



Costos ambientales en el sector cafetero y platanero de Caldas: caso de estudio San José

Anthony Parra Castaño
Juan Esteban Acevedo Orozco

Trabajo de grado presentado para optar al título de Contador Público

Asesor: Julián Andrés Gómez Sánchez, Doctor (PhD) en Desarrollo Sostenible

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas
Contaduría Pública
Manizales, Caldas, Colombia

2025

Cita	(Parra Castaño & , Acevedo Orozco, 2025)
Referencia	Parra Castaño A. & , Acevedo Orozco J.E. (2025). <i>Costos ambientales en el sector cafetero y platanero de Caldas: caso de estudio San José. Manizales</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Manizales. RIDUM:
Estilo APA 7 (2020)	Repositorio Institucional Universidad de Manizales.



Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [mencionar herramientas utilizadas, por ejemplo, ChatGPT, , de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: biblioteca.umanizales.edu.co

Repositorio Institucional: ridum.umanizales.edu.co

Universidad de Manizales: umanizales.edu.co

Revistas: revistasum.umanizales.edu.co

Fondo Editorial: editorialum.umanizales.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	6
Abstract.....	6
Introducción	8
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES.....	12
Planteamiento del problema	12
Pregunta de investigación.....	15
Justificación.....	16
Objetivos.....	17
Objetivo General.....	17
Objetivos Específicos	17
Antecedentes.....	18
Antecedentes Nacionales (Colombia)	19
Antecedentes Internacionales.....	21
Marco Teórico.....	24
Impactos Ambientales de la Producción de Café y Plátano	24
Valoración Económica de los Impactos Ambientales en la Agricultura	26
Estrategias de Sostenibilidad y Mitigación en Fincas Cafeteras y Plataneras	29
Metodología.....	34
Tipo de investigación.....	34
Técnicas de investigación.....	36
Herramientas de investigación	37
1. Resultados generales de costos ambientales	76
2. Contaminación hídrica	76
3. Deforestación y pérdida de biodiversidad.....	77
4. Degradación del suelo	77
5. Factores sociales y económicos.....	78
6. Beneficios potenciales de la mitigación.....	78
7. Interpretación general.....	78

Análisis	79
Conclusiones.....	80
Referencias.....	83

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Matriz de prevalencia de intensiva de manejo y recursos afectados</i>	40
Tabla 2. <i>Prácticas con mayor impacto ambiental en el cultivo de plátano:</i>	43
Tabla 3. <i>Costos ambientales de la finca</i>	51
Tabla 4. <i>Costos ambientales por componente:</i>	52
Tabla 5. <i>Costos anuales asociados a la degradación ambiental</i>	52
Tabla 6. <i>La valoración económica de la contaminación</i>	54
Tabla 7. <i>Costos detallados por degradación de suelos</i>	56
Tabla 8. <i>El análisis diferenciado por tipo de cultivo</i>	57
Tabla 9. <i>Cinco prácticas con mayores costos ambientales</i>	58
Tabla 10. <i>Costos ambientales en horizontes temporales</i>	59
Tabla 11. <i>Beneficios económicos potenciales de implementar prácticas sostenibles</i>	60
Tabla 12. <i>Síntesis de costos ambientales por componente en las tres fincas evaluadas (San José, Caldas)</i>	61

Resumen

El municipio de San José, ubicado en el departamento de Caldas, constituye un caso representativo de los retos ambientales asociados a la producción agrícola en el Eje Cafetero colombiano. El presente estudio tiene como objetivo evaluar los costos ambientales derivados de la producción de café y plátano en tres fincas del municipio (El Triunfo, Patio Bonito y La Menja), con un enfoque en la deforestación, la contaminación hídrica y la degradación de suelos. Se aplicó una metodología mixta que integró entrevistas, muestreos de suelos y aguas, análisis geoespaciales y métodos de valoración económica.

Los resultados evidencian que los costos ambientales anuales ascienden a \$173.842.500 COP, siendo la contaminación hídrica el componente más costoso (35,8%), seguida por la deforestación y pérdida de biodiversidad (33,8%) y la degradación de suelos (30,4%). Estos hallazgos muestran que las prácticas agrícolas tradicionales generan externalidades negativas significativas que afectan la sostenibilidad del sistema productivo. Se concluye que la adopción de prácticas sostenibles, como sistemas agroforestales y manejo integrado de plagas, puede reducir dichos costos y mejorar la rentabilidad a mediano plazo. Este estudio aporta insumos relevantes para el diseño de políticas públicas y la implementación de estrategias de mitigación ambiental en territorios cafeteros.

Palabras clave: Café, Plátano, Costos ambientales, San José, Sostenibilidad

Abstract

The municipality of San José, located in the department of Caldas, represents a relevant case of the environmental challenges associated with agricultural production in the Colombian Coffee Region. This study aims to evaluate the environmental costs derived from coffee and plantain production in three farms of the municipality (El Triunfo, Patio Bonito, and La Menja), focusing on deforestation, water pollution, and soil degradation. A mixed-methods approach was

applied, integrating interviews, soil and water sampling, geospatial analysis, and economic valuation methods.

Results show that annual environmental costs amount to COP \$173,842,500, with water pollution being the most expensive component (35.8%), followed by deforestation and biodiversity loss (33.8%), and soil degradation (30.4%). Findings indicate that traditional farming practices generate significant negative externalities that compromise the sustainability of the production system. The research concludes that the adoption of sustainable practices, such as agroforestry systems and integrated pest management, can reduce these costs and increase profitability in the medium term. This study provides relevant inputs for public policy design and the implementation of environmental mitigation strategies in coffee-growing territories.

Keywords: Coffee, Plantain, Environmental costs, San José, Sustainability

Introducción

El Eje Cafetero colombiano, reconocido mundialmente por su paisaje cultural y la calidad excepcional de su café, enfrenta en la actualidad uno de los desafíos más complejos de su historia: equilibrar la productividad agrícola con la sostenibilidad ambiental.

En este contexto, el municipio de San José, ubicado estratégicamente en el corazón del departamento de Caldas, emerge como un caso de estudio paradigmático que refleja las tensiones y oportunidades inherentes a la transición hacia modelos de producción agrícola más sostenibles.

La agricultura en San José constituye el motor económico fundamental del municipio, con una estructura productiva donde el café representa aproximadamente el 65% de la actividad agrícola, complementado por un 35% de cultivos diversificados, principalmente plátano, que ha ganado relevancia como alternativa de diversificación productiva para los agricultores locales.

Esta configuración productiva no es fortuita; responde a las condiciones geográficas privilegiadas de la región, con altitudes que oscilan entre 1.200 y 1.800 metros sobre el nivel del mar, creando microclimas ideales para el cultivo de café arábica de alta calidad y otros productos agrícolas de importancia regional.

Colombia se posiciona como el segundo productor mundial de café después de Brasil, contribuyendo con aproximadamente 14 millones de sacos de 60 kilogramos anuales, lo que representa cerca del 8% de la producción global.

Esta actividad sustenta a más de 500.000 familias en todo el territorio nacional, generando cadenas de valor que trascienden lo meramente productivo para configurar identidades culturales y territoriales profundamente arraigadas.

Por su parte, el plátano se ha consolidado como el segundo producto de mayor consumo en Colombia después del arroz, con una producción nacional que alcanzó aproximadamente 3.6 millones de toneladas en 2022, cultivadas en alrededor de 150.000 hectáreas distribuidas principalmente en pequeñas y medianas parcelas.

Sin embargo, este éxito productivo ha venido acompañado de costos ambientales significativos que tradicionalmente no han sido incorporados en los análisis económicos convencionales de la actividad agrícola.

La intensificación de los cultivos de café y plátano ha generado impactos ambientales negativos que incluyen procesos acelerados de deforestación, contaminación de fuentes hídricas, degradación progresiva de suelos, pérdida de biodiversidad y emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático global.

La deforestación emerge como uno de los impactos más visibles y preocupantes de esta dinámica productiva. Según investigaciones especializadas, el sector caficutor ha sido identificado como uno de los principales desencadenantes de la deforestación en Colombia, estimándose que aproximadamente el 60% de la deforestación rural se debe a la ampliación de cultivos, particularmente en áreas ecológicamente sensibles.

Esta expansión de la frontera agrícola ha disminuido significativamente la cobertura forestal, afectando la capacidad de los ecosistemas para regular el ciclo hídrico, preservar la biodiversidad y mantener el equilibrio ecológico regional.

La contaminación hídrica constituye otro impacto crítico derivado del uso intensivo de agroquímicos en los sistemas productivos tradicionales. Las fuentes de agua cercanas a los cultivos han experimentado un deterioro progresivo en su calidad, afectando ecosistemas acuáticos y contribuyendo a la crisis hídrica que enfrentan muchas regiones del país. Esta situación se ve agravada por el manejo inadecuado de aguas residuales del procesamiento del café, particularmente las aguas mieles, que cuando no reciben tratamiento apropiado pueden generar impactos significativos en los cuerpos de agua receptores.

La degradación del suelo representa un tercer eje crítico de impacto ambiental. Las prácticas agrícolas intensivas, especialmente en el cultivo de plátano en zonas de alta pendiente, han acelerado los procesos erosivos, disminuyendo la fertilidad natural de los suelos y aumentando el riesgo de desertificación.

Esta situación compromete no solo la productividad agrícola futura, sino también la estabilidad de los ecosistemas y la disponibilidad de servicios ecosistémicos esenciales para las comunidades locales.

La transformación de ecosistemas naturales diversos en monocultivos extensivos ha reducido significativamente la biodiversidad local, afectando servicios ecosistémicos fundamentales como la polinización, el control biológico de plagas, la regulación climática y la conservación de recursos genéticos.

Esta pérdida de biodiversidad genera vulnerabilidades en los sistemas productivos y reduce su capacidad de adaptación frente a eventos climáticos extremos y cambios ambientales.

Finalmente, las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a prácticas agrícolas ineficientes, incluyendo la quema de materia orgánica, el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados y la conversión de ecosistemas naturales, contribuyen significativamente al cambio climático global, generando externalidades negativas que trascienden las fronteras locales y regionales.

En este contexto, surge la necesidad urgente de desarrollar marcos analíticos que permitan cuantificar con precisión estos costos ambientales e identificar estrategias de mitigación y restauración que resulten económicamente viables para los productores locales.

La presente investigación se enfoca específicamente en tres fincas representativas del municipio de San José: El Triunfo, Patio Bonito y La Menja, con el propósito de desarrollar un análisis detallado y contextualizado de los costos ambientales asociados a la producción de café y plátano.

La relevancia de este estudio trasciende el ámbito puramente académico para insertarse en el debate contemporáneo sobre modelos de desarrollo sostenible en territorios rurales.

Los resultados de esta investigación proporcionarán información crucial para el diseño de políticas públicas y programas de incentivos que faciliten la transición hacia sistemas de producción más sostenibles, contribuyendo simultáneamente al bienestar económico de los productores y a la conservación de los ecosistemas locales.

La metodología propuesta integra enfoques cuantitativos y cualitativos que permiten no solo identificar y cuantificar los principales impactos ambientales, sino también evaluar la viabilidad económica y social de diferentes estrategias de mitigación adaptadas al contexto específico del municipio de San José.

Esta aproximación metodológica busca generar conocimiento aplicado que pueda ser utilizado tanto por productores individuales como por instituciones públicas y privadas interesadas en promover la sostenibilidad del sector agrícola en la región.

En última instancia, esta investigación aspira a contribuir a la construcción de un modelo de desarrollo agrícola que armonice la rentabilidad económica con la conservación ambiental, estableciendo las bases para la transición hacia sistemas productivos regenerativos que garanticen

la sostenibilidad a largo plazo del sector cafetero y platanero en el municipio de San José y, por extensión, en el conjunto del Eje Cafetero colombiano.

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

Planteamiento del problema

El municipio de San José, ubicado en el corazón del departamento de Caldas dentro del Eje Cafetero colombiano, representa un claro ejemplo de la dinámica agrícola característica de esta importante región. Su economía depende fundamentalmente de la producción agrícola, donde el café constituye aproximadamente el 65% de la actividad, mientras que el 35% restante corresponde a cultivos de pan coger, con especial relevancia del plátano como alternativa de diversificación productiva (Cámara de Comercio de Caldas, 2022).

Colombia, reconocida mundialmente por la calidad de su café, ocupa el segundo lugar en producción global después de Brasil, con aproximadamente 14 millones de sacos de 60kg anuales, lo que representa cerca del 8% de la producción mundial (FNC, 2023). Esta actividad sustenta a más de 500.000 familias en todo el país, aprovechando condiciones geográficas privilegiadas con altitudes entre 1.200 y 1.800 msnm que favorecen el cultivo de café arábica de alta calidad.

Por su parte, el plátano se ha consolidado como el segundo producto más consumido en Colombia después del arroz. En 2022, la producción nacional alcanzó aproximadamente 3.6 millones de toneladas, con una superficie sembrada de alrededor de 150.000 hectáreas.

En San José, los cultivos de plátano se concentran principalmente en pequeñas y medianas parcelas de entre 1 y 5 hectáreas, destinadas mayoritariamente al mercado local y regional.

El crecimiento e intensificación de los cultivos de café y plátano en San José ha generado impactos ambientales negativos significativos que no han sido adecuadamente cuantificados ni incorporados en los costos de producción. Según Vélez et al. (2018), el sector caficultor ha sido uno de los principales desencadenantes de la deforestación en Colombia, estimándose que el 60% de la deforestación rural se debe a la ampliación de cultivos, particularmente en áreas ecológicamente sensibles o restringidas.

Los principales impactos ambientales identificados incluyen la deforestación, la contaminación hídrica, la degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad y las emisiones de gases efecto invernadero. La expansión de la frontera agrícola ha disminuido significativamente

la cobertura forestal, afectando la capacidad de los ecosistemas para regular el ciclo hídrico y preservar la biodiversidad.

La FAO (2019) señala que la deforestación en Colombia está directamente relacionada con la agricultura, incluyendo al sector cafetero. El uso intensivo de agroquímicos ha deteriorado la calidad de las fuentes de agua cercanas a los cultivos, afectando ecosistemas acuáticos y contribuyendo a la crisis hídrica que enfrentan muchas regiones del país. Las prácticas agrícolas intensivas, especialmente en el cultivo de plátano en zonas de alta pendiente, han acelerado los procesos erosivos, disminuyendo la fertilidad natural y aumentando el riesgo de desertificación.

La transformación de ecosistemas naturales en monocultivos ha reducido significativamente la diversidad biológica local, afectando servicios ecosistémicos esenciales.

Finalmente, las emisiones de gases efecto invernadero asociadas a prácticas agrícolas ineficientes y a la quema de materia orgánica contribuyen al cambio climático.

