)

fi = Factor de ponderación variable

n = Número de variables económicas, sociales y ambiental.

Coeficiente para el grupo de variables, Ca (Coeficiente ambiental) = 0,34;

Ce (Coeficiente económico) = 0,35 y Cs (Coeficiente social) = 0,32.

Los coeficientes de las variables, oscilaron entre 0,32 y 0,35, los cuales se los puede contrastar con el estudio de Farfán e Hincapié, (2011) al evaluar la sustentabilidad ambiental en sistemas de producción de café, en tres localidades de la zona cafetera colombiana; mediante indicadores de calidad del suelo, registraron valores diferenciados para las variables físicas (0,28), químicas (0,58) y biológicas (0,14).

3.1.9.3 Aplicación del IGS a los Sistemas de Producción.

Para evaluar la sustentabilidad de los sistemas de producción de café, se calculó el Índice General de Sustentabilidad (IGS); los resultados se categorizaron en cinco intervalos de calificación (Tabla 3.32), los cuales facilitan la interpretación del grado de desarrollo sustentable de cada sistema. Los resultados (Tabla 3.37 y Figura 7), reflejan diferencias significativas en su desempeño, lo que permite identificar áreas de mejora y prácticas destacadas en cada caso. Al comparar los sistemas de producción de café mediante el IGS, se observó, que los subíndices parciales del grupo de variables ambientales, oscilaron entre 0,12 y 0,25; el valor más bajo (0,12), correspondió a los sistemas de café sin sombra, mientras que el más alto (0,25) fue obtenido por los sistemas de café con sombra.

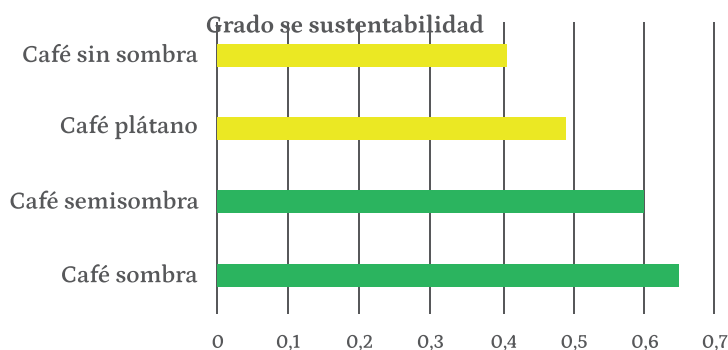
Tabla 3.37
Valoración de la Sustentabilidad de los Sistemas de Producción de Café

Sistema Producción Café	DIMENSIÓN			Promedio %
	Ambiental	Económica	Social	
S1	0,25	0,16	0,23	0,65
S2	0,19	0,19	0,23	0,60
S3	0,15	0,18	0,16	0,49
S4	0,12	0,18	0,11	0,41

Dónde: Café sombra (S1), café semisombra (S2), café-plátano (S3) y café sin sombra (S4)

Nota: Sustentabilidad de los Sistemas de Producción de Café. Ordóñez-Jurado (2014).

Por otro lado, el subíndice parcial del grupo de variables económicas, presentó un rango de 0,16 a 0,19; en este caso, el menor valor (0,16) se registró en las fincas con café con sombra, mientras que el mayor (0,19) correspondió al sistema de café semisombra.

Figura 7
Escala para la Calificación del Grado de Sustentabilidad en una Escala de 0 a 1 para los Sistemas de Producción de Café


Nota: Calificación del Grado de Sustentabilidad en una Escala de 0 a 1. Ordóñez-Jurado (2014).

Al considerar los valores de los subindicadores de los cuatro sistemas de producción en la escala de valoración, se encontró, que existen diferencias como se indica en la figura 7; el Índice de Sustentabilidad construido con los conjuntos de variables ambientales, económicas y sociales, indican, que el sistema café bajo sombra con una calificación de 0,649 y café semisombra con 0,601, se ubica en la categoría de sustentabilidad buena; los sistemas café sin sombra y café plátano, con valores 0,405 y 0,490, respectivamente, según la escala de valoración, se ubican como sistemas en un estado regular de sustentabilidad. Farfán e Hincapié, (2011) afirman, que, cuando las calificaciones muy cercanas a las de la categoría inmediatamente superior, deberán implementarse las prácticas agronómicas necesarias, para incrementar el grado de sustentabilidad, en este caso el sistema café plátano de sustentabilidad regular a buena.

En el caso de las fincas con valores altos en indicadores de la dimensión económica, se observa, que presentan valores bajos en servicios ecosistémicos y sociales; estas fincas, suelen estar diseñadas para la producción intensiva de café, descuidando prácticas ambientales, que protejan tanto el medio ambiente como a los trabajadores agrícolas y consumidores (Altieri & Nicholls, 2007). Los pequeños productores de la zona, además del café, valoran otros productos del agroecosistema, ya sea para el autoconsumo o la venta ocasional y tienden a priorizar aspectos ambientales; demuestran una mayor preocupación por la conservación del suelo y el agua. Su menor dependencia de insumos químicos genera ventajas económicas y sus fincas, suelen mantener una mayor producción biológica y conservar mejor las funciones ecosistémicas, en comparación con los sistemas convencionales o de café a pleno sol.

Conclusiones

Los datos y resultados obtenidos, permitieron validar algunas afirmaciones sobre los sistemas de producción de café y refutar otras, esto demuestra la importancia de analizar dichos sistemas desde múltiples dimensiones para llegar a conclusiones más precisas, basadas en el estudio de los factores, que determinan el comportamiento de sus componentes y no únicamente en datos estadísticos o promedios aislados.

La calificación del Índice de Sustentabilidad, construido a partir de variables ambientales, económicas y sociales, reveló que el sistema de café bajo sombra y semisombra, se clasifica en la categoría de buena sustentabilidad. Por otro lado, los sistemas de café sin sombra y café-plátano, según la escala de valoración, presentan un estado regular de sustentabilidad.

Mediante la integración de indicadores representativos y factibles para evaluar las dimensiones ambiental, económica y social, así como mediante el cálculo del Índice General de Sostenibilidad (IGS), es posible establecer comparaciones que permitan identificar las variables que reducen la sostenibilidad. Estas deben ser abordadas, mediante planes de acción orientados a su mejora; así mismo, es fundamental promover cambios positivos en los factores clave, que inciden en la sostenibilidad de los sistemas de producción cafetera a pequeña y mediana escala.

Capítulo 4

**Captura y Almacenamiento
de Carbono de los Sistemas de
Producción de Café (*Coffea arabica* L.)**

4.1. Introducción

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático [IPCC], (2013) afirma, que el calentamiento global, trae como consecuencia principal, el calentamiento de la atmósfera y los océanos, debido mayormente, al incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) tales como vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4), ozono (O_3), los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF_6), los cuales retienen el calor del sol e impiden que escape al espacio, provocando así, el calentamiento global. El IPCC, (2023) indica, que las actividades humanas, principalmente a través de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), han causado el calentamiento global entre 2011 y 2020, con una temperatura superficial global que alcanzó el $1,1^\circ\text{C}$. Las emisiones de GEI han seguido aumentando, con las contribuciones históricas y las actuales provenientes del uso de energías fósiles, el cambio en el uso de la tierra, los estilos de vida, los patrones de consumo y producción en todas las regiones del mundo (IPCC, 2023).

Los cambios actuales se diferencian de los del pasado, los cuales, han obedecido a procesos naturales, mientras que los actuales han sido influenciados directamente por la actividad humana; esto se debe principalmente, a la emisión de gases antropogénicos, los cuales están forzando al sistema climático, debido a la liberación masiva de gases de efecto invernadero. Estas emisiones, son resultado del uso intensivo de combustibles fósiles, la producción de compuestos químicos sintéticos y la alteración de materia orgánica e inorgánica; dichos procesos, han perturbado los ciclos biogeoquímicos, especialmente los del carbono, nitrógeno y fósforo (Rockström *et al.*, 2009). En la actualidad, aproximadamente el 23% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), son generadas por las actividades humanas; provienen de la agricultura y del cambio de uso del suelo. Además,

la expansión y la intensificación de las prácticas agrícolas, representan una amenaza para más del 80% de las especies en peligro de extinción (IPCC, 2019).

Para Colombia, según el IDEAM *et al.*, (2015) si los niveles de estas emisiones aumentan, como es lo más probable para finales de siglo, la temperatura media anual, podría incrementarse gradualmente en 2,14 °C; sin embargo, el aumento esperado en la temperatura, así como el comportamiento de las precipitaciones, no será el mismo para todas las regiones del país. Para esta misma época, se esperaría que la precipitación media disminuya entre un 10 % y un 30 % en cerca del 27 % del territorio nacional y aumente entre un 10 % y un 30 % en aproximadamente el 14 % del territorio (IDEAM *et al.*, 2015). Esto implica, que las medidas para hacer frente a posibles fenómenos extremos, deben ser diferentes para cada región del país.

A nivel mundial, una de las mayores preocupaciones de la humanidad, es la influencia que ha tenido y tendrá el cambio climático, ya que su constante aumento en la variabilidad climática, ha afectado la productividad agrícola. Lo anterior, ejerce mayor presión sobre los sistemas productivos de los pequeños agricultores y de la población rural, principalmente, en los países en vía de desarrollo, que pueden ser más vulnerables a los efectos de este fenómeno, debido a la presencia de sistemas de producción poco resilientes y poco diversos (FAO, 2017). Es por ello, que se creó el Protocolo de Kioto en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, con el objetivo de frenar las emisiones causadas por los Gases de Efecto Invernadero (GEI), generadas por las actividades antrópicas.

Una de las estrategias para mitigar los Gases de Efecto Invernadero (GEI) es la captura de carbono, un proceso en el que las plantas desempeñan un papel fundamental; a través de la fotosíntesis, las plantas transforman la energía lumínica del sol en energía química, la cual es utilizada por los organismos vivos. Este proceso, no solo permite el crecimiento y desarrollo de la vegetación, sino que también contribuye a la reducción

del dióxido de carbono (CO_2) atmosférico; los bosques, en particular, actúan como sumideros de carbono, almacenando grandes cantidades de este elemento, tanto en la biomasa vegetal como en el suelo, además, intercambian carbono con la atmósfera, mediante procesos como la fotosíntesis y la respiración (Gayoso & Guerra, 2005).

Los sistemas de producción de café asociados a árboles de sombrío, además de albergar una amplia diversidad de especies animales y vegetales, tienen un potencial apreciable para retener carbono atmosférico, tanto en las partes aéreas de las plantas, como en el sistema radicular y en la materia orgánica del suelo (Ramachandran *et al.*, 2009; Farfán, 2014). Además de incluir una alta diversidad de especies leñosas como sombrío, estos sistemas son una opción con gran potencial para capturar carbono.

Para la evaluación de la captura de carbono en sistemas productivos de café de cuatro años de edad, se estableció un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA). Los bloques correspondieron, a tres rangos altitudinales: I (>1800 msnm), II (1800-1600 msnm) y III (<1600 msnm). Los tratamientos consistieron en: café a libre exposición (T1), café asociado con limón (T2), café asociado con guamo (T3) y café asociado con carbone-ro (T4). Para determinar el carbono almacenado, se empleó un método no destructivo, con el fin de identificar el sistema cafetero con mayor capacidad de almacenamiento de carbono en el municipio de Consacá, Nariño, Colombia.

4.2 Marco Conceptual

4.2.1 La Agricultura frente al Cambio Climático

En el primer artículo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), se define el Cambio Climático, como un cambio en el clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, el cual altera la composición de la atmósfera mundial y se suma a la variabilidad natural del clima, observada durante períodos

comparables de tiempo (CMNUCC, 1992). Por su parte, el IPCC, (2021) destaca, que los sistemas de producción agrarios, están directamente influenciados por las condiciones ambientales y sus cambios, lo que los hace vulnerables a los impactos del cambio climático.

Aunque algunos cultivos en ciertas regiones del mundo, puedan beneficiarse de estos cambios, en general se espera que los impactos del cambio climático sean negativos para la agricultura; probablemente, las poblaciones más afectadas, sean las de los países en vías de desarrollo, debido a su menor capacidad de adaptación y su dependencia de los recursos naturales (IPCC, 2021).

Los efectos del cambio climático sobre la agricultura, están estrechamente vinculados, con su creciente integración a una organización industrial, que abarca todos los procesos: producción, distribución y consumo (Naredo, 2009); este modelo agrícola, es responsable de aproximadamente, el 25% de las emisiones antropogénicas globales de Gases de Efecto Invernadero (GEI), principalmente Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4) y Óxido Nitroso (N_2O) (Tubiello et al., 2021). Estas emisiones provienen específicamente, de actividades agrícolas y silvicultura, como es el uso de fertilizantes nitrogenados, la fermentación entérica del ganado, el cambio de uso del suelo y el consumo de combustibles fósiles en maquinaria agrícola y transporte (Crippa *et al.*, 2021).

El cambio climático, tiene impactos directos e indirectos en los sistemas de producción agrícola; entre los impactos directos, se encuentran los efectos causados por la alteración de las propiedades físicas, como los niveles de temperatura y la distribución de las lluvias, por otro lado, los impactos indirectos, son aquellos que afectan la producción agrícola a través de cambios en otras especies, como polinizadores, plagas, vectores de enfermedades y especies invasoras; estos últimos pueden desempeñar un papel crucial y son mucho más difíciles de evaluar y proyectar, debido a la gran cantidad de parámetros y relaciones que interactúan (Ferreiro, 2023; FAO, 2014). El aumento de la temperatura, podría derivar

en la sustitución de algunos componentes de los ecosistemas, lo que conllevaría, una disminución en la productividad de los sistemas naturales y agroecosistemas, como cultivos y ganadería.

A nivel de América Latina, Sánchez, (2018) menciona, que el cambio climático, es uno de los grandes desafíos globales del siglo XXI, con consecuencias significativas sobre las actividades económicas, el bienestar de la población y los ecosistemas. En el caso de Colombia, estudios de Lau *et al.*, (2011) y Läderach *et al.*, (2011) señalan, que el cambio climático, probablemente, tendrá impactos considerables en el sector agropecuario, el cual representa más de una décima parte del PIB del país y es fuente de empleo para más de una quinta parte de su población. Los análisis indican, que, para el año 2050, es probable que se presenten aumentos significativos de la temperatura, una precipitación y una mayor prevalencia de plagas y enfermedades (Lau *et al.*, 2011); estos impactos, generados por el cambio climático, variarán según el sector y la región en la que se presenten.

