

**Evaluación de la Sostenibilidad Ambiental, Económica y Productiva de Modelos
Agroforestales con Café en la Laguna de Ortices**

Deisy Carolina Lozano Suarez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniería Forestal

Directora

Sandra Milena Díaz López

Ingeniera Forestal

Codirector

Rubén Carvajal Caballero

Ingeniero Agrónomo

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia-IPRED

Programa de Ingeniería Forestal

Málaga

2019

Agradecimientos

Agradezco a Dios por ser mi guía y fortaleza en cada momento de la vida

A mi querida madre, por ser una de las personas más importantes e incondicional, con su ejemplo y fortaleza me ayuda a ser mejor cada día.

A mi querido padre, por enseñarme cosas importantes para el camino de la vida.

A mi querida hermana, siempre incondicional, su entrega y colaboración para la realización de proyectos importantes en mi vida, a nivel personal y profesional.

A mis compañeros de estudio y amigos que contribuyeron durante esta etapa de mi vida.

A mi directora y codirector por el apoyo y guía durante la realización de este proyecto.

A la Asociación Agropecuaria Laguna de Ortices por permitirme realizar el proyecto en predios de sus productores.

Deisy Carolina Lozano Suárez

Tabla de Contenido

Introducción	16
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo general.....	18
1.2 Objetivos específicos	18
2. Planteamiento del problema.....	19
3. Justificación del Proyecto	20
4. Marco referencial	22
4.1 Marco teórico.....	22
4.1.1 Proceso productivo del café.....	24
4.1.2 Estructura de los Sistemas de Producción: Agrícola, Forestal y Agroforestal.	25
4.1.3 Agroforestería.	26
4.1.4 Interacciones Ecológicas en Agroforestería.....	27
4.1.5 Categorías básicas de Sistemas Agroforestales	28
4.1.6 Caracterización de Sistemas Agroforestales:.....	30
4.1.7 Variables necesarias para el análisis del estado del Sistema Agroforestal	30
4.1.8 Sistemas de indicadores para diagnosticar el estado de un Sistema Agroforestal	30
4.1.9 Humedad del suelo.....	34
4.2 Variables morfológicas	35
4.3 Variables fisiológicas.....	35
4.3.2 Sostenibilidad.....	37
4.4 Marco jurídico.....	38
4.5 Marco histórico de la investigación	40
4.5.1 Caracterización morfológicas, productivas y componentes del rendimiento de dos variedades de café: Colombia y Caturra	40

4.5.2 Estudio comparativo de indicadores de calidad de suelo en fincas de café orgánico y convencional en Turrialba, Costa Rica	41
4.5.3 Morfología del café (<i>Coffea arabica</i> L) en lotes comerciales en Nicaragua.....	41
4.5.4 Análisis económico de la producción de fincas cafeteras convencionales y orgánicas en transición, en el departamento de Caldas.....	41
4.5.5 Sostenibilidad socioeconómica y ecológica de sistemas agroforestales de café (<i>Coffea arabica</i>) en la microcuenca del Río Sesesmilés, Copán, Honduras.	42
4.5.6 Estudio económico de sistemas de producción cafeteros certificados y no certificados, en dos regiones de Colombia	43
4.5.7 Valoración de sostenibilidad ambiental mediante indicadores de calidad del suelo, en sistemas de producción de café en Colombia	43
4.5.8 Evaluación socioeconómica del sistema agroforestal tradicional café-plátano-cítricos en el municipio de Tlapacoyán, Veracruz, México	44
4.5.9 Caracterización agro-morfológica de nueve variedades de café arábigo (<i>Coffea arabica</i> L) en el cantón Caluma, Provincia Bolívar, Ecuador.	44
4.5.10 Caracterización de nueve agro ecosistemas de café de la cuenca del río Porce, Colombia, con un enfoque agroecológico.....	45
4.5.11 Comportamiento ecofisiológico del cafeto (<i>Coffea arabica</i> L.) cv Castillo en Sistemas Agroforestales de Tibacuy, Cundinamarca.	45
5. Metodología	45
5.1 Caracterización de las fincas del área de estudio	46
5.1.1 Aspectos generales del área de estudio	46
5.2 Variables del suelo.....	48
5.2.1 Muestreo de las variables químicas, físicas y biológicas.....	49
5.3 Variables morfológicas y fisiológicas del café	50
5.3.1 Variables morfológicas	50
5.3.2 Variables fisiológicas del café	52
5.3.3 Variables económicas	52
5.3.4 Indicadores ambientales.....	53
5.3.5 Indicadores económicos.....	55

5.3.6 Indicadores productivos	55
6. Resultados y Discusión	56
6.1 Caracterización de las fincas cafetaleras en el área de estudio	56
6.1.1 Características socioeconómicas.....	56
6.1.2 Caracterización general de los cafetales.	57
6.2 Variables del suelo.....	58
6.2.1 Perfil del suelo	58
6.2.2 Fauna del suelo: Para la fauna del suelo (ver Apéndice J).	60
6.2.3 Análisis de suelos.....	63
6.2.4 Análisis descriptivo para variables físicas, químicas y biológicas del suelo.	65
6.2.5 Análisis de Componentes Principales.....	68
6.2.6 Análisis de Agrupamiento Jerárquico	71
6.3 Variables morfológicas y fisiológicas del café	72
6.3.1 Variables morfológicas del café.....	72
6.3.2 Variables fisiológicas del café	81
6.4 Indicadores económicos.....	86
6.5 Sostenibilidad ambiental	88
6.5.1 Variables químicas.....	88
6.5.2 Variables físicas	92
6.5.3 Variables: Porcentaje de sombra, Índices de diversidad, Lombrices.....	95
6.6 Sostenibilidad económica	97
6.7 Sostenibilidad productiva.....	99
6.8 Sostenibilidad ambiental, económica y productiva	101
7. Conclusiones	102
8. Recomendaciones	103
Referencias bibliográficas.....	104

Apéndices (ver en CD y disponible en Base de Datos UIS)

Lista de Tablas

Tabla 1.5 países con mayor producción mundial de café	22
Tabla 2 Indicadores de calidad del suelo.	31
Tabla 3 Clasificación de los invertebrados del suelo de acuerdo con los hábitos alimenticios y distribución en el suelo	32
Tabla 4. Clasificación de los invertebrados del suelo de acuerdo con el tamaño de los poros y preferencia al microhábitat.....	33
Tabla 5. Localización geográfica de las fincas del área de estudio.....	47
Tabla 6 Aspectos generales del área de estudio	48
Tabla 7. Variables físicas, químicas y biológicas utilizadas en el presente estudio	49
Tabla 8 Metodologías utilizadas para las variables del suelo.	49
Tabla 9. Variables morfológicas tenidas en cuenta en el presente estudio	51
Tabla 10 Variables fisiológicas tenidas en cuenta en el presente estudio.....	52
Tabla 11. Familia de acuerdo con los resultados del inventario	57
Tabla 12 Familia de acuerdo con los resultados del inventario	58
Tabla 13. Descripción de los horizontes del suelo	59
Tabla 14. Profundidad de los horizontes del suelo	59
Tabla 15 Clase agrológica, tipo y orden del suelo para el área de estudio	60
Tabla 16 Resultados de los análisis de suelos para las 10 fincas	63
Tabla 17 Resultados de los análisis de suelos para las 10 fincas	64
Tabla 18 Resultados de los análisis de suelos para las 10 fincas	64
Tabla 19 Resultados de los análisis de suelos para las 10 fincas	64
Tabla 20. Estadística descriptiva de las propiedades químicas, físicas, biológicas (suelo)	65
Tabla 21. Correlaciones lineales entre las variables químicas, físicas, biológicas (suelo).	66

Tabla 22. Altura promedio de las plantas de café en las fincas	73
Tabla 23 Incremento en la altura de las plantas de café por semana	74
Tabla 24. Estadística descriptiva variable Número de bandolas	74
Tabla 25. Estadística descriptiva variable Fluorescencia de clorofila	82
Tabla 26. Estadística descriptiva variable Conductancia estomática	84
Tabla 27. Estadística descriptiva variable Humedad del suelo	86
Tabla 28. Costos en cada una de las etapas de producción del café	86
Tabla 29. Costos en cada una de las etapas de producción del cafe	86
Tabla 30. Rangos utilizados para la determinación del grado de sostenibilidad	88

Lista de Figuras

Figura 1. Cifras del Censo Cafetero para Santander, Provincia de García Rovira y municipio de San Andrés año 2016.	23
Figura 2. Etapas del proceso productivo del café.....	24
Figura 3. Etapas del proceso productivo del café.....	24
Figura 4. Principales especies utilizadas como sombrío en Sistemas Agroforestales	25
Figura 5. Procesos ecológicos que actúan en un Sistema Agroforestal	27
Figura 6 Representación esquemática de árboles en cultivos perennes.	29
Figura 7. Estructura de Sistemas Agroforestales	29
Figura 8. Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuestos para monitorear los cambios que ocurren en el suelo	32
Figura 9. Fases de la metodología desarrollada.	46
Figura 10. Mapa de ubicación de las 10 fincas objeto de estudio	47
Figura 11. División en tercios de la planta de café para toma de datos	51
Figura 12. Rubros económicos a lo largo del proceso productivo del café	53
Figura 13. Variables del fruto de café como indicadores productivos.....	55
Figura 14. Principales especies asociadas al cultivo de café en el área de estudio	57
Figura 16. Individuos de la clase Insecta para las 10 fincas del área de estudio.....	61
Figura 17. Clase Arachnida en las 10 fincas del área de estudio	62
Figura 18. Clase Clitellata en las 10 fincas del área de estudio.	63
Figura 19. Varianza que explica cada componente principal.....	68
Figura 20. Relación entre las variables y los componentes	69
Figura 21. Relaciones individuales y componentes principales	69
Figura 22. Conformación de grupos mediante el Análisis de Agrupamiento Jerárquico ...	71

Figura 23. Reunión sobre fertilidad del suelo a los productores del área de estudio	72
Figura 24. Altura promedio de las plantas para las 12 semanas de medición.....	73
Figura 25. Longitud de la rama de las plantas de café en las fincas	75
Figura 26. Longitud de la rama de las plantas de café en las fincas	76
Figura 27. Diámetro de las ramas de las plantas de café en las fincas.....	76
Figura 28. Diámetro de las ramas de las plantas de café en las fincas.....	77
Figura 29. Número de nodos de las plantas de café en las fincas	77
Figura 30. Número de nodos de las plantas de café en las fincas	78
Figura 31. Número de frutos de las plantas de café en las fincas	79
Figura 32. Número de frutos de las plantas de café en las fincas	79
Figura 33. Número de cojines florales en las plantas de café en las fincas	80
Figura 34. Número de cojines florales en las plantas de café en las fincas	80
Figura 35. Valores de fluorescencia promedio para las 10 fincas del área de estudio.....	81
Figura 36. Conductancia estomática para las 10 fincas del área de estudio.....	83
Figura 37. Humedad del suelo promedio para las fincas del área de estudio	85
Figura 38. Estructura de costos en el proceso productivo del café	88
Figura 39. Grado de sostenibilidad ambiental para las fincas del área de estudio	89
Figura 40. Redegrama del grado de sostenibilidad ambiental	89
Figura 41. Análisis de agrupamiento jerárquico	90
Figura 42. Valores y grado de restricción para variables químicas de los suelos	91
Figura 43. Grado de restricción en las fincas con sistemas agroforestales con café.....	91
Figura 44. Grado de sostenibilidad ambiental para las variables físicas.....	92
Figura 45. Valores y grado de restricción de las variables físicas de los suelos	93
Figura 46. Grado de restricciones o limitantes de las propiedades físicas.....	93
Figura 47. Análisis de agrupamiento jerárquico	94

Figura 48. Grado de sostenibilidad ambiental de las fincas del área de estudio.	95
Figura 49. Redegrama de sostenibilidad para las variables: Índices de diversidad y Densidad de Lombrices.	96
Figura 50. Análisis de agrupamiento jerárquico sostenibilidad ambiental.	96
Figura 51. Grado de sostenibilidad económica de las fincas del área de estudio	97
Figura 52. Redegrama del grado de sostenibilidad económica de las fincas	98
Figura 53. Análisis de agrupamiento jerárquico Sostenibilidad económica.	98
Figura 54. Grado de sostenibilidad productiva de las fincas del área de estudio.	99
Figura 55. Redegrama del grado de sostenibilidad productiva de las fincas	100
Figura 56. Análisis de agrupamiento jerárquico sostenibilidad productiva	100
Figura 57. Gráfico de barras sostenibilidad ambiental, económica y productiva	101

Resumen

Título: Evaluación de la Sostenibilidad Ambiental, Económica y Productiva de Modelos Agroforestales con Café en la Laguna de Ortices

Autor: Deisy Carolina Lozano Suarez**

Palabras clave: Agroforestería, Café, Conductancia, Fluorescencia, Morfología, Calidad del suelo

Descripción:

En el contexto rural es muy común la generación de bajas productividades agrícolas, pecuarias y forestales y de modelos productivos no sostenibles, es decir, los productores tienen sistemas de producción de subsistencia y no de producción empresarial. El propósito de esta investigación está relacionado con la evaluación ambiental, económica y productiva de los sistemas agroforestales con café en la vereda Laguna de Ortices, municipio de San Andrés, Santander.

El proceso metodológico utilizado para evaluar la sostenibilidad de los componentes se ha orientado a caracterizar los sistemas agroforestales, describir el tipo de suelo, clases agrológicas, perfil del suelo, propiedades físicas, químicas y biológicas, niveles de restricción para las variables del suelo, determinación de índices de diversidad del componente arbóreo asociados al cultivo de café. De igual manera, se utilizó un proceso descriptivo para caracterizar el componente productivo relacionado con la evaluación de rendimientos, crecimiento de las plantas de café y descripción física del grano. Para evaluar el componente económico se determinaron los costos por etapas y el ingreso bruto y neto. Para la valoración del componente ambiental, económico y productivo se realizaron ponderaciones de las variables utilizadas para cada ítem. Se realizaron análisis estadísticos y multivariados (ACP y AAJ).

Se encontraron diferentes grados y niveles de restricción asociados al suelo que limitan la capacidad del recurso para obtener sistemas eficientes. Se hallaron bajos niveles de productividad y altos costos que generan sistemas agroforestales con baja sostenibilidad económica y productiva. Es necesario, realizar cambios en los planes de fertilización y tecnologías utilizadas para mejorar los sistemas agroforestales que permitan mejorar la sostenibilidad en el ámbito ambiental, económico y productivo.

** Trabajo de grado

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia. Programa de Ingeniería Forestal
Directora: Sandra Milena Díaz López, Ingeniera Forestal. Codirector: Rubén Carvajal Caballero Ingeniero Agrónomo.

Abstract

Title: Evaluation of the Environmental, Economic and Productive Sustainability of Agroforestry Models with Coffee in the Laguna of Ortices

Author: Deisy Carolina Lozano Suárez**

Keywords: Agroforestry, Coffee, Conductance, Fluorescence, Humidity, Morphology, Indicators quality of soil

Description:

In the rural context it is very common to generate low agricultural, livestock and forestry products and unsustainable productive models, that is, producers have subsistence production systems and not business production. The purpose of this research is related to the environmental, economic and productive evaluation of agroforestry systems with coffee in the Laguna de Ortices village, municipality of San Andrés, Santander.

The methodological process used to assess the sustainability of the components has been oriented to characterize agroforestry systems, describe the type of soil, agrological classes, soil profile, physical, chemical and biological properties, restriction levels for soil variables, detection of diversity indices of the tree component associated with coffee cultivation. Similarly, a descriptive process is found to characterize the productive component related to the evaluation of yields, growth of coffee plants and physical description of the grain. To evaluate the economic component, the costs by stages and the gross and net income are determined. For the valuation of the environmental, economic and productive component, weights of the variables used for each item were analyzed. It was statistically analyzed and multivariate (ACP and AAJ). Different degrees and levels of restriction associated with soil were found that limit the ability of the resource to obtain efficient systems.

It is found in low levels of productivity and high costs that generate agroforestry systems with low economic and productive sustainability. It is necessary to make changes in the fertilization plans and technologies used to improve agroforestry systems that can improve sustainability in the environmental, economic and productive fields.

** Trabajo de grado

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia. Programa de Ingeniería Forestal
Directora: Sandra Milena Díaz López, Ingeniera Forestal. Codirector: Rubén Carvajal Caballero, Ingeniero Agrónomo.