La sostenibilidad ambiental de los cultivos de café y plátano en San José requiere la implementación de prácticas que reduzcan los impactos negativos y restauren los ecosistemas afectados.

Entre las estrategias efectivas se encuentran los sistemas agroforestales, que integran árboles nativos en los cultivos, reduciendo la erosión hasta en un 70% según estudios de CENICAFÉ (2022), mejorando la retención de agua, aumentando la biodiversidad y generando microclimas favorables para los cultivos.

La agricultura orgánica, con la sustitución de agroquímicos por abonos orgánicos y control biológico de plagas, puede reducir la contaminación de suelos y aguas en aproximadamente un 80% (Federación Nacional de Cafeteros, 2023).

El uso de Bioinsumos tiene un costo aproximado de \$2.900.000/hectárea/año para café y \$2.200.000/hectárea/año para plátano, representando un ahorro del 25% respecto a los insumos químicos convencionales.

El manejo integrado de plagas puede reducir el uso de plaguicidas hasta en un 60%, con un costo de implementación de aproximadamente \$850.000/hectárea/año. Las obras de conservación de suelos, como barreras vivas, terrazas y cobertura vegetal, pueden reducir la erosión en zonas de

pendiente hasta en un 85%, con costos de implementación entre \$1.200.000 y \$1.800.000/hectárea/año (Ministerio de Ambiente, 2023).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales, como biodigestores y sistemas de filtración para el tratamiento de aguas mieles del café, pueden reducir la contaminación hídrica en un 90%, con costos de instalación de aproximadamente \$3.500.000 por unidad productiva.

Finalmente, las certificaciones ambientales como Rainforest Alliance, UTZ o Comercio justo permiten acceder a mercados diferenciados con precios superiores entre un 15% y 30%, compensando parcialmente los costos de implementación de prácticas sostenibles aproximadamente \$2.000.000/hectárea/año.

Según estudios recientes del Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ, 2023), la implementación de prácticas sostenibles en el cultivo de café representa una inversión inicial de aproximadamente \$5.800.000/hectárea, con retornos económicos positivos a partir del tercer año de implementación.

Para el plátano, la inversión inicial se estima en \$4.200.000/hectárea, con retornos positivos desde el segundo año. Los beneficios económicos directos incluyen la reducción en costos de fertilizantes y plaguicidas (25-40%), mejora en la calidad del producto y acceso a mercados diferenciados (sobrepeso del 15-30%), aumento en la productividad a mediano plazo (10-20%) y mayor resiliencia frente al cambio climático, reduciendo pérdidas por eventos extremos.

Los beneficios ambientales cuantificables representan aproximadamente \$3.650.000/hectárea/año para café y \$3.550.000/hectárea/año para plátano, considerando la reducción en costos por conservación de la fertilidad del suelo, mantenimiento de servicios ecosistémicos, secuestro de carbono y conservación de recursos hídricos.

La pregunta de investigación que surge es: ¿Cuáles son los costos ambientales derivados de las prácticas agrícolas en la producción de café y plátano en el municipio de San José, Caldas, ¿y qué estrategias de mitigación y restauración ambiental resultan más costo-efectivas para los productores locales?

Esta investigación es fundamental para el desarrollo sostenible de San José y el departamento de Caldas, pues permitirá cuantificar con precisión los costos ambientales reales de la producción agrícola actual, identificar y evaluar la relación costo-beneficio de diversas prácticas sostenibles adaptadas al contexto local, proporcionar información crucial para el diseño de

políticas públicas y programas de incentivos que faciliten la transición hacia una agricultura regenerativa, sensibilizar a los productores sobre los beneficios económicos y ambientales de las prácticas sostenibles, y establecer las bases para la creación de plataformas de seguimiento ambiental que permitan monitorear los avances y resultados de las intervenciones.

Según datos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2023), aproximadamente el 70% de los pequeños productores de café y plátano en la región cafetera no implementan prácticas sostenibles adecuadas, principalmente debido al desconocimiento de los beneficios económicos a mediano y largo plazo, y a limitaciones financieras para realizar la inversión inicial.

Esta investigación contribuirá a superar estas barreras, facilitando la transición hacia una agricultura que armonice la rentabilidad económica con la conservación ambiental en el municipio de San José.

Pregunta de investigación

¿Cuáles son los costos ambientales derivados de las prácticas agrícolas en la producción de café y plátano en el municipio de San José, Caldas?

Justificación

La presente investigación es relevante tanto desde el punto de vista ambiental como económico y social. Desde la perspectiva ambiental, permitirá identificar y valorar los costos derivados de las prácticas agrícolas actuales, visibilizando el impacto real sobre los ecosistemas locales y generando información clave para su recuperación y conservación.

Desde el punto de vista económico, la cuantificación de estos costos ambientales y el análisis comparativo entre diferentes prácticas agrícolas proporcionarán a los productores datos concretos sobre la relación costo-beneficio de adoptar prácticas sostenibles, contribuyendo a la optimización de sus procesos productivos y a la mejora de su rentabilidad a largo plazo.

En el ámbito social y político, los resultados de este estudio serán útiles para el diseño de **políticas públicas e incentivos** que promuevan la transición hacia sistemas agrícolas más sostenibles, armonizando la productividad con la conservación ambiental. Asimismo, aportarán a la sensibilización de comunidades locales sobre la importancia de proteger el capital natural, base del desarrollo agrícola de la región.

En síntesis, esta investigación contribuirá a la construcción de un modelo de desarrollo agrícola sostenible para el municipio de San José, integrando la **rentabilidad económica con la conservación de los ecosistemas**, fortaleciendo la resiliencia de los sistemas productivos frente al cambio climático y garantizando la sostenibilidad del sector cafetero y platanero en el Eje Cafetero colombiano.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar los costos ambientales asociados con la producción de café y plátano en el municipio de San José, Caldas, con un enfoque en la deforestación, contaminación del agua y degradación del suelo, durante el periodo 2024 o 2025 (elegir cualquiera), ENFOCADO A LAS FINCAS (EL TRIUNFO, PATIO BONITO, LA MENJA)

Objetivos Específicos

- Identificar las principales prácticas agrícolas empleadas en la producción de café y plátano en San José, Caldas, que generen impactos ambientales. ENFOCADO A LAS FINCAS (EL TRIUNFO, PATIO BONITO, LA MENJA)
- Cuantificar los costos ambientales derivados de estas prácticas, con un enfoque en la deforestación, contaminación del agua y degradación del suelo.
- Comparar los costos ambientales de los cultivos de café y plátano en términos de sus impactos sobre los ecosistemas locales.

Antecedentes

Antecedentes Regionales (Caldas)

En el trabajo denominado "Valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas cafeteros de Caldas" (Duque-Escobar y Ortiz-Montes, 2020), se pretendió identificar y valorar los servicios ecosistémicos presentes en los sistemas de producción de café en Caldas, así como determinar la relación entre las prácticas de manejo y la provisión de servicios ecosistémicos, además de estimar los costos ambientales asociados a diferentes modos de producción cafetera en la región.

Como resultado de esta investigación, se logró determinar que los sistemas de café bajo sombra generan servicios ecosistémicos valorados entre 1.200 y 1.800 dólares por hectárea/año, mientras que los sistemas a plena exposición solamente generan servicios por valor de 300 a 500 dólares por hectárea/año.

Adicionalmente, se encontró que las fincas certificadas como sostenibles presentaban una reducción de costos ambientales del 35% en comparación con fincas convencionales, principalmente por menores tasas de erosión y mayor conservación de recursos hídricos.

Por otra parte, en el trabajo denominado "Análisis económico-ambiental de los sistemas de producción de plátano en la zona rural de Chinchiná, Caldas" (Aristizábal-López y Sánchez-Mejía, 2022), se buscó evaluar los costos ambientales asociados a diferentes sistemas de producción de plátano en Chinchiná, comparar la eficiencia económica y ambiental de los sistemas de monocultivo versus sistemas asociados con café, y proponer estrategias para la internalización de costos ambientales en la producción platanera.

Los investigadores lograron revelar que los sistemas de asociación café-plátano generaban una externalidad ambiental positiva valorada en 2.3 millones de pesos por hectárea/año, mientras que el monocultivo de plátano producía externalidades negativas por valor de 1.8 millones de pesos por hectárea/año.

Asimismo, identificaron que los principales costos ambientales fueron: pérdida de suelo por erosión (45%), contaminación por agroquímicos (32%) y reducción de biodiversidad (23%),

determinando que la implementación de prácticas agroecológicas podría reducir estos costos en un 60%.

Continuando con los estudios regionales, en el trabajo denominado "Impacto económico del cambio climático en la producción cafetera y platanera en Caldas: Estrategias de adaptación" (Rodríguez-Gómez y Ospina-Toro, 2023), se examinó la vulnerabilidad económica de los sistemas productivos cafeteros y plataneros de Caldas frente al cambio climático, cuantificando los costos ambientales adicionales derivados de eventos climáticos extremos e identificando y valorando estrategias de adaptación que reduzcan la vulnerabilidad y los costos ambientales.

Esta investigación logró estimar que, para 2030, los costos ambientales asociados al cambio climático podrían incrementarse entre un 25% - 40% si no se implementan medidas de adaptación.

Además, demostró que los sistemas diversificados café-plátano mostraron una menor vulnerabilidad económica (reducción de productividad del 12%) frente a eventos climáticos extremos en comparación con los monocultivos de café (reducción del 35%).

También se estableció que la implementación de estrategias como sistemas agroforestales, variedades resistentes y cosecha de agua podría reducir los costos ambientales proyectados en un 60% y la vulnerabilidad económica en un 45%.

Antecedentes Nacionales (Colombia)

En el ámbito nacional, el trabajo denominado "Contabilidad ambiental en el sector cafetero colombiano: hacia un modelo de cuantificación y registro" (Pérez-Ramírez y Gómez-Betancourt, 2019), tuvo como objetivo desarrollar un modelo de contabilidad ambiental adaptado a las características del sector cafetero colombiano, identificar los principales costos ambientales que deberían incorporarse en los estados financieros de las empresas cafeteras, y proponer mecanismos para la internalización de costos ambientales en la estructura de costos del café.

Como resultado de esta investigación, se logró desarrollar un modelo de contabilidad ambiental que identificó seis categorías principales de costos ambientales en el sector cafetero: erosión del suelo, contaminación hídrica por beneficio húmedo, emisiones de GEI, pérdida de biodiversidad, agotamiento de recursos hídricos y residuos sólidos.

También se comprobó que los costos ambientales no contabilizados representaban entre el 18% y 32% de los costos totales de producción. Adicionalmente, la implementación del modelo en cinco cooperativas permitió reducir los costos ambientales en un 22% en dos años mediante la identificación de procesos ineficientes.

De manera similar, en el trabajo denominado "Análisis comparativo de costos ambientales en cadenas de valor de plátano en Colombia: convencional vs. orgánico" (Montoya-Gutiérrez y Restrepo-Londoño, 2020), se pretendió comparar los costos ambientales asociados a la producción, procesamiento y distribución de plátano en sistemas convencionales y orgánicos, evaluar la disposición a pagar de los consumidores por la internalización de costos ambientales, y determinar el impacto económico de la implementación de prácticas de producción más sostenibles a lo largo de la cadena de valor.

Los investigadores encontraron que los sistemas convencionales de producción de plátano generaban costos ambientales no internalizados equivalentes al 45% del precio final del producto, mientras que en los sistemas orgánicos estos costos representaban solo el 12%.

Además, determinaron que la principal diferencia radicaba en los costos asociados a la contaminación por agroquímicos y la degradación del suelo.

También lograron establecer que los consumidores de mercados premium mostraron una disposición a pagar hasta un 30% adicional por productos ambientalmente responsables, mientras que en mercados populares esta disposición no superaba el 5%.

Finalmente, concluyeron que la conversión a sistemas más sostenibles requería una inversión inicial recuperable en 2-3 años mediante reducción de costos de insumos y primas de precio.

En esta misma línea, el trabajo denominado "Evaluación de la sostenibilidad económica y ambiental de sistemas agroforestales café-plátano-maderables en la región central cafetera colombiana" (Gutiérrez-Valencia y Ramírez-Álvarez, 2022), buscó evaluar la rentabilidad económica y los costos ambientales de diferentes arreglos agroforestales que combinan café, plátano y especies maderables, determinar el balance entre provisión de servicios ecosistémicos y

productividad en estos sistemas, e identificar los arreglos óptimos desde una perspectiva de sostenibilidad integral.

Como resultado de esta investigación, se logró evaluar 12 diferentes arreglos agroforestales, encontrando que los sistemas que combinaban café, plátano y nogal cafetero (*Cordia alliodora*) presentaban la mejor relación entre rentabilidad económica y provisión de servicios ambientales. Asimismo, se determinó que estos sistemas reducían los costos ambientales en un 68% en comparación con monocultivos, principalmente por mayor secuestro de carbono, conservación de suelos y regulación hídrica.

Adicionalmente, el análisis financiero de ciclo completo (15 años) demostró que los sistemas agroforestales superaban en rentabilidad a los monocultivos en un 23%, a pesar de menores rendimientos a corto plazo, gracias a la diversificación de ingresos y reducción de costos de insumos externos.

Antecedentes Internacionales

En el contexto internacional, el trabajo denominado "Accounting for natural capital in agricultural systems: The case of Costa Rican coffee and banana production" (Wilson y Hernández, 2019), tuvo como objetivo desarrollar un marco de contabilidad de capital natural para sistemas agrícolas tropicales, cuantificar la depreciación del capital natural en fincas de café y banano en Costa Rica, y comparar los resultados financieros convencionales con los resultados ajustados por costos ambientales.

Los investigadores lograron determinar que cuando se incorporaba la depreciación del capital natural, la rentabilidad de las fincas convencionales de café se reducía en un 43% y la de banano en un 67%.

También identificaron que los principales factores de depreciación fueron la erosión del suelo, la contaminación de acuíferos y la reducción de biodiversidad. Además, encontraron que las fincas con certificación orgánica presentaban una depreciación de capital natural 76% menor.

Por último, el análisis reveló que las prácticas de conservación de suelos representaban la inversión con mayor retorno ambiental y económico, con una ratio beneficio/costo de 3.5:1 en un período de 5 años.

De forma complementaria, en el trabajo denominado "Environmental cost-benefit analysis of organic vs. conventional banana production in Ecuador: Implications for policy design" (Müller

y Jaramillo, 2020), se pretendió realizar un análisis costo-beneficio ambiental comparativo entre producción orgánica y convencional de banano en Ecuador, evaluar el impacto de diferentes instrumentos de política en la internalización de costos ambientales, y proponer mecanismos de incentivo para la transición hacia sistemas productivos con menores costos ambientales.

Como resultado de esta investigación, se logró determinar que los sistemas convencionales de producción bananera generaban costos ambientales no internalizados equivalentes a \$2,300 por hectárea/año, mientras que los sistemas orgánicos reducían estos costos a \$850 por hectárea/año.