4.2.2 La Producción de Café en Colombia y el Impacto del Cambio Climático

La producción de café en Colombia, es reconocida mundialmente, por la alta calidad de sus granos. Sin embargo, en la última década, este sector se ha enfrentado, a los efectos del cambio climático, los cuales han afectado significativamente la caficultura y los sistemas productivos asociados a este cultivo. Estos cambios han incrementado, las amenazas de múltiples orígenes, derivadas de las alteraciones en los patrones climáticos (FNC, 2020). Las variaciones climáticas y el aumento de fenómenos extremos, como sequías prolongadas o lluvias intensas, han tenido diversos efectos en el cultivo del café; entre estos se incluyen, la alteración fisiológica de la planta, cambios en el comportamiento de plagas y enfermedades, la disminución de poblaciones de microorganismos benéficos y la pérdida de fertilidad del suelo (Ovalle-Rivera *et al.*, 2015). Estos factores, en conjunto, pueden reducir la capacidad productiva de los cafetales y amenazar la sustentabilidad de la caficultura en el país.

Para enfrentar estos desafíos, es necesario implementar estrategias de adaptación, como el desarrollo de variedades de café más resistentes, la promoción de prácticas agrícolas sostenibles y la gestión integral de los recursos naturales (Läderach *et al.*, 2017), estas medidas podrían mitigar los impactos del cambio climático y asegurar la continuidad de la producción cafetera colombiana (Leonel *et al.*, 2022). En Colombia, fuera de los rangos óptimos, el cultivo de café, se vuelve vulnerable a condiciones extremas, las tasas de fotosíntesis neta disminuyen, lo que puede dañar severamente los cultivos e incluso causar la muerte de las plantas, comprometiendo la productividad agrícola; según estudios recientes, los eventos climáticos extremos, tienen un impacto significativo en la Fisiología Vegetal y en la producción de cultivos (Smith *et al.*, 2020).

El cultivo del café, ha experimentado un proceso de adaptación a las condiciones altitudinales y topográficas, las cuales, han sido fundamentales para determinar la productividad y calidad, no obstante, el cambio climático, está modificando el rango de altitud óptimo para el cultivo, desplazándolo gradualmente hacia elevaciones mayores. Este fenómeno representa, un desafío económico significativo para los caficultores, quienes enfrentan dificultades para sostener un cultivo que cada vez ofrece menor rentabilidad. Como consecuencia, muchas zonas que antes eran ideales para el cultivo del café, ahora son menos productivas, lo que ha llevado a los agricultores, a buscar alternativas; en algunas regiones, los productores están optando por reemplazar el café con otros cultivos más beneficiosos y mejor adaptados a las condiciones climáticas cambiantes, como cacao, frutales o cultivos de subsistencia (Ovalle-Rivera *et al.*, 2015).

En conclusión, el cambio climático, está transformando las condiciones óptimas para el cultivo del café, obligando a los productores, a adaptarse a nuevas realidades; aunque algunos están optando por diversificar sus cultivos, es esencial apoyar a los caficultores con herramientas y recursos que les permitan enfrentar estos desafíos y mantener la sustentabilidad de este importante sector agrícola.

4.2.3 Fijación de Carbono

La fijación de carbono se genera, en el proceso de fotosíntesis, el cual, es realizado por las hojas y otras partes verdes de las plantas; a través de este proceso, se forma la biomasa de la planta. Esta fase es llevada a cabo, por organismos fotosintéticos, para producir materia orgánica a partir de materia inorgánica, utilizando la energía de la luz solar; en este proceso, la energía lumínica se transforma en energía química (Baslam *et al.*, 2021). Anderegg *et al.* (2012) indican, que, durante la fotosíntesis, las plantas captan una gran cantidad de Dióxido de Carbono (CO_2) de la atmósfera, para formar Glucosa y construir estructuras vitales como follajes, ramas, raíces y troncos. Durante la fotosíntesis, las plantas absorben Dióxido de Carbono (CO_2) y lo convierten en Oxígeno (O_2); sin embargo, no todo el Carbono (C) es liberado como O_2 ; una parte queda inmovilizado en los tejidos de las plantas, mientras que otra parte regresa al suelo y a la atmósfera a través de procesos como la respiración y la descomposición (Taiz *et al.*, 2015). Este ciclo del carbono es fundamental, para el equilibrio de los ecosistemas y el clima global (IPCC, 2021).

Los sistemas de producción agropecuarios, no solo son una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también, pueden cumplir una función esencial en su reducción al secuestrar carbono atmosférico y almacenarlo. Sin embargo, su efectividad depende de dos factores principales: la cantidad de CO_2 que pueden secuestrar y el tiempo que pueden retenerlo sin liberarlo de nuevo a la atmósfera; esta función puede ser viable, mediante la implementación de prácticas agrícolas sustentables, en este sentido, la presencia de leñosas perennes en bosques, plantaciones y sistemas agroforestales, mitiga el cambio climático, al fijar carbono en biomasa, necromasa y suelo, convirtiéndolos en una de las principales alternativas como sumideros de CO_2 atmosférico (Alvarado *et al.*, 2013).

4.2.4 Captura y Almacenamiento de Carbono

La capacidad de un ecosistema, para secuestrar y almacenar carbono, depende de una diversidad de factores, como los climáticos, el manejo del suelo, el material parental, la pendiente y la cobertura vegetal; por ejemplo, en latitudes elevadas con clima frío, la materia orgánica se descompone lentamente, así, en los bosques boreales, el carbono acumulado en el suelo, puede alcanzar entre el 80 % y el 90 % del total. Por el contrario, en el trópico, las temperaturas más cálidas aceleran su descomposición y el carbono distribuye de manera más equitativa entre el suelo y la vegetación (Pardos, 2010; Andrade *et al.*, 2014). Ante la preocupación por el aumento constante de las emisiones de CO₂, se han implementado diversas alternativas a nivel mundial, para reducir estas emisiones, principalmente, mediante la captura y el almacenamiento prolongado del carbono en la biomasa vegetal; este carbono también puede incorporarse al suelo, a través de la descomposición y mineralización de la materia orgánica (Zavala *et al.*, 2018); este proceso, implica retirar carbono de la atmósfera, mediante la fotosíntesis de las plantas y luego almacenarlo en el suelo, en forma de materia orgánica estable.

Los árboles, al crecer, pueden utilizarse como madera y otros subproductos, los cuales, al degradarse, liberan carbono al suelo y CO₂ a la atmósfera; mientras el carbono permanece en las estructuras del árbol, se considera almacenado, al descomponerse o quemarse, regresa al ciclo del carbono (Espinoza *et al.*, 2012). Por ello, es fundamental, mantener el carbono secuestrado el mayor tiempo posible, contribuyendo así, a la mitigación de estos gases y así, mantener un balance ambiental más equilibrado. La captura de carbono, es el resultado de las diferencias entre el CO₂ atmosférico absorbido durante la fotosíntesis y el CO₂ emitido durante la respiración; parte de este CO₂ es liberado nuevamente, cuando los cultivos se descomponen o son cosechados, pero otra parte, queda almacenada en el suelo, gracias a las raíces y los residuos de las plantas. Esta retención a largo plazo en el suelo, actúa como un sumidero de carbono, contribuyendo a estabilizar el CO₂ atmosférico durante períodos más prolongados

(Lamo de Espinosa, 2016). En este proceso natural, las especies vegetales, mantienen un flujo constante de absorción y fijación de carbono, lo que nutre el suelo y promueve su crecimiento (Yerena *et al.*, 2014).

La concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, puede reducirse, mediante la disminución de las emisiones de CO₂ y la creación o incremento de sumideros de carbono (IPCC, 2019). La FAO, (2014) propone que, para lograr una reducción de emisiones y aumentar el almacenamiento de carbono, es necesario reconvertir algunas de las prácticas actuales, considerando métodos alternativos, como la agricultura ecológica o la agricultura de conservación. Estas prácticas, promueven técnicas que disminuyen las emisiones de carbono, debido a la menor dependencia de fertilizantes, el manejo adecuado del suelo y los cultivos.

Los Sistemas Agroforestales (SAF) o cultivos asociados con árboles, permiten beneficios a los campesinos, ya que no solo obtienen productos como frutos, madera y leña, sino también la posibilidad de recibir pagos directos por servicios ambientales o bonos de carbono (Nair *et al.*, 2021; Delgado-Vargas *et al.*, 2022). Entre los principales beneficios de los SAF, se incluyen, la recuperación, conservación y mejora de la biodiversidad, el aumento de las reservas de carbono, la fijación biológica de nitrógeno, el ciclaje de nutrientes, la disminución de la erosión y el mantenimiento de la fertilidad del suelo (Villa *et al.*, 2020).

4.2.5 Carbono en Biomasa Aérea

La Biomasa Aérea, se define, como la cantidad de materia seca producida por las plantas, expresada en términos de peso y referida a una superficie determinada; según la FAO, (2010) el carbono en biomasa aérea, corresponde al contenido de carbono presente en toda la biomasa viva situada sobre el suelo, incluyendo troncos, ramas, corteza, hojas y semillas. Algunos investigadores, también incorporan en esta definición, la biomasa resultante de la pérdida de órganos leñosos (como las ramas) y no leñosos (como las hojas). En otras palabras, la Biomasa Aérea, abarca toda la biomasa ubicada por encima del suelo.

Las especies leñosas, de los bosques naturales, plantados y los sistemas agroforestales, almacenan carbono en cuatro componentes: biomasa aérea, biomasa subterránea (raíces), carbono orgánico del suelo, material vegetal y de organismos; la biomasa, que se almacena, a corto plazo, es la energía solar, en forma de carbono, generada por procesos metabólicos de las plantas. Hace parte del ciclo natural del carbono entre la tierra y el aire; la misma cantidad de carbono almacenado durante muchos años, incluso décadas o siglos, se emite hacia la atmósfera en forma de CO₂, una vez cumplido el ciclo de vida de la especie (IPCC, 2019).

La captura de carbono atmosférico, ocurre principalmente, durante el desarrollo de los árboles, hasta que alcanzan su madurez; en este proceso, los árboles absorben dióxido de carbono (CO₂) a través de la fotosíntesis, convirtiéndolo en compuestos orgánicos como la Glucosa, que son esenciales, para la formación de las estructuras de la planta, sin embargo, esta capacidad de captura de carbono, tiende a disminuir a medida que los árboles envejecen. En las etapas tempranas o intermedias de su ciclo de vida de las especies leñosas, la tasa de captura de carbono, es mayor (López-Reyes *et al.*, 2016).

Durante las fases iniciales de crecimiento de los árboles, la velocidad de acumulación de Biomasa Aérea y radicular, es más alta, lo que permite secuestrar más CO₂ del que emiten a través de la respiración (Casiano-Domínguez *et al.*, 2018). La velocidad de captura de carbono, está directamente relacionada con el crecimiento; otra variable que afecta la cantidad de carbono fijado por una especie leñosa, es la densidad de su madera, es decir, cuanto más dura y densa es la madera, mayor es su contenido de carbono (Poorter *et al.*, 2015). Es fundamental, conocer el contenido de carbono almacenado en la Biomasa Aérea, no solo, porque representa alrededor del 30 % del carbono total en los ecosistemas terrestres, sino también, porque este reservorio, es fundamental para que las comunidades mantengan su capacidad de intercambio y almacenamiento de dicho elemento (Kumar & Mutanga, 2017).

4.2.6 Carbono en la Biomasa Bajo el Suelo

El carbono del suelo, se encuentra en dos formas, uno inorgánico y otro orgánico; el carbono inorgánico en el suelo, se refiere a las formas de carbono que no están asociadas con la materia orgánica, como minerales carbonatados, como el carbonato de calcio (Blasco & Burbano, 2015). En cambio, el carbono orgánico en el suelo, está determinado por las actividades biológicas, donde, las tasas de entrada, provienen de fuentes vegetales y animales y las salidas generadas por la descomposición y la respiración microbiana (Burbano, 2018). Cuando la biomasa se descompone, a través de la respiración de los microorganismos que la procesan, se transforma en parte del suelo, en forma de humus o se libera como CO_2 ; este carbono en el suelo se encuentra en distintas etapas de humificación, con tiempos de recambio, que pueden extenderse desde cientos hasta miles de años (Kurniatun *et al.*, 2011).

En los análisis de carbono presente en la biomasa subterránea, se incluye principalmente, las raíces vivas con diámetros mayores a 2 mm.; las raíces de diámetros menores a 2 mm. suelen excluirse, ya que empíricamente resulta difícil distinguirlas de la materia orgánica del suelo, la hojarasca y otros residuos orgánicos (Jones *et al.*, 2009). Esta exclusión, se debe a la complejidad de separar físicamente estos componentes sin alterar su integridad estructural o química. La cantidad de carbono orgánico presente en la biomasa, se expresa comúnmente, en porcentaje (% C), lo que se conoce como el Factor de Conversión de Carbono; este factor es fundamental, para estimar el almacenamiento de carbono en los ecosistemas y se utiliza ampliamente en estudios de ecología y ciencias del suelo (IPCC, 2006).

Para estimar la biomasa vegetal subterránea en los ecosistemas y agroecosistemas con datos confiables, ha sido difícil y complicado, debido a que la mayoría de los métodos de estimación, poseen importantes limitaciones, especialmente en su precisión, ya que no se cuenta con estimaciones precisas de la abundancia y distribución de las raíces en diferentes tipos

de usos de la tierra; además, estos métodos suelen implicar altos costos. Según Andrade *et al.*, (2014), Yepes *et al.*, (2016), existe una diversidad de métodos, como los métodos destructivos, basados en la cosecha de la biomasa en una determinada área y los métodos no destructivos, basados en regresiones para estimar la biomasa; este último, es utilizado principalmente, en la evaluación de árboles, siendo poco aplicado en la estimación de la biomasa bajo el suelo.