Introducción

En el sector rural de Colombia específicamente en las unidades productivas de los pequeños productores se evidencian modelos de producción de baja sostenibilidad ambiental, económica y productiva. Estas situaciones se relacionan con la calidad del recurso suelo, presentando altos y muy altos niveles de restricción en relación a variables físicas, químicas, biológicas y condiciones topográficas, siendo limitantes en el desarrollo radicular y el crecimiento de las plantas en el área de estudio en relación a la agricultura y el ámbito forestal, disminuyendo el rendimiento, también se puede mencionar el uso de modelos tecnológicos insostenibles (FAO, 2014).

Los productores no tienen información sobre las condiciones del suelo a través de análisis de variables físicas y químicas, los programas de fertilización no son coherentes con las deficiencias en el suelo que permitan ofrecer a la planta los nutrientes para cada etapa de crecimiento y producción, ausencia de sistemas de riego, siembra del cultivo en suelos con poca profundidad efectiva, altas pendientes y textura.

Es así que la agroforestería es un sistema de manejo de los cultivos y el suelo, mediante el cual se busca aumentar los rendimientos del cultivo principal (café), combinando la producción de las especies arbóreas con cultivos de valor económico, incluido el café en forma simultánea o secuencial en la misma unidad de terreno (Farfán, 2014).

Por lo tanto, se hace necesario realizar la evaluación de la sostenibilidad ambiental, económica y productiva de los Sistemas Agroforestales en la vereda Laguna Ortices de Ortices, municipio de San Andrés, Santander.

La presente propuesta está organizada de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se presentan los objetivos, en el capítulo 2 el Planteamiento del problema, en el capítulo 3 la Justificación, en el capítulo 4 se encuentra el Marco referencial donde se

muestra el marco teórico, jurídico e histórico, en el capítulo se explicará la Metodología desarrollada para dar cumplimiento a los Objetivos planteados, luego en el capítulo 6 se presentan los Resultados y la Discusión. Finalmente, en los capítulos 7, 8, 9 contienen, respectivamente, Conclusiones, Recomendaciones y Referencias Bibliográficas utilizadas.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar la Sostenibilidad Ambiental, Económica y Productiva de los Sistemas Agroforestales con Café en la Laguna de Ortices.

1.2 Objetivos específicos

Determinar variables físicas, químicas y biológicas del suelo que pueden ser usadas para monitoreo de la calidad del recurso a través de análisis multivariante.

Evaluar variables fisiológicas y morfológicas del café bajo diferentes Sistemas Agroforestales.

Establecer indicadores económicos de los Sistemas Agroforestales con café.

Determinar la sostenibilidad ambiental, económica y productiva de los Sistemas Agroforestales con café.

2. Planteamiento del problema

La Laguna de Ortices está ubicada en el municipio de San Andrés, Santander, donde gran parte de la actividad económica está centrada en Sistemas Agroforestales asociados al cultivo del Café. Aunque es una actividad importante para el desarrollo social y económico de las comunidades del área de estudio, no se han realizado estudios para determinar el estado actual de los sistemas.

Por otra parte, los SAF al ser gestores de la tierra que optimizan la producción a través de interacciones entre sus componentes en el tiempo y el espacio, permiten que aquellas fincas que los implementan posean mayor productividad, estabilidad y sostenibilidad en comparación con sistemas individuales (Farfán, 2014).

En la Laguna de Ortices se han dedicado por muchos años a la producción del café, pero las personas dedicadas a la caficultura en el área de estudio no tienen información registrada de la finca que permita el conocimiento del sistema y percibir si es sostenible o no. Según (Molina Cárdenas, 2012) un manejo sostenible posibilita el incremento del rendimiento integral, realizando una asociación de cultivos, plantas y/o animales de forma simultánea o secuencial en la misma unidad de tierra y la sostenibilidad significa la capacidad de satisfacer las necesidades y de ser posible, sin afectar el recurso base del que depende el sistema.

Para el caso específico del café la agroforestería se convierte en una alternativa para el desarrollo de las comunidades dedicadas a este cultivo para apoyarse en la conservación y optimización de los recursos con el fin de obtener mejores ingresos económicos a la par del cuidado del medio ambiente, además de la obtención de café de calidad y estabilidad en la producción, un rango más amplio de productividad por planta y la obtención de ingresos adicionales de la comercialización y uso de productos adicionales como la madera, la leña,

son un conjunto de beneficios que permiten recomendar el establecimiento de árboles en el cafetal (Damatta y Rodríguez, 2007).

La agroforestería es entonces un pilar fundamental en el proceso que integra la conservación y el mejoramiento del suelo, tiene como objetivos reforzar y establecer la sostenibilidad de las fincas mediante el fomento de la diversificación en la producción y capacitación en el manejo de sistemas estratificados (Nair, 1993); que permite mantener y mejorar todo tipo de agricultura aumentando los niveles de materia orgánica en el suelo, la fijación del nitrógeno atmosférico, reciclaje de nutrientes, modificación del microclima dentro del cultivo y la optimización de la productividad del sistema mediante una producción sostenible (Farfán, 2014b).

3. Justificación del Proyecto

De acuerdo con Perfecto, Vandermeer, Mas, y Pinto (2005) Colombia es uno de los países productores de café más importantes del continente Americano, los cafetales cultivados en Sistemas Agroforestales (SAF) tienen el potencial de afectar positivamente el bosque y la salud de los cultivos en comparación con las plantaciones a pleno sol; la mayoría del café cultivado en el país está a cargo de pequeños productores en la zona andina tropical que atraviesa el país de norte a sur.

El café es considerado como uno de los principales productos económicos y sociales que ofrece Colombia gracias a su calidad (Bermúdez Ballén, 2019), contribuyó en un 3,1% al PIB del país (Dane, 2019); el departamento de Santander es el octavo productor a nivel nacional (14.4% de la producción nacional) y el municipio de San Andrés es el primer productor a nivel de la provincia de García Rovira (Censo Cafetero, 2016).

En Colombia se ha visto el interés por investigar sobre la importancia de la incorporación de la agroforestería en los sistemas productivos de café y cómo ello puede contribuir al mejoramiento, entre ellos se pueden mencionar los siguientes trabajos: (Machado Vargas, Nicholls, Márquez, y Turbay, 2015) caracterizaron sistemas agroforestales con café y crearon indicadores para evaluar producción y recomendar posibles estrategias de planificación y ajuste de parámetros para diversificar la producción, elaborar compostaje, usar abonos verdes. El estudio realizado por Zapata, Andrade y Nieto (2017) evaluó la radiación incidente, conductancia estomática y asimilación neta de CO₂, diseño completamente al azar, obtuvieron menor radiación en cafetales bajo sombra, conductancia estomática mayor en SAF con media y baja sombra, transpiración mayor en cafetos a sombra baja y media, asimilación neta de CO₂ mayor en SAF con baja y media sombra. Concluyen que la sombra en los cafetales del estudio disminuye la transpiración del café, pero cuando es superior al 40% se reduce la fotosíntesis neta y se vería afectada la productividad. Es importante tener en cuenta las condiciones idóneas para el desarrollo de la planta de café, la economía de las familias dedicadas a la caficultura y el manejo sostenible de los recursos.

En los ecosistemas se ejerce presión sobre el uso del suelo, talas, quemas, monocultivos, pérdida de materia orgánica por el mal manejo de las prácticas agrícolas, llevando así a la degradación de los suelos, disminución en el rendimiento de los cultivos; es así que los sistemas agroforestales se muestran como alternativas para moderar estos procesos y ayudar en la regulación del clima; es importante destacar que en SAF con café las especies ayudan en la prevención de la escorrentía superficial en el suelo que puede provocar lixiviación y problemas de erosión; mejora las condiciones de fertilidad del mismo permitiendo el reciclaje de nutrientes y el aprovechamiento de los recursos disponibles tanto para el café como para los árboles que prestan el servicio de sombreado (Farfán, 2014).

Es importante estudiar y comprender cómo funcionan los agro ecosistemas y buscar estrategias de mejoramiento en aquellas fincas que no poseen altos puntajes en relación con los indicadores que se van a manejar en el presente estudio; lo que apoyará el surgimiento de mejoras para las personas que poseen como medio de subsistencia la producción de café; convirtiéndose en oportunidad para progresar en el ámbito económico y social. Para ello se cuenta con herramientas como la caracterización agroforestal que de acuerdo con Ospina (2003) pueda ofrecer elementos suficientes para la toma de decisiones y mejorar los resultados de la investigación generando información importante para el desarrollo tecnológico.

Por tal razón, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar la sostenibilidad ambiental, económica y productiva en modelos agroforestales asociados con café en la Laguna de Ortices en el Municipio de San Andrés en el departamento de Santander.

4. Marco referencial

4.1 Marco teórico

Según Cifras de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) para el 2016, Colombia es el tercer productor de Café a nivel Mundial con 865.889 hectáreas cultivadas con café, un rendimiento de 861 Kg/ha y una producción de 865.889 toneladas al año, ver en Tabla 1.

Tabla 1.
5 países con mayor producción mundial de café

País	Elemento	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<i>Brasil</i>	Área cosechada (ha)	2159785	2148775	2120080	2085522	1997827	1977714	1994761
	Rendimiento (Kg/ha)	1346	1257	1433	1422	1404	1339	1514

	Producción(toneladas)	2907265	2700540	3037534	2964538	2804070	2647504	3019051
Vietnam	Área cosechada (ha)	511900	543865	572600	581381	589041	593800	597597
	Rendimiento (Kg/ha)	2160	2347	2201	2282	2388	2447	2445
	Producción (toneladas)	1105700	1276506	1260463	1326688	1406469	1452999	1460800
Colombia	Área cosechada (ha)	778052	723921	696023	771725	795563	801118	865889
	Rendimiento (Kg/ha)	688	647	664	846	916	1062	861
	Producción (toneladas)	535380	468540	462000	653160	728400	850500	745084
Indonesia	Área cosechada (ha)	1268476	1293000	1233900	1241700	1230500	1230001	1228512
	Rendimiento (Kg/ha)	539	494	560	544	523	520	520
	Producción (toneladas)	684076	638600	691163	675800	643900	639412	639305
Honduras	Área cosechada (ha)	313429	328375	347065	286461	300629	352236	382662
	Rendimiento (Kg/ha)	780	866	989	980	938	941	947
	Producción (toneladas)	244335	284347	343403	280697	282071	331532	362367

De acuerdo con cifras del Censo Cafetero (2016) en el contexto nacional, regional y local, las cifras se pueden visualizar en Figura 1.

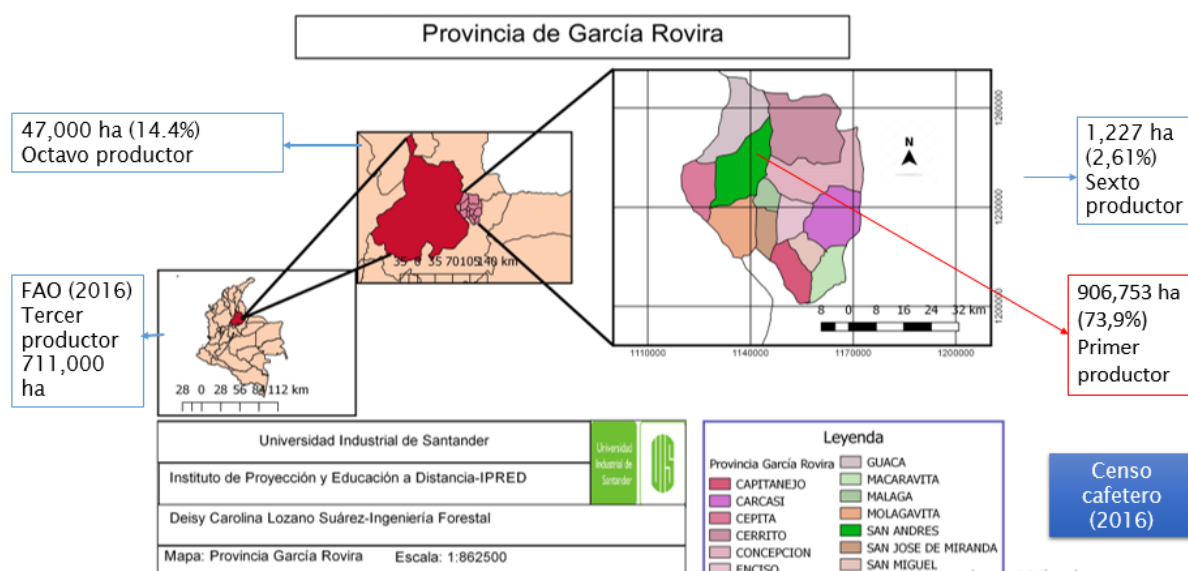


Figura 1. Cifras del Censo Cafetero para Santander, Provincia de García Rovira y municipio de San Andrés año 2016.

4.1.1 Proceso productivo del café: Es importante conocer el proceso productivo del café que permita distinguir en qué etapa se encuentra el cultivo en cada una de las fincas de estudio. Las etapas del proceso productivo se visualizan en Figura 2 y Figura 3.



Figura 2. Etapas del proceso productivo del café



Figura 3. Etapas del proceso productivo del café.

Los árboles más utilizados en el país para el sombrío son los que se muestran en la Figura 4.

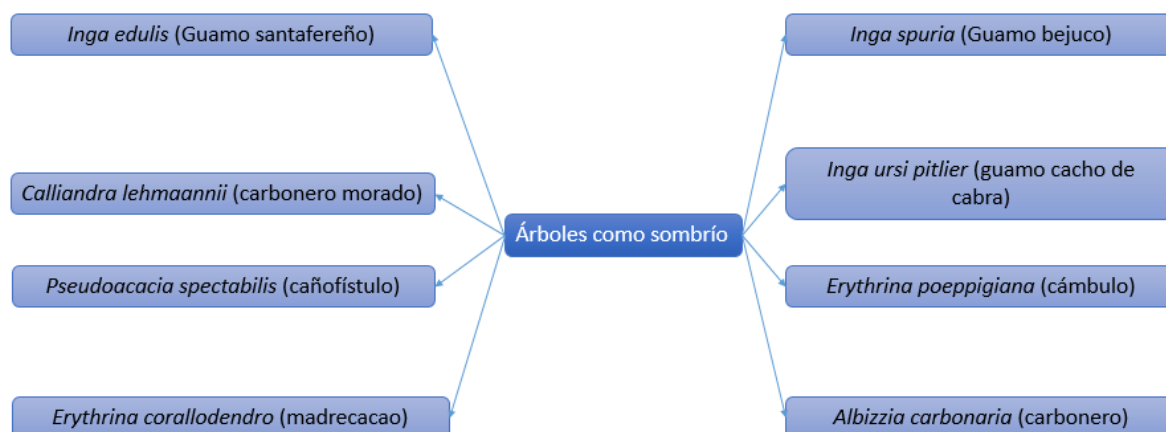


Figura 4. Principales especies utilizadas como sombrío en Sistemas Agroforestales con café. Adaptado de: Farfán (2014). Mantenimiento del componente arbóreo. *Avances Técnicos*, 440. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/486/1/avt0440.pdf>

4.1.2 Estructura de los Sistemas de Producción: Agrícola, Forestal y Agroforestal: De acuerdo con Malagón y Martín (2001) la estructura del sistema depende de las características de los componentes del mismo, es decir, el número de componentes, el arreglo o interacción entre los componentes y el tipo de componentes. El número de componentes hace referencia a la cantidad de elementos básicos que interactúan para constituir el sistema, lo cual afectará la influencia sobre la estructura del sistema, las interacciones entre los componentes son importantes para comprender dónde están las posibles problemáticas, además el tipo de componentes es importante en la estructura del sistema porque relaciona la capacidad del productor para entender cada componente y realizar arreglos entre los componentes.

Los sistemas de producción pueden ser: Agrícola, Forestal y Agroforestal. A continuación, se enunciarán cada uno de ellos: Según Moreno (2007) el sistema de producción agrícola es una actividad dirigida a transformar componentes abióticos en ingresos económicos, mediante componentes bióticos ordenados en arreglos espaciales y cronológicos, sometidos a prácticas adecuadas de manejo, la estructura de los sistemas se denomina arreglo y ordena los componentes bióticos en el tiempo y el espacio. Los arreglos existentes son: interespecíficos, espaciales y cronológicos. Según Pan, Birdsey, Phillips y Jackson (2013) en el sistema de producción forestal la estructura se define como la disposición espacial de los diversos

componentes del ecosistema (altura en los diferentes niveles del dosel y el espaciado de los árboles) con alturas mayores a 5 metros y una cobertura del dosel mayor al 10%. El sistema de producción agroforestal según López y Molina (2007) es un sistema agropecuario cuyos componentes son árboles, cultivos o animales; posee límites, componentes, interacciones, ingresos y egresos, una relación jerárquica con el sistema de finca y una dinámica entre los componentes.