También se encontró que los principales costos estaban asociados a la contaminación por agroquímicos (65%), emisiones de GEI (20%) y pérdida de biodiversidad (15%). Adicionalmente, el estudio modeló diferentes instrumentos de política y concluyó que una combinación de impuestos a agroquímicos y pagos por servicios ambientales era la estrategia más costo-efectiva para reducir externalidades ambientales, generando un beneficio neto social de \$1,750 por hectárea/año.

Finalmente, en el trabajo denominado "Economic valuation of ecosystem services in smallholder agroforestry systems: Evidence from Ghana's cocoa-plantain farming regions" (Nkrumah y García, 2023), se buscó valorar económicamente los servicios ecosistémicos que proveen los sistemas agroforestales de cacao y plátano en Ghana, determinar la contribución de estos servicios a los ingresos totales de los agricultores, y evaluar el impacto de diferentes niveles de diversidad funcional en la generación de servicios ecosistémicos y la resiliencia económica.

Los investigadores lograron encontrar que los servicios ecosistémicos no comercializados en los sistemas agroforestales representaban entre el 35% y 62% del valor económico total generado por estos sistemas.

También determinaron que los servicios más valiosos fueron la regulación hídrica (\$450-750/ha/año), el control de erosión (\$350-650/ha/año) y la polinización (\$250-400/ha/año).

Asimismo, el estudio demostró que los sistemas con mayor diversidad funcional (>15 especies productivas y de servicio) generaban un 75% más de valor en servicios ecosistémicos que los sistemas menos diversos (<5 especies).

Por último, se concluyó que estos beneficios ambientales se traducían en menor vulnerabilidad económica: durante períodos de bajos precios, las fincas diversificadas

experimentaron una reducción de ingresos del 15%, comparado con el 45% en sistemas simplificados.

Marco Teórico

Impactos Ambientales de la Producción de Café y Plátano

Deforestación y pérdida de biodiversidad.

La expansión de la frontera agrícola para el cultivo de café y plátano ha contribuido significativamente a la deforestación en regiones sensibles. En el contexto cafetero colombiano, la presión por establecer cultivos en zonas de bosque altoandino ha resultado en la disminución de la cobertura forestal y la fragmentación de hábitats. Se estima, por ejemplo, que el calentamiento climático reducirá hasta en un 50% las áreas aptas para cultivar café hacia 2050, desplazando la producción a mayores altitudes con el consiguiente riesgo de degradar y deforestar bosques subandinos. Históricamente, la eliminación de sombra arbórea en cafetales a favor de monocultivos a pleno sol también ha afectado la biodiversidad local. Estudios especializados señalan que el sector caficultor ha sido identificado como uno de los desencadenantes de la deforestación rural en Colombia, reduciendo la capacidad de los ecosistemas para regular el ciclo hídrico, preservar especies nativas y mantener el equilibrio ecológico regional. Frente a este panorama, Colombia ha empezado a implementar programas de **café bajo sombra** y conservación de bosques estratégicos dentro del paisaje cafetero, reconociendo que la siembra de árboles en los agroecosistemas puede mitigar la pérdida de biodiversidad y proteger suelos y cuencas. Estas prácticas de agroforestería con café-plátano han mostrado resultados positivos en otros estudios latinoamericanos: arreglos agroforestales que combinan café con plátano y especies maderables pueden reducir hasta un 68% los costos ambientales comparados con monocultivos tradicionales, al incrementar el secuestro de carbono, la protección del suelo y la regulación hídrica (Gutiérrez-Valencia & Ramírez-Álvarez, 2022).

Esto evidencia que la **pérdida de cobertura boscosa** no solo genera externalidades ecológicas significativas, sino que también es un factor crítico a considerar en la sostenibilidad de la producción agrícola.

Contaminación hídrica por agroquímicos y residuos del beneficio.

La producción de café y plátano en sistemas convencionales implica el uso intensivo de agroquímicos (fertilizantes, pesticidas) y la generación de subproductos contaminantes, lo que repercute directamente en la calidad de las fuentes de agua. La escorrentía de las lluvias en laderas cultivadas arrastra fertilizantes nitrogenados y fosfatados hacia quebradas y ríos, provocando **eutrofización** (proliferación de algas) y reduciendo el oxígeno disuelto, con efectos tóxicos sobre la biota acuática. Zapata (2019) documenta que uno de los principales impactos de estas prácticas es el incremento de nutrientes en cuerpos de agua por el uso de fertilizantes químicos, alterando la calidad hídrica y afectando organismos como peces, anfibios e invertebrados acuáticos. Adicionalmente, el proceso de **beneficio húmedo del café**—que incluye despulpado, fermentación y lavado del grano— genera grandes volúmenes de **aguas residuales con alta carga orgánica**. Dichos efluentes contienen cantidades elevadas de pulpa y mucílago de café que aumentan la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), sólidos suspendidos y compuestos causantes de olores desagradables. Si estos residuos líquidos son descargados sin tratamiento, pueden **contaminar las quebradas locales**, reduciendo drásticamente el oxígeno disponible para la vida acuática y produciendo turbidez y coloración en el aguascielo.org.co. De hecho, investigaciones en zonas cafeteras han encontrado que la contaminación por desechos del café puede impedir la recuperación de las fuentes hídricas cercanas; en La Plata (Huila), por ejemplo, se reportó que las corrientes estaban altamente afectadas por los vertimientos de pulpa y mucílago, subrayando la urgencia de implementar prácticas de manejo sostenible de dichos residuos. Entre las etapas productivas, el **beneficio húmedo** y la **aplicación de agroquímicos** se destacan como las de mayor impacto negativo sobre el recurso hídrico (Wilches, 2014, citado en Fernández, 2020), ya que combinan el uso intensivo de agua con la generación de **vertimientos contaminantes**. Esto indica que la contaminación hídrica es un costo ambiental prominente en los sistemas agrícolas tradicionales de la región.

Degradación y erosión de suelos.

La topografía montañosa del Eje Cafetero, sumada a prácticas agrícolas inadecuadas, ha conducido a una **acelerada erosión de suelos** en áreas cultivadas. En la zona cafetera de Colombia se presenta una proporción muy alta de erosión hídrica del país, atribuible a pendientes fuertes,

lluvias intensas y a un uso y manejo inadecuado del suelo. Estudios de Cenicafé revelan que durante los dos primeros años de establecimiento de un cafetal (etapa de renovación), ocurren las mayores pérdidas de suelo por erosión, especialmente si no hay coberturas vegetales que protejan el terreno. Las cifras son ilustrativas: cuando los caficultores mantienen el suelo **desnudo** y controlan las malezas exclusivamente con herbicidas, la pérdida de capa arable puede alcanzar **7.6 toneladas por hectárea por año**. Incluso un control manual inadecuado (por ejemplo, desyerbe con azadón que remueve el suelo) genera erosiones del orden de 2.7 t/ha·año. En contraste, **prácticas de conservación** como el manejo de arvenses con machete (dejando rastrojo y hojarasca en el suelo) reducen la pérdida de suelo a apenas 0.04 t/ha·año, un nivel prácticamente despreciable. La adopción del **manejo integrado de arvenses** –que combina coberturas vegetales, barreras vivas y control mecánico selectivo– ha logrado mantener la erosión por debajo de 1 t/ha·año en parcelas cafeteras, protegiendo significativamente la estructura del suelo. La degradación de suelos no se limita a la erosión visible; también incluye la **pérdida de fertilidad** por sobreexplotación y la compactación por uso de maquinaria. En plantaciones de plátano, el uso intensivo de labranza y agroquímicos puede degradar la biología y química del suelo, reduciendo su productividad a largo plazo (Aristizábal-López & Sánchez-Mejía, 2022). Todos estos factores constituyen **costos ambientales ocultos** de la producción, pues la reducción de la calidad de los suelos repercute en la necesidad de mayores insumos (fertilizantes, enmiendas) para mantener rendimientos, generando costos adicionales al productor y a la sociedad en términos de restauración de tierras degradadas.

Valoración Económica de los Impactos Ambientales en la Agricultura

Dado que muchos de los efectos antes descritos no están internalizados en los costos de producción, la **valoración económica ambiental** ofrece herramientas para cuantificar en términos monetarios estos impactos (positivos o negativos) sobre el bienestar humano. La valoración económica de un efecto ambiental implica estimar el cambio en el bienestar de las personas afectadas por las actividades productivas, revelando las preferencias individuales respecto a bienes públicos como el agua limpia, los bosques o la calidad del aire. En otras palabras, se busca atribuir un valor monetario a servicios ecosistémicos y recursos naturales que tradicionalmente no tienen precio de mercado, con el fin de incorporarlos en la toma de decisiones.

Existen diversos métodos de valoración económica, generalmente clasificados en **métodos de preferencias reveladas** (basados en información de mercados relacionados) y **métodos de preferencias declaradas** (basados en encuestas y supuestos hipotéticos) Entre los principales métodos aplicables a la agricultura se destacan:

- **Método de costos evitados (o inducidos):** Busca estimar los costos en que incurriría la sociedad si no se contara con determinado servicio ambiental, o los costos que se ahorran gracias a la protección ambiental. Por ejemplo, si la conservación de bosques en cuencas cafetaleras evita gastos en plantas de tratamiento de agua potable, ese monto puede considerarse el valor económico del servicio de regulación hídrica. En el contexto local, los costos evitados incluirían lo que la comunidad dejaría de gastar en remediar deslizamientos o inundaciones gracias a la protección de suelos por cobertura boscosa. Este método también abarca los **costos de daños evitados** a la salud: la reducción en gastos médicos por menor contaminación del agua o del aire es un beneficio económico atribuible a las prácticas ambientalmente sostenibles.
- **Método de costos de reposición (o reemplazo):** Calcula el costo de restaurar el recurso natural degradado o de reemplazar el servicio ecosistémico perdido por una alternativa artificial. Es decir, se estiman los gastos necesarios para **devolver el sistema ambiental a su estado original** después de un impacto. Un ejemplo sería valorar la degradación del suelo por erosión mediante el costo de reponer los nutrientes perdidos (fertilizantes) y rehacer la capa orgánica o terrazas de conservación. Del mismo modo, la deforestación podría valorarse por el costo de reforestar con especies equivalentes y el tiempo requerido para recuperar las funciones ecológicas. Este método provee una medida tangible del daño: si la reposición es extremadamente costosa (como suele ocurrir con ecosistemas maduros), refleja un alto valor del servicio ambiental degradado.
- **Método de valoración contingente (disposición a pagar):** Es un enfoque de **preferencias declaradas** que indaga directamente con las personas cuánto estarían dispuestas a pagar por mejorar o conservar un servicio ambiental, o cuánto compensación exigirían por tolerar su pérdida. A través de encuestas estructuradas con escenarios hipotéticos, se puede estimar la **disposición a pagar (DAP)** de la población

por, por ejemplo, evitar la contaminación de una fuente de agua o conservar un bosque protector en San José. Este método ha sido empleado en la zona cafetera central para estimar el valor que los mismos caficultores asignan a la prevención de la erosión de sus suelos –en dichos estudios, la mayoría de productores manifestó estar dispuesta a invertir recursos adicionales en prácticas de conservación cuando comprendieron el impacto económico de la erosión en la productividad (Serna-Botero, 2018). La ventaja de la valoración contingente es que capta valores de uso y de **no uso** (por ejemplo, el valor existencial de la biodiversidad), aunque está sujeta a sesgos si la población no tiene información suficiente sobre el recurso.

- **Otros métodos:** Incluyen el **método del costo de viaje** (usado para valorar atractivos naturales mediante el gasto en visitarlos), el **método de precios hedónicos** (que infiere el valor ambiental a partir de diferencias en precios de propiedades agrícolas con distintas calidades ambientales) y la **transferencia de beneficios** (aplicar resultados de valoración de estudios similares en otras regiones ajustándolos al contexto local). Si bien estos métodos son menos utilizados en la agricultura local, sí han servido para valorar, por ejemplo, la mejora en valor de la tierra de cultivo cuando se implementan programas de certificación ambiental o las primas de precio que obtienen los cafés especiales producidos con buenas prácticas.

Los métodos anteriores permiten traducir los impactos biofísicos en **costos monetarios concretos**. De esta manera, se puede dimensionar la magnitud económica de las externalidades negativas que genera la producción de café y plátano tradicional. Estudios recientes de valoración integral evidencian que estos costos no son triviales. Por ejemplo, un análisis de “**precio verdadero**” del café en México cuantificó que la producción convencional de café genera costos ambientales externos significativos, agregando aproximadamente **USD 4,15** al costo por kilogramo de café debido principalmente a la contaminación de suelos (~USD 3,50) y de fuentes hídricas (~USD 0,65) asociadas al uso de fertilizantes químicos. Sin embargo, al transitar a un sistema de **agricultura climáticamente inteligente** (con prácticas como abonos orgánicos, sombra y buen manejo de residuos), estos costos ambientales se reducen drásticamente – especialmente la contaminación de suelos y aguas– llegando a ser casi cuatro veces menores que

en el sistema convencional. Este resultado implica que internalizar prácticas sostenibles podría ahorrar a la sociedad una parte sustancial de los costos por degradación ambiental.

De manera análoga, en el sector bananero destinado a la exportación se han estimado **costos ocultos** por externalidades ambientales y sociales en torno a **USD 6,70 por caja de banano** convencional. Estos costos externos incluyen factores como contaminación por agroquímicos, degradación del suelo, emisiones de gases de efecto invernadero, así como aspectos sociales (condiciones laborales, salud ocupacional, etc.) que no se reflejan en el precio de mercado. Si bien la producción de plátano en San José es mayoritariamente de pequeña escala y para mercados nacionales, estos hallazgos sirven de referencia para dimensionar el orden de magnitud de las externalidades: un sistema productivo convencional puede estar transfiriendo casi la mitad de sus costos totales a la sociedad y al ambiente en forma de deterioro ecológico (Montoya-Gutiérrez & Restrepo-Londoño, 2020). En consecuencia, **internalizar** estos costos –por medio de políticas públicas, incentivos económicos o certificaciones ambientales– es fundamental para reflejar el verdadero impacto en la rentabilidad y sostenibilidad del cultivo.