Con el cálculo de la biomasa, se obtiene un valor aproximado de la cantidad de carbono almacenado, ya que existe una estrecha relación entre la biomasa y el carbono (IPCC, 2006). Es fundamental, no confundir el Carbono (C) con el Dióxido de Carbono (CO₂). En una molécula de CO₂, existen dos átomos de Oxígeno (con un peso atómico de $2 \times 16 = 32$) y un átomo de Carbono (con un peso atómico de 12). Por lo tanto, el peso molecular del CO₂ es 44 ($2 \times 16 + 12$), de los cuales, solo 12 corresponden al Carbono; de lo anterior se deduce, que se necesitan $44/12 = 3,667$ toneladas de CO₂ atmosférico para obtener 1 tonelada de Carbono en la biomasa (Brown, 1997).

4.2.7 Carbono Orgánico del Suelo

El suelo, como recurso fundamental de los ecosistemas, es reconocido, como uno de los principales depósitos de Carbono (C) en el planeta, desempeñando un papel crucial en la regulación del ciclo global del Carbono (FAO, 2017). Este recurso, no solo sustenta la biodiversidad y la producción agrícola, sino que también actúa como un sumidero para la captura y almacenamiento de Carbono, ayudando a mitigar los efectos del cambio climático (Lal, 2004). La importancia del suelo como reservorio de Carbono, radica en su capacidad para retener y transformar el Carbono orgánico a través de procesos biológicos, químicos y físicos; en este sentido, la gestión sostenible del suelo se presenta, como una estrategia clave para maximizar su potencial como sumidero de Carbono y, al mismo tiempo, garantizar la provisión de servicios ecosistémicos esenciales, como la fertilidad del suelo, la regulación del agua y el mantenimiento de la biodiversidad (FAO, 2017).

La descomposición y mineralización de la materia vegetal, llevada a cabo por microorganismos y macroorganismos presentes en el suelo, es un proceso clave en la formación del Carbono Orgánico del Suelo (COS). Este proceso, está mediado por la actividad biológica del suelo, que transforma los residuos vegetales en compuestos orgánicos estables, una vez formado, el COS se almacena en diversas formas orgánicas, generando nuevos agregados y asociaciones con minerales, que pueden persistir durante largos periodos de tiempo (Lal, 2004). La acumulación de Carbono en el suelo, es un proceso más lento que la acumulación de biomasa y se estima, que el COS, contiene aproximadamente el doble de Carbono que la atmósfera y la biosfera juntas (Lal, 2004).

El COS, es el componente principal de la Materia Orgánica del Suelo (MOS) y es un indicador clave de la calidad del suelo; su presencia influye en las propiedades físicas, químicas y biológicas, así como en la disponibilidad de macronutrientes esenciales como el Fósforo y el Nitrógeno, que son fundamentales para la fertilidad del suelo (FAO, 2017; Martínez *et al.*, 2008). El carbono orgánico, almacenado en el suelo, es una parte fundamental de la MOS y afecta propiedades, como la estructura del suelo, la capacidad de intercambio catiónico, la retención de agua, la densidad aparente, la porosidad y la infiltración (Lal, 2004).

Los contenidos de Carbono en el suelo, dependen principalmente, de factores a largo plazo relacionados con la formación del suelo, como el clima, la topografía, el material parental y la vegetación. Sin embargo, estos contenidos pueden ser modificados, degradados o mejorados en función de los cambios en los usos y manejos del suelo (Lal, 2004; Martínez *et al.*, 2008). Por ejemplo, prácticas agrícolas intensivas, la deforestación y la erosión, pueden reducir significativamente los niveles de COS, mientras que prácticas como la Agroforestería, los cultivos asociados y la aplicación de materia orgánica, pueden incrementar su almacenamiento.

La cantidad y distribución espacial del Carbono Orgánico del Suelo (COS), particularmente a escala de paisaje, está determinada por la interacción de factores climáticos, edáficos, topográficos y biológicos a lo

largo del tiempo (Johnson *et al.*, 2011); entre estos elementos, la precipitación y la temperatura, ejercen un papel crítico en las reservas de COS y en la dinámica de la materia orgánica, las cuales se asocian estrechamente con la textura del suelo.

Estudios recientes indican, que mayores niveles de COS, suelen observarse en condiciones de elevada precipitación media anual y bajas temperaturas (Haddix *et al.*, 2020); adicionalmente, la cantidad de material vegetal (hojas, ramas, residuos de cultivos) incorporado al suelo, influye directamente, en la concentración de Carbono, de modo que una mayor disponibilidad de estos materiales, conlleva un incremento en las reservas de COS (Castillo-Pacheco *et al.*, 2016).

4.2.8 Cuantificación de Biomasa para Estimar Carbono

La biomasa, corresponde al peso fresco y seco de la materia orgánica presente en un ecosistema, tanto en su componente aérea (sobre el suelo) como subterránea (raíces) y suele emplearse, como indicador de productividad ecosistémica (Wu & Xu, 2023). La cuantificación de la biomasa en sistemas naturales y agroecosistemas, ha adquirido relevancia científica y práctica, debido a su vinculación con intereses industriales, energéticos, alimentarios y, en las últimas décadas, ambientales; se debe principalmente, a su rol en el ciclo global del Carbono, ya que su estimación permite aproximar la cantidad de Carbono capturado y almacenado en la vegetación (IPCC, 2004).

En este contexto, estudios como los de Snowdon *et al.*, (2001), IPCC, (2004), Brown, (1997) y Delgado-Vargas y Benavides, (2025), destacan, que la biomasa seca, es un parámetro clave para calcular la concentración de Carbono orgánico. Estos autores señalan, que existe una relación proporcional aproximada de 2:1 entre la biomasa seca y el Carbono almacenado, lo que implica, que cerca del 50% de la biomasa seca corresponde a Carbono; esta relación es ampliamente utilizadas en la evaluación de reservorios de Carbono en diversos ecosistemas terrestres.

La cuantificación de Carbono en sistemas forestales, agroforestales o en especies específicas, se fundamenta en la estimación de la biomasa, la cual permite determinar la cantidad total de materia orgánica viva, expresada en toneladas o megagramos (Mg) de peso seco por unidad de superficie (Riofrío *et al.*, 2013). Para este fin, se han empleado diversas metodologías a lo largo del tiempo. Las técnicas más antiguas corresponden, a métodos destructivos, que implican la cosecha y medición directa de la vegetación; no obstante, con el avance científico, se han desarrollado métodos indirectos no destructivos, como el uso de ecuaciones alométricas, que relacionan variables dendrométricas (diámetro, altura) con la biomasa (Yepes *et al.*, 2016). En la actualidad, han cobrado relevancia, los métodos de teledetección, los cuales utilizan datos obtenidos mediante sensores remotos, como imágenes satelitales, para estimar la biomasa a escalas espaciales amplias (Yepes *et al.*, 2016).

4.2.8.1 Métodos Directos.

El método destructivo, es una técnica ampliamente utilizada, para la estimación de biomasa forestal, sin embargo, presenta limitaciones significativas, como el alto consumo de tiempo y recursos, especialmente durante la medición de fracciones arbóreas específicas (fuste, ramas, follaje y raíces). El proceso consiste, en talar árboles dentro de una parcela de área conocida, medir variables dasométricas clave (Diámetro a la Altura del Pecho [DAP], altura total, diámetro de copa y tamaño de copa) y posteriormente, pesar cada componente del árbol por separado; finalmente, se determina el peso seco de cada fracción, mediante secado en estufa, lo que permite calcular la biomasa (Andrade *et al.*, 2014).

Con estos datos, se infiere el peso de cada componente, mediante Factores de Conversión de Biomasa (FCB), calculados a partir de la relación entre el peso seco y el peso fresco de las muestras recolectadas en campo; la sumatoria de los pesos de todos los componentes, permite estimar la biomasa total de cada individuo (Rügnitz *et al.*, 2009; Segura y Andrade, 2008). Igualmente, la biomasa puede estimarse, a partir del volumen del

fuste, la densidad básica de la madera y, un factor de expansión que permite proyectar el peso total del árbol (Fonseca, 2017).

- **Factor de Expansión de Biomasa (FEB).** Para estimar el volumen (total y comercial) de un árbol o bosque, se cuenta con información, que constituye una base útil para generar aproximaciones, que permiten convertir el volumen en valores de biomasa total; esto se logra mediante coeficientes que establecen una relación porcentual en tre ambas medidas, conocidos como Factores de Expansión de Biomasa (FEB). Estos factores se multiplican por el volumen de la madera en pie o comercial, para incluir componentes de biomasa no medidos, como ramas, follaje y árboles no comerciales (Brown, 1997; IPCC, 2004).

El valor más utilizado históricamente para el FEB, es 1,6, sin embargo, en sistemas agroforestales se han registrado valores promedio de 2,2, con un rango entre 1,9 y 2,4 (Andrade & Ibrahim, 2003).

4.2.8.2 Método Indirecto.

La estimación de la biomasa arbórea en áreas boscosas o plantaciones, se realiza mediante Métodos Indirectos, sin tener que talar los árboles; estos métodos emplean ecuaciones alométricas o modelos matemáticos desarrollados a través de Análisis de Regresión, los cuales relacionan variables dasométricas obtenidas en campo, como el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP), la Altura Comercial (HC), la Altura Total (HT), el crecimiento diamétrico, el área basal y la densidad específica de la madera; estas ecuaciones expresan, la biomasa como una función de las dimensiones del árbol, lo que facilita cálculos precisos sin dañar los ejemplares (Segura & Andrade, 2008; Fonseca, 2017). Entre las técnicas indirectas destacan, las Ecuaciones Alométricas y los Métodos de Teledetección.

- **Ecuaciones Alométricas.** Los modelos alométricos, son ecuaciones matemáticas, que relacionan la biomasa total con variables dasométricas del árbol, donde una variable es dependiente (biomasa) y otra independiente

(variables dasométricas). Entre las variables dasométricas más comunes, se encuentran el Diámetro del Fuste a la Altura del Pecho (DAP), la Altura Total (HT), la Altura Comercial (HC), el diámetro de copa y la densidad de la madera. Estos modelos, son una herramienta fundamental, para estimar la biomasa y el Carbono almacenado en sistemas forestales, lo que los convierte en una herramienta esencial para la gestión y conservación de los bosques (Vallejo et al., 2007; Segura & Andrade, 2008; Fonseca, 2017). Cabe resaltar, que para el desarrollo de las ecuaciones alométricas se requiere, de un muestreo destructivo, en el cual se relaciona la masa seca total y por componentes con variables dendrométricas fáciles de medir en los árboles.

- **Métodos de Teledetección.** La estimación de la biomasa a partir de imágenes satelitales, permite caracterizar la estructura del dosel vegetal. Al combinar esta información con ecuaciones alométricas específicas para cada tipo de vegetación, es posible calcular la biomasa de manera precisa, en grandes extensiones, incluso en áreas de difícil acceso (Hickey et al., 2018); no obstante, estas metodologías implican altos costos, requieren validación en campo y demandan procesos de análisis complejos (Lu et al., 2016).

4.2.9 Medición de Carbono en el Suelo.

El COS, no se distribuye de manera uniforme en amplias superficies, profundidades, tipos de suelos y posiciones del paisaje, razón por cual, se han desarrollado diversas técnicas para determinar el contenido de Carbono orgánico; entre ellas, el Método Tradicional de Combustión Húmeda, es una técnica ampliamente utilizada, para analizar el Carbono orgánico en suelos; este método consiste en la oxidación húmeda de la muestra de suelo y requiere instrumentación simple y relativamente económica, sin embargo, aunque es una metodología rápida y de bajo costo, presenta desventajas significativas, como el uso de grandes cantidades de ácido sulfúrico y la generación de productos cancerígenos y tóxicos (Wang et al., 2012; Eyherabide & Barbieri, 2014).

4.3 Cuantificación del Carbono en Sistemas Productivos *Coffea arabica* L

El estudio de la cuantificación de Carbono se llevó a cabo, en fincas cafeteras del municipio de Consacá, ubicado en el departamento de Nariño, Colombia; se caracterizada por una precipitación anual promedio de 1.161 mm, temperatura media anual de 20 °C y una humedad relativa del 80%.

4.3.1 Fase de Campo

Se seleccionaron tres lotes experimentales bajo un diseño de Bloques Completos al Azar (BCA); los bloques se definieron en función de tres rangos altitudinales: bajo (<1.600 m), medio (1.600-1.900 m) y alto (>1.900 m). Los tratamientos correspondieron a los sistemas productivos de café.

4.3.2 Tratamientos

Cada localidad (bloque), tiene un área de 10.000 m², en la cual se establecieron cuatro tratamientos (Tabla 4.1 y Figura 4.1). Cada tratamiento ocupa un área de 2.500 m² y se implementó en cultivos de café variedad Castillo de cinco años de edad. Las especies arbóreas utilizadas como sombrío fueron: limón tahití (*Citrus limon* Burm.), guamo (*Inga densiflora* L.) y carbonero (*Albizia carbonaria* Britton).

Tabla 4.1

Sistemas Productivos de Café, Municipio de Consacá, Nariño

Tratamiento	Componentes	Distancia de Siembra (m.)	Sistema de Siembra (m.)	Plantas (ha.)
T1	Café sin sombrío	Café: 1,3 x 1,3	Triángulo	6.828
T2	Café con sombrío de limón tahití	Café: 1,3* 1,3	Triángulo	6.672
		Limón: 8*8	Cuadro	156
T3	Café con sombrío de guamo	Café: 1,3*1,3	Triángulo	6.705
		Guamo: 9*9	Cuadro	123

Tratamiento	Componentes	Distancia de Siembra (m.)	Sistema de Siembra (m.)	Plantas (ha.)
T4	Café con sombrío de carbonero	Café: 1,3*1,3	Triángulo	6.759
		Carbonero: 12x12	Cuadrado	69

Nota: Establecimiento de tratamientos implementadas en cultivos de café Variedad Castillo. Jurado *et al.* (2020).

Figura 4.1

División Área del Lote Experimental en Subpartes Homogéneas.

10000m²

Tratamiento 1 2500m ²	Tratamiento 2
Tratamiento 3	Tratamiento 4

Nota: Area de implementación de cultivo de café variedad Castillo. Esta investigación.