4.1.3 Agroforestería: Según Farfán (2014) la agroforestería es un sistema de gestión de las tierras que permite optimizar su productividad mediante las interacciones positivas entre sus componentes en el tiempo y el espacio; de tal forma que la productividad, la estabilidad y la sostenibilidad del sistema en conjunto sean superiores en comparación con la mayoría de los casos individuales; por lo cual se constituye en un sistema agrícola ideal para la recuperación de la agricultura sostenible.

Los objetivos que trata esta ciencia son diversos y entre estos se pueden mencionar los siguientes: reforzar y establecer la sostenibilidad en las fincas llevando a cabo diversidad productiva y capacitación en el manejo de sistemas estratificados, mejoras en las prácticas agrícolas para incrementar los niveles de materia orgánica en el suelo, fijación de nitrógeno, reciclaje de nutrientes, modificación del microclima dentro del cultivo y optimización de la producción del sistema.

4.1.4 Interacciones Ecológicas en Agroforestería: Algunos procesos ecológicos en Agroforestería se pueden ver en Figura 5. Según Farrell (1983) los árboles utilizados como sombrío ayudan en el mejoramiento de las condiciones micro climáticas, reducción de la velocidad del viento, mantenimiento de la humedad relativa, protección contra heladas, en el aspecto edáfico ayudan en el aumento de la capacidad de reciclaje de nutrientes, favorece la reducción de la erosión, en el aspecto biótico según Damatta & Rodríguez (2007) ayuda en la reducción en la incidencia de cercosporiosis (*Cercospora coffeicola*), minador de la hoja (*Leucoptera coffeella*) y malezas como las gramíneas. En el aspecto endógeno la atenuación del ciclo bienal de la producción, mayor tamaño de los frutos, en el aspecto económico según Salgado (2015) los árboles asociados a SAF son cosechados en general, cuando los precios de los cultivos principales no permiten ser competitivos o no alcanzan a suplir los gastos imprevistos; lo cual permite obtener ingresos adicionales a los dueños de la tierra, el tiempo en el que se deben renovar los cafetales aumenta hasta a 20 años, además el productor puede comercializar productos como la madera, frutos, forraje, semillas. Las interacciones negativas se encuentran asociadas a especies que compiten con el cafeto, sombreado excesivo y dificultades en las operaciones de cosecha. Generalmente el uso de especies con sistema radicular superficial, mayor incidencia de la broca del fruto (*Hipotenemus hampei*) y de la roya (*Hemileia vastatrix*).

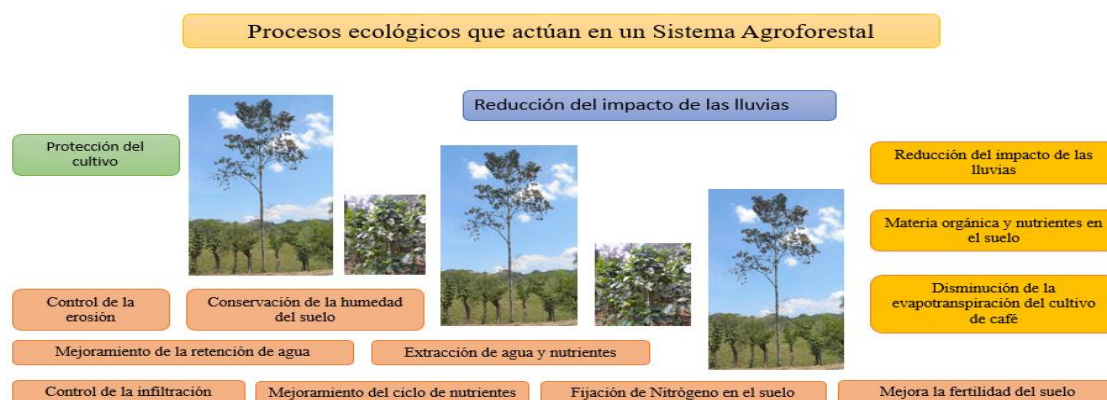


Figura 5. Procesos ecológicos que actúan en un Sistema Agroforestal. Adaptado de: Farfán (2014). Agroforestería y sistemas agroforestales con café. Recuperado de: https://www.cenicafe.org/es/publications/Agroforester%C3%ADa_y_sistemas_agroforestales_con_caf%C3%A9.pdf

4.1.5 Categorías básicas de Sistemas Agroforestales: Según Musálem Santiago (2001) hay dos categorías básicas de Sistemas Agroforestales: Secuenciales y Simultáneos.

4.1.5.1 Sistemas Agroforestales Secuenciales: De acuerdo con Musálem Santiago (2001) en este tipo de sistemas existe una relación cronológica entre los componentes, es decir, las cosechas anuales y los productos arbóreos, algunos ejemplos de ello son: sistemas Taungya, agricultura migratoria con intervención o manejo de barbechos.

4.1.5.2 Sistemas Agroforestales Simultáneos: Según Musálem Santiago (2001) este tipo de sistemas integra de forma simultánea y continua los cultivos anuales y perennes, árboles maderables, frutales o de uso múltiple, y/o ganadería. Ayuda en la diversificación de la producción para lograr aumentos en la productividad a través de las interacciones con el componente arbóreo.

Existen diferentes tipos de Sistemas Agroforestales Simultáneos: árboles en asociación con cultivos perennes, árboles en franjas intercaladas con cultivos anuales, huertos caseros mixtos y los Sistemas Silvopastoriles.

Según Molina Cárdenas (2012) la asociación de especies forestales con cultivos perennes es una alternativa innovadora y permite ofrecer a los agricultores modelos de agricultura basados en policultivo; diversificación de cultivos en la unidad productiva, fertilización con el uso e incorporación de especies fijadoras de nitrógeno y aprovechamiento de su biomasa. (ver Figura 6).

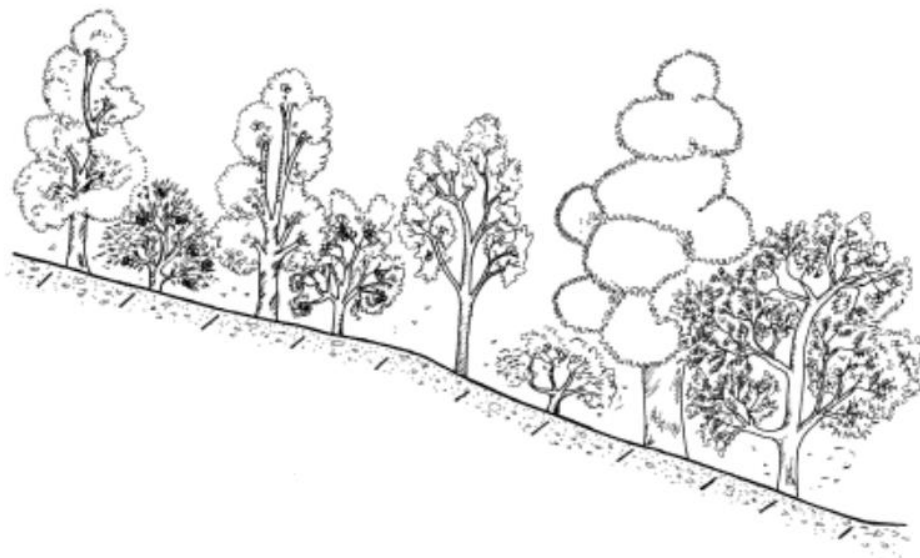


Figura 6. Representación esquemática de árboles en cultivos perennes. Adaptado de: Ospina, A. (2003). Características de tecnologías agroforestales. en: A. Ospina, ed., *Agroforestería: Aportes conceptuales, metodológicos y prácticos para el estudio agroforestal.*, Santiago de Cali, Colombia: Asociación del Colectivo del Suroccidente Colombiano. Recuperado de: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=CENIDA.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=029257> [Acceso 19 Junio 2018].

En la Figura 7 se puede visualizar la clasificación general de sistemas agroforestales de acuerdo con la asociación de componentes que se realiza.

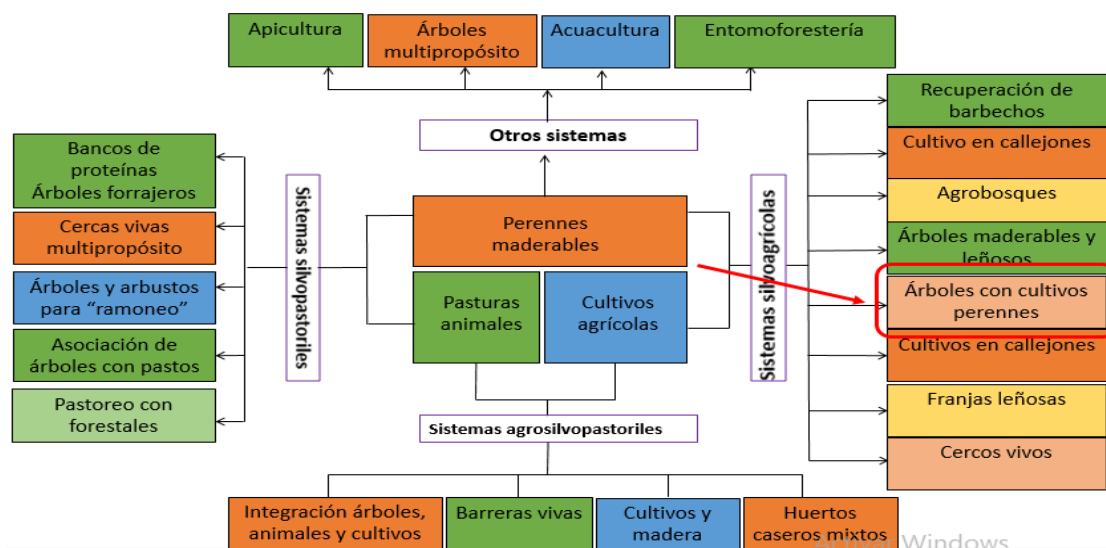


Figura 7. Estructura de Sistemas Agroforestales. Adaptado de: Farfán (2007) Producción de café en sistemas agroforestales. *Sistemas de Producción de Café En Colombia*, 161–200. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/720>

4.1.6 Caracterización de Sistemas Agroforestales:

Caracterización: Según Malagón y Mosquera (2001) la caracterización consiste en la obtención del modelo real de producción del sistema prestando especial atención a los agro ecosistemas que se cree tienen algún tipo de dificultad operativa, para lograr explicar las interacciones entre los estos y también entre el sistema y su entorno. También, se puede definir en términos de la obtención de un modelo real de producción del sistema, logrando explicar de alguna manera la interacción existente entre los diferentes agro ecosistemas, el sistema y su entorno; entendiendo aspectos biofísicos y socio-económicos con ayuda de productores e investigadores.

4.1.7 Variables necesarias para el análisis del estado del Sistema Agroforestal

4.1.7.1 Variable: Es todo aquello que se va a medir, controlar y estudiar en una investigación, es también un concepto clasificatorio; asume valores diferentes, los cuales pueden ser cuantitativos o cualitativos; pueden ser definidas de forma conceptual y operacional (Flores, 2007). Otra definición de variable dada por Causas (2005) es una característica observable ligada, con una relación determinada.

4.1.8 Sistemas de indicadores para diagnosticar el estado de un Sistema Agroforestal con café: De acuerdo con Dumanski, Gameda y Pieri (1998) un indicador es un número que indica el estado y desarrollo de un sistema y condiciones que afectan al mismo, su objetivo es brindar información y representar la complejidad del sistema de forma más simple.

Los indicadores permiten desarrollar políticas de mejoramiento o conservación de los suelos con el fin de mantener o mejorar la calidad de los mismos, de la misma forma que

puede contribuir a la repercusión o contraste de los procesos que intervienen o inciden en su degradación. Los indicadores se muestran a continuación:

4.1.8.1 Indicadores de calidad del suelo: Según Astier Calderón et al., (2002) el suelo es un componente central del agroecosistema, por lo que la definición de su estado es importante para evaluar la sustentabilidad del mismo, por tal razón se debe estudiar la calidad de este seleccionando indicadores de acuerdo con los recursos humanos, técnicos, económicos e infraestructura además del tiempo disponible, el rigor de la información que se requiera en el estudio a llevar a cabo.

Adicionalmente, los indicadores de calidad del suelo son una herramienta de medición que ofrece información sobre las propiedades, los procesos y las características; su medición es útil para hacer seguimiento a los efectos del manejo del mismo sobre su funcionamiento en un período establecido Astier, Maas y Etchevers (2002) . A continuación, se definen los indicadores físicos, químicos y biológicos en Tabla 2.

Tabla 2.
Indicadores de calidad del suelo

Indicadores de calidad del suelo		
Indicadores físicos	Indicadores químicos	Indicadores biológicos
Según Bautista Cruz, Etchevers Barra, del Castillo, y Gutiérrez, (2004) Permiten reflejar la manera en la que el recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, posibles limitantes en el crecimiento de las raíces, emergencia de las plantas, infiltración o movimiento del agua dentro del perfil, arreglo de los poros en el suelo.	Según SQIS (1996) Relacionados con los que afectan las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, disponibilidad de agua y nutrientes y microorganismos (Disponibilidad de nutrimentos, Carbono orgánico total, Conductividad eléctrica, Capacidad de Intercambio Catiónico, Nitrógeno total).	Según Vallejo Quintero (2013) Permiten obtener información de la actividad metabólica del suelo, evidencian en corto plazo las posibles alteraciones en el sistema, afecta la capacidad de almacenamiento de agua, tasa de infiltración, susceptibilidad a la compactación.

Según García, Ramírez y Sánchez (2012) los indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo varían en relación con las características predominantes del sitio y el manejo (ver Figura 8).



Figura 8. Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuestos para monitorear los cambios que ocurren en el suelo. Adaptado de: Bautista Cruz, A, Etchevers Barra, J., del Castillo, R. F., y Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista Científica de Ecología Y Medio Ambiente*, 13(2), 90–97. Recuperado de: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/8708>

4.1.8.2 Invertebrados del suelo y su clasificación: Los invertebrados del suelo se pueden clasificar de acuerdo con Anderson e Ingram (2006) por los hábitos alimenticios y distribución del suelo (ver Tabla 3).

Tabla 3.

Invertebrados del suelo		
Hábitos alimenticios y distribución en el suelo		
Especie Epigénica	Ejemplos	Hábitos
	Artrópodos (miriápodos, isópodos, lombrices de tierra)	Se alimentan de la superficie del suelo
Anécicas	Lombrices de tierra	Eliminan la basura de la superficie del suelo a través del proceso alimenticio

Endógenas	Lombrices de tierra y raíces muertas	Viven en el suelo y se alimentan de materia orgánica y raíces muertas
------------------	--------------------------------------	---

Clasificación de los invertebrados del suelo de acuerdo con los hábitos alimenticios y distribución en el suelo

Nota: Clasificación de los invertebrados del suelo de acuerdo con hábitos alimenticios y distribución en el suelo. Adaptado de: C-A-B International (1993) Tropical Soil Biology and Fertility: a Handbook of Methods. Second Edition. UK. Reino Unido. Recuperado: https://www.researchgate.net/profile/John_Ingram5/publication/39004845_Tropical_Soil_Biology_and_Fertility_A_Hand_Book_of_Methods/links/589b53d0aca2721ae1b

Los invertebrados del suelo también se pueden clasificar de acuerdo con (Palacios Vargas y Mejia, 2007) según el tamaño de los poros y la preferencia al microhábitat de la fauna edáfica, (ver Tabla 4).

Tabla 4.

Clasificación de los invertebrados del suelo de acuerdo con el tamaño de los poros y preferencia al microhábitat

Invertebrados del suelo		
Especie	Características	Ejemplos
Microfauna	Organismos menores de 0,2 mm	Algas, protozoarios, hongos, ácaros
Mesofauna	Individuos de tamaño entre 0,2-2 mm	Colémbolos, dipluros, pseudoescorpiones, coleópteros, isópodos
Macrofauna	Individuos entre 2 y 20 mm	Hormigas, termitas, arácnidos, coleópteros, lombrices, dípteros y lepidópteros

4.1.8.3 Lombrices de tierra: Según Paoletti (1999) las lombrices de tierra se han considerado indicadores del uso de la tierra y la fertilidad del suelo, son importantes como indicadores de calidad del suelo por su rapidez limitada en el desplazamiento, recolonización lenta y tamaño relativamente grande que permiten percibir perturbaciones en el suelo.