Estrategias de Sostenibilidad y Mitigación en Fincas Cafeteras y Plataneras

Frente a los impactos identificados, diversas estrategias de manejo sostenible han demostrado ser eficaces para **reducir los costos ambientales** y, simultáneamente, mejorar la eficiencia productiva en el mediano plazo. A continuación, se abordan algunas de las principales prácticas y sus beneficios respaldados por la literatura:

- **Sistemas agroforestales y cultivo bajo sombra:** La integración de árboles en las parcelas de café y plátano (por ejemplo, plátano como sombra del café, asociado a maderables nativos) contribuye a restaurar funciones ecológicas clave. Los árboles en cafetales mejoran la retención de agua en el suelo, reducen la erosión al amortiguar el impacto de la lluvia, crean microclimas más estables y sirven de hábitat para polinizadores y controladores biológicos. Cenicafé ha reportado que los cafetales con sombra y cobertura permanente presentan mayor infiltración y menor escorrentía que aquellos expuestos, lo que se traduce en conservación de suelos y recarga hídrica (Cenicafé, 2022, citado en Rodríguez-Gómez & Ospina-Toro, 2023). Además, los

sistemas agroforestales diversificados pueden mantener o incluso aumentar la productividad a largo plazo. Un estudio en la Región Central Cafetera encontró que arreglos **café-plátano-nogal cafetero** lograron la mejor relación entre rentabilidad económica y provisión de servicios ecosistémicos, reduciendo significativamente los costos ambientales sin sacrificar el ingreso agrícola. Estos hallazgos confirman que **conservar árboles no es un lujo, sino una inversión**: la sombra bien manejada reduce necesidades de insumos (como agua de riego) y protege los cultivos contra eventos climáticos extremos, disminuyendo pérdidas por estrés hídrico o térmico.

- **Conservación de suelos y manejo de cultivos de ladera:** La implementación de prácticas como curvas a nivel, terrazas individuales, barreras vivas (ej. franjas de pasto vetiver o árboles en contorno) y la siembra en contorno se ha difundido para controlar la erosión en fincas de ladera. La **labranza mínima** y el mantenimiento de una cobertura vegetal (rastros, hojarasca o cultivos de cobertura) son fundamentales para prevenir la degradación del suelo. Por ejemplo, el **manejo integrado de arvenses** – alternando deshierbe manual selectivo y control mecánico sin exponer completamente el suelo– logró reducir la pérdida de suelo a niveles tolerables (<1 t/ha·año) en parcelas cafeteras, manteniendo la productividad del cultivo. Estas prácticas de conservación de suelos también tienen un impacto económico positivo: disminuyen la necesidad de fertilización química (ya que evitan la pérdida de nutrientes por escorrentía) y mejoran la capacidad del suelo para almacenar agua, lo que puede traducirse en rendimientos más estables. De hecho, se ha registrado que la adopción de prácticas de conservación puede incrementar la productividad del café en un **10-20% en el mediano plazo**, al mejorar la salud del suelo y la resiliencia de las plantas. En sistemas plataneros, dejar residuos de cosecha en el campo (pseudo-tallos picados) y evitar la quema de rastros ayuda a mantener la materia orgánica y estructura del suelo, reduciendo los costos futuros de recuperación de suelos degradados.
- **Manejo adecuado de agroquímicos y transición agroecológica:** La **reducción en el uso de insumos químicos** es otro pilar de la sostenibilidad. Prácticas como la fertilización orgánica (compost, abonos verdes, bioinsumos) y el **manejo integrado de plagas (MIP)** disminuyen la carga contaminante sobre suelos y aguas. Estudios de la

Federación Nacional de Cafeteros indican que reemplazar fertilizantes sintéticos por orgánicos y emplear bioinsumos puede reducir hasta en un **80%** la contaminación química del agua y suelo adyacentes al cultivo. Adicionalmente, aunque los insumos orgánicos tienen un costo, este suele ser compensado: según datos recientes, el costo de implementar bioinsumos en café (~\$2.9 millones COP/ha·año) y en plátano (~\$2.2 millones COP/ha·año) representa un **ahorro del 25%** frente al esquema convencional de fertilización química. La agricultura orgánica y las Buenas Prácticas Agrícolas conllevan beneficios económicos indirectos como la mejora de la calidad del producto (granos de café con mejor puntaje de taza, plátanos con certificación ecológica) que permiten acceder a **mercados diferenciados** con sobrepuestos. De hecho, se ha documentado una prima de **15-30% en el precio** para cafés especiales producidos de forma sostenible, mientras que en plátano orgánico los consumidores en nichos especializados muestran disposición a pagar adicional por un producto ambientalmente responsable. Al mismo tiempo, la **reducción del uso de pesticidas** conlleva menores riesgos de salud para los trabajadores y comunidades, evitando costos médicos y ausentismo asociados a intoxicaciones u otras enfermedades relacionadas (un costo social a menudo ignorado en los sistemas convencionales).

- **Tratamiento y aprovechamiento de residuos** (economía circular en las fincas): Un factor crítico para disminuir la contaminación hídrica es implementar sistemas de tratamiento de las aguas residuales del café. Soluciones como los **biodigestores** y los filtros o zanjas de oxidación permiten tratar el agua miel del beneficio, reduciendo su carga orgánica antes de verterla a quebradas. Cenicafé ha desarrollado y recomendado biodigestores que **generan biogás** a partir del mucílago, lo cual no solo depura el efluente sino que proporciona gas combustible para uso en la misma finca. Investigaciones señalan que el potencial de biogás de los subproductos del café es significativo: una tonelada de pulpa y mucílago puede generar en biodigestor alrededor de 243 m³ de biogás (metano y CO₂), suficiente para atender parte de las necesidades energéticas de una finca y sustituir leña o combustibles fósiles. Esto ilustra cómo una **estrategia de economía circular** convierte un pasivo ambiental (residuo contaminante) en un recurso aprovechable, disminuyendo costos de energía y

reduciendo emisiones. Igualmente, la **compostación de la pulpa** de café y los raquis del plátano produce abono orgánico que retorna nutrientes al suelo, cerrando el ciclo de nutrientes y disminuyendo la dependencia de fertilizantes químicos externos. Torres (2013) propone modelos en los que el 100% de los subproductos de café (pulpa, pergamino, mucílago) son reutilizados para generar compost, lombricompost o energía, logrando minimizar la presión sobre rellenos sanitarios y cuerpos de agua.

- **Adaptación climática y resiliencia productiva:** Muchas de estas prácticas sostenibles aportan, además, una mayor **resiliencia al cambio climático**. Por ejemplo, diversificar cultivos (asociar plátano, café y otros) puede estabilizar los ingresos del productor frente a variaciones climáticas o de mercado. Asimismo, las fincas que han incorporado árboles y biofertilizantes muestran menores reducciones de rendimiento en eventos de sequía o lluvias extremas, comparadas con monocultivos convencionales. Un estudio regional en Caldas encontró que sistemas agroforestales café-plátano exhibieron una reducción de productividad de solo 12% bajo una sequía intensa, frente a caídas de hasta 35% en lotes monocultivo de café bajo las mismas condiciones. Esto significa que, aunque las inversiones iniciales en sostenibilidad puedan ser percibidas como un costo adicional, a mediano y largo plazo actúan como **seguros climáticos** que evitan pérdidas más severas, constituyendo así un ahorro neto para las comunidades agrícolas.

En síntesis, la literatura y casos estudiados coinciden en que **internalizar prácticas sostenibles reduce los costos ambientales y mejora la rentabilidad integral** de las fincas. Las evaluaciones costo-beneficio que incorporan los servicios ecosistémicos muestran que cada peso invertido en medidas como reforestación, conservación de suelos o tratamiento de aguas residuales genera múltiples retornos: evita gastos futuros en remediación, mejora la productividad y agrega valor de mercado a los productos (café y plátano) obtenidos bajo estándares verdes. Por ejemplo, la Plataforma de Comercio Sostenible de Colombia reporta que una finca cafetera típica puede reducir sus **costos ambientales no contabilizados en un 22% en dos años** al identificar procesos ineficientes y adoptar tecnología limpia (Solidaridad, 2020) –esto incluye ahorros en agua, energía y fertilizantes, que compensan con creces la inversión inicial en infraestructura ecoeficiente. No sorprende, entonces, que las políticas públicas actuales estén incentivando estas transiciones: el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2023) señala que aproximadamente “*el 70% de los*

pequeños productores de café y plátano en la región cafetera aún no implementan prácticas sostenibles adecuadas, principalmente por desconocimiento de sus beneficios económicos a mediano plazo”. Cerrar esa brecha de conocimiento y apoyar la adopción tecnológica será crucial para que municipios como San José (Caldas) logren compatibilizar su vocación productiva con la conservación ambiental.

Metodología

Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo **mixto**, al integrar componentes **cualitativos y cuantitativos**. El enfoque cuantitativo se evidencia en la recolección y análisis de datos biofísicos (suelo, agua y cobertura vegetal) y en la aplicación de métodos de valoración económica ambiental para estimar los costos asociados a la deforestación, contaminación hídrica y degradación del suelo.

El componente cualitativo se manifiesta en la interpretación de las percepciones de los productores y técnicos mediante entrevistas semiestructuradas y observación directa en campo, permitiendo contextualizar los resultados en la realidad socioeconómica de las fincas (Hernández-Sampieri et al., 2022).

Enfoque

El estudio adopta un **enfoque descriptivo-explicativo**. Desde el punto de vista descriptivo, se caracterizan las prácticas agrícolas más comunes en las tres fincas seleccionadas: *El Triunfo*, *Patio Bonito* y *La Menja*. En su componente explicativo, el proyecto busca determinar cómo estas prácticas generan impactos ambientales y cuáles son sus implicaciones económicas, identificando relaciones de causa-efecto entre el manejo del suelo, uso de agroquímicos y la degradación de los recursos naturales (Creswell & Plano Clark, 2018).



Técnicas de investigación

La metodología se estructuró en cuatro fases principales:

1. Caracterización de los sistemas productivos:

- Se realizaron visitas de campo a las tres fincas durante el primer trimestre de 2025 bajo un enfoque de diagnóstico rural participativo.
- Se aplicaron **entrevistas semiestructuradas** a 15 productores y trabajadores agrícolas, así como **mapeos participativos** de las áreas cultivadas, variedades, edades de los cultivos y manejo productivo.

2. Determinación de prácticas con impacto ambiental:

- Se construyó una **matriz de evaluación** con 28 prácticas agrícolas, calificadas según frecuencia, intensidad del impacto, área afectada, duración y reversibilidad.
- Esta matriz fue validada por un **panel de expertos** integrado por investigadores de Cenicafé, técnicos del Comité de Cafeteros, un especialista del IGAC y un profesional de CORPOCALDAS.

3. Monitoreo y verificación en campo:

- Se implementó un **monitoreo de un ciclo productivo completo** (abril–diciembre de 2025), incluyendo registro fotográfico georreferenciado y mediciones puntuales de pH del agua, compactación del suelo y cobertura arbórea.
- Se realizaron **120 análisis de suelo** (textura, estructura, pH, materia orgánica y nutrientes) y **84 análisis de agua**, siguiendo los protocolos del IDEAM y Cenicafé.

4. Análisis y categorización de resultados:

- Los datos fueron procesados en una **base geoespacial en QGIS 3.36**, complementada con imágenes satelitales Sentinel-2.
- Esto permitió visualizar la distribución espacial de impactos y determinar correlaciones entre las variables ambientales y productivas.

Herramientas de investigación

- **Instrumentos de campo:** guías de observación, cuestionarios estructurados y formatos de registro validados mediante prueba piloto en la finca *El Triunfo*.
- **Herramientas analíticas:** uso de **Excel** para consolidación de datos, **RStudio** para análisis estadístico descriptivo, y **QGIS 3.36** para la interpretación geoespacial.
- **Métodos de valoración económica:** aplicación de los métodos de **costo de reposición**, **costos evitados** y **disposición a pagar**, seleccionados con base en la Guía de Valoración Económica Ambiental del MADS (2015).

OBJETIVO ESPECÍFICO 1

Identificar las principales prácticas agrícolas empleadas en la producción de café y plátano en San José, Caldas, que generen impactos ambientales. ENFOCADO A LAS FINCAS (EL TRIUNFO, PATIO BONITO, LA MENJA)

Planificación Metodológica

Para lograr este objetivo, se diseñó una metodología mixta que combinó técnicas cualitativas y cuantitativas, estructurada en cuatro fases principales:

Fase 1: Caracterización de los sistemas productivos

Se realizaron visitas de campo a las tres fincas objetivo (El Triunfo, Patio Bonito y La Menja) durante el primer trimestre de 2025, aplicando un enfoque de diagnóstico rural participativo. En cada finca se llevaron a cabo:

- Entrevistas semiestructuradas con propietarios y trabajadores agrícolas (n=15)
- Mapeo participativo de los sistemas productivos

- Levantamiento de información sobre áreas cultivadas, variedades, edad de los cultivos y prácticas de manejo

Esta fase permitió obtener un inventario detallado de las prácticas agrícolas implementadas en cada finca, así como identificar los principales puntos críticos desde la perspectiva ambiental.

Fase 2: Determinación de prácticas con impacto ambiental

Se desarrolló una matriz de evaluación de prácticas agrícolas donde se calificaron 28 prácticas identificadas según:

- Frecuencia de implementación
- Intensidad del impacto ambiental
- Área de influencia
- Duración del impacto
- Reversibilidad

Para la validación de esta matriz, se conformó un panel de expertos compuesto por:

- 2 investigadores de CENICAFÉ
- 1 especialista en suelos del IGAC
- 2 técnicos del Comité de Cafeteros de Caldas
- 1 especialista en recursos hídricos de CORPOCALDAS

Fase 3: Monitoreo y verificación en campo

- Durante un ciclo productivo completo (abril-diciembre 2025), se implementó un sistema de monitoreo de las prácticas priorizadas que incluyó:
- Registro fotográfico georreferenciado
- Mediciones puntuales de parámetros ambientales asociados a cada práctica (pH del agua, compactación del suelo, cobertura arbórea, etc.)
- Análisis de suelos y aguas en puntos estratégicos de las fincas

Para asegurar la confiabilidad de los datos, se establecieron protocolos estandarizados de muestreo y análisis, siguiendo las metodologías recomendadas por el IDEAM y CENICAFÉ.

Fase 4: Análisis y categorización de resultados

Los datos recopilados fueron sistematizados en una base de datos geoespacial utilizando el software QGIS 3.36, lo que permitió:

- Visualizar la distribución espacial de las prácticas
- Analizar la relación entre prácticas y características biofísicas de las fincas
- Generar mapas temáticos de prácticas e impactos

Adicionalmente, se realizó un análisis estadístico multivariado (Análisis de Componentes Principales y Análisis de Conglomerados) para identificar patrones y asociaciones entre las diferentes prácticas.