4.3.3 Métodos para Determinar Biomasa Aérea

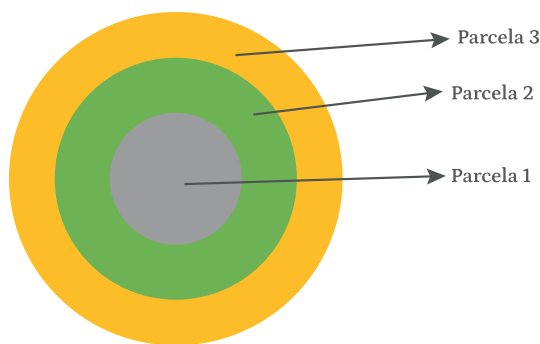
En la estimación de la biomasa, variable fundamental para determinar la captura de Carbono en los sistemas productivos de café, se empleó un método no destructivo. Para ello, se aplicaron ecuaciones alométricas reportadas por Álvarez *et al.*, (2011), Segura *et al.*, (2006), Segura y Andrade (2008) y Penman *et al.* (2003).

4.3.4 Unidades de Muestreo y Tamaño de Subparcelas

Para determinar las unidades de muestreo, se adaptó el método de muestreo empleado por Castellanos *et al.*, (2010), el cual se basa, en la estratificación y la distribución aleatoria de puntos de muestreo; el proceso inició con la división del área correspondiente a cada uno de los tratamientos en unidades de muestreo. En cada tratamiento, se seleccionaron tres puntos de manera aleatoria y en cada uno de estos puntos, se establecieron tres unidades de muestreo de diferentes tamaños: 250 m², 28 m² y 1 m². Estas parcelas anidadas, permitieron registrar información detallada sobre los componentes evaluados, que incluyeron la hojarasca, el suelo, los árboles de café y los árboles de sombrío (Figura 4.2 y Tabla 4.2). Este enfoque metodológico garantizó, una representación adecuada de la variabilidad espacial y una recopilación sistemática de datos, en cada uno de los estratos definidos.

Figura 4.2

Parcelas Circulares de Muestreo para la Medición de Carbono



Nota: Tres puntos seleccionados de manera aleatoria en cada tratamiento y en cada uno de estos puntos, se establecieron tres unidades de muestreo. Esta investigación.

Tabla 4.2

Tamaños y Componentes de Carbono Evaluados en Cada Subparcela

Subparcela	Área m ²	Componente evaluado
1	1	Hojarasca y suelo
2	28	Arboles de café
3	250	Arboles de sombrío

Nota: Tamaños y Componentes de Carbono Evaluados en Cada Subparcela. Castellanos *et al.* (2010).

4.3.5 Variables Evaluadas.

4.3.5.1 Hojarasca.

Se instalaron trampas para la recolección de hojarasca en áreas con presencia de especies arbóreas y plantas de café (*Coffea* spp.) Las trampas fueron distribuidas de manera estratégica en tres subparcelas circulares, cada una con un área de 1 m², con el fin de obtener una muestra representativa de la biomasa vegetal. La recolección de las muestras se llevó a cabo, después de un período de 30 días desde la instalación. Se registró el peso húmedo total de la hojarasca recolectada en campo, utilizando una balanza de precisión.

Para determinar el contenido de materia seca, se tomó una submuestra de 500 g de hojarasca; esta submuestra fue colocada en una estufa de secado, a una temperatura constante de 105 °C, siguiendo protocolos estandarizados. El secado se mantuvo, hasta que la muestra alcanzó un peso constante, lo que indicó la eliminación completa de la humedad. Este procedimiento permitió calcular, la proporción de materia seca en relación con el peso húmedo inicial, lo cual, es fundamental para estimar la biomasa seca y analizar la descomposición de la hojarasca en el ecosistema estudiado.

4.3.5.2 Árboles de Café.

Para evaluar las plantas de café, se seleccionaron tres parcelas de 28 m² por tratamiento, con una densidad que varió entre 19 y 22 árboles por parcela; a cada planta de café, se le midió el diámetro basal a 15 cm. del suelo y la altura total; estas mediciones permiten, estimar el crecimiento y la biomasa de los árboles, lo cual, es fundamental para evaluar la productividad y el manejo del cultivo.

4.3.5.3 Árboles de Sombra.

Se evaluaron los árboles asociados en tres subparcelas de 250 m² por tratamiento; en cada subparcela, se midieron las variables de altura (en metros) y el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) a 1,30 m. desde el suelo. La densidad de individuos registrada, osciló entre 2 y 4 árboles por área de muestreo, lo que indica, una distribución espacial relativamente baja en las áreas estudiadas.

4.3.6 Determinación de Biomasa en Plantas de Café y Árboles de Sombra

Para la determinación de la biomasa en árboles de café y de sombrío, se emplearon ecuaciones alométricas específicas para cada especie (Tabla 4.3). En el caso de la especie carbonero, se aplicó una ecuación desarrollada para árboles del bosque húmedo premontano, la cual ha demostrado ser precisa para estimar la biomasa aérea en este tipo de ecosistemas. Para cuantificar la biomasa del sistema radicular, se utilizó el valor obtenido de la biomasa aérea y se reemplazó en la ecuación alométrica propuesta por Penman *et al.* (2003), la cual ha sido ampliamente validada en estudios similares. Este enfoque metodológico permite una estimación confiable y estandarizada de la biomasa total, tanto aérea como subterránea, en sistemas agroforestales.

Tabla 4.3
Ecuaciones Alométricas Utilizadas por Especie para la Estimación de Biomasa

Ecuación Alométrica	Especie	Observación	Fuente
$\text{Log}(\text{BA}) = -1,1-1,6^*\text{Log}(\text{d}_{15})+0,6^*\text{log}(\text{h})$	Café (<i>Coffea arabica</i> L.)	BA= Biomasa aérea (kg/árbol) d_{15} = diámetro medido a 15 cm del suelo.	Segura <i>et al.</i> , (2006)
$\text{BA} = 10^{(-0,889+2,317^*\text{Log}(\text{dap}))}$	Guamo (<i>Inga sp.</i>)	d=diámetro a 130 cm	Segura <i>et al.</i> , (2006)
$\text{BA} = \text{EXP}(-1,8656+(2,3733^*\text{LN}(\text{d})))$	Carbonero (<i>Albizia carbonaria</i> Britton.)	d=diámetro a 130 cm	(Álvarez <i>et al.</i> , 2011)
$\text{BA} = 10^{-1,11+(2,64^*\text{LOG}(\text{d}))}$	Limón (<i>Citrus limon</i> (L) Burm)	D=diámetro a 130 cm	(Segura y Andrade, 2008)
$\text{Raíces} = e^{(-1,06+0,88^*\text{LN}(\text{BA}))}$	Biomasa de raíces a partir de biomasa arriba del suelo.	BA=Biomasa aérea (kg/árbol)	(Penman <i>et al.</i> , 2003)

Nota: Ecuaciones Alométricas Específicas para cada Especie. Fuente anotación en la tabla

4.3.7 Estimación de Carbono

La Estimación del Carbono almacenado en las plantas de café, los árboles de sombrío y las raíces, se determinó multiplicando el valor de la biomasa obtenida a través de ecuaciones alométricas, por la fracción de Carbono pre-determinada de 0,5, según lo establecido por el IPCC, (2006). Este enfoque metodológico, es ampliamente utilizado en estudios de captura de Carbono en sistemas agroforestales, ya que permite una estimación estandarizada y comparable a nivel internacional. La aplicación de estas ecuaciones alométricas y el uso de la fracción de Carbono recomendada por el IPCC, garantizan la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos.

4.3.8 Carbono Almacenado en el Suelo.

El Carbono almacenado en el suelo, fue evaluado mediante la selección de cinco sitios distribuidos al azar para cada tratamiento. En cada sitio, se recolectaron muestras de suelo a una profundidad de 30 cm. (figura 4.3), con un peso de 200 g. por muestra. Estas muestras fueron transportadas al Laboratorio Especializado de Suelos e Insumos Agrícolas de la Universidad de Nariño, donde se determinó el porcentaje de Carbono orgánico utilizando la Metodología de Oxidación Húmeda, conocida como el Método de Walkley & Black.

La estimación del Carbono almacenado en el suelo, se realizó mediante la siguiente ecuación:

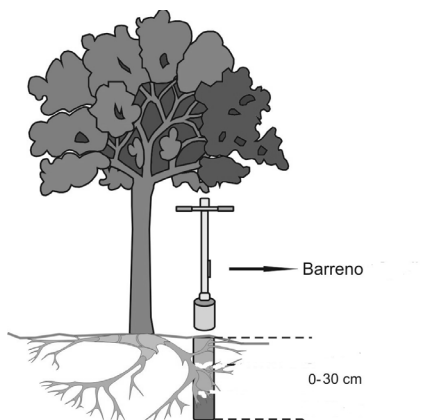
$$t.C/ha = Prof. \times D \times \%CO$$

Donde:

- $t.C/ha$ = Carbono orgánico en el suelo (toneladas de carbono por hectárea).
- Prof. = Profundidad del muestreo (cm).
- D = Densidad aparente (g/cm^3).
- $\%CO$ = Contenido porcentual de carbono orgánico en el suelo, obtenido en el laboratorio.

Figura 4.3

Adaptado de Delgado et al (2016) muestreo en campo para toma de muestras de suelo



4.3.9 Total de Carbono en el Sistema

Para determinar el contenido total de Carbono en los sistemas evaluados, se integraron los datos estimados de Carbono, tanto en la biomasa sobre el suelo como bajo el suelo; este enfoque permitió cuantificar de manera integral, las reservas de Carbono en los agroecosistemas estudiados. Según las directrices del IPCC, (2006) la estimación del Carbono en sistemas terrestres, debe incluir tanto la biomasa aérea como la subterránea, para obtener una evaluación precisa de las reservas totales. Este enfoque integral, asegura la inclusión de todos los componentes clave del almacenamiento de Carbono, lo que resulta esencial para la planificación de estrategias de conservación y manejo sostenible de los agroecosistemas y recursos naturales. La integración de estos elementos, permite una comprensión más completa de los flujos de Carbono y contribuye a la mitigación del cambio climático, mediante la identificación de prácticas agrícolas y forestales que maximizan el secuestro de Carbono.

4.3.9.1 Carbono Almacenado en Biomasa Aérea (Café, árboles de sombrío y hojarasca).

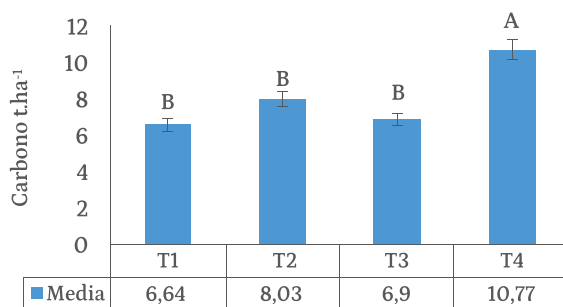
Según el Análisis de Varianza, se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p = 0,001$); al aplicar la Prueba de Comparación de Medias de Tukey, se encontró, que el tratamiento café-carbonero (T4) mostró diferencias significativas con respecto a los demás tratamientos, con un valor promedio de $10,77 \text{ t ha}^{-1}$; por otro lado, el valor más bajo de almacenamiento de Carbono, se observó en el tratamiento de café sin sombra (T1), con un promedio de $6,64 \text{ t ha}^{-1}$, como se muestra en la Figura 4.4. Estos resultados indican, que las reservas de carbono son mayores en los sistemas productivos de café con sombra, en comparación con las plantaciones de café a libre exposición.

Hernández *et al.*, (2021) señalan, que este tipo de resultados, está directamente relacionado con el tamaño de los fustes, los cuales almacenan mayor cantidad de Carbono; así mismo, factores como la densidad de

plantación y el tipo de especies asociadas a cada sistema, también influyen en el almacenamiento de Carbono.

Figura 4.4

Almacenamiento de Carbono en la Raíz en Cuatro Sistemas Productivos de Café



Nota: Almacenamiento de Carbono Aéreo en Cuatro Sistemas Productivos de Café. Jurado *et al.* (2020)

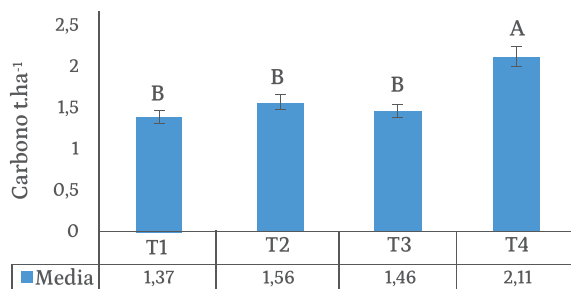
Manchabajoy et al., (2022) en su investigación, indican, una mayor captura de Carbono en el sistema productivo de café y carbonero sembrado a una distancia de 12 × 12 m, con un valor promedio de 10,77 t ha⁻¹ en el municipio de Sandoná, Nariño. Por otro lado, en el estudio sobre captura de Carbono en Sistemas Agroforestales (SAF) con café, Córdoba y Tulcán, (2021) reportaron valores medios entre 12,4 y 9,56 t ha⁻¹, en los sistemas café-carbonero y café libre exposición, respectivamente, los cuales difieren un poco de los resultados obtenidos en la presente investigación. La variación de los resultados, se debe a diversos factores, como la altitud, las condiciones ambientales y la topografía de cada lugar; de esta manera, el cambio de zona, puede alterar las condiciones de adaptación para las especies evaluadas. Gómez y Oviedo, (2000) reportan, que los árboles de grandes dimensiones, tienen la capacidad de retener carbono en su madera por un tiempo prolongado; esto sugiere, que los árboles de carbonero, al presentar las mayores dimensiones en altura y diámetro, poseen un mayor almacenamiento de Carbono en comparación con otras especies leñosas.

4.3.9.2 Carbono Almacenado en la Biomasa Sistema Raíz.

Según el Análisis de Varianza (ANDEVA), se encontraron diferencias estadísticas altamente significativas entre los tratamientos ($p = 0,001$). Al aplicar la Prueba de Comparación de Medias de Tukey, se determinó, que la mayor cantidad de Carbono almacenado en la raíz, se obtuvo en el tratamiento T4, con un valor de $2,11 \text{ t ha}^{-1}$. Por otro lado, el sistema que presentó el menor almacenamiento de Carbono fue el T1, con un valor de $1,37 \text{ t ha}^{-1}$, (Figura 4.5). Esta variabilidad puede atribuirse, a la heterogeneidad espacial del desarrollo del sistema radicular, el cual está influenciado por las interacciones entre factores genéticos y ambientales de las especies leñosas.