Las lombrices de tierra excavan a través del suelo y se alimentan de material orgánico, los residuos de plantas y el estiércol se fragmentan y se mezclan con el suelo al pasar por el intestino de la lombriz y son incorporados al perfil del suelo (Syers y Springett, 1984), los nutrientes se reciclan más rápidamente a través de los procesos metabólicos de las lombrices.

Estas producen un impacto en los agregados del suelo que puede afectar el rendimiento de los cultivos en relación a la dinámica del agua y el crecimiento de las raíces (Ayuke et al., 2011).

4.1.9 Humedad del suelo: Según Ramírez, Jaramillo, Arcila y Montoya (2010) la humedad del suelo está en función de la distribución de la lluvia dentro del cultivo, la densidad de siembra y distribución del área foliar, de la demanda evaporativa de la atmosfera, pendiente del terreno y las propiedades físicas e hidráulicas del suelo.

Las limitaciones relacionadas con la sequía y temperaturas desfavorables para la producción de café serán cada vez más importantes debido al cambio en el clima global; además el cultivo se ha extendido a zonas con escasez de agua y temperaturas no aptas para el rendimiento del café (Damatta y Ramalho, 2006). Según Lin (2007) la temperatura es un umbral climático importante para los cultivos alimentarios porque las altas temperaturas que coinciden con las fases críticas del ciclo del cultivo pueden reducir drásticamente el rendimiento. En café puede disminuir entre un 40 y 80% durante los años más secos (DaMatta, Chaves, Pinheiro, Ducatti, y Loureiro, 2003). Es así que los Sistemas Agroforestales se convierten en una forma no destructiva y económicamente accesible para proteger los cultivos de la sequía en ambientes poco favorables.

Las copas de los árboles modifican el medio ambiente a través de los patrones de sombreado que generan, las áreas bajo las copas reciben menor radiación solar, este sombreado se ve afectado por el patrón espacial de los árboles, ubicación del sitio (Breshears y Ludwig, 2010). Los árboles pueden regular el microclima en los sistemas agroforestales, controlar el equilibrio hídrico del ecosistema que afectará la evaporación del suelo y la transpiración de las hojas (Lin, 2010).

4.2 Variables morfológicas

La altura es importante porque indica el crecimiento ortotrópico de la planta, lo que va a proporcionar bandolas que garantizarán la producción en los próximos años (Garriz y Vicuna, 1990) citado por (Blanco, Hagggar, Moraga, Madriz y Pavón, 2003)

El número de ramas primarias es una característica morfológica del cafeto que se relaciona con la productividad (Salazar, Orozco y Clavijo, 1988).

La longitud de las ramas se realizó teniendo en cuenta la metodología de (Zelaya Sotelo Fittora, 2000).

El diámetro de las bandolas se midió teniendo en cuenta la metodología de (Balladares y Calero, 2005).

El número de frutos, nodos y cojines florales se tuvo en cuenta la metodología de (Alarcón Aguila, 2016).

4.3 Variables fisiológicas

4.3.1.1 Conductancia estomática: La conductancia estomática depende de la cantidad de estomas por unidad de área y la apertura del poro estomático y ambos se ven afectados por el entorno luminoso. (Boccalandro et al., 2012).

Los estomas regulan el intercambio de gases, como el CO₂ y el vapor de agua con el medio ambiente, lo que le permite a la planta optimizar y equilibrar el rendimiento fotosintético con la disponibilidad y el uso del agua (Chaerle, Saibo y Van Der Straeten, 2005). La regulación se logra abriendo y cerrando el poro estomático, ya sea aumentando o reduciendo la conductancia estomática o la velocidad con que se intercambia el agua o el CO₂ (Roelfesema y Hedrich, 2005). Los estomas suelen cerrarse temprano en la mañana en

las plantas de café, con una conductancia estomática en valores bajos de 10-20 mmol/m²/s durante la tarde (Ronquim, Prado y Novaes, 2006) (Chaves, Pinheiro, Ribeiro, y DaMatta, 2008) (DaMatta et al., 2008).

La conductancia estomática es una variable que permite determinar el estrés hídrico de la planta, el balance de energía y las relaciones fotosintéticas; se expresa como umol H₂O/m²/s. (Zapata Arango, Andrade Castañeda, Nieto Abril, 2017). El cierre de estomas es producido como respuesta al déficit hídrico y produce ácido abscísico, en plantas C₃ y C₄ es inducido por elevadas concentraciones de CO₂; el cierre estomático y la transpiración reducida conducen a temperaturas elevadas dentro de las hojas (Schroeder, Allen, Hugouvieux, Kwak, y Waner, 2001), pero el cierre estomático conlleva a la disminución de la fijación de CO₂, lo cual puede generar sobreexcitación de los centros de reacción del fotosistema II (PSII) (Ahmed, Rouina, Sensoy, Boukhris y Abdallah, 2009). Según Jiménez, Alvarado y Balaguera (2015) para evitar la sobreexcitación del PSII y los daños del aparato fotosintético, la energía que no toma la vía fotoquímica puede ser disipada principalmente como calor o reemitida como energía lumínica de menor energía (fluorescencia), el estudio del rendimiento de la fluorescencia permite obtener información sobre la eficiencia fotoquímica y la disipación térmica de la energía absorbida.

4.3.1.2 Fluorescencia de clorofila: La fluorescencia de clorofila es un método sensible que proporciona información sobre procesos fotosintéticos, reacciones bioquímicas y la división de energía entre los componentes fotosintéticos (Mouget y Tremblin, 2002).

Durante la inducción de la fotosíntesis, una hoja adaptada a la oscuridad se expone a la luz, esto genera cambios en la fluorescencia de clorofila, en ese momento la fluorescencia se eleva al nivel mínimo de (F₀), lo que se traduce en centros de reacción de PSII abiertos, luego la fluorescencia se eleva al nivel de inflexión transitoria (F_i) para alcanzar un nivel

máximo (F_p), si se cierran los centros de reacción de PSII se alcanza el nivel máximo de fluorescencia (F_m); la diferencia entre F_m y F_o se denomina fluorescencia variable (F_v). (Baker y Rosenqvist, 2004). La relación F_v/F_m es una estimación de la eficiencia cuántica máxima de la actividad fotoquímica del PSII cuando los centros de reacción del PSII están abiertos (Jiménez Suanca et al., 2015). El estrés ambiental puede afectar la eficiencia del PSII al disminuir F_v/F_m (Oliveira, Aguiar Alves y Vitória, 2009)

4.3.2 Sostenibilidad: Según Masera, Astier y López (2000) los sistemas productivos buscan realizar el potencial multifuncional de los recursos que los sostienen, brindar oportunidades ambientales, sociales y económicas para las generaciones presentes y futuras.

De acuerdo con (Molina Cárdenas, 2012) con un manejo sostenible de la tierra se considera que incrementa su rendimiento integral, realizando una asociación de cultivos y plantas forestales y/o animales de forma simultánea o secuencial en la misma unidad de tierra; en un sistema la sostenibilidad significa la capacidad de satisfacer las necesidades y de ser posible, sin afectar el recurso base del que depende el sistema.

Cuando se habla de sostenibilidad se refiere a diferentes aspectos como el ambiental, productivo y económico.

4.3.2.1 Sostenibilidad ambiental: Según Rey (2002) se define la sostenibilidad ambiental como la posibilidad para responder de forma acertada en cada dimensión que afecte al medio ambiente y de acuerdo con como la administración eficiente y racional de los recursos (Ahumada, Pelayo y Arano, 2012) naturales para mejorar el bienestar de la población actual sin comprometer la calidad de vida de las generaciones futuras.

4.3.2.2 Sostenibilidad económica: De acuerdo con (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, 2011) un sistema posee sostenibilidad económica si produce seguridad alimentaria, genera ingresos por mano de obra, ingresos adicionales basados en la productividad y rentabilidad del predio.

4.3.2.3 Sostenibilidad productiva: De acuerdo con (Martínez Castillo, 2009) la sostenibilidad productiva de los sistemas de producción se refiere a la capacidad del sistema para mantener su productividad a pesar de las perturbaciones económicas y naturales, externas o internas.

4.4 Marco jurídico

Para consultar el marco legal referente al sector forestal se buscó en la base de datos AMBIENTALEX.INFO disponible en los recursos electrónicos de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander

- Ley 76 de 1927: Sobre protección y defensa del café
- Ley 11 de 1972: Por la cual se deroga el impuesto de exportación de café
- Decreto Ley 2811 de 1974: Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente
- Ley 9 de 1991: Normas generales sobre cambios internacionales y medidas complementarias (Contribución Cafetera)
- Ley 165 de 1994: Por medio de la cual se aprueba el “Convenio sobre la Diversidad Biológica” en Río de Janeiro el 5 de junio de 1992.
- Ley 189 de 1995: Aprueba el “Acuerdo de Creación de la Asociación de Países Productores de Café”

- Ley 629 de 2000: Por medio de la cual se aprueba el “Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”
- Ley 863 de 2003: Ley normas tributarias (Transferencias cafeteras)
- Ley 1021 de 2006: Por la cual se expide la Ley General Forestal
- Decreto 444 de 1967: Régimen de cambios internacionales y de comercio exterior
- Decreto 2278 del 1 de septiembre de 1953:
 - Fue uno de los primeros esfuerzos por parte del Gobierno Nacional, en este decreto se abordó el tema forestal al expedir las reglas generales en la vigilancia, conservación, mejoramiento, reserva, repoblación y explotación de bosques y el aprovechamiento, comercio, movilización y exportación de productos forestales.
- Ley 2ª de 1959:
 - Con la cual se dictan normas sobre economía forestal de la Nación y conservación de recursos naturales renovables.
- Ley 1731 de Julio 31 de 2014
 - Por medio de la cual se adoptan medidas en materia de financiamiento para la reactivación del sector agropecuario, pesquero, acuícola, forestal y agroindustrial, y se dictan otras disposiciones relacionadas con el fortalecimiento de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).
- Decreto 1655 de 2017
 - “Por medio del cual se adiciona al Libro 2, Parte 2, Título 8, Capítulo 9 del Decreto número 1076 de 2015, cinco nuevas secciones en el sentido de establecer la organización y funcionamiento del Sistema Nacional de Información Forestal, el Inventario Forestal Nacional y el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono que hacen parte del Sistema de Información Ambiental para Colombia, los cuales son instrumentos para la generación de información oficial que permita tomar

decisiones, formular políticas y normas para la planificación y gestión sostenible de los bosques naturales en el territorio colombiano.”.

4.5 Marco histórico de la investigación

4.5.1 Caracterización morfológicas, productivas y componentes del rendimiento de dos variedades de café: Colombia y Caturra. (Salazar Arias et al., 1988) realizaron un estudio en la estación central Naranjal de Cenicafe ubicada en el municipio de Chinchiná, Caldas a una altitud de 1,400 m.s.n.m, temperatura promedio de 20,6°C, precipitación anual de 2,660 mm, humedad relativa del 75%. Realizaron la comparación de las variedades Colombia y Caturra.

De acuerdo con los resultados la variedad Colombia a los 42 meses de edad alcanzó una altura de 225 centímetros y la variedad Caturra alcanzó la misma altura a los 54 meses de edad. La tasa de crecimiento tiende a estabilizarse entre los cuatro y cinco años. La variedad Colombia presentó el mayor número de ramas primarias con un promedio de 92, la variedad Caturra un valor promedio de 81 ramas primarias. El máximo número de ramas primarias se alcanzó a los 48 meses. El número de ramas productivas aumentó hasta los 42 meses de edad de la planta. La variedad Colombia presentó el mayor número de nodos con frutos, la mayor formación de nodos productivos fueron los 30 y 42 meses. El mayor promedio del número de frutos por nodo fue en la variedad Caturra (7). Los promedios de producción por árbol en las variedades Colombia y Caturra fueron 700 a 800 gramos de café pergamino seco por árbol.

4.5.2 Estudio comparativo de indicadores de calidad de suelo en fincas de café orgánico y convencional en Turrialba, Costa Rica. (Andrews, Karlen y Mitchell, 2002) realizaron un estudio en el Valle de Sacramento, California. Realizaron indexación de los indicadores de calidad del suelo, determinaron el tejido de la hoja N mediante el método de digestor en bloque, en las comparaciones económicas utilizaron los ingresos netos de cada sistema y cultivo. Las variables altamente ponderadas bajo PC1 fueron: TOC, NT, K y S, en el PC2: Na y Ca, en el PC3: pH del suelo, P y Zn (sólo P se retuvo por correlación). El PCA final para el MDS fue NT, Na, Ca, pH y P.

4.5.3 Morfología del café (*Coffea arabica* L.) en lotes comerciales en Nicaragua. (Blanco, Haggard, Moraga, Madriz y Pavón, 2003) realizaron un estudio en el Centro de Capacitación y Servicio Regional Pacífico UNICAFÉ. De acuerdo con los resultados hubo diferencia entre los lotes de café debido a la variedad sembrada, sombra y manejo agronómico.

4.5.4 Análisis económico de la producción de fincas cafeteras convencionales y orgánicas en transición, en el departamento de Caldas. (Ospina, Duque y Farfán, 2003) evaluaron las variables evaluadas fueron: costos de producción (costos de producción por hectárea (fijos, variables, totales) y unitarios (fijos, variables y totales), margen bruto y punto de equilibrio por hectárea. Costos fijos (CF), Costos variables (CV), Costos Totales (CT), Costo Fijo Unitario (CFU), Costo Variable Unitario (CVU), Costo Unitario Total (CUT). Para analizar la estructura de costos de los sistemas de producción utilizaron: mano de obra general, insumos, mano de obra en recolección y beneficio, punto de equilibrio.

En los costos convencionales, el costo fijo/ha y el costo unitario fueron 15,5% y 19,2% superiores en las fincas en transición a orgánicas que en las convencionales. En las fincas

orgánicas en transición, los costos variables y costos variables unitarios fueron 5,8% y 5,7% menores a los mismos costos para las fincas convencionales. En las fincas orgánicas en transición la mano de obra y los insumos representaron el 22% y el 4,2% dentro de los costos variables de producción. Para las fincas convencionales, la mano de obra y el costo de los insumos fueron el 20% y el 22,2% de los costos variables totales. Los costos totales por hectárea y los costos unitarios totales fueron 3,6 y 3,2% en las fincas orgánicas en transición en comparación con las fincas convencionales. El promedio de productividad por hectárea para las fincas orgánicas fue de 845 kg de café pergamino seco por hectárea/año y para las fincas convencionales de 831,25 kg.

La mano de obra requerida para el manejo del cultivo del café en fincas orgánicas en transición fue de 175 jornales/ha/año, en las convencionales de 118 jornales/ha/año. Para las fincas en transición a orgánicas el punto de equilibrio se alcanzaba con 196,25 kg de cps/ha y para las fincas convencionales con 188,75 kg.

4.5.5 Sostenibilidad socioeconómica y ecológica de sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) en la microcuenca del Río Sesesmiles, Copán, Honduras. (Silveira Duarte, 2005) realizó un estudio para caracterizar socioeconómica y ecológicamente las fincas de café en la microcuenca del Río Sesesmiles, Copán, Honduras para agruparlas en conjuntos semejantes cuanto a la estrategia de producción, las variables que influyeron principalmente entre las fincas fueron: área de café, relación costo/beneficio, costo de producción, margen bruto/ha, consenso social, precio y diversidad de Simpson y Shannon. De acuerdo con los resultados, los productores orgánicos presentaron mejores condiciones ecológicas y socioeconómicas.

4.5.6 Estudio económico de sistemas de producción cafeteros certificados y no certificados, en dos regiones de Colombia. (Serna, Trejos, Cruz y Calderón, 2010)

realizaron un estudio en 144 fincas cafeteras de Cundinamarca y Santander, certificadas con la Norma de Agricultura Sostenible de Rainforest Alliance y las que no han adoptado la norma. Tomaron información con encuestas y entrevistas semiestructuradas, registros en formatos para que los caficultores registraran información de las actividades de la finca, cantidades y precios. Concluyeron que la caficultura de Santander presenta mayores eficiencias tecnológicas con respecto a los sistemas de Cundinamarca, con mayores niveles promedios de productividad de café. Resultado financiero favorable del sistema certificado, con mano de obra contratada y con proyectos productivos de diversificación.