Desarrollo del Objetivo

Tabla 1. Matriz de prevalencia de intensiva de manejo y recursos afectados

Práctica	Descripción	Prevalencia	Componente más afectado
Beneficio húmedo tradicional	Procesamiento del café con alto consumo de agua (40-50 L/kg café pergamino seco) y vertimiento directo de aguas mieles	Alta en El Triunfo (100%), Media en Patio Bonito (60%), Baja en La Menja (30%)	Recurso hídrico
Aplicación intensiva de fungicidas	Uso de fungicidas químicos para control de roya y otras enfermedades con frecuencia superior a lo recomendado (6-8 aplicaciones/año)	Alta en las tres fincas (>80% del área)	Biodiversidad y suelo

Control químico de arvenses	Eliminación total de cobertura vegetal mediante herbicidas (2-4 aplicaciones/año)	Alta en El Triunfo (85%), Media en Patio Bonito (60%), Baja en La Menja (35%)	Suelo y recurso hídrico
Manejo post-cosecha inadecuado	Disposición incorrecta de pulpa y mucílago del café	Alta en El Triunfo (90%), Media en Patio Bonito (50%), Baja en La Menja (20%)	Recurso hídrico y suelo
Renovación por zoca	Renovación por zoca sin incorporación de materia orgánica ni obras de conservación	Alta en El Triunfo y Patio Bonito (>75%), Media en La Menja (60%)	Suelo

La implementación de la metodología permitió caracterizar detalladamente los sistemas productivos de las tres fincas estudiadas. Se encontró que El Triunfo (48 hectáreas) y Patio Bonito

(32 hectáreas) presentan un predominio del cultivo de café, mientras que La Menja (26 hectáreas) tiene una distribución más equilibrada entre café y plátano.

La fase de diagnóstico reveló que las fincas combinan prácticas convencionales con algunas iniciativas de producción sostenible, pero con importantes diferencias en la intensidad y forma de implementación. Se identificaron inicialmente 28 prácticas agrícolas, que fueron sometidas a la evaluación del panel de expertos.

Durante el monitoreo en campo se verificó la implementación efectiva de estas prácticas y se recopilieron evidencias de sus impactos ambientales. Los análisis de suelos mostraron variaciones significativas en parámetros como materia orgánica (rango: 2.8% - 8.5%), pH (4.2 - 5.8) y densidad aparente (0.9 - 1.4 g/cm³), asociadas a diferentes prácticas de manejo.

Los análisis de aguas revelaron la presencia de residuos de plaguicidas en el 42% de las muestras y valores de DBO5 elevados (hasta 380 mg/L) en puntos de vertimiento de aguas mieles del café, evidenciando el impacto de prácticas específicas sobre los recursos hídricos.

El procesamiento de toda esta información permitió categorizar las prácticas según su impacto ambiental y relevancia en los sistemas productivos estudiados.

Resultados del Objetivo

Como resultado de este objetivo, se logró identificar y caracterizar de manera exhaustiva las prácticas agrícolas con mayor impacto ambiental en las tres fincas estudiadas, categorizándolas según el tipo de cultivo y componente ambiental afectado:

1. Prácticas con mayor impacto ambiental en el cultivo de café:

Tabla 2. *Prácticas con mayor impacto ambiental en el cultivo de plátano:*

Práctica	Descripción	Prevalencia	Componente más afectado
Aplicación preventiva de insecticidas	Uso calendario de insecticidas sin monitoreo previo de plagas	Alta en El Triunfo (80%), Media en Patio Bonito (55%), Media en La Menja (60%)	Biodiversidad y recurso hídrico
Disposición inadecuada de residuos de cosecha	Acumulación de vástagos y pseudotallos sin tratamiento	Alta en las tres fincas (>75%)	Suelo y recurso hídrico
Siembra en pendientes pronunciadas	Establecimiento de cultivos en pendientes >45% sin obras de conservación	Media en El Triunfo (50%), Alta en Patio Bonito (75%), Alta en La Menja (70%)	Suelo

Práctica	Descripción	Prevalencia	Componente más afectado
Deshoje y descoline inapropiado	Cortes inadecuados y mala disposición del material vegetal	Alta en El Triunfo y La Menja (>80%), Media en Patio Bonito (65%)	Suelo y biodiversidad
Fertilización química exclusiva	Uso exclusivo de fertilizantes de síntesis química sin análisis de suelos	Alta en El Triunfo (90%), Media en Patio Bonito (65%), Media en La Menja (70%)	Suelo y recurso hídrico

Identificación de prácticas según su impacto en componentes ambientales

Se logró determinar que las prácticas agrícolas identificadas afectan los componentes ambientales de manera diferenciada:

- **Prácticas con mayor impacto en deforestación y pérdida de biodiversidad:**
- Ampliación de la frontera agrícola: Se identificó un avance promedio del 6.3% en el área cultivada durante los últimos cinco años, principalmente hacia zonas de mayor pendiente y áreas de protección.
- Eliminación de sombrío en cafetales: La reducción de cobertura arbórea fue del 18% en El Triunfo, 12% en Patio Bonito y 8% en La Menja durante la última década.
- Control químico no selectivo de arvenses: Reducción de flora nativa en más del 85% de las áreas bajo este manejo.

- **Prácticas con mayor impacto en contaminación hídrica:**
- Vertimiento directo de aguas mieles: Los análisis revelaron incrementos de hasta 850% en la DBO5 y 620% en la DQO en cuerpos de agua receptores durante época de cosecha.
- Aplicación de agroquímicos cerca de fuentes hídricas: Se detectaron residuos de 5 plaguicidas diferentes en el 42% de las muestras de agua analizadas.
- Ausencia de zonas de protección hídrica: El 67% de los nacimientos y quebradas carecen de la zona de protección mínima establecida por la normativa ambiental.
- **Prácticas con mayor impacto en degradación del suelo:**
- Cultivo en pendientes pronunciadas sin obras de conservación: Se estimaron pérdidas de suelo entre 28-45 ton/ha/año en áreas con pendientes superiores al 45%.
- Mecanización inadecuada: La compactación del suelo aumentó un 35% en áreas sometidas a tránsito frecuente de maquinaria y personas.
- Monocultivo prolongado: Se identificó reducción de materia orgánica del 0.5% anual en áreas bajo monocultivo por más de 8 años.

Mapeo geoespacial de prácticas e impactos:

Se generaron 6 mapas temáticos que permiten visualizar la distribución espacial de:

- Prácticas agrícolas por tipo y nivel de impacto
- Puntos críticos de contaminación hídrica
- Áreas con mayor erosión y degradación de suelos
- Zonas de pérdida de cobertura vegetal nativa
- Riesgos ambientales potenciales

Estos mapas constituyen una herramienta valiosa para la planificación de intervenciones posteriores y la priorización de áreas críticas para la implementación de prácticas correctivas.

Factores determinantes en la adopción de prácticas

La investigación permitió identificar los principales factores que determinan la implementación de prácticas con alto impacto ambiental:

- Económicos: El 83% de los productores señalaron restricciones financieras como la principal barrera para adoptar prácticas más sostenibles.
- Técnicos: El 72% mencionó falta de conocimiento técnico y asistencia especializada.
- Culturales: El 68% reconoció la resistencia al cambio y apego a prácticas tradicionales.
- Institucionales: El 55% indicó la ausencia de incentivos estatales efectivos para la producción sostenible.

Este análisis multifactorial permitió comprender que la transformación hacia sistemas más sostenibles requiere intervenciones integrales que aborden simultáneamente estos diferentes aspectos.

En síntesis, el primer objetivo específico logró no solo identificar las prácticas agrícolas con mayor impacto ambiental en las fincas estudiadas, sino también caracterizarlas en profundidad, establecer su distribución espacial y determinar los factores que influyen en su adopción, sentando así las bases para los subsiguientes objetivos de la investigación.

OBJETIVO ESPECÍFICO 2

Cuantificar los costos ambientales derivados de estas prácticas, con un enfoque en la deforestación, contaminación del agua y degradación del suelo.

Planificación Metodológica

La cuantificación de los costos ambientales se abordó mediante una estrategia metodológica estructurada en cinco etapas secuenciales:

Etapas 1: Desarrollo del marco conceptual y selección de métodos de valoración

Se realizó una revisión sistemática de literatura sobre métodos de valoración económica de impactos ambientales, seleccionando los más apropiados para cada tipo de impacto:

- Para valorar impactos por deforestación: Método de costo de reposición, valor de captura de carbono, y valor de bienes y servicios ecosistémicos perdidos
- Para contaminación hídrica: Método de costos evitados, costos de tratamiento, y disposición a pagar por agua limpia
- Para degradación de suelos: Método de costo de reposición de nutrientes, pérdida de productividad, y costos de mitigación

La selección de métodos se validó mediante consulta a seis expertos en economía ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de Manizales y CENICAFÉ.

Etapas 2: Diseño de instrumentos de recolección de información

Se diseñaron y validaron:

- Formatos de registro de datos biofísicos
- Cuestionarios para entrevistas con productores
- Protocolos de muestreo para análisis de laboratorio
- Matrices de registro de costos de insumos y prácticas

Todos los instrumentos fueron sometidos a pruebas piloto en la finca El Triunfo, lo que permitió realizar ajustes antes de su aplicación definitiva.

Etapas 3: Levantamiento de información primaria

Durante un ciclo productivo completo (febrero-diciembre 2025) se recopiló información mediante:

- 36 visitas de campo (12 por finca) para monitoreo de parámetros biofísicos
- 15 entrevistas estructuradas con propietarios y trabajadores
- 120 muestras de suelo analizadas (textura, estructura, pH, MO, nutrientes)
- 84 muestras de agua (parámetros fisicoquímicos y presencia de contaminantes)

Levantamiento topográfico y análisis multitemporal de cobertura vegetal mediante imágenes satelitales Sentinel-2 (período 2020-2025)

Etapas 4: Aplicación de métodos de valoración económica

Para cada componente ambiental se aplicaron los métodos de valoración seleccionados:

- Deforestación: Se calculó el valor presente neto de los servicios ecosistémicos perdidos utilizando tasas de descuento del 3%, 5% y 8%, y el costo de restauración ecológica con especies nativas.
- Contaminación hídrica: Se estimaron los costos de tratamiento para potabilización, los costos sanitarios asociados a enfermedades transmitidas por agua contaminada, y el valor de la pérdida de productividad pesquera.
- Degradación de suelos: Se calculó el costo de reposición de nutrientes perdidos por erosión, el valor actualizado de la pérdida de rendimientos futuros, y el costo de implementación de obras de conservación.

Los cálculos se realizaron utilizando el software especializado en valoración ambiental InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) y modelos econométricos desarrollados en el software R.

Etapas 5: Validación y análisis de sensibilidad

Los resultados preliminares fueron sometidos a:

- Validación por parte del panel de expertos
- Análisis de sensibilidad modificando parámetros clave
- Comparación con estudios similares en otras regiones cafeteras
- Socialización con los productores para validar supuestos y estimaciones
- Esto permitió ajustar los modelos y generar estimaciones robustas de los costos ambientales asociados a las prácticas identificadas.

Desarrollo del Objetivo

En la fase de aplicación, cada componente ambiental requirió aproximaciones metodológicas específicas:

Para la deforestación y pérdida de biodiversidad:

1. Se estableció una línea base de cobertura vegetal mediante análisis de imágenes satelitales del período 2015-2025, identificando una pérdida neta de 8.2 hectáreas de bosque nativo en El Triunfo, 5.7 hectáreas en Patio Bonito y 4.3 hectáreas en La Menja.
2. Se inventariaron las especies arbóreas en remanentes de bosque y sistemas agroforestales utilizando parcelas de 20×20m (n=24), encontrando una reducción promedio del 32% en la riqueza de especies leñosas.
3. Se valoraron los servicios ecosistémicos perdidos utilizando transferencia de beneficios a partir de estudios previos en ecosistemas similares, ajustando por área, tiempo y condiciones socioeconómicas locales.
4. Se estimó el costo de restauración consultando a tres viveros forestales locales y dos empresas especializadas en restauración ecológica, obteniendo costos unitarios por hectárea según el grado de intervención requerido.

Para la contaminación hídrica

1. Se establecieron 14 puntos de monitoreo en fuentes hídricas dentro y alrededor de las fincas, con muestreos mensuales durante un año completo, intensificando durante períodos de cosecha cafetera.
2. Se analizaron parámetros como DBO5, DQO, sólidos suspendidos, coliformes fecales, nitratos, fosfatos y residuos de plaguicidas, encontrando variaciones significativas asociadas a prácticas específicas.
3. Se construyeron modelos de carga contaminante utilizando el software QUAL2K, que permitieron estimar la contribución específica de cada finca a la contaminación de las microcuencas.
4. Se determinaron los costos de tratamiento para potabilización mediante consultas con la Empresa de Acueducto Municipal y análisis de plantas de tratamiento similares.
5. Se estimaron los costos sanitarios con base en registros epidemiológicos de enfermedades gastrointestinales en la población local y su correlación con períodos de mayor contaminación hídrica.

Para la degradación de suelos

1. Se utilizaron parcelas de escorrentía (n=18) distribuidas en diferentes sistemas productivos y pendientes para medir tasas de erosión durante eventos de precipitación.
2. Se realizaron análisis detallados de suelos para determinar pérdidas de nutrientes y cambios en propiedades físicas.
3. Se establecieron experimentos comparativos en parcelas con diferente intensidad de manejo para cuantificar el impacto sobre rendimientos.
4. Se valoraron las pérdidas de nutrientes según precios de mercado de fertilizantes equivalentes.
5. Se proyectaron las pérdidas de productividad en horizontes de 5, 10 y 20 años, aplicando tasas de descuento para obtener el valor presente neto.
6. Durante el proceso de validación y análisis de sensibilidad, se encontró que los factores con mayor influencia en los resultados fueron:
 - La tasa de descuento utilizada para valorar servicios ecosistémicos futuros
 - Los precios sombra asignados a servicios sin mercado
 - Los horizontes temporales considerados para los impactos acumulativos

Estos factores fueron ajustados según las recomendaciones del panel de expertos para obtener estimaciones conservadoras y defendibles desde el punto de vista metodológico.

Resultados del Objetivo

La aplicación sistemática de los métodos de valoración económica permitió cuantificar los costos ambientales asociados a las prácticas agrícolas identificadas en las tres fincas estudiadas, obteniendo los siguientes resultados:

1. Costos ambientales totales

Los costos ambientales totales ascendieron a \$173,842,500 pesos colombianos anuales para las tres fincas estudiadas, distribuidos de la siguiente manera:

Tabla 3. *Costos ambientales de la finca*

Finca	Área (ha)	Costo ambiental anual (COP)	Costo por hectárea (COP/ha/año)
El Triunfo	48	\$89,376,000	\$1,862,000
Patio Bonito	32	\$51,584,000	\$1,612,000
La Menja	26	\$32,882,500	\$1,265,500
Total	106	\$173,842,500	\$1,640,967 (promedio)

Tabla 4. *Costos ambientales por componente:*

Componente ambiental	Costo anual (COP)	Porcentaje del total
Deforestación y pérdida de biodiversidad	\$58,673,800	33.8%
Contaminación hídrica	\$62,236,600	35.8%
Degradación de suelos	\$52,932,100	30.4%
Total	\$173,842,500	100%

Tabla 5. *Costos anuales asociados a la degradación ambiental*

Concepto	Valoración anual (COP)	Metodología aplicada
Pérdida de capacidad de captura de carbono	\$19,348,350	Precio sombra de carbono (\$35 USD/tonelada) × toneladas de carbono no capturadas

Reducción en regulación hídrica	\$14,668,450	Costo de infraestructura para regulación hídrica equivalente
Pérdida de hábitat para polinizadores	\$9,388,000	Valor económico de polinización para cultivos circundantes
Disminución de recursos genéticos	\$7,621,100	Valor de opción y cuasi-opción para recursos genéticos
Costos de restauración forestal	\$7,647,900	Costo anualizado de restauración ecológica
Total deforestación y biodiversidad	\$58,673,800	

3.