Figura 4.5

Almacenamiento de Carbono en la Raíz en Cuatro Sistemas Productivos de Café



Nota: Cantidad de Carbono almacenado en la raíz. Jurado *et al.* (2020).

Los resultados obtenidos demuestran, que el contenido de Carbono en la biomasa bajo el suelo, presentó valores más altos en los tratamientos con árboles de sombrío, en comparación con el tratamiento de café a libre exposición. Este efecto, se atribuye al aporte de hojas, follaje y raíces muertas provenientes tanto de los árboles de sombra como del café, los cuales incorporan materia orgánica al suelo; Thomazini *et al.*, (2015); Smith *et al.*, (2020) destacan, además, la influencia del componente arbóreo, que reduce la temperatura del suelo, mejora la actividad microbiana

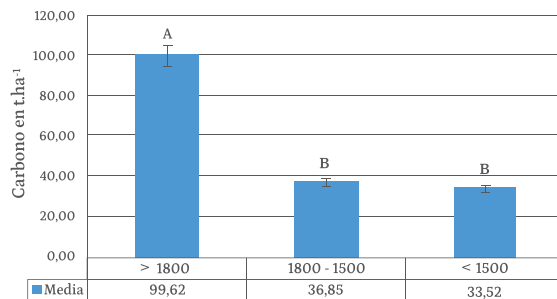
y promueve un mayor almacenamiento y estabilidad en el flujo de Carbono. Esto implica, que el Carbono permanece almacenado en el suelo, por un período más prolongado en comparación con un sistema de café expuesto directamente a las condiciones ambientales (De Carvalho *et al.*, 2016).

4.3.9.3 Carbono Almacenado en el Suelo.

Al analizar el Carbono almacenado en el suelo y aplicar el Análisis de Varianza (ANDEVA), no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos; posiblemente, se deba a la edad de los sistemas evaluados, donde los componentes no tuvieron un efecto diferencial sobre la acumulación de Carbono Orgánico del Suelo (COS). Sin embargo, investigaciones previas indican, que los sistemas asociados con café, tienden a presentar mayores reservas de Carbono en el suelo en comparación con los monocultivos de café. Al comparar el COS en los tres rangos altitudinales, se observaron diferencias altamente significativas entre ellos ($p = 0,001$); la mayor cantidad de Carbono almacenado se registró, en altitudes superiores a 1800 msnm, con un valor promedio de $99,62 \text{ t ha}^{-1}$, mientras que el menor valor se encontró en el rango inferior a 1.500 msnm, con un promedio de $33,52 \text{ t ha}^{-1}$, (Figura 4.6).

Figura 4.6

Almacenamiento de Carbono en el Suelo en Tres Rangos Altitudinales



Nota: Almacenamiento de Carbono en el Suelo. Jurado *et al.* (2020).

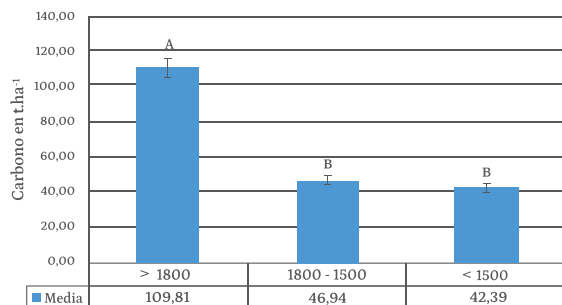
En los suelos localizados a más de 1.800 msnm, se registró una densidad aparente de $0,74 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, mientras que, en suelos por debajo de 1600 msnm, este valor fue de $0,83 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Los suelos con mayor altitud, mostraron una menor densidad aparente y, a su vez, una mayor capacidad de almacenamiento de Carbono; en este sentido, el Carbono orgánico del suelo, está estrechamente relacionado con el contenido de materia orgánica y la densidad aparente, lo que sugiere, una correlación inversa entre la densidad aparente del suelo y su capacidad para almacenar Carbono (Jones *et al.*, 2009). Otro aspecto a considerar, es el efecto de la sombra; según Sánchez, (2016) el Carbono orgánico presente en el suelo, está directamente relacionado con el porcentaje de sombra; este fenómeno se debe, a la presencia y abundancia de especies arbóreas que proporcionan sombra en el área, así como a la actividad radicular en el suelo.

4.3.9.4 Carbono Almacenado en la Biomasa Aérea y Bajo el Suelo en Tres Rangos Altitudinales.

Al realizar el análisis del Carbono almacenado en los tres rangos altitudinales estudiados, se observaron diferencias estadísticamente significativas. La mayor cantidad de Carbono almacenado, se registró en altitudes superiores a 1.800 msnm., con un promedio de $109,81 \text{ t ha}^{-1}$. Por el contrario, en el rango altitudinal inferior a 1.500 msnm. Se presentó el menor almacenamiento de Carbono, con un promedio de $42,39 \text{ t ha}^{-1}$ (Figura 4.7). Estos resultados sugieren, que la altitud. es un factor determinante en la capacidad de almacenamiento de Carbono en el área de estudio.

Figura 4.7

Almacenamiento de Carbono en Biomasa Aérea y Bajo el Suelo en Tres Rangos Altitudinales



Nota: Almacenamiento de Carbono en Biomasa Aérea y Bajo el Suelo en Tres Rangos Altitudinales. Jurado *et al.* (2020).

El almacenamiento de Carbono, fue mayor a una altitud superior a los 1800 msnm., debido a la fuerte influencia de las condiciones topográficas y climáticas presentes en esa altitud, así como a la capacidad de descomposición y la presencia de actividad microbiana. Estos factores promueven la estabilidad del flujo de Carbono (Hergoualc'h *et al.*, 2012); además, Delgado-Vargas y Benavides, (2025) y Martínez *et al.*, (2008) sostienen, que el contenido de Carbono Orgánico del Suelo (COS), no solo está determinado por las condiciones ambientales locales, sino que también se ve significativamente influenciado, por el manejo del suelo. Lo anterior se explica por la diversidad de prácticas de manejo, que los productores realizan en sus cultivos, entre las cuales, algunas provocan degradación progresiva del COS, mientras que otras promueven su acumulación.

En este contexto, las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, juegan un papel fundamental en la captura de Carbono, dentro de los diferentes sistemas productivos; estas características determinan la capacidad del suelo para almacenar Carbono orgánico, lo que influye directamente en la mitigación del cambio climático y en la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y forestales. Por lo tanto, es esencial, implementar

prácticas de manejo sostenible, que promuevan la salud del suelo y maximicen su potencial como sumidero de Carbono. Entre estas prácticas, se incluyen, la rotación de cultivos, la incorporación de materia orgánica, la reducción del laboreo y el uso de cultivos de cobertura; estas estrategias contribuyen, a mejorar la calidad del suelo y a incrementar la capacidad de almacenamiento de carbono (Lal, 2004; Hergoualc'h *et al.*, 2012).

Conclusiones

Los sistemas agroforestales de café, especialmente aquellos asociados con especies leñosas perennes, demuestran una capacidad significativamente mayor para almacenar Carbono, en comparación con los cultivos de café a libre exposición; este incremento en las reservas de Carbono, está directamente relacionado con la biomasa y el contenido de Carbono en el suelo, los cuales dependen de la densidad y las especies de árboles de sombra utilizados. En particular, se observó que los sistemas que combinan café con especies, como el carbonero (*Albizia carbonaria* Britton) y el guamo (*Inga spp.*), en comparación con el cultivo de café a libre exposición, presentan una mayor capacidad de almacenamiento de Carbono, debido a la mayor cantidad de biomasa, tanto en el sistema aéreo como bajo el suelo, lo que los convierte en opciones viables, para la mitigación del cambio climático.

Las asociaciones agroforestales, no solo representan una alternativa sostenible para la producción de café, sino, que también contribuyen de manera significativa al secuestro de Carbono y a la reducción de las emisiones de Dióxido de Carbono (CO_2), uno de los principales gases de efecto invernadero; además, estos sistemas generan una amplia gama de servicios ecosistémicos, como la conservación de la biodiversidad, la mejora de la salud del suelo y la regulación del ciclo hídrico; asimismo, se alinean con los objetivos de desarrollo limpio, ofreciendo beneficios económicos y ambientales superiores a los monocultivos, gracias a su mayor biomasa viva y a su capacidad, para diversificar los ingresos de los productores.

La implementación de sistemas asociados con otras especies, especialmente leñosas en la producción de café, no solo promueve la sostenibilidad ambiental, sino que también fortalece la resiliencia de los ecosistemas y las comunidades rurales, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y al cumplimiento de los objetivos globales de desarrollo sostenible.

Referencias

- Alcântara, E. N., & Ferreira, M. M. (2000). Efeitos de métodos de controle de plantas daninhas na cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) sobre a qualidade física do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24(4), 711–721. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000400003>
- Aldaz, J. C. C., Cortez, J. L. P., López, M. C., y Jacome, S. S. I. (2020). Adaptabilidad en el sistema de producción agrícola: Una mirada desde los productos alternativos sostenibles. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, 26(4), 308-327.
- Altieri, M., y Nicholls, C. (2000). *Agroecología: Teoría y práctica para una agricultura sostenible*. ONU-PNUMA.
- Altieri, M. (2002). *Agroecología: Bases Científicas para una Agricultura Sustentable*. Agropecuária.
- Altieri, M., y Nicholls, C. I. (2007). Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación. *Revista Ecosistemas*, 16(1), 6-12.
- Altieri, M., Nicholls, C., Funes-Monzote, F., Henao, A., León, T. y Vázquez, L. (2011). *Hacia una metodología para la identificación, diagnóstico y sistematización de sistemas agrícolas resilientes a eventos climáticos extremos*. REDAGRES.
- Alvarado, J., Andrade, H., y Segura, M. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*, 16(1), 21-31.
- Álvarez-Sánchez, D. E., Gómez-López, E. D., y Ordóñez-Jurado, H. R. (2019). Tipología de fincas productoras de arveja (*Pisum sativum* L.)

Referencias

- en la subregión Sur de Nariño, Colombia. *Ciencia Y Tecnología Agropecuaria*, 20(3), 659–677. https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num3_art:1593.
- Álvarez, S., Paolini, J., Lares, M., y Duque, A. (2011). Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa en sistemas agroforestales de café. *Revista Agroforestal*, 15(2), 123-135.
- Anderegg, W. Berry, J. Smith, D. Sperry, J. Anderegg, L. y Field, C. (2012). The roles of hydraulic and carbon stress in a widespread climate-induced forest die-off. *PNAS*, 109(1), 233–237.
- Anderson, J., y Ingram, J. (1989). *Tropical Soil Biology and Fertility: A handbook of methods*. CAB International.
- Andrade, H. J., Marín, M. L. y Pachón P. D. (2014). Fijación de carbono y porcentaje de sombra en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el Líbano, Tolima, Colombia. *Biagro*, 26(2), 127-32. <http://www.scielo.org/ve/scielo.php?pi=S131633612014000200008&script=sci-arext>
- Andrade, H., Ibrahim, M. (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas*, 10(39/40), 109 – 116.
- Angelsen, A., Jagger, P., Babigumira, R., Belcher, B., Hogarth, N. J., Bauch, S., Borner, J. Smith-Hall, C. y Wunder, S. (2014). Environmental income and rural livelihoods: A global-comparative analysis. *World Development*, 64, S12-S28. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2014.03.006>
- Arcila, J., Farfán, F., Moreno, A., Salazar, L. F. y Hincapié, E. (2007). *Sistemas de producción de café en Colombia*. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

- Astier, M. y Gonzáles, C. (2008). Formulación de indicadores socioambientales para evaluaciones de sustentabilidad de sistemas de manejo complejos. En M. Astier, O. Masera, y Y. Galván-Miyoshi. (Coords), *Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional* (pp. 73-93). SAEA, CIGA, ECOSUR, CIEco, UNAM, GIRA, Muldisprensa, Fundación Instituto de Agricultura Ecológica y sustentable.
- Ávila, L., Muños, M. y Rivera, B. (2000). *Tipificación de los sistemas de producción agropecuaria en la zona de influencia del programa UNIR (CALDAS)*. Universidad de Caldas.
- Barba-Romero, S., y Pomerol, J. C. (1997). *Decisiones multicriterio: Fundamentos teóricos y utilización práctica*. Alcalá de Henares: Servicio de Publicaciones de la U.A.H.
- Barrera, J. A., Hermida Daza, M. A. y Rodríguez León, C. H. (2021) *Tipificación, caracterización y sostenibilidad de los sistemas productivos en los paisajes de montaña y lomerío de los municipios de San José del Fragua, Belén de los Andaquíes y Albania, departamento del Caquetá*. Instituto SINCHI.
- Baslam, M., Mitsui, T., Sueyoshi, K., y Ohyama, T. (2021). Recent advance in carbon and nitrogen metabolism in C3 plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(1), 318
- Bautista, F., Gallegos, Á. y García, N. (2023). *Manual para el muestreo y descripción de perfiles de suelo en campo con objetivos múltiples*. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental UNAM.
- Bertalanffy Von, L. (1998) *Teoría General de los Sistemas*. Editorial Fondo de Cultura Económica.
- Binder, C. R., Feola, G., y Steinberger, J. K. (2010). Consideración de las dimensiones normativa, sistémica y procedimental en las evaluaciones

- de sostenibilidad basadas en indicadores en la agricultura. *Revisión de la evaluación de impacto ambiental*, 30(2), 71-81.
- Blanco, Y., y Leyva, Á. (2007). Las arvenses en el agroecosistema y sus beneficios agroecológicos como hospederas de enemigos naturales. *Cultivos tropicales*, 28(2), 21-28.
- Blasco, Hedo, E. y López Pérez, F. (2020). Red Natura 2000: La imparable pérdida de la biodiversidad: Más de un millón de especies en peligro de extinción según el informe IPBES. *Observatorio de Políticas Ambientales*, (XXVII), 715-741.
- Blasco, M. y Burbano, H. (2015). *La vida en el suelo. Notas sobre su bioquímica y microbiología*. Impresos la Castellana.
- Briceño, L. M., Mahecha, A. G. y Triana, M. A. (2017). Recuperación etnobotánica del uso tradicional no maderable del bosque secundario en el municipio de Nocaima, Cundinamarca. *Revista Mutis*, 7(1), 48-66. <https://doi.org/10.21789/22561498.1188>
- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Burbano, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82-96. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>
- Bustillo, A. E. (2006). Evaluación de métodos para cuantificar poblaciones de broca del café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari)(Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), en fincas de de caficultores experimentadores. *Revista Colombiana de Entomología*, 32(1), 39-45.
- Cárdenas, G. I., Giraldo, H., Idárraga, A., Vázquez, L. N. (2005). Desarrollo y Validación de Metodología para Evaluar con Indicadores la Sostenibilidad de Sistemas Productivos Campesinos de la Asociación de

Caficultores Orgánicos de Colombia – ACOC. Producción *Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*, 9, 109-135.