4.5.7 Valoración de sostenibilidad ambiental mediante indicadores de calidad del suelo, en sistemas de producción de café en Colombia. (Farfán e Hincapié, 2011)

realizaron un estudio en las fincas cafeteras de la Mesa de los Santos en el Departamento de Santander, en Piendamó (Cauca) y en Chinchiná (Caldas); en la Finca el Roble seleccionaron cinco lotes de terreno y tres sistemas de producción (dos lotes de terreno sembrados con café y sombrío de *Inga edulis* (guamo santafereño) y *Albizzia carbonaria* (carbonero) en uno de ellos aplicaron fertilización orgánica en dosis de 4.5 kg/planta/año y el otro no se fertilizó. Los resultados indican que es recomendable cultivar los suelos en sistemas agroforestales con o sin intervención de fertilización.

4.5.8 Evaluación socioeconómica del sistema agroforestal tradicional café-plátano-cítricos en el municipio de Tlapacoyán, Veracruz, México. (Cruz, Leos, Uribe y Rendón, 2014) realizaron un estudio, el objetivo general fue evaluar socioeconómicamente el sistema agroforestal café-plátano-cítricos. Realizaron encuestas a los productores y luego clasificaron las fincas de acuerdo con la superficie de la tierra, la cantidad de mano de obra disponible, grado de equipamiento y tecnificación. Concluyeron que la construcción de la tipología de productores contribuye a entender la complejidad de los sistemas de producción; en el cálculo de indicadores socioeconómicos mostraron que la productividad de la mano de obra es superior al costo de oportunidad en la región y la productividad de la tierra indica que se obtiene mayor productividad de la tierra cuando la superficie es menor.

4.5.9 Caracterización agro-morfológica de nueve variedades de café arábigo (*Coffea arabica* L) en el cantón Caluma, Provincia Bolívar, Ecuador. (Zapata, Espinoza, Melena y Moncayo, 2015) realizaron un estudio en la Granja Experimental El Triunfo de la Universidad Estatal de Bolívar. De acuerdo con los resultados, el ancho de la hoja con 7,69 cm, 7,65 cm y 7,39 para la variedad Catuai Amarillo, Pache y resto de variedades, respectivamente. La altura de la planta el valor más alto en promedio fue de 130,55 cm. El diámetro del tallo obtuvo en promedio 16,85 milímetros. El mayor promedio de longitud de la hoja fue la variedad Pache con 16,79 cm. La variable número de ramas a los 3,6 y 9 meses alcanzó un promedio de 21,35 ramas.

4.5.10 Caracterización de nueve agro ecosistemas de café de la cuenca del río Porce, Colombia, con un enfoque agroecológica. (Machado Vargas et al., 2015) realizaron un estudio en la cuenca del río Porce en las alturas entre 1.025 y 1.5000 m.s.n.m, bosque muy húmedo premontano (bmh-PM), Caracterizaron los agroecosistemas de café, realizaron 48 encuestas a agricultores. Establecieron tres dimensiones: económica, productiva, social.

4.5.11 Comportamiento ecofisiológico del cafeto (*Coffea arabica* L.) cv Castillo en Sistemas Agroforestales de Tibacuy, Cundinamarca. (Zapata, Andrade y Nieto, 2017) realizaron una investigación en el municipio de Tibacuy en el departamento de Cundinamarca, situada a una altitud de 1.647 m, temperatura media de 22°C y precipitación media de 1.092 mm/año. Concluyen que la sombra en los cafetales del estudio disminuye la transpiración del café, pero cuando es superior al 40% se reduce la fotosíntesis neta y se vería afectada la productividad.

5. Metodología

En la *Figura 9* se muestran cada una de las fases desarrolladas para dar cumplimiento a los objetivos planteados en el proyecto.

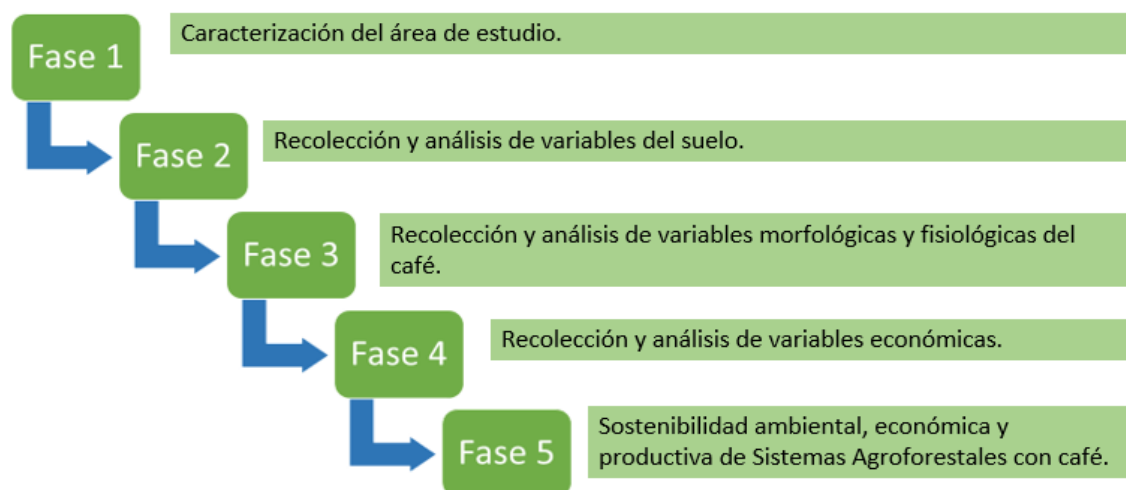


Figura 9. Fases de la metodología desarrollada.

5.1 Caracterización de las fincas del área de estudio

Para la determinación de variables ambientales, económicas y productivas se realizaron encuestas semiestructuradas a los productores, tanto grupales como individuales, utilizando la metodología de (Silveira, 2005).

Aspectos generales del área de estudio: El área de estudio se encuentra localizada en la vereda Laguna de Ortices en el Municipio de San Andrés (Santander, Colombia), lo cual se puede (ver Figura 10).

Fueron seleccionadas 10 fincas de los sectores Helechal y Cirial, la localización geográfica se puede visualizar en Tabla 5. Las características de topografía, temperatura, régimen de lluvias, precipitación, humedad relativa, zona de vida y orden de suelos se visualiza en Tabla 6.

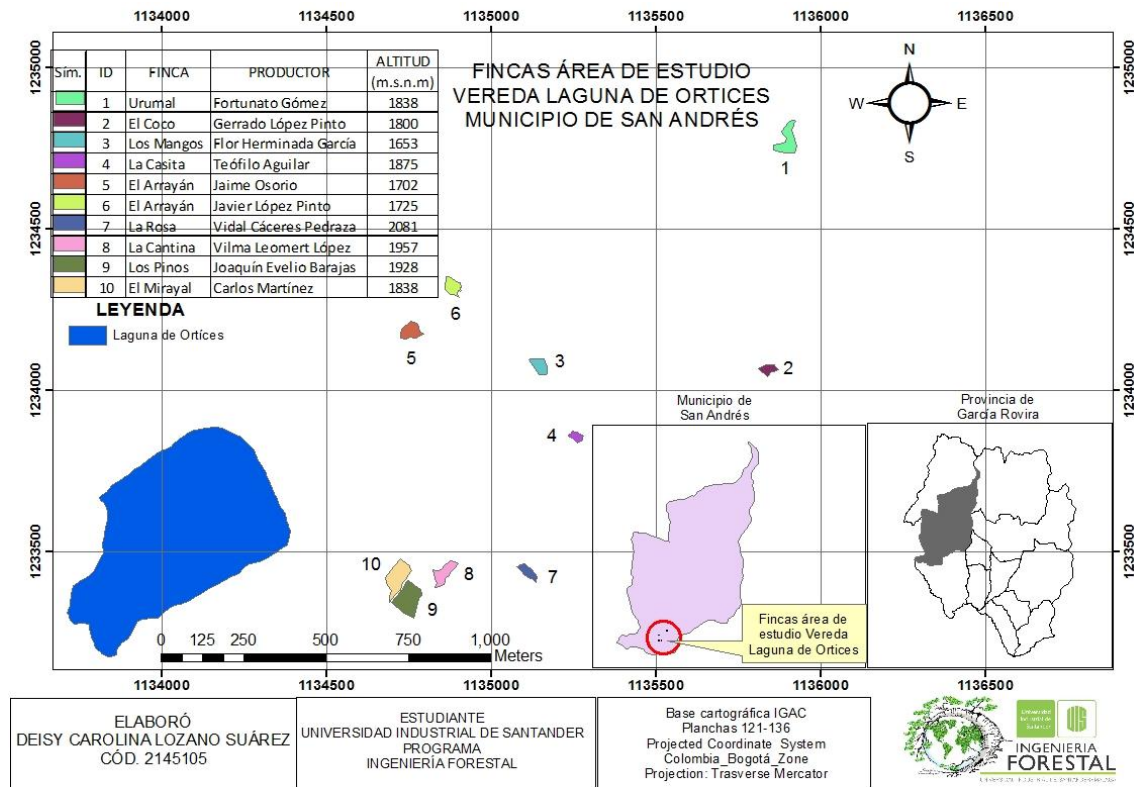


Figura 10. Mapa de ubicación de las 10 fincas objeto de estudio

Tabla 5.
Localización geográfica de las fincas del área de estudio

Fincas	Productor	Localización Geográfica		Altitud (m)	Nomenclatura
		N	W		
Finca El Mirayal	Carlos Martínez	6°42'19.8"	72°51'32.6	1838	1
Finca Los Mangos	Flor García Pedraza	6°42'16.88"	72°51'15.01"	1653	2
Finca El Urumal	Fortunato Gómez	6°43'03.7"	72°50'54.0"	1838	3
Finca El Coco	Gerardo López Pinto	6°42'40.6"	72°50'56.2"	1800	4
Finca El Arrayán	Jaime Osorio	6°42'44.6"	72°51'31.5"	1702	5
Finca El Arrayán	Javier López Pinto	6°42'49.0"	72°51'27.3"	1725	6
Finca Los Pinos	Joaquín Barajas	6°42'17.5"	72°51'31.9"	1928	7
Finca La Casita	Teófilo Aguilar	6°42'33.9"	72°51'15.2	1875	8
Finca La Rosa	Vidal Cáceres	6°42'16.88"	72°51'15.01"	2081	9
Finca La Cantina	Vilma López	6°42'20.2"	72°51'28.3"	1957	10

Tabla 6.
Aspectos generales del área de estudio

Aspectos generales del área de estudio	
Topografía	Irregular
Temperatura promedio	23,1°C
Régimen de lluvias	Bimodal
Precipitación promedio anual	1444,4 mm
Horas de brillo solar	4
Humedad relativa promedio	83%
Zona de vida	Bosque Seco Tropical (bs-T)
Orden de suelo	Inceptisol (K)
Suborden	Ustepts (KD)

5.2 Variables del suelo

Para la descripción del perfil del suelo se utilizó la metodología propuesta por (Jaramillo, 2002), para el color se utilizó la Tabla de Munsell (ver Apéndice A).

Para determinar la clase agrológica y el tipo de suelo se utilizó la clasificación del (IGAC,2002) (ver Apéndice).

Para determinar el orden de suelos, horizontes superficiales (epipedones) y subsuperficiales (endopedones) se utilizó la metodología propuesta por (USDA,2014) (ver Apéndice A).

Para esta sección se utilizó la base de datos (ver Apéndice R).

Se eligieron las variables físicas, químicas y biológicas que se presentan a continuación (ver Tabla 7). Luego se recolectaron las muestras de suelo y finalmente para el análisis de los resultados se utilizó la técnica de Análisis de Componentes Principales (ACP) para reducir el número de variables, que expliquen la mayor variabilidad posible y ser propuestas como indicadores de calidad de suelo. (ver Apéndice I). Posteriormente, se realizó Análisis de Agrupamiento Jerárquico. Este análisis se realizó en el software estadístico RStudio versión 1.1.463-© 2009-2018 RStudio, Inc.

Tabla 7.
Variables físicas, químicas y biológicas utilizadas en el presente estudio

Variables físicas	Variables químicas	Variables biológicas
Contenido de arena	Nitrógeno	Materia orgánica
Contenido de limos	Magnesio	Población de lombrices
Contenido de arcillas	Manganeso	
Saturación de humedad	Fósforo	
Densidad aparente	Calcio	
	Zinc	
	Potasio	
	Sodio	
	Boro	
	Ph	
	Azufre	
	Conductividad eléctrica	
	Cobre	
	CIC	
	Hierro	
	Aluminio	

5.2.1 Muestreo de las variables químicas, físicas y biológicas: De acuerdo a la metodología propuesta por (IGAC, 2013). Las muestras de suelo fueron tomadas al azar en un recorrido en forma de zig-zag entre las hileras de café a una profundidad de 30 cm; se tomaron 10 sub-muestras de suelo por cada finca, posteriormente estas fueron mezcladas para dejar aproximadamente 1000 g de suelo; se colocó el material en bolsa plástica rotulada (fecha, código de la finca) y enviadas a Laboratorios Calderón. (Ver Apéndice A).

Con el objetivo de obtener muestras de suelo para medir otras variables del suelo se utilizaron las siguientes metodologías (ver Tabla 8).

Tabla 8.
Metodologías utilizadas para las variables del suelo

Variables del suelo	
Recolección muestras suelo	(IGAC,2013)
Fauna del suelo	(Anderson e Ingram, 2006)
Hormigas	(Anderson e Ingram, 2006)
Lombrices	(USDA,1999)
Humedad del suelo	Lectura directa

Para el muestreo de la fauna del suelo se tuvo en cuenta la metodología propuesta por (Anderson e Ingram, 2006) de la siguiente manera: se realizó un monolito de 25*25*30 cm, se colectaron los invertebrados mayores de 10 cm de largo (ciempiés), fueron preservados en un frasco con una solución en formol para evitar la supuración del material (Ver Apéndice J)

Las hormigas fueron extraídas tomando un puñado de suelo, pasándolo a través de un tamiz de malla grande de 5 mm en una charola. Las muestras fueron conservadas en un frasco con una solución de alcohol al 80%. Para el análisis de biología de suelos también se tuvo en cuenta poblaciones de la clase Insecta. (Ver Apéndice J)

La densidad de lombrices se midió excavando con auxilio de un machete, un hoyo en el suelo de 12 x 12 x 12 cm (USDA, 1999) en el volumen de tierra extraído se realizó el conteo total de las lombrices. Los datos fueron expresados en número de lombrices / m² (ver Apéndice C). La humedad del suelo se midió con un sensor GS3 y lectura directa.

5.3 Variables morfológicas y fisiológicas del café

5.3.1 Variables morfológicas: Para el cumplimiento del objetivo 2 se realizó un muestreo a un área de 0.5 hectáreas, de allí se tomaron 30 plantas al azar para evaluar en un período de 6 meses, teniendo en cuenta medir siempre las mismas plantas y medir los cambios en las variables mencionadas en la Tabla 9.

Para la medición de longitud de la rama, diámetro de la rama, número de nodos, número de frutos y número de cojines florales, se dividió la planta en tercio inferior, medio y superior (ver Figura 11), y se realizó un análisis descriptivo de las variables. (Ver Apéndice D).

Tabla 9.
Variables morfológicas tenidas en cuenta en el presente estudio

Variables morfológicas		
Variable	Instrumento de medición	Metodología
Altura de la planta	Cinta métrica	(Balladares Valdivia y Calero Moraga, 2005)
Número de bandolas	Conteo directo	(Zapata et al., 2015).
Longitud de rama	Cinta métrica	(Blanco et al., 2003).
Diámetro de la bandola	Pie de rey digital (mm)	(Balladares Valdivia y Calero Moraga, 2005)
Número de frutos	Conteo directo	(Alarcón Aguila, 2016)
Número de nodos	Conteo directo	(Alarcón Aguila, 2016)
Número de cojines florales	Conteo directo	(Alarcón Aguila, 2016)

En la Figura 11 se visualiza la división de la planta en tercio superior, medio e inferior para la toma de datos de variables morfológicas.



Figura 11. División en tercios de la planta de café para toma de datos

5.3.2 Variables fisiológicas del café: Para el cumplimiento del objetivo 2 se tuvieron en cuenta 3 variables fisiológicas: conductancia estomática, fluorescencia de clorofila y porcentaje de sombra (ver Tabla 10). Para ver los datos de porcentaje de sombra (ver Apéndice N).

Tabla 10.