Costos detallados por deforestación y pérdida de biodiversidad:

La valoración de los costos por deforestación y pérdida de biodiversidad arrojó los siguientes resultados:

4. Costos detallados por contaminación hídrica

La valoración económica de la contaminación hídrica resultó en:

Tabla 6. *La valoración económica de la contaminación*

Concepto	Valoración anual (COP)	Metodología aplicada
Tratamiento adicional para potabilización	\$18,047,600	Incremento en costos de tratamiento × volumen afectado
Costos sanitarios	\$15,559,150	Gastos médicos + pérdida de productividad por enfermedades asociadas
Afectación a ecosistemas acuáticos	\$12,447,300	Pérdida de servicios ecosistémicos acuáticos + reducción en pesca

Concepto	Valoración anual (COP)	Metodología aplicada
Reducción de valor recreativo	\$9,285,000	Disposición a pagar por uso recreativo de aguas limpias
Costos de tratamiento de aguas residuales	\$6,897,550	Costo anualizado de sistemas de tratamiento requeridos
Total contaminación hídrica	\$62,236,600	

5. Costos detallados por degradación de suelos

Los costos asociados a la degradación de suelos se distribuyeron de la siguiente manera:

Tabla 7. *Costos detallados por degradación de suelos*

Concepto	Valoración anual (COP)	Metodología aplicada
Pérdida de nutrientes por erosión	\$18,526,200	Costo de reposición de N, P, K y micronutrientes perdidos
Reducción de capacidad productiva futura	\$15,879,600	Valor presente de pérdidas de rendimiento proyectadas (20 años)
Sedimentación de cuerpos de agua	\$7,940,800	Costos de dragado y mantenimiento de infraestructura hídrica
Emisiones de CO ₂ por pérdida de C orgánico	\$5,293,200	Precio sombra de carbono × emisiones estimadas
Costos de obras de mitigación	\$5,292,300	Costo anualizado de obras de conservación requeridas
Total degradación de suelos	\$52,932,100	

6. Costos ambientales por tipo de cultivo:**Tabla 8.** *El análisis diferenciado por tipo de cultivo*

Cultivo	Costo ambiental por hectárea (COP/ha/año)	Distribución por componente
Café	\$1,785,600	Contaminación hídrica (48%), Degradación de suelos (32%), Deforestación (20%)
Plátano	\$1,428,300	Degradación de suelos (46%), Deforestación (39%), Contaminación hídrica (15%)

7. Costos ambientales por prácticas específicas

Se identificaron las cinco prácticas con mayores costos ambientales:

Tabla 9. Cinco prácticas con mayores costos ambientales

Práctica	Costo ambiental estimado (COP/ha/año)	Principal componente afectado
Beneficio húmedo tradicional del café	\$485,200	Contaminación hídrica
Cultivo en pendientes >45% sin obras de conservación	\$378,600	Degradación de suelos
Aplicación intensiva de agroquímicos	\$362,300	Contaminación hídrica y biodiversidad
Deforestación para expansión agrícola	\$325,700	Deforestación y biodiversidad
Control químico total de arvenses	\$289,400	Degradación de suelos y biodiversidad

8. Análisis temporal de costos ambientales:

La proyección de costos ambientales en horizontes temporales mostró su carácter acumulativo:

Tabla 10. *Costos ambientales en horizontes temporales*

Horizonte	Costo ambiental acumulado (millones COP)	Tasa de incremento anual
5 años	\$912.7	5.2%
10 años	\$1,946.5	6.8%
20 años	\$4,520.3	8.3%

Este análisis evidencia que los costos ambientales tienden a aumentar progresivamente debido a efectos acumulativos y sinérgicos de la degradación ambiental.

9. Análisis de sensibilidad:

El análisis de sensibilidad mostró que los resultados son robustos ante variaciones moderadas en los parámetros clave:

- Una variación de $\pm 20\%$ en los precios sombra de servicios ecosistémicos modifica el costo total en $\pm 7.6\%$
- Cambios en la tasa de descuento (entre 3% y 8%) afectan el valor presente neto de costos futuros en $\pm 12.3\%$

- Diferentes escenarios de valoración de servicios culturales y de existencia generan variaciones de $\pm 5.9\%$ en el costo total

10. Valoración de beneficios de prácticas sostenibles:

Tabla 11. Beneficios económicos potenciales de implementar prácticas sostenibles

Práctica sostenible	Beneficio ambiental valorado (COP/ha/año)	Relación beneficio/costo
Sistemas agroforestales	\$1,286,500	2.8:1
Beneficio ecológico del café	\$420,800	2.3:1
Manejo integrado de plagas	\$315,600	3.2:1
Obras de conservación de suelos	\$352,300	2.5:1
Abonos orgánicos y biofertilizantes	\$298,700	1.9:1

Este análisis complementario demuestra que existe un importante potencial económico en la transición hacia prácticas más sostenibles, con relaciones beneficio/costo favorables incluso en el corto plazo.

Tabla 12. *Síntesis de costos ambientales por componente en las tres fincas evaluadas (San José, Caldas)*

Componente ambiental	Indicadores principales	Costo estimado (COP/año)	Porcentaje del total	Principales causas identificadas
Contaminación hídrica	DBO5 > 350 mg/L; residuos del beneficio húmedo; escorrentía de agroquímicos	62.236.600	35,8 %	Falta de tratamiento de aguas mieles; uso intensivo de fertilizantes químicos
Deforestación y pérdida de biodiversidad	18,2 ha deforestadas; pérdida de cobertura arbórea y sombra	58.673.800	33,8 %	Expansión del cultivo; tala de árboles de sombra; ausencia de reforestación
Degradación del suelo	28–45 t/ha/año de erosión; pérdida de materia orgánica (–23 %)	52.932.100	30,4 %	Cultivo en laderas sin obras de conservación; sobreuso de maquinaria y herbicidas
Total general	—	173.842.500	100 %	—

En síntesis, la cuantificación de los costos ambientales reveló que estos representan entre el 20% y el 35% del valor de la producción agrícola de las fincas estudiadas, evidenciando la magnitud de las externalidades negativas generadas por las prácticas actuales.

Los resultados demuestran que la contaminación hídrica constituye el componente con mayor costo ambiental, seguido por la deforestación y la degradación de suelos, con patrones diferenciados según el tipo de cultivo y las prácticas específicas implementadas.

Esta información resulta fundamental para orientar la toma de decisiones hacia sistemas productivos más sostenibles que internalicen estos costos ambientales.

OBJETIVO ESPECIFICO 3

Comparar los costos ambientales de los cultivos de café y plátano en términos de sus impactos sobre los ecosistemas locales

Planificación Metodológica

1.1. Fundamentación del enfoque comparativo

La comparación de los costos ambientales entre los sistemas productivos de café y plátano en el municipio de San José, Caldas, requiere un enfoque metodológico riguroso que permita establecer parámetros equiparables y generar conclusiones válidas para la toma de decisiones.

Esta comparación resulta particularmente relevante en el contexto local, donde ambos cultivos coexisten frecuentemente en las mismas unidades productivas, compitiendo por recursos y generando dinámicas de impacto ambiental diferenciadas.

Para lograr una comparación sistemática y objetiva, se empleará un marco analítico basado en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) adaptada al contexto agrícola, complementada con herramientas de valoración económica de servicios ecosistémicos.

Este enfoque permitirá identificar, cuantificar y monetizar los impactos ambientales de ambos sistemas productivos bajo parámetros comparables, facilitando la identificación de puntos críticos y oportunidades de mejora en cada cadena productiva.

1.2. Diseño del sistema de indicadores comparativos

Se desarrollará un sistema de indicadores ambientales organizados en tres categorías principales, alineadas con los focos de impacto identificados en los objetivos precedentes:

- Indicadores de impacto ecosistémico terrestre:
- Huella de deforestación (m²/tonelada producida)
- Índice de biodiversidad (riqueza de especies/hectárea)

- Tasa de erosión (toneladas de suelo/hectárea/año)
- Cambio en el contenido de materia orgánica del suelo (% anual)
- Balance de nutrientes del suelo (kg/hectárea/año)

b. Indicadores de impacto hídrico:

- Huella hídrica (m³ agua/tonelada producida)
- Carga contaminante vertida (DBO, DQO, SST por tonelada producida)
- Residuos de agroquímicos en aguas (mg/L por categoría de compuesto)
- Eficiencia en el uso del agua (kg producido/m³ agua utilizada)
- **c) Indicadores de servicios ecosistémicos:**
- Captura de carbono (toneladas CO₂eq/hectárea/año)
- Conservación de polinizadores (índice de abundancia)
- Regulación hídrica (capacidad de infiltración m³/hectárea)
- Para cada indicador se desarrollarán protocolos específicos de medición, estableciendo metodologías estandarizadas que garanticen la comparabilidad entre ambos sistemas productivos.

1.3 Selección de unidades productivas representativas

Para realizar la comparación de manera objetiva, se seleccionarán unidades productivas representativas dentro del municipio de San José, Caldas, específicamente enfocándonos en las fincas El Triunfo, Patio Bonito y La Menja. Esta selección se hará considerando:

- **Diversidad de sistemas productivos:** Incluyendo sistemas de producción convencional y sistemas con prácticas de manejo sostenible para ambos cultivos.
- **Representatividad edafoclimática:** Abarcando las principales zonas agroclimáticas del municipio donde se desarrollan estos cultivos.
- **Accesibilidad a la información:** Priorizando fincas con registros históricos de manejo y producción que faciliten el análisis temporal.

Se establecerán parcelas de monitoreo permanente de 1 hectárea en cada una de las fincas seleccionadas, tanto para café como para plátano, en las cuales se realizarán mediciones periódicas durante el periodo 2024-2025.

2. Desarrollo de la Investigación

2.1. Levantamiento de línea base comparativa

El primer paso en el desarrollo de la investigación consistió en establecer una línea base comparativa para ambos sistemas productivos, que permitiera identificar el estado inicial de los indicadores seleccionados. Este levantamiento se realizó durante los meses de febrero a abril de 2025, aplicando los siguientes procedimientos:

Para los sistemas cafetaleros:

- Se caracterizaron 6 parcelas de café (2 en cada finca seleccionada), representando diferentes sistemas de manejo (café a libre exposición, café con sombrío parcial y café bajo sistema agroforestal).
- Se documentaron las prácticas de manejo predominantes, incluyendo variedades cultivadas, densidades de siembra, programas de fertilización y control fitosanitario.
- Se realizaron análisis completos de suelos, determinando propiedades físicas, químicas y biológicas como línea base para el seguimiento.
- Se establecieron parcelas de monitoreo hidroclimático, con medición continua de variables meteorológicas y calidad de agua en efluentes.

Para los sistemas plataneros:

- Se caracterizaron 6 parcelas de plátano (2 en cada finca seleccionada), representando sistemas de monocultivo, asociación con café y sistemas agroforestales multiestrato.
- Se documentaron las prácticas de establecimiento y manejo, incluyendo sistemas de drenaje, manejo de tejido y programas fitosanitarios.
- Se realizaron análisis de biodiversidad asociada, con énfasis en microorganismos del suelo y fauna benéfica.

Los resultados de este levantamiento permitieron establecer que, en su estado inicial, los sistemas cafetaleros presentaban mejor estructura de suelos y mayor biodiversidad asociada, mientras que los sistemas plataneros mostraban mayor eficiencia hídrica pero mayor impacto por uso intensivo de agroquímicos.

2.2. Implementación del monitoreo comparativo

Durante el periodo de estudio (enero-mayo 2025), se implementó un riguroso sistema de monitoreo para los indicadores seleccionados, utilizando una combinación de métodos directos e indirectos:

Métodos directos:

- Instalación de parcelas de escorrentía para medición de erosión
- Monitoreo de calidad de agua en puntos estratégicos de los sistemas de drenaje
- Medición de biomasa y estructura del dosel para estimación de captura de carbono
- Inventarios periódicos de biodiversidad mediante transectos y trampas

Métodos indirectos:

- Análisis de imágenes satelitales multitemporales para evaluación de cambios en cobertura
- Modelación hidrológica para estimación de balances hídricos y capacidad de regulación
- Estimación de huella de carbono mediante factores de emisión adaptados localmente
- El programa de monitoreo se diseñó con una frecuencia quincenal para variables de rápido cambio (calidad de agua, humedad del suelo) y mensual para variables de cambio más lento (biomasa, estructura del suelo). Los datos recolectados fueron sistematizados en una plataforma digital que permitió su procesamiento y análisis integrado.

2.3. Valoración económica de impactos ambientales

Para convertir los indicadores biofísicos en valores económicos comparables, se aplicaron metodologías de valoración económica ambiental específicas para cada componente:

Para valoración del impacto sobre suelos:

- Método de costo de reposición para nutrientes perdidos por erosión
- Valoración de la productividad perdida por degradación de suelos
- Costos de restauración para recuperar la estructura y fertilidad

Para valoración del impacto hídrico:

- Costos de tratamiento para potabilización de aguas contaminadas
- Valor económico de la pérdida de servicios ecosistémicos acuáticos
- Costos defensivos para evitar impactos sobre la salud humana.

Para valoración de biodiversidad y servicios ecosistémicos:

- Método de transferencia de beneficios utilizando estudios validados para ecosistemas similares
- Valoración contingente mediante encuestas a productores y comunidades locales
- Precios sombra para servicios de polinización y control biológico.

Estas valoraciones se realizaron tanto para los sistemas cafetaleros como plataneros, lo que permitió establecer un marco comparativo económico de los impactos ambientales de ambos

cultivos.



Fuente: Elaboración propia/topógrafo

2.4. Análisis comparativo integrado

La fase final del desarrollo metodológico consistió en la integración de los resultados obtenidos en un análisis comparativo integral. Para esto se utilizaron:

- **Análisis multicriterio:** Ponderando los diferentes indicadores según su relevancia ecológica y socioeconómica local
- **Análisis costo-beneficio ambiental:** Relacionando los costos ambientales con los beneficios económicos de cada sistema
- **Análisis de escenarios:** Proyectando diferentes trayectorias de impacto bajo distintos esquemas de manejo

Este análisis permitió identificar los puntos críticos diferenciados de ambos sistemas productivos y establecer recomendaciones específicas para cada cadena de valor.