Cardona-Calle, D. A., & Sadeghian-Khalajabadi, S. (2005). *Aporte de material orgánico y nutrientes en cafetales al sol y bajo sombrío de guamo* (Avances Técnicos No. 334). Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), Chinchiná, Colombia.

Carvalho, R., Goedert, W. J. y Armando, M. S. (2004). Physical features of soil quality under an agroforestry system. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 39(11), 1153-1155,

Casiano-Domínguez, M., Paz-Pellat, F., Rojo-Martínez, M., Covaleda-Ocon, S. y Aryal, D. R. (2018). El Carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México. *Madera y Bosques*, 24, e2401894. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401894>.

Castellanos, E. J., Quilo Coronado, A. E. y Mato Amboage, R. (2010). *Metodología para la estimación del contenido de carbono en bosques y sistemas agroforestales en Guatemala*. Universidad del Valle de Guatemala.

Castillo-Pacheco, L. A., Bojórquez-Serrano, J. I., Hernández-Jiménez, A. y García-Paredes, D. (2016). Contenidos de carbono orgánico en suelos bajo diferentes coberturas vegetales y de cultivo. *Cultivos Tropicales*, 37(3), 72–78. <https://link.gale.com/apps/doc/A470867909/AONE?u=anon-bd0e872c&sid=googleScholar&xid=8123e446>

Cerda, R., Allinne, C., Gary, C., Tixier, P., Harvey, C. A., Krolczyk, L., ... y Avelino, J. (2017). Efectos de la sombra, la altitud y el manejo en múltiples servicios ecosistémicos en agroecosistemas de café. *Revista Europea de Agronomía*, 82, 308-319

- Chazdon, R. L., Brancalion, P. H. S. y Laestadius, L. (2020). *Restauración de bosques en paisajes agrícolas: Avances y desafíos*. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18(2), 100-108. <https://doi.org/10.1002/fee.2166>
- Cieza, R. I. y Sarandón, S. J. (2023). Evaluación de la sustentabilidad en sistemas productivos familiares y empresariales de la Cuenca del Salado. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 122(1), 1-13.
- Comité de Cafeteros de Nariño, Seccional La Unión. (2018). *Comité departamental de Nariño. Informe Comité Departamentales, Documento Técnico*.
- Comité de Cafeteros de Nariño. (2014). *Comité de Cafeteros de Nariño, Labores de registro en fincas. Colombia: Sistema de información cafetero (SICA)*.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [CMNUCC]. (1992). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. Adoptada el 9 de mayo de 1992. Nueva York: Naciones Unidas. Recuperado de <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- Córdoba, S. Y. y Tulcán, L. P. (2021). *Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café (Coffea arabica L.)*, La Florida, Nariño – Colombia. [Trabajo de grado, Universidad de Nariño].
- Criollo-Escobar, H., Lagos Burbano, T. C., Bacca Ibarra, T. y Muñoz Belalcázar, J. A. (2016). Caracterización de los sistemas productivos de café en Nariño, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 19(1), 105–113. <https://doi.org/10.31910/rudca.v19.n1.2016.260>
- Criollo-Escobar, H., Muñoz, J., y Lagos-Burbano, T. (2020). Modelos alométricos para biomasa y carbono de Albizia carbonaria durante la fase de crecimiento. *Ciencia y Agricultura*, 17(3), 95–110. <https://doi.org/10.19053/O1228420.v17.n3.2020.11384>

- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F. N. y Leip, A. (2021). Los sistemas alimentarios son responsables de un tercio de las emisiones antropogénicas globales de GEI. *Nature Food*, 2, 198-209.
- DaMatta, F. M., y Rodríguez, N. H. (2007). Ecophysiological responses of coffee to environmental factors. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 485–510.
<https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400014>.
- De Carvalho, A. M., Bustamante, M. M. C., Kozovits, A. R., Miranda, L. N., Vivaldi, L. J. y Souza, M. D. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas de producción de café en Brasil. *Agricultura, Ecosistemas y Ambiente*, 224, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.03.012>
- Delgado, I., Daza, J., Luna, G., Leonel, H. & Forero, L. (2016). Cuantificación de carbono radical *Morella pubescens* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Wilbur en dos agroecosistemas (Nariño, Colombia). *Colombia Forestal*, 19(2), 85-93
- Delgado-Vargas, I., Ballesteros, W., y Arellano, V. (2022). Agrobiodiversidad de leñosas multipropósito en sistemas productivos cafeteros. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 13(2), 67–80. <https://doi.org/10.22490/21456453.4741>
- Delgado-Vargas, I. A., & Muñoz Rodríguez, M. A. (2023). Análisis financiero en agroecosistemas cafeteros (*Coffea arabica* L.) en el suroeste de Colombia. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(6), 727-750. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i6.8721
- Delgado-Vargas, I. A., & Benavides Franco, N. (2025). Soil organic carbon storage in different agroforestry systems associated with coffee in Nariño, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 36, 59765. <https://doi.org/10.15517/am.2024.59765>

Referencias

- Detlefsen, R. (1998). Evaluación del rendimiento de (*Coffea arabica*) cv. *Caturra* bajo diferentes densidades de *Cordia alliodora* y *Erythrina poeppigiana* plantados en un diseño sistemático de espaciamientos. [Tesis de Magister, Turrialba].
- Duarte, N. (2005). Análisis de la sostenibilidad socioeconómica y ecológica de los sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) en la microcuenca del Río Sesesmiles. [Tesis de maestría, Turrialba].
- Dussán, L., Duque, O. y González, L. (2006). Caracterización tecnológica de caficultores de economía campesina, de los principales municipios cafeteros de Colombia. *CENICAFÉ*, 57(3), 167-186.
- Escobar, G. (2007). El sombrío en los cafetales: *un sistema, una estrategia para la seguridad alimentaria*. redSAN.
- Escobar, N., Romero, N. J. y Jaramillo, C. I. (2019). Typology of small producers in transition to agroecological production. *Agronomy Research*, 17(6), 2242-2259. <https://doi.org/10.15159/AR.19.221>.
- Escobar, G. y J. Berdegúe. (1990). Conceptos y metodologías para tipificación de sistemas de finca: la experiencia de RIMISP. En G. Escobar y J. Berdegúe. (Eds), *Tipificación de Sistemas de Producción Agrícola* (pp. 13-44). Red Internacional de Metodología de Investigación de Sistemas de Producción (RIMISP). Cardona-Calle & Sadeghian-Khalajabadi, 2005).
- Espinoza-Domínguez, W., Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A., y Torres-Rivera, A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 18(1), 57-70.
- Eyherabide, M., Saíinz, H., Barbieri, P. y Echeverría, H. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Cienc Suelo (Argentina)*, 32(1), 13-19.

- Farfán, V., y Jaramillo, R. (2009). Sombrío para el cultivo del café según la nubosidad de la región. *Avances Técnicos CENICAFÉ*, 379, 1-8.
- Farfán V., F. e Hincapié G. E. (2011). Valoración de la sostenibilidad ambiental mediante indicadores de calidad del suelo, en sistemas de producción de café en Colombia. *CENICAFÉ* 62(1), 100-118.
- Farfán, F., Baute, J., Sánchez, P. y Menza, H. (2013). Guamo santaferense en sistemas agroforestales con café. *CENICAFÉ*, 120-178.
- Farfán, F. (2014). *Agroforestería y sistemas agroforestales con café*. Cenicafé. https://www.cenicafe.org/es/publications/Agroforester%C3%ADa_y_sistemas_agroforestales_con_caf%C3%A9.pdf
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia - FNC. (1993). *Manual de uso de fotografías aéreas; aplicación al sistema de información cafetera*.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia-CENICAFÉ. (2013). *Manual del cafetero colombiano. Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (Tomo I, II y III). CENICAFÉ.
- Federación Nacional de cafeteros (FNC). (2019). *Estadísticas Históricas. Cultivos de Café en Colombia*.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC). (2020). El consumo interno de café en Colombia: medición y determinantes. *Ensayos sobre Economía Cafetera*, 33(1), 37-66. <https://federaciondecafeteros.org/app/uploads/2020/05/Revista-No.-33-Final.pdf>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC). (2022). *Clima y café: una relación vital*. <https://www.federaciondecafeteros.org>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2024). *Informe de Gestión 2023*.

Referencias

- Ferreiro, V. S. (2023). *Estrategias de mitigación al cambio climático y contribución a la seguridad alimentaria a partir del uso de agrominerales alternativos. Disponibilidad de recursos en la República Argentina*. [Trabajo de especialización, Universidad de Buenos Aires]. http://hdl.handle.net/20.500.12110/especializacion_nGM0017_Ferreiro
- Figueroa, M. E. (2000). *Uso agroecológico, actual y potencial, de especies arbóreas en una Selva Baja Caducifolia perturbada del suroeste del Estado de México*. [Tesis de Maestría, Colegio de Posgraduados].
- Fonseca, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 51(2), 91-109.
- Fundación Hondureña de Investigación Agrícola-FHIA. (2004). *Guía práctica: Producción de café con sombra de maderables*. http://www.fhia.org.hn/downloads/cacao_pdfs/gpcafeconsombramaderables.pdf
- Gallego, G. R., Carrascal, M. R., Ospina, M. J. B., Franco, G., Cárdenas, J. C. P., Muñoz, J. E. M., Duque, J. L. G. y Agudelo, D. I. E. (2004). Zonificación, caracterización y tipificación de los sistemas de producción de lulo (*Solanum quitoense* Lam) en el Eje Cafetero. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 5(1), 22–30.
- Gayoso, J. y Guerra, J. (2005). Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque (Valdivia)*, 26(2), 33-38
- Gentry, A. (1982). Patterns of Neotropical plant diversity. *Evolutionary Biology. Hecht, Wallace and Prance, plenum publishing corporation*, 15, 1-84.
- Ghosh, K., y Braun, G. (2020). *Transformando la alimentación y la agricultura para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): Buenas prácticas de los proyectos FAO-FMAM en todo el mundo*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

- Gómez, V. y Oviedo, S. (2000). *Estudio sobre fijación de carbono en plantaciones de Pinus ocarpa, de 11 años de edad en Quinta Buenos Aires, Estelí y Aurora, Nueva Segovia*. [Trabajo de grado, Universidad de Nacional Agraria].
- Goswami, R., Chatterjee, S. y Prasad, B. (2014). Farm types and their economic characterization in complex agro-ecosystems for informed extension intervention: study from coastal West Bengal, India. *Agricultural and Food Economics*, 2(5), 1-24.
- Guharay, F., Monterroso, D. y Staver, C. (2001). El diseño y manejo de la sombra para la supresión de plagas en cafetales de América Central. *Agroforestería en las Américas*, 8(29), 22-29.
- Haddix, M. L., Gregorich, E. G., Helgason, B. L., Janzen, H., Ellert, B. H. y Cotrufo, M. F. (2020). Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil. *Geoderma*, 363, 114160.
- Han, X., Wang, S., Veneman, P. y Xing, B. (2006). Change of Organic Carbon Content and Its Fraction in Black Soil under Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Recycled Organic Manure. *Soil Science and Plant Analysis*, 37, 1127-1137.
- Hart, R. (1990). Componentes, subsistemas y propiedades del sistema finca como base para un método de clasificación. En G. Escobar y J. Berdegue. (Eds), *Tipificación de Sistemas de Producción Agrícola* (pp. 45-62). Red Internacional de Metodología de Investigación de Sistemas de Producción (RIMISP).
- Hergoualc'h, K., Blanchart, E., Skiba, U., Hénault, C. y Harmand, J. M. (2012). Cambios en las reservas de carbono y el balance de gases de efecto invernadero en un monocultivo de café (*Coffea arabica*) versus un sistema agroforestal con *Inga densiflora*, en Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 148, 102-110.

Referencias

- Hernández, H., Andrade, H., Suárez, J., Sánchez, J., Gutiérrez, D., Gutiérrez, G., Trujillo, E., y Casanoves, F. (2021). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en los Llanos Orientales de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 69(1), 352-368.
- Heuveldop, J., Alpizar, L., Fassbender, H., Enríquez, G. y Folster, H. (1985). Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y café con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. II. Producción agrícola, maderable y de residuos vegetales, 5(4), 347–355.
- Hickey, S. M., Brown, L. y Green, T. (2018). *Advances in canopy structure analysis using remote sensing. Journal of Vegetation Science*, 29(4), 456-468.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELERÍA. (2015). *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional - Regional: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*.
- Jiménez, G., Siles, P., Bustamante, O., Rapidel, B. y Staver, C. (2012). Optimizing timber production and carbon storage of *Cedrela odorata* and *Swietenia macrophylla* in coffee agroforestry [Conference]. *24th International Conference on Coffee Science*, San Jose, Costa Rica.
- Johnson K.D., Scatena, F. N. y Silver, W. L. (2011). Atypical soil carbon distribution across a tropical steepland forest catena. *Catena*, 87, 391-397.
- Jones, D. L., Nguyen, C. y Finlay, RD (2009). Flujo de carbono en la rizosfera: comercio de carbono en la interfaz suelo-raíz. *Plant and Soil* 321(1-2), 5-33.
- Jurado, M. A., Ordoñez, H. R. y Burbano, T. C. (2020). Evaluación de la captura de carbono en sistemas productivos de café (*Coffea arabica* L.), Consacá, Nariño, Colombia. *Revista Luna Azul*, (51), 166-181.