Variables fisiológicas tenidas en cuenta en el presente estudio

Variables fisiológicas	
Conductancia estomática	3 plantas (4 hojas por planta)
Fluorescencia de clorofila	3 plantas (3 hojas por planta)
Porcentaje de sombra	Farfán y Mestre (2004)

Para la medición de conductancia estomática se realizó un muestreo al azar tomando 3 plantas en cada finca ubicadas en el centro del lote a evaluar para evitar el efecto de borde; de esta se seleccionaron 4 hojas y se hicieron 4 mediciones con un porómetro portátil Decagon: SC-1 entre las 7 a.m. hasta las 5 p.m., en intervalos de 2 horas (ver Apéndice G). Los datos se pueden visualizar en (ver Apéndice O).

Para la medición de fluorescencia de clorofila se tomaron las mismas tres plantas y tres hojas entre las 11 y la 1 p.m.

La medición del % de sombra se realizó con la metodología utilizada en el estudio de (Farfán y Mestre, 2004), (ver Medición de variables fisiológicas). Los datos se pueden visualizar en (ver Apéndice P).

5.3.3 Variables económicas: Finalmente, se revisó información secundaria (Villavicencio, 2013), (Ordoñez, Suárez, Oyola, Vega y Suarez, 2013), (Serna Giraldo et al., 2010), (Cruz et al., 2014) del proceso productivo del café y cuáles son los rubros para estimar los costos en cada una de las etapas del proceso.

Basándose en ello se construyó la entrevista semiestructurada (ver Apéndice R) de acuerdo a la metodología propuesta por (Nina Duarte, 2005) para aplicar a los productores del área de estudio y recolectar información sobre las labores que realizan y los costos en que incurren. (ver Figura 12).

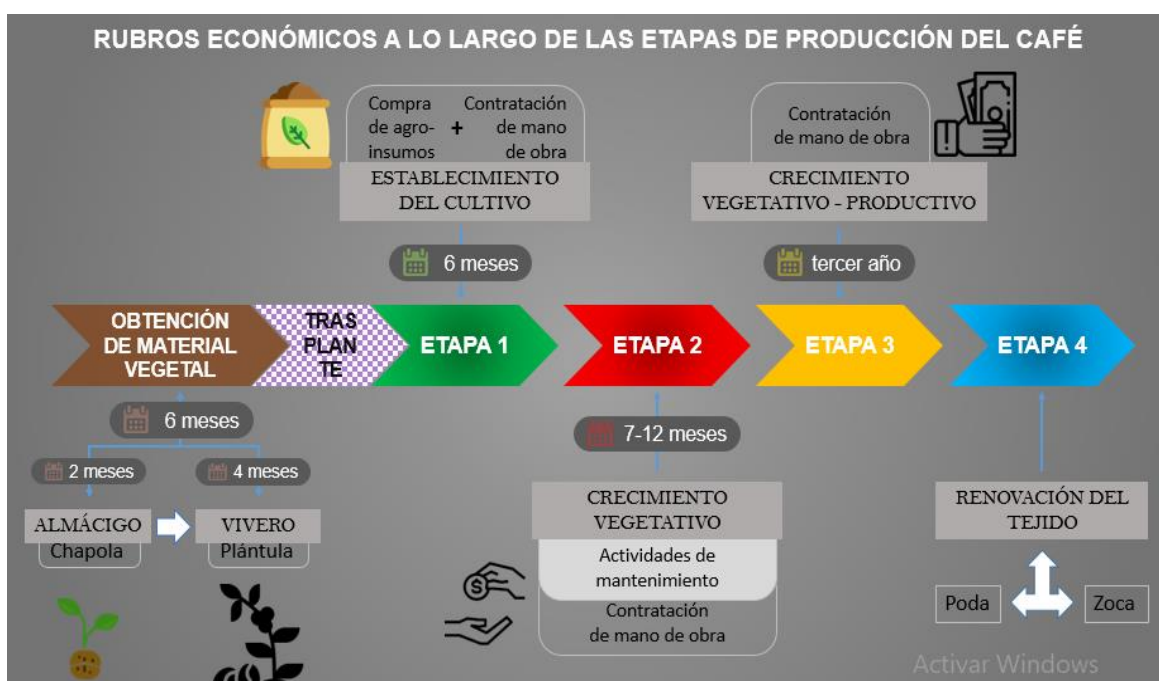


Figura 12. Rubros económicos a lo largo del proceso productivo del café

5.3.4 Indicadores ambientales

5.3.4.1 Variables químicas Para la medición de la sostenibilidad ambiental de los SAF con café en el área de estudio se tuvieron en cuenta las variables químicas. La ponderación se realizó teniendo en cuenta la fertilidad de los suelos, metodología Códigos para los levantamientos de suelos (IGAC, 2010).

5.3.4.2 Variables físicas: Clase textural, profundidad efectiva, densidad aparente, pendiente y grado de recubrimiento de rocas en superficie, las cuales limitan el desarrollo radicular de las plantas (Salamanca, Sadeghian, Amézquita, 2004). Para realizar la ponderación de la variable densidad aparente se adoptó la metodología (Hunt y Gilkes, 1992).

5.3.4.3 Variables del componente arbóreo y densidad de lombrices: Índice de Margalef, Shannon y Simpson, porcentaje de sombra y densidad de lombrices.

Para la ponderación del porcentaje de sombra se tuvo en cuenta el valor base de 40% de acuerdo con (Muschler, 2000), por lo tanto, se clasificó de la siguiente manera: >80% (0,2, muy restrictivo), 70-80% (0,4), 40-50% (1, no restrictivo), 30-40% (0,8, bajamente restrictivo), 20-30% (0,6, medianamente restrictivo), 10-20% (0,4, altamente restrictivo), <0% (0,2, muy restrictivo). Para los índices de diversidad de Shannon, Margalef y Simpson: Muy bajo (0-0,25), bajo (0,26-0,5), medio (0,5-0,75) y alto (0,75-1). Para la densidad de lombrices: muy bajo (0-10), bajo (10-20), alto (20-30) y muy alto (30-40). Para evaluar la diversidad florística en el sistema de producción de café se realizó un inventario con conteo total en el lote del Sistema Agroforestal, se identificaron todas las especies, tomando datos de abundancia, DAP (Diámetro a la Altura del Pecho), altura (ver Apéndice Inventario). Se calculó el índice de diversidad de Margalef, Simpson y Shannon. Para ver descripción de cada una de las especies encontradas en el área de estudio (Apéndice F). Para definir los rangos de sostenibilidad se adaptó la metodología Farfán (2014).

5.3.5 Indicadores económicos: Se tuvieron en cuenta como indicadores económicos el ingreso bruto calculado como el producto del precio de venta por la demanda y el ingreso neto calculado como la diferencia entre el ingreso bruto y los costos totales de producción (ver Apéndice H).

5.3.6 Indicadores productivos: Se tuvo en cuenta las variables físicas del grano de café: peso, diámetro polar, diámetro ecuatorial, peso de la cereza, (ver Figura 13), fluorescencia, conductancia estomática y humedad del suelo.



a. Diámetro polar



b. Diámetro ecuatorial



c. Peso fruto

Figura 13. Variables del fruto de café como indicadores productivos. a. Diámetro polar, b. Diámetro ecuatorial, c. Peso fruto

Para definir los rangos de sostenibilidad se adaptó la metodología propuesta por Farfán (2014)

6. Resultados y Discusión

6.1 Caracterización de las fincas cafetaleras en el área de estudio

La actividad cafetalera en la Laguna de Ortices, municipio de San Andrés, Santander se desarrolla en unidades productivas pequeñas, existen fincas convencionales, las cuales se describen a continuación:

6.1.1 Características socioeconómicas

6.1.1.1 Aspectos sociales: Dentro de los aspectos sociales, la edad promedio es de 43 años y comparado con la edad promedio para Colombia que es de 54 años, los productores del área de estudio son más jóvenes. El 60% de los productores tienen nivel de escolaridad primaria, el 20% tienen básica secundaria y el 20% restante son bachilleres. En el área de estudio los agricultores utilizan medios de comunicación como radio, televisión y celulares. El tipo de vivienda varía desde mixta (80%) y el 20% restante son casas de tapia pisada. Cuentan con servicios de agua y luz. Todas las fincas pertenecen a la clasificación de pequeña finca productora (FNC, 2018). El 100% de los productores del área utilizan sombrío en su unidad productiva de café, varía en el porcentaje de sombra que proveen los árboles asociados.

6.1.1.2 Aspectos económicos: Las 10 fincas objeto de estudio venden el café pergamino seco a intermediarios o a la cooperativa de cafeteros a precios entre \$700,000 y 800,000 en promedio para una carga (125 kilogramos o 10 arrobas) para la cosecha del año 2018. El precio promedio al que les pagaron fue \$6.048 por kilogramo de café pergamino seco.

6.1.2 Caracterización general de los cafetales: El tamaño del área dedicada al café oscila entre 1 y 8 hectáreas, con un promedio de 4,3 hectáreas. Las fincas están ubicadas entre los 1653 y 2081 m.s.n.m. La edad promedio del cafetal es de 4 años y utilizan la variedad Castillo. La densidad promedio de la plantación es de 5,090 plantas por hectárea. La riqueza promedio de especies asociadas al cafetal de acuerdo con los resultados del inventario es de 27 especies diferentes para todas las fincas, predominio de Falso balso (*Ochroma pyramidale*), Arrayán (*Myrtus communis*), y Alapo (*Mimosoidea sp*). (ver Figura 14). (ver Apéndice E).



a. Balso (*Ochroma pyramidale*) b. Arrayán (*Myrtus communis*) c. Alapo (*Mimosoidea sp*)

Figura 14. Principales especies asociadas al cultivo de café en el área de estudio

En la Tabla 11 y Tabla 12 se visualizan las familias presentes en cada una de las fincas del área de estudio.

Tabla 11.

Familia y número de individuos de acuerdo con los resultados del inventario

Inventario				
Finca 1	Finca 2	Finca 3	Finca 4	Finca 5
Primulaceae	Lauraceae	Fabaceae	Anacardiaceae	Acanthaceae
Lauraceae	Anacardiaceae	Malvaceae	Moraceae	Fabaceae

Araliaceae	Fabaceae	Primulaceae	Solanaceae	Lauraceae
		Lauraceae	Hypericaceae	Urticaceae
		Myrtaceae	Fabaceae	Primulaceae
		Urticaceae		Annonaceae
				Ericaceae
				Myrtaceae
				Melastomataceae

Tabla 12.

Familias de acuerdo con los resultados del inventario

Inventario				
Finca 6	Finca 7	Finca 8	Finca 9	Finca 10
Myrtaceae	Lauraceae	Malvaceae	Myrtaceae	Lauraceae
Boraginaceae	Myrtaceae	Fabaceae	Primulaceae	Myrtaceae
Primulaceae			Cyatheaceae	Rutaceae
Bignoniaceae			Anacardiaceae	Annonaceae
			Cloranthaceae	
			Hypericaceae	
			Solanaceae	

6.1.2.1 Manejo de los cafetales: En el área de estudio los productores fertilizan el cultivo de café con DAP (Fosfato Diamónico) aplicando en promedio para las plantas de café en etapa de vivero 10 gramos, en etapa de establecimiento del cultivo en promedio 30 gramos. El café es secado en el patio, marquesinas o casas Elba. Las cerezas obtenidas del proceso de despulpado generalmente son utilizadas en la elaboración de lombricompost, apiladas o aplicadas al lote como abono.

6.2 Variables del suelo

6.2.1 Perfil del suelo. En la Tabla 13 se visualizan los perfiles del suelo para cada una de las fincas del área de estudio.

En la Figura 15 Perfil del suelo de las 10 fincas del área de estudio.

El perfil del suelo de las fincas: 3, 7 y 9 presentan una capa orgánica escasa, lo que puede repercutir en el desarrollo radicular de las plantas y las deficiencias de Nitrógeno porque la

materia orgánica aporta este mineral (Khalajabadi, 2011). La finca 6 no presenta capa orgánica. En la Tabla 13 se presenta la descripción de los horizontes del suelo.

Tabla 13.
Descripción de los horizontes del suelo

Descripción de horizontes	
Horizonte	Descripción
Oa	Materiales orgánicos muy descompuestos
Oi	Material orgánico muy descompuesto
Oe	Residuos orgánicos con descomposición intermedia
A	Acumulación de materia orgánica humificada, íntimamente mezclada con la fracción mineral del suelo
E	Eluvial de coloides del suelo
EB	Poseen propiedades del horizonte E y del horizonte B
B	Horizonte mineral
Bw	Horizonte mineral, posee desarrollo de color y/o estructura

En la Tabla 14 se visualiza la profundidad en centímetros de los horizontes del suelo para cada finca.

Tabla 14.
Profundidad de los horizontes del suelo

Profundidad de los horizontes del suelo					
Finca	H 1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	H4 (cm)	H5 (cm)
Finca 1	A (20 cm)	E (18 cm)	EB (32 cm)	Bw (30 cm)	
Finca 2	A (28 cm)	E (18 cm)	Bw 38 cm)		
Finca 3	Oa (6 cm)	A (28 cm)	AE (15 cm)	E (30 cm)	Bw (26 cm)
Finca 4	Oi (16 cm)	A (28 cm)	E (18 cm)	Bw (38 cm)	
Finca 5	A (48 cm)	E (52 cm)			
Finca 6	A (23 cm)	E (38 cm)	Bw (39 cm)		
Finca 7	Oe (10 cm)	A (35 cm)	E (40 cm)	Bw (15 cm)	
Finca 8	A (40 cm)	E (25 cm)	Bw (35 cm)		
Finca 9	Oi (8 cm)	A (28 cm)	E (40 cm)	Bw (24 cm)	
Finca 10	A (20 cm)	E (15 cm)	EB (23 cm)	Bw (42 cm)	

En la Tabla 15 se presenta la clase agrológica, tipo y orden del suelo para el área de estudio.

Tabla 15.

Clase agrológica, tipo y orden del suelo para el área de estudio.

Variables del suelo		
Clase agrológica	Nomenclatura	Descripción
	VII s-1	Suelos con uso recomendado para sistemas agroforestales, plantaciones forestales o tierras con fines de conservación
Tipo de suelo	MLBf2	Relieve moderadamente a fuertemente escarpado con pendientes mayores del 50%, profundos, texturas franco arenosa, franco arcilloso, arcillosa y arcillo arenosa, reacción muy fuerte a moderadamente ácida, saturación de Aluminio activo mayor del 50% en algunos suelos, baja fertilidad natural y erosión moderada localizada.
Orden de suelo	Inceptisol	Suelos de origen relativamente nuevo, indicación de minerales arcillosos, óxidos metálicos o humus que se acumulan en capas, se encuentran en entornos topográficos propicios a la erosión del suelo o la inundación

6.2.2 Fauna del suelo: Para la fauna del suelo (ver Apéndice J).

En la Figura 16 se visualiza la clase Insecta en las 10 fincas, los mayores valores están presentes en las fincas 8 y 10, según los resultados tienen mayor diversidad.

Para el orden Coleoptera los mayores valores están en la finca de Jaime, el orden Lepidoptera en la finca 1. Este orden responde con facilidad a los cambios en la textura y estructura del suelo (Guillen, Soto y Springer, 2006). El orden Dermaptera en la finca 3 y 4. El orden Hymenoptera presenta mayores valores en la finca 10, este orden es importante como bioindicadores de los ecosistemas y son sensibles a los cambios dentro de ellos (Rivera y Armbrrecht, 2005). El orden Ortoptera y Diptera en la finca 4. De acuerdo con estos resultados la mayor diversidad está en la finca 4.