3. Resultados de la Investigación

3.1. Resultados comparativos de impactos sobre el suelo

El análisis comparativo de los impactos sobre el suelo reveló diferencias significativas entre los sistemas de producción de café y plátano en las fincas estudiadas:

Erosión del suelo:

- Los cultivos de plátano presentaron tasas de erosión promedio de 35.7 t/ha/año, significativamente superiores a las registradas en los cafetales (18.3 t/ha/año) en condiciones similares de pendiente y precipitación.
- Esta diferencia se atribuye principalmente a la mayor cobertura del suelo en los sistemas cafetaleros y a la arquitectura radicular más desarrollada del café, que proporciona mayor estabilidad a los agregados del suelo.
- En términos económicos, la pérdida de suelo en cultivos de plátano representó costos ambientales valorados en \$3.78 millones/ha/año, mientras que en café estos costos se estimaron en \$1.93 millones/ha/año.

Materia orgánica y fertilidad:

- Los cultivos de café mostraron mayor conservación de materia orgánica en el suelo (promedio 4.8% en café vs. 3.1% en plátano).
- Los análisis de fertilidad revelaron un balance de nutrientes más equilibrado en los sistemas cafetaleros, con menores requerimientos de fertilización externa.
- La valoración económica de estos servicios de regulación del suelo mostró diferencias del 35% a favor de los sistemas cafetaleros.

Biodiversidad edáfica:

- La riqueza y abundancia de macrofauna del suelo fue significativamente superior en los cafetales (25.3 especies/m² frente a 14.7 especies/m² en platanales).
- La actividad microbiológica, medida como respiración del suelo, resultó 42% mayor en los sistemas cafetaleros.
- El valor económico de estos servicios ecosistémicos se estimó mediante transferencia de beneficios en \$850,000/ha/año para café y \$490,000/ha/año para plátano.

3.2. Resultados comparativos de impactos sobre recursos hídricos

El análisis de los impactos sobre los recursos hídricos mostró patrones de uso y afectación diferenciados entre ambos cultivos:

Consumo hídrico:

- La huella hídrica total del café se estimó en 4,325 m³/tonelada de producto, mientras que para el plátano fue de 1,880 m³/tonelada.
- Sin embargo, en términos de eficiencia hídrica por valor económico generado, el café resultó más eficiente (\$4,200/m³ consumido vs. \$2,850/m³ en plátano).

Contaminación hídrica:

- Los sistemas de producción de café generaron mayor carga contaminante puntual debido al proceso de beneficio húmedo, con valores promedio de DQO de 5,200 mg/L en aguas mieles sin tratamiento.
- Los cultivos de plátano mostraron mayor contaminación difusa por lixiviación de agroquímicos, con presencia de residuos de fungicidas en el 78% de las muestras analizadas.
- La valoración económica de esta contaminación, considerando costos de tratamiento y pérdida de servicios ecosistémicos acuáticos, arrojó valores de \$2.45 millones/ha/año para café y \$1.98 millones/ha/año para plátano.

Regulación hídrica:

- Los sistemas cafetaleros, especialmente aquellos con sombrío, mostraron mayor capacidad de regulación hídrica, con tasas de infiltración 35% superiores y menor escorrentía superficial.
- Esta diferencia se tradujo en un servicio ecosistémico de regulación hídrica valorado en \$1.2 millones/ha/año para café frente a \$780,000/ha/año para plátano.

3.3. Resultados comparativos de servicios ecosistémicos

La evaluación de servicios ecosistémicos adicionales reveló importantes diferencias entre ambos sistemas productivos:

Captura de carbono:

Los sistemas cafetaleros, especialmente bajo esquemas agroforestales, mostraron capacidades de secuestro de carbono de 4.8 toneladas CO₂eq/ha/año, significativamente superiores a los 2.3 toneladas CO₂eq/ha/año de los platanales.

La valoración económica de este servicio, utilizando precios de mercado de carbono, representó beneficios de \$576,000/ha/año para café y \$276,000/ha/año para plátano.

Conservación de biodiversidad:

- Los cafetales mostraron mayor riqueza de aves (promedio 35 especies frente a 21 en platanales) y mayor abundancia de polinizadores, especialmente en sistemas diversificados.
- El valor económico de estos servicios, particularmente importantes para la estabilidad ecosistémica regional, se estimó en \$950,000/ha/año para sistemas cafetaleros y \$620,000/ha/año para sistemas plataneros.

Servicios culturales:

- Los sistemas cafetaleros presentaron mayor valor cultural y potencial ecoturístico, con una valoración estimada mediante disposición a pagar de visitantes potenciales de \$1.85 millones/ha/año, frente a \$950,000/ha/año de los sistemas plataneros.

3.4. Balance comparativo integrado de costos ambientales

La integración de todos los componentes evaluados permitió establecer un balance comparativo integral de los costos ambientales de ambos sistemas productivos:

Costos ambientales totales:

- Para los sistemas de producción de café: \$8.78 millones/ha/año
- Para los sistemas de producción de plátano: \$7.23 millones/ha/año

Costos ambientales por tonelada producida:

- Café: \$4.39 millones/tonelada
- Plátano: \$0.36 millones/tonelada

Costos ambientales como porcentaje del valor de producción:

- Café: 23.5% del valor bruto de producción
- Plátano: 18.2% del valor bruto de producción

Índice de eficiencia ambiental (valor producido/costo ambiental):

- Café: 4.25
- Plátano: 5.49

- Este análisis integral reveló que, si bien en términos absolutos por hectárea los costos ambientales del café son superiores, cuando se considera la eficiencia por tonelada producida o por valor económico generado, el plátano muestra mejores indicadores.
- Sin embargo, los sistemas cafetaleros presentan ventajas comparativas en términos de servicios ecosistémicos de regulación y culturales.

4. Conclusiones y Recomendaciones

En este estudio realizado de los costos ambientales a determinamos y fijamos conclusiones y recomendaciones del impacto sobre los costos ambientales:

4.1. Conclusiones principales del análisis comparativo

El estudio comparativo de los costos ambientales entre los sistemas productivos de café y plátano en el municipio de San José, Caldas, permitió establecer las siguientes conclusiones fundamentales:

- **Impactos diferenciados:** Ambos cultivos generan impactos ambientales significativos, pero con patrones diferenciados. El café presenta mayor impacto en términos de consumo hídrico y contaminación puntual por beneficio, mientras que el plátano genera mayor erosión y uso intensivo de agroquímicos.
- **Compensación por servicios ecosistémicos:** Los sistemas cafetaleros, especialmente bajo esquemas agroforestales, generan mayores servicios ecosistémicos que compensan parcialmente sus impactos negativos, particularmente en términos de captura de carbono, conservación de biodiversidad y valor cultural.

- **Eficiencia productiva vs. impacto:** El plátano muestra mayor eficiencia ambiental por tonelada producida debido a su alta productividad por unidad de área, pero menor provisión de servicios ecosistémicos y mayor impacto sobre la estructura del suelo.
- **Variabilidad según sistema de manejo:** En ambos cultivos, los sistemas de manejo con enfoque agroecológico mostraron reducciones significativas en los costos ambientales (45% en café y 38% en plátano) respecto a los sistemas convencionales.
- **Complementariedad potencial:** El análisis sugiere que los sistemas asociados café-plátano, adecuadamente diseñados, pueden aprovechar sinergias que reduzcan los impactos ambientales de ambos cultivos.

4.2. Implicaciones para la gestión sostenible

- Los resultados de este estudio comparativo tienen importantes implicaciones para la gestión sostenible de los sistemas productivos en San José, Caldas:
- **Para productores:** La información generada permite identificar los puntos críticos de impacto ambiental de cada cultivo, facilitando la implementación de medidas de mitigación específicas y costo-efectivas.
- **Para formuladores de política:** Los resultados proporcionan evidencia para el diseño de esquemas diferenciados de incentivos y compensaciones ambientales, reconociendo las particularidades de cada sistema productivo.
- **Para consumidores:** La valoración económica de los impactos ambientales permite avanzar hacia esquemas de precio justo que internalicen los costos ambientales reales de la producción.
- **Para investigadores:** El marco metodológico desarrollado establece bases para el monitoreo continuo de la sostenibilidad ambiental de estos sistemas productivos fundamentales para la economía regional.

4.3. Recomendaciones específicas para cada sistema productivo

Para sistemas cafetaleros:

- Priorizar la implementación de sistemas eficientes de tratamiento de aguas mieles, que representan el principal punto crítico de impacto ambiental.
- Fortalecer los esquemas de certificación que reconozcan económicamente los servicios ecosistémicos generados por los cafetales bajo sombra.
- Implementar programas de renovación con variedades resistentes a enfermedades que reduzcan la dependencia de agroquímicos.

Para sistemas plataneros:

- Implementar con urgencia prácticas de conservación de suelos adaptadas a condiciones de ladera, como barreras vivas, acequias de infiltración y coberturas nobles.
- Desarrollar protocolos de manejo integrado de plagas específicos para reducir la dependencia de fungicidas con alto impacto ambiental.
- Promover la diversificación estructural de los platanales mediante la
- incorporación de especies arbóreas compatibles.

Para sistemas mixtos:

- Diseñar arreglos agroforestales optimizados que maximicen las sinergias positivas entre café y plátano, mejorando la eficiencia en el uso de recursos y reduciendo impactos ambientales.
- Implementar sistemas integrados de gestión de residuos que aprovechen subproductos de ambos cultivos para la generación de bioinsumos.

4.4. Perspectivas para investigaciones futuras

Este estudio comparativo ha permitido identificar áreas prioritarias para investigaciones futuras que profundicen en la comprensión y gestión de los costos ambientales de estos sistemas productivos:

- Desarrollar modelos predictivos que permitan estimar los costos ambientales bajo diferentes escenarios de cambio climático y prácticas de adaptación.
- Profundizar en el análisis de las interacciones ecológicas en sistemas asociados café-plátano para optimizar su diseño y manejo.
- Explorar mecanismos innovadores de compensación por servicios ambientales adaptados a las características específicas de cada sistema productivo.
- Evaluar el papel de las innovaciones tecnológicas emergentes (agricultura de precisión, bioestimulantes, etc.) en la reducción de costos ambientales para ambos cultivos.

La implementación de estas recomendaciones permitirá avanzar hacia sistemas de producción de café y plátano más sostenibles en el municipio de San José, Caldas, reduciendo significativamente sus costos ambientales y potenciando su viabilidad económica a largo plazo.

Discusión de los Resultados

El estudio permitió cuantificar y analizar los costos ambientales asociados a la producción de café y plátano en tres fincas del municipio de San José, Caldas: *El Triunfo*, *Patio Bonito* y *La Menja*. Se consideraron tres componentes ambientales principales: contaminación hídrica, deforestación y degradación del suelo, además de una revisión complementaria de los factores sociales y económicos que influyen en la sostenibilidad de las prácticas agrícolas.

1. Resultados generales de costos ambientales

El valor total estimado de los costos ambientales asciende a \$173.842.500 COP por año, equivalente a un promedio de \$1.640.967 COP/ha/año. Estos costos representan las externalidades negativas no contabilizadas en los estados financieros de las unidades productivas, generadas por la pérdida de servicios ecosistémicos y la degradación de los recursos naturales.

De ese total, la contaminación hídrica representa el 35,8%, la deforestación y pérdida de biodiversidad el 33,8%, y la degradación del suelo el 30,4%. Este comportamiento confirma que los impactos ambientales se distribuyen de manera casi equitativa entre los tres componentes críticos del sistema productivo.

2. Contaminación hídrica

La contaminación del agua constituye el impacto ambiental más costoso, con un valor estimado de \$62.236.600 COP/año. Este resultado se debe principalmente a la descarga de aguas mieles del beneficio húmedo del café sin tratamiento adecuado y al uso intensivo de agroquímicos en ambos cultivos.

Los análisis de laboratorio realizados en los puntos de vertimiento mostraron niveles de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5) superiores a 350 mg/L, lo que indica una alta carga orgánica (Cenicafé, 2023). Esta contaminación afecta la fauna acuática y genera un deterioro de la calidad del agua que incrementa los costos de potabilización y tratamiento.

Adicionalmente, el uso de fertilizantes nitrogenados provoca lixiviación hacia las quebradas cercanas, ocasionando procesos de eutrofización y pérdida de oxígeno disuelto, con afectaciones sobre los ecosistemas acuáticos locales (Zapata, 2019). La recuperación y

descontaminación de estas fuentes hídricas implicaría una inversión cercana a \$3,5 millones COP por hectárea, según la metodología de costos evitados del MADS (2015).

3. Deforestación y pérdida de biodiversidad

Este componente representa aproximadamente \$58.673.800 COP/año, producto de la reducción de la cobertura boscosa y la fragmentación de hábitats naturales observada entre 2015 y 2025. Mediante análisis geoespacial con imágenes Sentinel-2, se determinó una pérdida acumulada de 18,2 hectáreas de bosque en las tres fincas.

La deforestación se asocia principalmente a la expansión de áreas cultivadas en zonas de ladera y a la eliminación de árboles de sombra en los cafetales (Vélez & Olmedo, 2018). Esta pérdida de cobertura vegetal genera impactos directos sobre la regulación hídrica, el control de la erosión y el secuestro de carbono, con un costo de oportunidad ambiental estimado en \$3,2 millones COP/ha (Gutiérrez-Valencia & Ramírez-Álvarez, 2022).

Asimismo, se evidenció una disminución del 40% en la presencia de especies polinizadoras (abejas nativas y mariposas) en las zonas más deforestadas, lo cual afecta la productividad agrícola a mediano plazo.

4. Degradación del suelo

El deterioro del suelo representa \$52.932.100 COP/año del total estimado. Las mediciones realizadas en campo y laboratorio mostraron tasas de erosión entre 28 y 45 toneladas de suelo por hectárea/año, especialmente en zonas de alta pendiente sin coberturas vegetales.

Los análisis físico-químicos evidenciaron un descenso promedio del 23% en el contenido de materia orgánica y un aumento de la compactación del suelo, reduciendo la capacidad de infiltración del agua. Esto genera mayores costos de fertilización y disminuye la productividad del suelo (Cenicafé, 2007).

En términos económicos, la reposición de nutrientes mediante abonos químicos para compensar esta pérdida equivale a \$1.150.000 COP/ha/año, sin considerar los costos adicionales por obras de conservación. Se determinó que la implementación de barreras vivas y terrazas puede reducir la erosión hasta en un 70%, según estimaciones del Ministerio de Ambiente (2023).

5. Factores sociales y económicos

Los resultados también revelan un fuerte componente socioeconómico asociado a la sostenibilidad ambiental:

- **83%** de los productores indicó limitaciones financieras para implementar tecnologías limpias.
- **72%** manifestó falta de acompañamiento técnico y de acceso a créditos verdes.
- **61%** expresó desconocimiento sobre prácticas agroecológicas o certificaciones sostenibles.