- Köbrich, C., Rehman, T. y Khan, M., (2003). Typification of farming systems for constructing representative farm models: Two illustrations of the application of multi-variate analyses in Chile and Pakistan. *Agricultural Systems* 76(1), 141-157.
- Kumar, L. y Mutanga, O. (2017). Remote sensing of above-ground biomass. *Remote Sensing*, 9(9), 935. <https://doi.org/10.3390/rs9090935>
- Kurniatun, H., Agus, F., Velarde, S. y Van Noordwijk, M. (2011). Medición del carbono de los usos de la tierra. In D. White y P. Minang, (Eds.), *Estimación de costos de oportunidad de REDD+* (pp 5-30). Banco Mundial.
- Läderach, P., Hagggar, J., Lau, C., Eitzinger, A., Ovalle, O., Baca, M., Jarvis, A. y Lundy, M., (2011). *Café mesoamericano: Desarrollo de una estrategia de adaptación al cambio climático*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- Läderach, P., Ramirez-Villegas, J., Navarro-Racines, C., Zelaya, C., Martinez-Valle, A. y Jarvis, A. (2017). Climate change adaptation of coffee production in space and time. *Climatic Change*, 141(1), 47-62. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1788-9>
- Lagos-Burbano, T., Cruz, Z., Muñoz, J. y Andrade, D. (2021). Balance de energía en sistemas productivos de café variedad castillo en el departamento de Nariño (Colombia). *Rev. FAGROPEC*, 13(1), 44-59. <https://doi.org/10.47847/fagropec.v13n1a5>
- Lagos-Burbano, T. C., Criollo Escobar, H., García Alzate, J., Muñoz Belalcazar, J., López Gómez, J., Benavides Arteaga, V. y Dulce Delgado, J. (2019). *El Cultivo del Café (Coffea arabica L.) en Nariño*. Editorial Universidad de Nariño.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304, 1623-1627

Referencias

- Lamo De Espinosa, J. (2016). *Crítica de libros «Agricultura, cambio climático y secuestro de carbono»*. Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros.
- Lau, C., Jarvis, A., y Ramírez, J., (2011). *Agricultura colombiana: Adaptación al cambio climático*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- Lavelle, P. T., Decaëns, M., Aubert, S., Barot, M., Blouin, F., Bureau, P., Margerie, P., Mora, P. y Rossi, J. P. (2006). Soil invertebrates 65 and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 42(Supplement 1), S3-S15.
- León Guevara, J. A. (2006). Estrategias de vida en familias cafeteras y su relación con la riqueza etnobotánica de fincas en el departamento de Caldas, Colombia [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)]. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2887>
- Leonel, H.F., Delgado-Vargas, I.A., Molina-Moreno, A.A., & Cadena-Pastrana, A. (2023). Coffee farm typification to implement technologies for adapting to climate change, Municipality of Buesaco (Nariño, Colombia). *Información tecnológica*, 34(3), 31-42. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642023000300031>
- Leonel, H.F., Molina-Moreno, A.A., Delgado-Vargas, I.A., & Luna-Cabrera, G.C. (2022). *Estrategias de adaptación a la variabilidad y cambio climático en sistemas productivos cafeteros, Buesaco - Nariño*. Editorial: Universidad de Nariño. ISBN: 978-628-7509-83-2
- Loaiza, W., Carvajal, Y., y Ávila, Á. (2014). Agroecological evaluation of agricultural production systems in the Centella watershed (Dagua, Colombia). *Colombia Forestal*, 17(2), 161–179.
- López-Reyes, L. Y., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P., Zavala-Cruz, J., Gómez-Guerrero, A. y Posada-Cruz, S. (2016). Carbono

- almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) de diferentes edades. *Madera y bosques*, 22(3), 49-60. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231456>
- López-Sarmiento, J. A., Villalba, D. A., Salazar-Gutiérrez, L. F., y Cárdenas-Salazar, O. A. (2012). Manejo integrado de arvenses en el cultivo de café: Nueva alternativa de control químico. En J. A. Lopez y D. A. Villalba. (Eds.), *Avances Técnicos Cenicafe* (1-8).
- Lovell, C., Mandondo, A., y Moriarty, P., (2002). The question of scale in integrated natural resource management. *Conservation Ecology*, 5(2), 25.
- Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., Li, G. y Moran, E. (2016). Estudio de métodos de estimación de biomasa aérea basados en teledetección en ecosistemas forestales. *Revista Internacional de la Tierra Digital*, 9(1), 63-105.
- Machado, M., Ríos, L. A. (2016). Sustentabilidad en agroecosistemas de café de pequeños agricultores. Revisión sistemática. IDESIA (Chile), 34(2), 15-23.
- Madry, W., Mena, Y., Roszkowska-Madra, B., Gozdowski, D., Hryniewski, R., y Castel, J. M. (2013). An overview of farming system typology methodologies and its use in the study of pasture-based farming system: A review. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11(2), 316–326.
- Malagón, R. y Prager, M. (2001). *El enfoque de sistemas: Una opción para el análisis de las unidades de producción agrícola*. Universidad Nacional de Colombia.
- Manchabajoy Cañar, J. P., Andrade Díaz, D., y Castillo Marín, Á. J. (2022). Captura de carbono en sistemas de producción de café en el departamento de Nariño. *Ciencia y Agricultura*, 19(1), 28-44. <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n1.2022.13358>.

Referencias

- Manson, R., López, F., Sosa, V., y Ortega, A. (2018). *Biodiversidad y otros servicios ambientales en cafetales-Manual de mejores prácticas*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Martínez, E., Fuentes, J. P., y Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.
- Masera, O., Astier, M., y López. Ridaura, M., (2000). El marco de evaluación del MESMIS. En: Sustentabilidad y sistemas campesinos. Cinco experiencias de evaluación en el México Rural. Masera, O y López-Ridaura Editores. 346p.
- Masera, O., Astier, M., López-Ridaura, S. (1999). *Sustentabilidad y manejo de Recursos Naturales*. Mundi-Prensa México.
- Masera, O., Astier, M., & López-Ridaura, S. (2000). El marco de evaluación MESMIS. *Sustentabilidad y Sistemas Campesinos. Cinco experiencias de evaluación en el México rural*. Omar M. y S. López-Ridaura (eds.). GIRA AC/Mundi-Prensa/PUMA, México, 14-44.
- Merma, I. y Julca, A. (2012). Caracterización y evaluación de la sustentabilidad de fincas en alto Urubamba, Cusco, Perú. *Ecología Aplicada*, 11(1), 1-11.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [Minagricultura]. (2020). *Cadena café. Dirección de cadenas agrícolas y forestales*.
- Miranda, D. y Carranza, C. (2013). *Caracterización, clasificación y tipificación de los sistemas productivos de caducifolios los frutales caducifolios*.
- Moguel, P., y Toledo, V. M. (1999). Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology*, 13(1), 11-21. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.97153>

- Montagnini, F. y Metzel, R. (2015). Biodiversidad, manejo de nutrientes y seguridad alimentaria en huertos caseros mesoamericanos. En F. Montagnini, E. Somarriba, E. Murgueitio, H. Fassola, y B. Eibl (Eds.), *Sistemas agroforestales: funciones productivas, socioeconómicas y ambientales* (pp. 381-403). CIPAV.
- Monteiro, A., y Santos, S. (2022). Enfoque sostenible para el manejo de malezas: El rol del manejo de precisión de malezas. *Agronomía*, 12(1), 118.
- Montilla, P., Arcilka, P., Aristizabal, L., Montoya, R., Puerta, Q., Oliveros, T., y Cadena, G., (2008). Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de beneficio húmedo tradicional. *CENICAFÉ*, 59(2), 120–142.
- Moreno, A. M., Hernández, E. y Grisales, L. (2005). Productividad del sistema: café intercalado con plátano en barreras. *CENICAFÉ*, 56(1), 79-85.
- Muñoz-Rodríguez, M.; Delgado-Vargas, I.; Guerrero, J.; Andrade, A. (2020). Physical properties of soil in the stage of establishment an agroforestry system in the High Andean zone. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 37(1): 70-79. doi: <https://doi.org/10.22267/rcia.203701.128>
- Muñoz-Rodriguez, M. A., & Santacruz-Ortiz, A. C. (2024). Edaphic macrofauna in the establishment of an agroforestry system in the High Andean region of Southern Colombia. *Revista De Ciencias Agrícolas*, 41(1), e1223. <https://doi.org/10.22267/rcia.20244101.223>
- Murray R. Spiegel y Larry J. Stephens. 2005. Estadística. 4ta edición. Mc Graw-Hill. México, Nair, P. R., Kumar, B. M., & Nair, V. D. (2021). *An introduction to agroforestry: Four decades of scientific developments* (pp. 1-649). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-75358-0>
- Nair, P. R., Kumar, B. M. y Nair, V. D. (2021). *An introduction to agroforestry: Four decades of scientific developments*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-75358-0>

Referencias

- Naredo, J. (2009). Economía y poder: megaproyectos: recalificaciones y contrataciones. En F. Aguilera y J. Naredo. (Eds.), *Economía, poder y megaproyectos* (pp. 19-52). Fundación César Manrique.
- Nicholls, C. I., Henao, A. y Altieri, M. A. (2015). Agroecología y el diseño de sistemas agrícolas resilientes al cambio climático. *Agroecología*, 10(1), 7-31.
- Ordóñez-Jurado, H. R. (2014). *Estudio de la sustentabilidad de los sistemas de producción de café mediante indicadores, en el municipio de La Unión Nariño*. [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia].
- Ordóñez-Jurado, H., Navia-Estrada, J. y Ballesteros-Possú, W. (2019). Tipificación de sistemas de producción de café en La Unión Nariño, Colombia. *Temas Agrarios*, 24(1), 53–65. <https://doi.org/10.21897/rta.v24i1.1779>
- Ordoñez, H., Martinez, D., y Martinez, M. (2021). Woody species associated with coffee production systems in southern Colombia. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 38(1), 4-16.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO). (2010). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Agricultura climáticamente inteligente.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO). (2014). *Emisiones de GEI de la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra en América Latina y el Caribe*. FAO. <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/238841/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO). (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura*. <https://www.fao.org/3/i6937es/I6937ES.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO). (2021). *Agroforestry. Food and Agriculture Organization*. <http://www.fao.org/forestry/agroforestry/en/>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO). (2022). *The state of food and agriculture: Leveraging automation for transformative agriculture*. Naciones Unidas. <https://www.fao.org/3/cb9479en/cb9479en.pdf>

Ovalle-Rivera, O., Läderach, P., Bunn, C., Obersteiner, M. y Schroth, G. (2015). Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. *PLOS ONE*, 10(4), e0124155. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124155>

Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). (2004). *Climate change. Spatial report on emissions scenarios. intergovernmental panel on climate change (IPCC)*. <http://grida.no/climate/ipcc>

Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). (2013). *Cambio Climático 2013: Bases Físicas. Resumen para responsables de política*. OMM, PNUMA.

Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). (2019). *Climate change and land. An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCLFull-Report-Compiled-191128.pdf>

Referencias

- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). (2023). *Cambio Climático 2023: Informe de Síntesis*.
- Pardos, J. A. (2010). *Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria Ministerio de Ciencia e Innovación.
- Paz, F., Wong, J. y Torres, R. (2015). *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2015*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. y Wagner, F. (2003). *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. Instituto Nacional de Ecología. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf.html>
- Perfecto, I., Vandermeer, J., Mas, A. y Pinto, L. S. (2005). Biodiversity, yield, and shade coffee certification. *Ecological Economics*, 54(4), 435-446. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.10.009>
- Perfecto, I., Vandermeer, J., y Wright, A. (2019). *Nature's matrix: linking agriculture, biodiversity conservation and food sovereignty*. Routledge.
- Pinoargote, M., Cerda, R., Mercado, L., Aguilar, A., Barrios, M., & Somarriba, E. (2017). Carbon stocks, net cash flow and family benefits from four small coffee plantation types in Nicaragua. *Forests, Trees and Livelihoods*, 26(3), 183-198. <https://doi.org/10.1080/14728028.2016.1268544>.

- Plataforma Intergubernamental de Ciencia-Política sobre Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos (IPBES). (2019). *Informe global sobre biodiversidad y servicios ecosistémicos*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>
- Pokorny, B., Godar, L., Hoch, J., Johnson, J., De Koning, G., Medina, R., Steinbrenner, V., Vos, Y. y Weigelt. (2011). *La producción familiar como alternativa de un desarrollo sostenible para la Amazonía: Lecciones aprendidas de iniciativas de uso forestal por productores familiares en la Amazonía boliviana, brasilera, ecuatoriana y peruana*. CIFOR
- Poorter, L., Bongers, F., Aide, T. M., Almeyda Zambrano, A. M., Balvanera, P., Becknell, J. M. y Rozendaal, D. M. A. (2015). Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*, 530(7589), 211-214. <https://doi.org/10.1038/nature16512>
- Porras Vanegas, C. (2006). *Comparación de sistemas de manejo en fincas de café orgánico y convencional dentro del Corredor Biológico Turrialba-Jiménez, Costa Rica*. [Tesis de posgrado, CATIE].
- Posada, S., Alvarado, A., Cortina, G., Solarte, C., Duque, O., Baldión, R., Guzmán, M. (2006). *La variedad Castillo® el Tambo: Para regiones cafeteras de Cauca, Nariño, Huila, Tolima y Valle del Cauca*. CENICAFÉ.
- Puerta, G. I. (2013). *Buenas prácticas agrícolas para el café*. Centro Nacional de Investigaciones de Café.
- Quiroz Guerrero, I., Pérez Vázquez, A., Landeros Sánchez, C., Gallardo López, F., Velasco Velasco, J. y Benítez Badillo, G. (2021). Análisis bibliométrico del conocimiento científico sobre resiliencia de agroecosistemas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(4), 617-628. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i4.2516>.