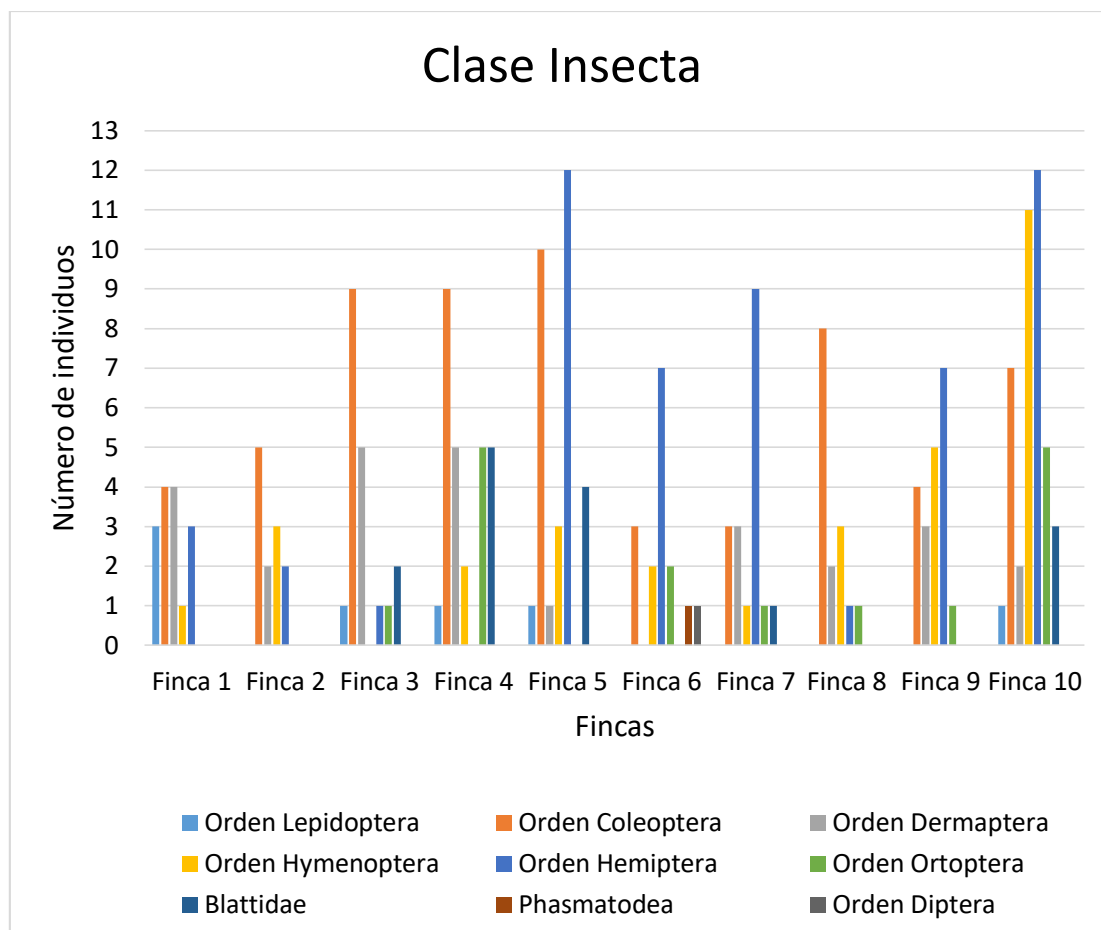


Figura 16. Individuos de la clase Insecta para las 10 fincas del área de estudio

En la Figura 17 se visualiza la clase *Arachnida*, de acuerdo con los resultados las fincas con mayores valores de subclase *Araneae* son: Finca 4 y 9..

La clase *Scolopendromorpha* las fincas 1, 5 y 7.

La clase *Colembola* la finca 3, esta clase es importante para la degradación de la materia orgánica y el ciclaje de nutrientes (Guillén, Soto y Springer, 2006)

La clase *Scorpion* la finca 5, la clase *Opilion* la finca 2. Los resultados indican que la clase *Araneae* es la más abundante.

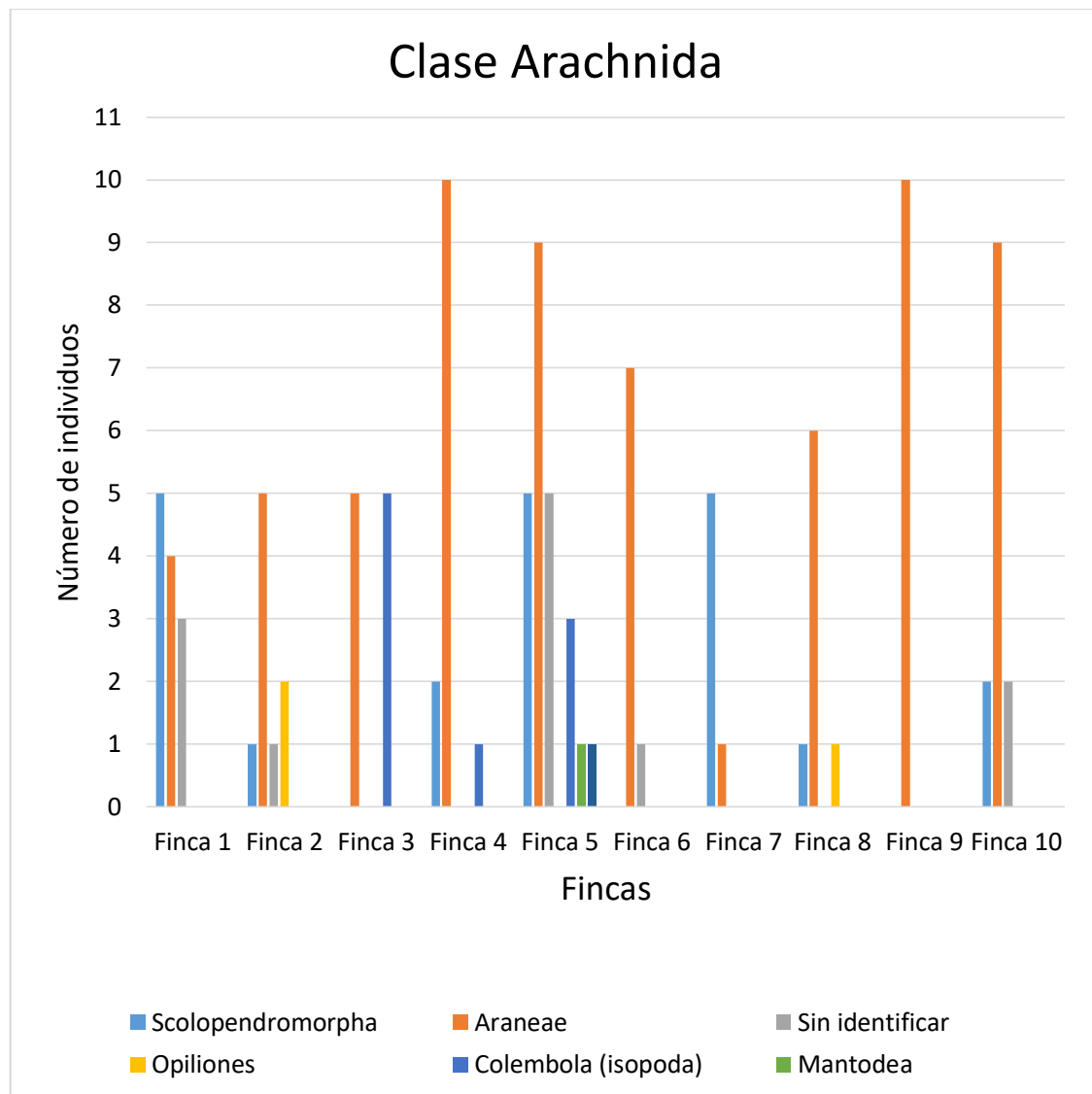


Figura 17. Clase Arachnida en las 10 fincas del área de estudio

En la Figura 18 se visualiza la clase *Clitellata* en el área de estudio, los mayores valores están en la finca 8, seguida de la 7.

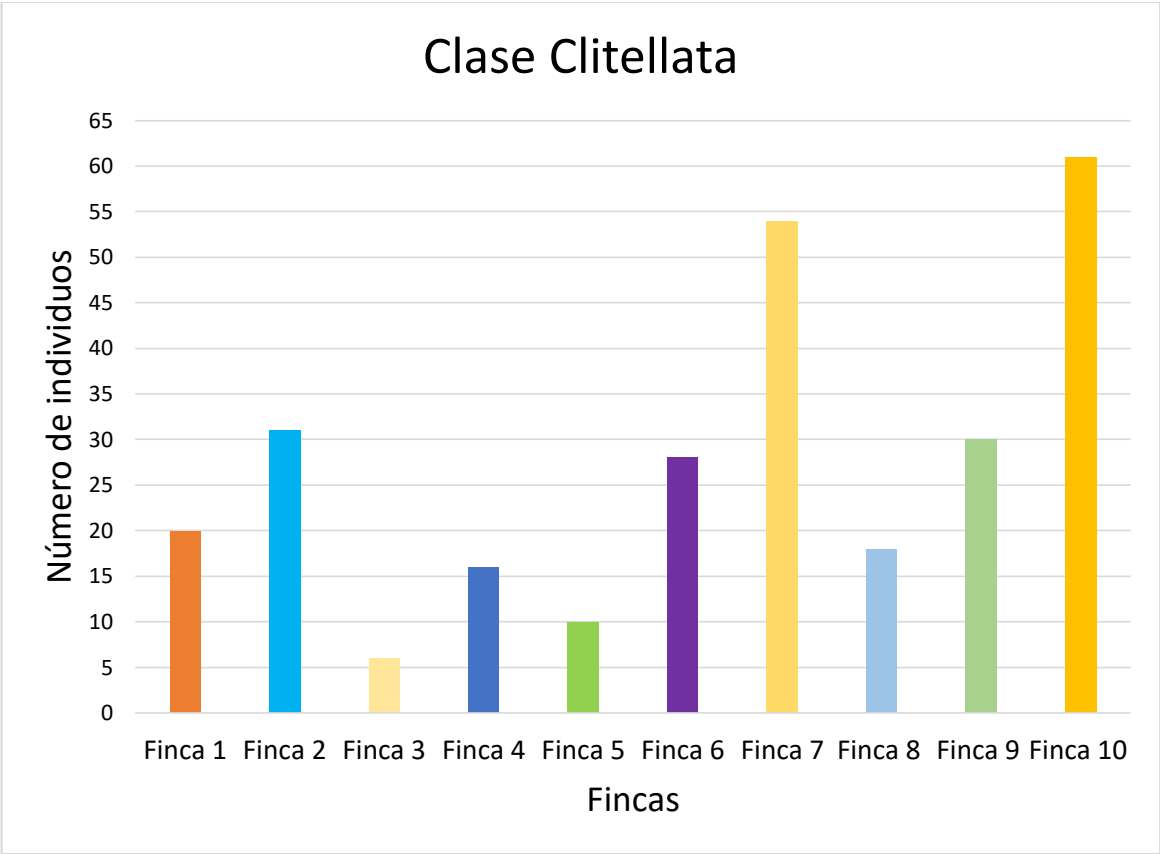


Figura 18. Clase Clitellata en las 10 fincas del área de estudio.

6.2.3 Análisis de suelos. En la Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19 se visualizan los resultados de los análisis de suelos para las 10 fincas.

Tabla 16
Resultados de los análisis de suelos para las 10 fincas

Fincas	Potasio	Calcio	Magnesio	Sodio	Aluminio	C.I.C	Cloruros
Finca 1	0.35	2.89	1.12	0.05	1.9	26	0.44
Finca 2	0.16	2.61	0.82	0.07	2.3	25	0.44
Finca 3	0.25	2.49	1.07	0.1	1.7	22	0.32
Finca 4	0.17	10.15	2.21	0.05	0.4	10	0.48
Finca 5	0.4	2.76	1.97	0.05	0.3	13	0.52
Finca 6	0.22	2.01	0.89	0.05	1.9	12	0.56
Finca 7	0.27	3.44	1.19	0.06	1.4	15	0.44
Finca 8	0.23	1.31	0.52	0.08	2.6	14	0.4
Finca 9	0.24	1.92	1.05	0.06	2.4	15	0.48
Finca 10	0.31	4.99	1.45	0.1	0.2	18	0.48

Tabla 17

Resultados de los análisis de suelos de las 10 fincas

Fincas	Fósforo	N- NH4	N-NO3	Azufre	Hierro	Manganeso	Cobre
Finca 1	5	2	20	1	2.29	16	0.2
Finca 2	3	2	20	1	139	5	0.3
Finca 3	3	3	20	1	200	70	0.2
Finca 4	2	2	30	2	105	185	0.3
Finca 5	2	3	20	1	76	33	0.3
Finca 6	7	4	10	1	63	9	0.3
Finca 7	6	2	20	1	205	13	0.2
Finca 8	1	3	20	1	141	9	0.2
Finca 9	2	3	20	1	210	34	0.2
Finca 10	2	3	10	1	121	21	0.2

Tabla 18

Resultados de los análisis de suelos de las 10 fincas

Fincas	Zinc	Boro	pH	C.E.	M.O	% Sat Bases	Arena	Limo
Finca 1	1.2	0.1	4.5	0.18	10.6	17	30	41
Finca 2	0.8	0.12	4.68	0.14	7.21	14	17	50
Finca 3	3.6	0.09	4.52	0.24	6.4	17	26	45
Finca 4	2	0.09	5.31	0.22	4.36	125	70	21
Finca 5	1	0.2	5.18	0.2	6.03	39	67	22
Finca 6	1.4	0.1	4.57	0.12	6.55	26	58	23
Finca 7	1.7	0.18	4.86	0.12	7.12	33	59	27
Finca 8	0.7	0.13	4.55	0.16	3.55	15	53	27
Finca 9	1.5	0.18	4.61	0.13	8.09	21	59	30
Finca 10	1.2	0.05	5.37	0.13	5.48	38	48	29

Tabla 19

Resultados de los análisis de suelos de las 10 fincas.

Fincas	Arcilla	Sat.Humedad	Densidad a	Lombrices
Finca 1	29	51	1.03	6.66
Finca 2	33	45	1.06	10.33
Finca 3	29	49	1.08	2
Finca 4	9	45	1.36	5.33
Finca 5	11	44	1.19	3.33
Finca 6	9	45	1.25	9.33
Finca 7	14	53	1.15	18
Finca 8	20	56	1.2	4.33
Finca 9	11	51	1.19	10
Finca 10	23	52	1.19	20.33

6.2.4 Análisis descriptivo para variables físicas, químicas y biológicas del suelo : La

media, el mínimo, el máximo, la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV) se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20.
Estadística descriptiva de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo en las fincas en la vereda Laguna de Ortices, Municipio de San Andrés

Variable	Mínimo	Máximo	Media
K	0.16	0.4	0.26
Ca	1.31	10.5	3.457
Mg	0.52	2.21	1.229
Na	0.05	0.1	0.067
Al	0.2	2.6	1.51
C.I.C	10	26	1.51
Cloruros	0.32	0.56	0.456
P	1	7	3.3
N-NH4	2	4	2.7
N-NO3	10	30	19
S	1	2	1.1
Fe	2.29	210	126.229
Mn	5	185	39.5
Cu	0.2	0.3	0.24
Zn	0.7	3.6	1.51
B	0.05	0.2	0.124
Ph	4.5	5.37	4.815
C.E	0.12	0.24	0.164
M.O	3.55	10.6	6.539
% SAT Bases	14.37	125.32	34.58
C/N	11.6	11.6	11.6016
Arena	17	70	48.7
Limo	21	50	31.5
Arcilla	18.8	9	33
Sat. Humedad	44	56	49.1
Densidad aparente	1.03	1.33	1.17
Lombrices	2	20.33	8.97

De acuerdo con el coeficiente de variación existe mayor dispersión para las variables Mn (1.38) y %Sat Bases (0.96). Las variables con menor variabilidad son: pH (0.071), Saturación de Humedad (0.08) y Densidad aparente (0.08).

Las correlaciones lineales entre las variables fueron seleccionadas teniendo en cuenta la clasificación realizada por (Rodríguez Garay, 2015) en la cual la correlación lineal en valores

inferiores a 12% son considerados de baja variabilidad, valores entre 12% y 60% variabilidad media y valores superiores a 60% de alta variabilidad (ver Tabla 21).

Tabla 21.