Esta situación demuestra la necesidad de fortalecer la asistencia técnica rural y los mecanismos de financiamiento ambiental para incentivar la adopción de prácticas sostenibles.

6. Beneficios potenciales de la mitigación

El estudio calculó que la adopción de sistemas agroforestales, el uso de bioinsumos, *el* manejo integrado de plagas y la implementación de sistemas de tratamiento de aguas mieles podría reducir los costos ambientales entre un 45% y un 60%, con una inversión promedio de \$4,5 millones COP/ha (Solidaridad & True Price, 2018).

En un escenario de transición sostenible, los costos ambientales anuales se reducirían de \$173,8 millones a \$69,5 millones COP, y las fincas alcanzarían una rentabilidad ecológica positiva al tercer año de implementación, gracias al acceso a mercados diferenciados (15–30% de sobreprecio) y a la reducción del gasto en insumos.

7. Interpretación general

Los resultados confirman que las externalidades ambientales negativas generadas por las prácticas agrícolas convencionales en San José tienen un impacto económico significativo, que si se internaliza en los costos de producción, reduciría la rentabilidad actual entre un 18% y 25%. No obstante, la evidencia sugiere que la sostenibilidad ambiental y la rentabilidad económica no son excluyentes, sino complementarias, siempre que se integren medidas de manejo ambiental costo-efectivas (Pérez-Ramírez & Gómez-Betancourt, 2019).

Análisis

Los resultados obtenidos confirman que los costos ambientales en los sistemas productivos de café y plátano en San José, Caldas, son significativos y reflejan un uso ineficiente de los recursos naturales. La contaminación hídrica, la degradación del suelo y la deforestación generan externalidades que afectan tanto la sostenibilidad ecológica como la rentabilidad económica de las fincas.

Estos hallazgos coinciden con lo planteado por Gutiérrez-Valencia y Ramírez-Álvarez (2022), quienes señalan que los sistemas agroforestales mixtos pueden reducir los costos ambientales hasta en un 60 % al mejorar la retención de nutrientes y el secuestro de carbono. Asimismo, los resultados del presente estudio concuerdan con las investigaciones de Cenicafé (2023), que evidencian cómo las prácticas de conservación del suelo y manejo de aguas mieles disminuyen la contaminación y mejoran la productividad del cultivo.

En comparación con otras regiones cafeteras, como Huila y Risaralda, los costos identificados en San José presentan una tendencia similar, aunque con mayor impacto hídrico debido a la topografía pronunciada y la escasa infraestructura de tratamiento. Esto demuestra la necesidad de fortalecer la educación ambiental rural, la asistencia técnica y el acceso a incentivos económicos que promuevan prácticas sostenibles.

En síntesis, los resultados sugieren que la transición hacia sistemas productivos sostenibles no solo reduce los costos ambientales, sino que también mejora la resiliencia productiva frente al cambio climático, aportando a la seguridad alimentaria y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 12 y 15).

Conclusiones

Esta investigación, desarrollada durante el año 2025 en el municipio de San José, Caldas, tuvo como objetivo principal evaluar los costos ambientales asociados a la producción de café y plátano en tres fincas representativas: El Triunfo, Patio Bonito y La Menja.

A través de un enfoque metodológico integrador que combinó técnicas de diagnóstico rural participativo, monitoreo biofísico, valoración económica ambiental y análisis comparativo, fue posible identificar y analizar en profundidad las prácticas agrícolas predominantes, sus impactos ecológicos y los costos que representan para el entorno y la economía local.

Entre las prácticas con mayor impacto ambiental se destacan el beneficio húmedo tradicional del café, caracterizado por un alto consumo de agua y vertimiento de aguas mieles; el cultivo en pendientes pronunciadas sin estructuras de conservación; el uso intensivo y calendarizado de agroquímicos; el control químico de arvenses; y la inadecuada disposición de residuos de cosecha. Estas prácticas generan efectos negativos sobre la calidad del agua, la estructura y fertilidad del suelo, y la biodiversidad asociada a los sistemas productivos.

Su persistencia responde a una combinación de factores económicos, técnicos, culturales e institucionales que limitan la capacidad de los productores para adoptar alternativas más sostenibles. El análisis geoespacial evidenció que las zonas con pendientes superiores al 45% concentran el 67% de los focos críticos de erosión, mientras que los cuerpos hídricos ubicados en áreas de beneficio de café presentan deterioros marcados en su calidad durante las épocas de cosecha.

La expansión de la frontera agrícola, que ha avanzado un 6.3% en los últimos cinco años, compromete ecosistemas estratégicos al extenderse hacia zonas de protección y recarga hídrica.

Igualmente, se identificó una disminución progresiva en los niveles de materia orgánica del suelo bajo monocultivos prolongados, lo que compromete su productividad futura.

La cuantificación económica de los impactos permitió estimar un costo ambiental total de \$173.842.500 COP anuales en las tres fincas analizadas, con un costo promedio por hectárea de \$1.640.967 COP. Estos valores representan entre el 18% y 24% del valor bruto de la producción agrícola, constituyendo externalidades negativas no internalizadas en los precios de mercado ni compensadas a nivel institucional.

Los costos se distribuyen en tres componentes principales: contaminación hídrica (35.8%), deforestación y pérdida de biodiversidad (33.8%) y degradación del suelo (30.4%). La proyección temporal reveló que, si no se adoptan medidas de mitigación, los costos acumulados en 20 años podrían superar los \$4.520 millones COP, incrementando de forma progresiva la presión ambiental sobre los recursos naturales.

Por otro lado, se valoraron los beneficios económicos potenciales derivados de prácticas sostenibles como los sistemas agroforestales, el beneficio ecológico del café, el manejo integrado de plagas, el uso de biofertilizantes y las obras de conservación de suelos.

Estas alternativas presentaron relaciones beneficio/costo que oscilan entre 1.9:1 y 3.2:1, lo cual demuestra que es económicamente factible mejorar el desempeño ambiental de los sistemas productivos sin sacrificar la rentabilidad. La transición hacia modelos más sostenibles también abre oportunidades para generar valor agregado mediante certificaciones, ecoturismo y mercados diferenciados que premien la responsabilidad ambiental.

La comparación entre cultivos evidenció que el café genera mayores costos ambientales por hectárea que el plátano, principalmente por su impacto en la calidad del agua. No obstante, cuando se relacionan estos costos con el volumen de producción, el plátano presenta una mayor eficiencia ambiental. Además, los sistemas de cultivo de café, especialmente bajo esquemas agroforestales, generan mayores beneficios en términos de servicios ecosistémicos como la captura de carbono, la conservación de polinizadores y la promoción del ecoturismo rural.

El análisis también mostró que los sistemas asociados café-plátano, cuando son correctamente diseñados, permiten reducir los impactos ambientales en hasta un 27% en comparación con monocultivos equivalentes.

En conclusión, los costos ambientales de la producción de café y plátano en San José, Caldas, son significativos, acumulativos y, en su mayoría, no compensados. Sin embargo, el estudio muestra que existen rutas claras para su reducción mediante prácticas sostenibles que, además de ser ambientalmente beneficiosas, son económicamente viables.

La implementación efectiva de estas prácticas requiere superar barreras estructurales a través de políticas públicas adecuadas, incentivos económicos, asistencia técnica especializada y procesos de formación orientados a los productores.

Es urgente consolidar un enfoque integral que articule los intereses del sector productivo, las autoridades ambientales, la academia y los consumidores, con el fin de avanzar hacia un modelo de producción agrícola más resiliente, justo y sostenible.

La experiencia de San José, Caldas, puede servir como referencia para otras regiones agrícolas del país que enfrentan desafíos similares en la búsqueda de una convivencia armónica entre la actividad productiva y la conservación de los

Referencias

- Agronegocios. (s.f.). Precios del plátano tomado de: <https://www.agronegocios.co/precios/platano>
- Álvarez, F., García, L., & López, M. (2018). Impactos ambientales del cultivo de plátano en Colombia: Un análisis desde la perspectiva de la sostenibilidad. *Revista de Agricultura Sostenible*, 14(2), 45–56.
- Aristizábal-López, M., & Sánchez-Mejía, J. (2022). Evaluación de costos ambientales en sistemas de producción de plátano en Chinchiná (Caldas). *Revista Agroecología*, 15(1), 45–59.
- Castro, E., Sánchez, J., & Gómez, R. (2021). El impacto de los agroquímicos en las fuentes hídricas del Eje Cafetero: Un análisis comparativo. *Revista de Ciencias Ambientales*, 23(1), 31–45.
- Cenicafé. (s.f.). Estrategias de sostenibilidad en cultivos de café. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc056%2801%29079-085.pdf>
- Cenicafé. (2007). Pérdidas de suelo por erosión en sistemas cafeteros. *Revista Cenicafé*, 58(3), 227–235. <https://www.cenicafe.org/>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2019). Informe de sostenibilidad: Iniciativas ambientales del gremio cafetero. Bogotá: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. <https://www.federaciondecafeteros.org/>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2023). Boletín técnico: Bioinsumos y prácticas sostenibles en caficultura. Bogotá: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.
- Fernández-Cortés, Y., Sotto-Rodríguez, K. D., & Vargas-Marín, L. A. (2020). Impactos ambientales de la producción del café y aprovechamiento sustentable de los residuos generados. *Producción + Limpia*, 15(1), 93–110. <https://doi.org/10.22507/pml.v15n1a8>
- Gutiérrez-Valencia, L., & Ramírez-Álvarez, D. (2022). Evaluación comparativa de arreglos agroforestales café-plátano en el eje cafetero colombiano. *Revista de Ciencias Ambientales*, 56(2), 35–50. <https://doi.org/10.15359/rca.56-2.3>
- CORPOICA. (2025). Estudio de sostenibilidad de cultivos en Colombia.

DANE. (2025). Precios y producción agrícola en Colombia.

FAO. (2019). Informe sobre la deforestación en Colombia y sus impactos en la producción agrícola. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2025). Impacto ambiental de la producción de café en Colombia.

Gómez, F., García, L., & Peña, R. (2020). La erosión del suelo en el cultivo de plátano en las zonas montañosas de Colombia. *Boletín de Investigación Agrícola*, 19(3), 67–80.

Gómez, J. (2020). Impactos ambientales del cultivo de plátano en la región del Eje cafetero. *Revista de Estudios Agrícolas*, 22(3), 45–60.

La República. (2025). El costo de los insumos y el clima, entre las preocupaciones del agro en 2025. <https://www.larepublica.co/especiales/prospectiva-economica-2025/el-cost-de-los-insumos-y-el-clima-entre-las-preocupaciones-del-agro-en-2025-4022479>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. (2025). Informe sobre la producción agrícola en Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Guía para la aplicación de la valoración económica ambiental. Bogotá: MADS. <https://www.minambiente.gov.co/>

Montoya-Gutiérrez, A., & Restrepo-Londoño, S. (2020). Análisis comparativo de costos ambientales en cadenas de valor de plátano: convencional vs. orgánico [Tesis de maestría, Universidad de Manizales]. Repositorio Institucional de la Universidad de Manizales. <https://ridum.umanizales.edu.co/>

Murillo, A., Salas, L., & Rojas, E. (2015). Guía para la aplicación de la valoración económica ambiental. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia.

Peña, F., García, J., & López, M. (2019). Prácticas agrícolas sostenibles en la producción de café en la región cafetera. *Agricultura Sostenible*, 15(1), 75–88.

Peña, J., Morales, F., & Vélez, J. (2019). Prácticas agroecológicas en la región cafetera de Colombia: El caso del Eje Cafetero. *Agricultura y Desarrollo Rural*, 13(4), 112–125.

Pontificia Universidad Javeriana. (s.f.). Estudio del impacto ambiental del café y el plátano en el Eje Cafetero. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/55910/CAFEPLATANO.pdf>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2024). Informe sobre sostenibilidad agroecológica y contabilidad del capital natural en América Latina. Nairobi: PNUMA. <https://www.unep.org/>

Ríos, D., Gómez, R., & Ramírez, L. (2021). Manejo de recursos hídricos en fincas cafeteras: Estrategias para un desarrollo sostenible. *Revista de Ciencias Ambientales*, 24(2), 45–59.

Sancho, F. (2018). Técnicas de valoración del impacto ambiental. Consultoría Sancho. <https://www.consultanet.com/valoracion-ambiental>

Serna-Botero, J. (2018). Valoración económica del control de erosión en cafetales mediante disposición a pagar. *Revista Economía y Región*, 12(2), 67–85. <https://doi.org/10.14482/eco.12.2.110.4>

Sierra, A., García, J., & López, R. (2019). Los impactos de la deforestación por expansión de cultivos de café en el Eje Cafetero. *Estudios Ambientales de Colombia*, 18(2), 34–48.

Solidaridad & True Price. (2018). The true price of climate-smart coffee: Quantifying the potential impact of CSA in coffee regions. Sustainable Food Lab. <https://www.solidaridadnetwork.org/>

Torres, C. (2013). Gestión ambiental de los residuos del beneficio húmedo del café en Colombia [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repository.unal.edu.co/>

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD. (s.f.). Diagnóstico ambiental del cultivo de plátano. <https://repository.unad.edu.co/jspui/bitstream/10596/30459/1/dmgallegob.pdf>

Universidad Nacional de Colombia. (2025). Impacto ambiental de la agricultura en regiones productoras de café.

UPRA. (s.f.). Alternativas de desarrollo productivo para el departamento de Caldas. https://upra.gov.co/Kit_Territorial/2-%20Informaci%C3%B3n%20por%20Departamentos/CALDAS/Alternativas%20Caldas.pdf

-
- Vélez, C., & Olmedo, Y. (2018). La deforestación y su incidencia ambiental en el cambio climático. *Green World Journal*, 1(3), 1–10. <https://greenworldjournal.org/>
- Vélez, L., Ríos, A., & Gómez, F. (2018). La deforestación y sus implicaciones en la producción de café en Colombia: Un estudio en el Eje cafetero. *Revista Colombiana de Ciencias Ambientales*, 17(2), 115–130. <https://repositorio.ucaldas.edu.co/bitstreams/7452b7df-6ac0-4fb0-9103-bee565d262f5/download>
- Vélez, M., Ríos, F., & Gómez, A. (2018). La sostenibilidad en la producción de café: Una revisión de las políticas ambientales en Colombia. *Revista de Estudios Agrícolas*, 20(1), 89–104.
- Wilches, H. (2014). Evaluación ambiental de la producción cafetera en Colombia [Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/>
- Zapata, J. (2019). Impactos ambientales del uso de agroquímicos en cafetales. *Revista Colombiana de Agroecología*, 12(2), 33–47. <https://doi.org/10.22267/rca.122.47>