Referencias

- Ramachandran Nair, P. K., Mohan Kumar, B. y Nair, V. D. (2009). *Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. Journal of plant nutrition and soil science*, 172(1), 10-23.
- Ramírez-Builes, V. H., Jaramillo-Robledo, Á. y Peña-Quñones, A. J. (2013). Gestión del riesgo agroclimático: Vulnerabilidad y capacidad de adaptación del sistema de producción de café. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, (Ed.), *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (Vol. 1, pp. 91–114). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/cenbook0026_06
- Red Internacional de Metodología de Investigación de Sistemas de Producción-RIMISP. (1995). *Módulo de capacitación: Tipificación de sistemas de producción* (Tomo I). Valgraf Ltda.
- Ricaurte, L., Wantzen, K., Agudelo, E., Betancourt, B. y Jokela, J. (2014). Participatory rural appraisal of ecosystem services of wetlands in the Amazonian Piedmont of Colombia: Elements for a sustainable management concept. *Wetlands Ecology and Management*, 22(4), 343-361. <https://doi.org/10.1007/s11273-013-9332-4>
- Rice, R. y Ward, J. (1997). *El café, la conservación ambiental, y el comercio en el hemisferio occidental*. Centro de Aves Migratorias (SMBC) y Consejo para la Defensa de los Recursos Naturales (NRDC).
- Riofrío, J., Herrero de Aza, C., Grijalva, J. y Bravo, F. (2013). Modelos para estimar la biomasa de especies forestales en sistemas agroforestales de la ecorregión andina del Ecuador [Ponencia]. *Congresos Forestales. Memorias VI Congreso Forestal Español*. Vitoria-Gasteiz.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F. y Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *nature*, 461(7263), 472-475, doi:10.1038/461472a.

- Rügnitz Tito, M., Chacón, M. L. y Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. Centro Mundial Agroflorestal (ICRAF) / Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). http://www.aecidcf.org.co/Ponencias/2016/septiembre/ MI120916-1/Ref.7. Guia_Carbono.pdf
- Sachs, J. D. (2015). *The age of sustainable development*. Columbia University Press. Datos bibliograficos
- Sadeghian, K., Salamanca, J., Cardona, C. (2004). *Indicadores de la calidad del en algunos agroecosistemas de la zona cafetera colombiana*. CIAT.
- Sadeghian, K. (2009). Calibración de análisis de suelos para N P K y Mg en cafetales bajo sol y semisombra. *Cenicafé*, 60(1), 7-24.
- Salamanca Gavidia, L. A. (2017). *Evaluación de la producción de café bajo sombra con especies arbóreas en el municipio de Pajarito*. [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD]. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13725/1116546426.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Salazar Iglesias, S. (2008). *Estudio de procesos ecológicos para el desarrollo sostenible del Castaño (Castanea sativa Mill.) de la Sierra de Francia*. [Trabajo de grado, Universidad de Salamanca].
- Sánchez, D. (2016). *Dinámica del carbono orgánico en suelos de sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca*. [Trabajo de maestría, Universidad De Ciencias Aplicadas y Ambientales].
- Sánchez, L. (2018). *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: una visión gráfica*.
- Sánchez, Y., Tapia, M. y Salazar, J. (2017). Importancia cultural de vegetación arbórea en sistemas ganaderos del municipio de San Vicente del

Referencias

- Caguán, Colombia. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 20(2), 393-401.
- Sánchez, L., Durán, S., Vélez, J., García, R. y Botero, J. (2013). Estudios regionales de biodiversidad en las zonas cafeteras de Colombia. *CENICAFÉ*, 378, 120-178.
- Sánchez, L., Botero, J. y Vélez, J. (2007). Estructura, diversidad y potencial para la conservación de sombrero en cafetales de tres localidades de Colombia. *CENICAFÉ*, 58(4), 304-323.
- Sarandón, S. y Flores, C. (2014). *Agroecología: Bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. <https://doi.org/10.35537/10915/37280>
- Sarandón, S., Flores, C., Gargolff, A. y Blandi, M. (2014). Análisis y evaluación de agroecosistemas: construcción y aplicación de indicadores. En S. Sarandón y C. Flores (eds.), *Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables* (pp. 375-41), Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.
- Schroth, L., Lehmann, J., Rodrigues, M., Barros, E. y Macêdo, J. (2001). Plant-soil interactions in multiestrata agroforestry in the humid tropics. *Agroforestry Systems. Netherlands*, 53, 85-102.
- Schuschny, A. R., & Soto de la Rosa, H. (2009). Guía metodológica: diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible, CEPAL, ONU., Santiago de Chile (2009).
- Segura, M., Kanninen, M. y Suárez, D. (2006). Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems*, 68(2), 143-150.

- Segura, M. y Andrade, H. (2008). ¿Cómo hacerlo? ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería en las Américas*. (46), 89-96. https://www.worldcocoafoundation.org/wp-content/uploads/files_mf/segura2008a.pdf
- Sepúlveda, S. y Biograma, S. (2008). *Metodología para estimar el nivel de desarrollo sostenible de territorios*. IICA.
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Tanveer, M., Sidhu, G. P., Handa, N., Kohli, S. K., Yadav, P., Bali, A. S., Parihar, R. D., Dar, O. I., Singh, K. B., Jasrotia, S., Bakshi, P., Ramakrishnan, M., Kumar, S., Bhardwaj, R. y Thukral, A. K. (2019). Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. *SN Applied Sciences*, 1, 1-16.
- Smith, P., Soussana, J. F., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D. P., Batjes, N. H., van Egmond, F., McNeill, S., Kuhnert, M., Arias-Navarro, C., Olesen, J. E., Chirinda, N., Fornara, D., Wollenberg, E., Álvaro-Fuentes, J., Sanz-Cobena, A. y Klumpp, K. (2020). How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil Carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Global Change Biology*, 26(1), 219-241.
- Snowdon, P., Raison, J., Keith, H., Montagu, K., Bi, K., Ritson, P., Grierson, P., Adams, M., Burrows, W. y D. Eamus. (2001). *Protocol for sampling tree and stand biomass. National carbon accounting system*. Australian Greenhouse Office.
- Sosa, L., Escamilla, E. y Díaz, C. (2004). Organic coffee. En J. N. Wintgens (Ed.), *Coffee: Growing, processing, sustainable production* (pp. 339-354). Wiley-VCH.
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M. y Murphy, A. (2015). *Fisiología y desarrollo vegetal* (6.ª ed). Sinauer Associates.

Referencias

- Thomazini, A., Mendonça, E., Teixeira, D., Almeida, I., La Scala, N., Canelas, L. y Schaefer, C. (2015). CO₂ and N₂O emissions in a soil chronosequence at a glacier retreat zone in Maritime Antarctica. *Sci. Total Environ.* 521, 336–345.
- Tittonell, P. (2019). Las transiciones agroecológicas: múltiples escalas, niveles y desafíos. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 51(1), 231-246.
- Tonolli, A. J. (2019). Propuesta metodológica para la obtención de indicadores de sustentabilidad de agroecosistemas desde un enfoque multidimensional y sistémico. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 51(2), 381-399.
- Trujillo, E., Héctor, I., Aristizábal, A., Bustillo, P. y Jiménez, Q. (2006). Evaluación de métodos para cuantificar poblaciones de broca del café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleóptera: Curculionidae: Scolytinae), en fincas de caficultores experimentadores. *Revista Colombiana de Entomología*, 32(1), 39 - 44.
- Tubiello, F. N., Rosenzweig, C., Conchedda, G., Karl, K., Gütschow, J., Xueyao, P., Obli-Laryea, G., Wanner, N., Yue Qiu, S. y De Barros, J. (2021). Greenhouse gas emissions from food systems: building the evidence base. *Environmental Research Letters*, 16(6), 065007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac018e>
- Turner, N. (1988). The importance of a rose: Evaluating the cultural significance of plants in Thompson and Lilloet Interior Salish. *American Anthropologist*, 90(2), 272–290. <https://doi.org/10.1525/aa.1988.90.2.02a00020>
- Urbano, M. F., Pantoja, M. F., Delgado, I. A., Cabrera, P. C., & Benavides, I. F. (2019). The effect of green fertilizers on the ecological structure of soil invertebrate communities in an andisol of Southwestern Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 67(6), 1394-1405.

- Valencia, A. y Carrillo, P. (1983). *Interpretación de análisis de suelos para café*. CENICAFÉ.
- Valencia, A. (1986). *Niveles adecuados de nutrimentos en suelos y en hojas para varios cultivos*. Avances Técnicos CENICAFÉ.
- Valencia, A. (1999). *Fisiología, nutrición y fertilización del cafeto*. CENICAFÉ-Agroinsumos del café. *Datos bibliograficos*
- Valerio, D., García, A., Acero, R., Perea, J., Castaldo, A. y Martos, J. (2004). *Metodología para la caracterización y tipificación de sistemas ganaderos*. Universidad de Córdoba.
- Vallejo, A., Rodríguez, P., Martínez, C., Hernández, P. y De Jong, B. (2007). *Guía para el diseño de proyectos MDL, forestal y de bioenergía*. CATIE.
- Velásquez, E. I., Lavelle, P. y Andrade, M. (2007). GISQ a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(12), 3066-3080.
- Villa, P. M., Martins, S. V., de Oliveira Neto, S. N., Rodrigues, A. C., Hernández, E. P. y Kim, D. G. (2020). Policy forum: Shifting cultivation and agroforestry in the Amazon: Premises for REDD+. *Forest Policy and Economics*, 118, 102217.
- Villarreyna, R. A., Avelino, J. y Cerda, R. (2020). Adaptación basada en ecosistemas: Efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en cafetales. *Agronomía Mesoamericana*, 31(2), 499-516.
- Wang, X., Wang, J. y Zhang, J. (2012). Comparisons of Three Methods for Organic and Inorganic Carbon in Comparisons of Three Methods for Organic and Inorganic Carbon in Calcareous Soils of Northwestern China. *PLOS ONE*, 7(8), e44334.

Referencias

- Wen, H., Van Meerbeek, K., Zhang, H., Peng, Y., Yue, K., Ni, X., Qiu, D., Chen, Z., Bol, R. y Wu, F. (2025). Loss of soil fauna following conversion of subtropical natural forests. *Soil Ecology Letters*, 7(3), 250315.
- Wezel, A., Herren, B. G., Kerr, R. B., Barrios, E., Gonçalves, A. L. R., y Sinclair, F. (2020). Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 1-13.
- Wilson, C., y Tisdell, C. (2001). Why farmers continue to use pesticides despite environmental, health and sustainability costs. *Ecol Econ*, 39, 449 – 462.
- Wu, H. y Xu, H. (2023) Review of Sampling and Modeling Techniques for Forest Biomass Inventory. *Agricultural & Rural Studies*, 1(10002), 2-12. <https://doi.org/10.59978/ar01010002>.
- Yepes, A., Zapata, M., Bolívar, J., Monsalve, A., Espinosa, S. M., Sierra-Correa, P. C. y Sierra, A. (2016). Ecuaciones alométricas de biomasa aérea para la estimación de los contenidos de carbono en manglares del Caribe Colombiano. *Revista de Biología Tropical*, 64(2), 913-926.
- Yerena, E., Jiménez, J. y De la Cruz, R. (2014). *Dinámica del carbono en ecosistemas forestales: absorción, fijación y su impacto en el suelo*. *Revista de Ciencias Ambientales*, 45(2), 123-135.
- Zapata, P. (2019). Composición y estructura del dosel de sombra en sistemas agroforestales con café de tres municipios de Cundinamarca, Colombia. *Ciencia Forestal*, 29(2), 685-697.
- Zavala, W., Merino, E. y Peláez, P. (2018). Influencia de tres sistemas agroforestales del cultivo de cacao en la captura y almacenamiento de carbono. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 493-501. <http://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.04>.

èditorial

Universidad de **Nariño**

Año de publicación: 2026

San Juan de Pasto - Nariño - Colombia

En la obra **Agroecosistemas Cafeteros: Caracterización y Evaluación**, la caficultura de Nariño se concibe como un sistema socioecológico complejo en el que confluyen historia, cultura y biodiversidad. El texto examina la transición desde cafetales tradicionales bajo diversos tipos de sombra, sustentados en saberes ancestrales y los modelos intensivos de agricultura convencional basados en monocultivos a libre exposición. Este proceso ha generado transformaciones profundas en la estructura ecológica y en las dinámicas productivas del territorio; frente a ello, los sistemas asociados con árboles, arbustos y otros cultivos, se perfilan como una alternativa estratégica para mitigar la crisis climática y la inestabilidad económica que enfrenta el sector.

A partir de análisis estadísticos multivariados, se identificaron cuatro modelos predominantes: a) café bajo sombra, b) bajo semisombra, c) asociado con plátano y d) libre exposición. Los resultados revelan una tensión estructural entre sistemas mientras el monocultivo privilegia altos rendimientos en el corto plazo a costa de la degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad y la dependencia de insumos químicos, por su parte, los sistemas diversificados o estratificados ofrecen mayor resiliencia frente a la variabilidad climática y estabilidad ecológica, pese a sus productividades moderadas. Mediante el Índice de Importancia Cultural (IIC), se reafirma el vínculo entre el caficultor y el componente leñoso perenne, evidenciando que especies como el guamo (*Inga spp.*) y los cítricos (*Citrus spp.*) resultan fundamentales para la seguridad alimentaria, la medicina tradicional y la provisión de servicios ecosistémicos estratégicos.

Asimismo, la aplicación del Índice General de Sustentabilidad (IGS) permite evaluar de manera integral las dimensiones ambiental, económica y social, confirmando el desempeño superior de los sistemas diversificados en la conservación de suelos y la reducción de la vulnerabilidad frente a las fluctuaciones del mercado. El estudio también demuestra que los sistemas café-árbol poseen una capacidad de captura de carbono significativamente mayor que el café cultivado sin sombra. La integración de especies como *Inga densiflora* y diversas leñosas perennes posiciona a la caficultura nariñense como una herramienta científica y práctica para el secuestro de gases de efecto invernadero. En conjunto, este manuscrito propone consolidar enfoques agroecológicos que reconozcan la multifuncionalidad del cultivo y garanticen un bienestar rural sostenible y resiliente.

ISBN: 978-628-7864-73-3



9

786287 864733



Universidad de Nariño
FUNDADA EN 1964



ACREDITADA EN ALTA CALIDAD
RESOLUCIÓN MEN 000022 - ENERO 11 DE 2023

êditorial
Universidad de Nariño