Correlaciones lineales entre las variables químicas, físicas y biológicas del suelo

Propiedad	Propiedad químicas, físicas y biológicas con correlación significativa
Calcio	Magnesio (0.776), Manganese (0.862), Aluminio (-0.670), Azufre (0.921), pH (0.724) %SatBases (0.953)
Magnesio	Calcio (0.776), Aluminio (-0.884), Azufre (0.665), Manganese (0.706), pH (0.823), %SatBases (0.811)
Aluminio	Calcio (-0.670), Magnesio (-0.884), pH (-0.919)
CIC	Arena (-0.944), Limo (0.934), Arcilla (0.934), Da (-0.849)
Cloruros	Arcilla (-0.66)
N-NH ₄	N-NO ₃ (-0.667)
N-NO ₃	N-NH ₄ (-0.667), Azufre (0.680), Manganese (0.697),
Azufre	Calcio (0.921), Magnesio (0.665), Manganese (0.936), N-NO ₃ (0.680), %SatBases (0.960)
Manganese	Calcio (0.862), Magnesio (0.706), N-NO ₃ (0.697), Azufre (0.937), C.E.(Conductividad Eléctrica) (0.657), %SatBases (0.900)
Cobre	Sat Humedad (-0.902)
Ph	Calcio (0.724), Magnesio (0.824), Aluminio (-0.919), %SatBases (0.698), Da (0.674)
C.E.	Manganese (0.657)
M.O	Da (-0.680)
Sat%bases	Calcio (0.953), Magnesio (0.811), Azufre (0.960), Manganese (0.900), pH (0.698), Da (0.727)
C/N	Limo (-0.695)
Arena	C.I.C (-0.944), Limo (-0.974), Arcilla (-0.96), Da (0.791)
Limo	C.I.C (0.937), C/N (-0.695), Arena (-0.974), Arcilla (0.915), Da (-0.823)
Arcilla	C.I.C (0.934), Cloruros (-0.660), Arena (-0.955), Limo (0.915), Da (-0.732)
Densidad aparente	C.I.C (-0.849), pH (0.674), M.O (-0.680), %SatBases (0.727), Arena (0.791), Limo (- 0.823), Arcilla (-0.733)

Propiedad	Propiedad químicas, físicas y biológicas con correlación significativa
Lombrices	C.E (-0.759)

De acuerdo con los resultados de la matriz de correlación para las variables químicas, físicas y biológicas del suelo de las 10 fincas objeto de estudio, el pH presenta un bajo C.V. lo cual concuerda con los resultados obtenidos en el estudio realizado por (Acevedo et al., 2008) e indica que es una de las propiedades químicas que menos varía, además de ser una característica propia de la génesis del suelo y una alta variabilidad de M.O, P y K por ser dependientes de las condiciones de manejo del suelo (fertilizaciones, incorporación de residuos orgánicos).

Comparado con el estudio realizado por (Obando Moncayo, Villegas Hincapié, Betancur, y Echeverri Tafur, 2005) y por (Moreira Da Silva, Menezes de Souza, Pereira de Figueiredo, de Souza Vieira y de Oliveira, 2008) el pH tiene un C.V del 7% y se encuentran diferencias de los coeficientes de variación obtenidos en el presente estudio para Ca, Mg, K, Na, CIC y P.

De acuerdo con los resultados de estadística descriptiva el K no está correlacionado con ninguna variable, el Ca tiene una correlación positiva (0.776) con el Mg, S (0.922), Mn (0.862), pH (0.724) y con el % de Saturación de bases (0.953) y una correlación negativa (-0.670) con el Al, obteniendo resultados similares para el estudio de (Rodríguez Garay, Camacho Tamayo y Rubiano Sanabria, 2016).

Adicionalmente, para otros elementos como: el Mg tiene una correlación positiva con Ca (0.776), S (0.665), Mn (0.706), pH (0.824), % Sat bases (0.811), correlación negativa con Al (-0.884) lo cual concuerda con lo obtenido en el estudio para Ca y pH, pero en este el Mg tiene además correlación con K, CIC, Fe y Zn. El pH se encuentra correlacionado de forma positiva con Calcio (0.724), Magnesio (0.824), Sat%bases (0.698) y negativa con el Al (-0.919) comparado con el estudio realizado por (Rodríguez Garay et al., 2016) en el cual se

encuentra correlacionado con Ca (0.88), Mg (0.76), Al (-0.76), lo cual, de acuerdo con los autores, la pérdida de base genera en el suelo mayor disponibilidad del Aluminio.

Los resultados de las correlaciones negativas entre el Al con Ca, Mg, pH y % Sat Bases.

A diferencia del estudio realizado por el Mn se correlaciona con Ca, Mg, N-NO₃, S, C.E y % Sat Bases y en el estudio en mención se relaciona con la CICE, Cu, Fe.

Correlaciones: (Rodríguez Garay et al., 2016), el pH presenta correlación positiva con las bases de cambio Ca, K y Mg, negativa con el contenido de Al; incrementos en el pH favorece la disponibilidad de P, correlación positiva con Cu, Fe y Zn, el contenido de C.O afecta negativamente la concentración de Fe y Al. Correlación negativa entre la concentración de C.O y la CICE; el C.O se correlaciona positivamente con el % de arcilla, negativamente con el % de arena, el C.O y la Da se correlacionan negativamente.

6.2.5 Análisis de Componentes Principales: Se obtuvieron 9 componentes principales, se eligieron los primeros cuatro de acuerdo con el criterio del investigador que explican una varianza acumulada mayor al 70%. (ver Figura 19). (Ver Apéndice I).

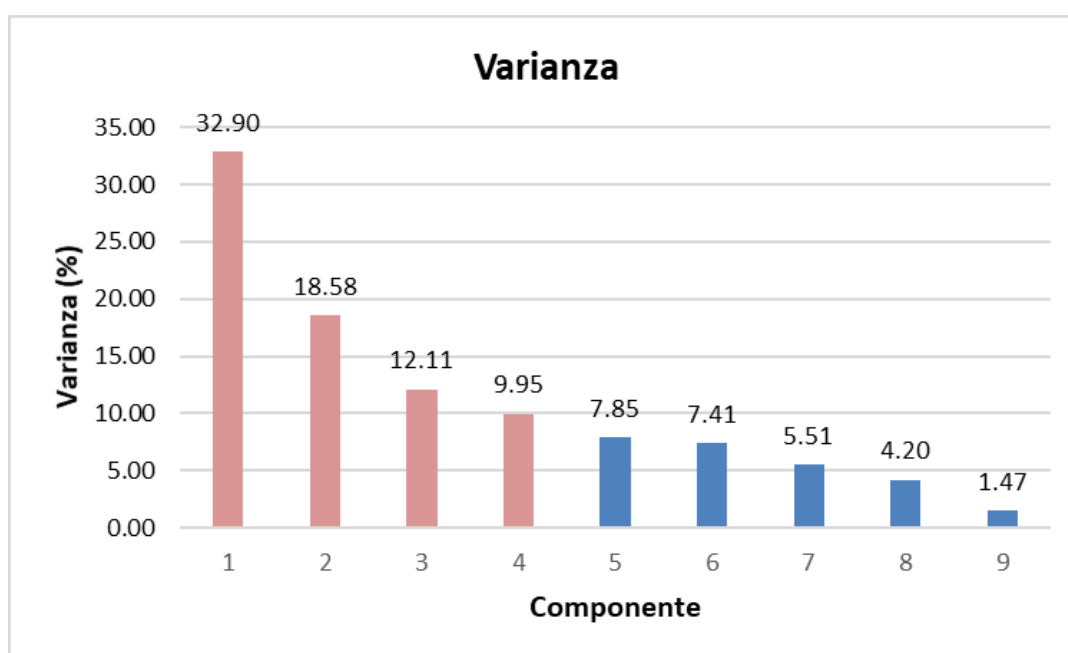


Figura 19. Varianza que explica cada componente principal

Las variables que tienen mayor contribución a la conformación de los primeros dos componentes se visualizan en *Figura 20*, destacándose para el primer componente las variables: Arena, Limo, Arcilla, C.I.C, Calcio y Azufre, para el segundo componente las variables: Manganeseo, Cloruro y Nitrato.

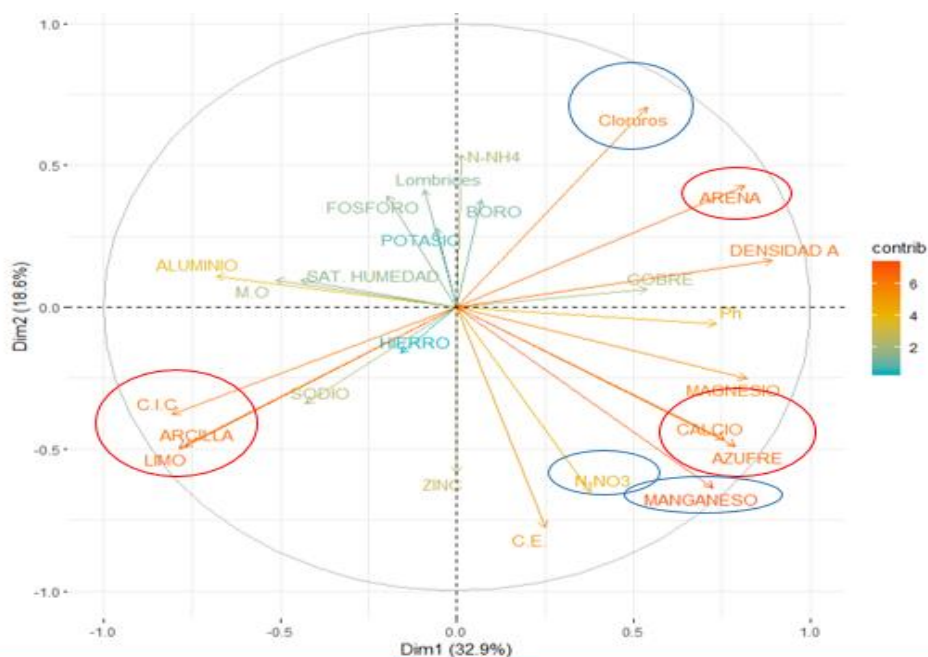


Figura 20. Relación entre las variables y los componentes (Análisis de Componentes Principales)

Los individuos (fincas) que contribuyen más al primer componente son las fincas: 4 y 6, en el segundo componente es la finca 5. (ver *Figura 21*).

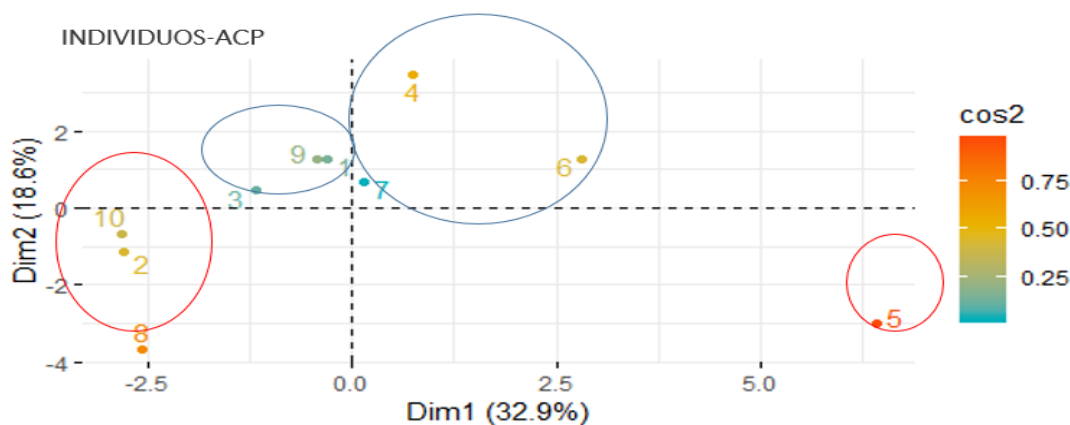


Figura 21. Relaciones individuales y componentes principales (Análisis de Componentes Principales)

Para el PCA se eligieron los cuatro primeros componentes que explican en total el 73,5% de la varianza total, En el primer componente se ubican las variables: Azufre, Arena, Arcilla, Limo, Calcio, C.I.C, en el segundo componente se ubican las variables: Cloruros, Nitrato y Manganeseo, en el tercer componente se ubica la variable: Na y en el cuarto componente se ubicó el Aluminio, a diferencia del estudio realizado por (Cardona Salle y Sadeghian Khalajabadi, 2005) los tres primeros componentes explican el 61% de la varianza total, el CP1 (29%), el CP2(18%) y el CP3 (14%), en este estudio tuvieron en cuenta las siguientes variables físicas: densidad real, aparente, porosidad total, arena, limo, arcilla, distribución de agregados en seco, estabilidad de agregados en húmedo, humedad del suelo, conductividad hidráulica, resistencia a la penetración, temperatura y las variables químicas: CIC, pH, N, nitratos, amonio, P, S, Al, Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Cu, Zn, Mn, B. Para este estudio en el primer componente se ubican las variables: N, M.O, CIC, nitratos, densidad real; para el CP2 las variables: Mg, Ca y limo; para el tercer componente: Mn y S.

En el estudio realizado por (Farfán Valencia y Sánchez Arciniegas, 2018) tuvieron en cuenta las siguientes variables: pH, M.O, N, P, K, Ca, Mg, Al, CIC y SumBas; tuvieron en cuenta dos componentes principales, el CP1 explicó el 72.1% de la varianza total y conformado por las variables: Ca, SumBas, Mg, M.O, N, P, CIC y K, el segundo componente explicó el 11.5% de la varianza total y las variables de mayor peso fueron: Al y pH.

En el estudio realizado por (Vásquez Polo, Baena García y Menjivar Flores, 2010) tuvieron en cuenta variables físicas: humedad, textura, densidad aparente, conductividad hidráulica, resistencia a la penetración; variables químicas: M.O, pH, CIC, N, P, K, Ca, Mg, Na, Cu, Zn, Fe, Mn, B. Para las variables físicas el CP1, CP2 Y CP3 explicaron el 72% de la varianza total, para las variables químicas el CP1, CP2, CP3 Y CP4 explicaron el 66% de la varianza total. En el componente 1 las variables físicas fueron: contenido de arena, limo y arcilla; las variables químicas: CIC, M.O y pH; para el segundo componente las variables

físicas fueron: densidad aparente y conductividad hidráulica; las propiedades químicas: Ca, K, B; para el tercer componente las propiedades físicas: humedad y resistencia a la penetración y las propiedades químicas: Na y Mg; el cuarto componente las variables químicas: P, Na y CIC.

En el estudio realizado por (Rodríguez Garay, 2015) tuvo en cuenta las siguientes variables: pH, C.O, Ca, K, Mg, Na, Al, CICE, P, Fe, Zn, Cu, Mn, B y textura. Tomaron 3 componentes principales que explican el 50% de la variación total; el CP1 explica el 26.04% de la varianza total y contiene la mayoría de los atributos químicos del suelo, el CP2 contiene el pH.

6.2.6 Análisis de Agrupamiento Jerárquico: Teniendo en cuenta los resultados del Análisis de Componentes Principales se tomaron las variables que conformaron los primeros cuatro componentes: Arena, Limo, Arcilla, C.I.C, Calcio, Azufre, Nitrato, Cloruro, Manganeso, Sodio, Aluminio. Para el Análisis Clúster se utilizó la distancia de Ward. Como se puede evidenciar en la Figura 22 se identificaron 3 grupos: el primero conformado por las fincas: 2,8 y 10, el segundo por las fincas: 1,3,4, 6, 7 y 9 y el tercero: finca 5. (Ver Apéndice I).

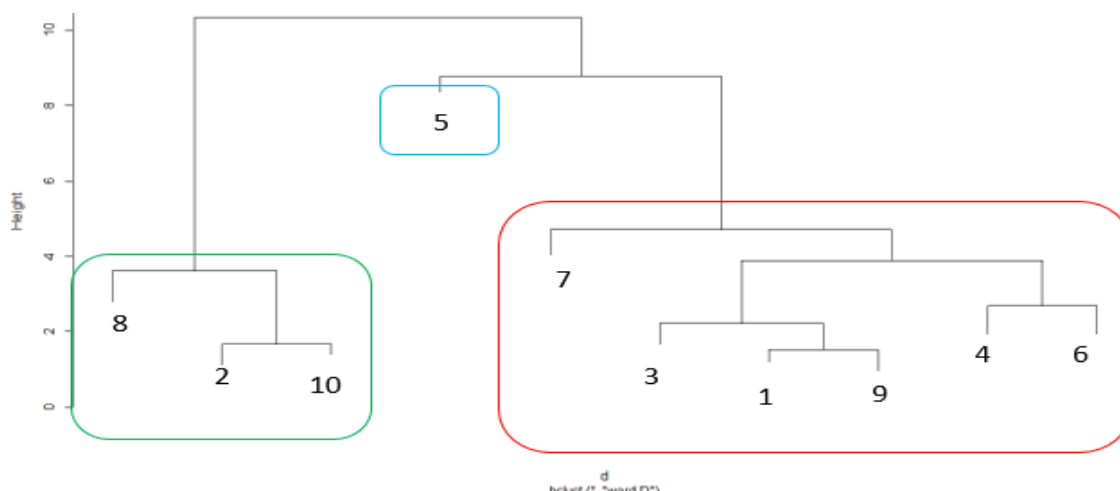


Figura 22. Conformación de grupos mediante el Análisis de Agrupamiento Jerárquico

Posteriormente, se realizó una socialización de los resultados obtenidos en esta etapa del proyecto a los productores. (ver Figura 23).(Ver Apéndice K)

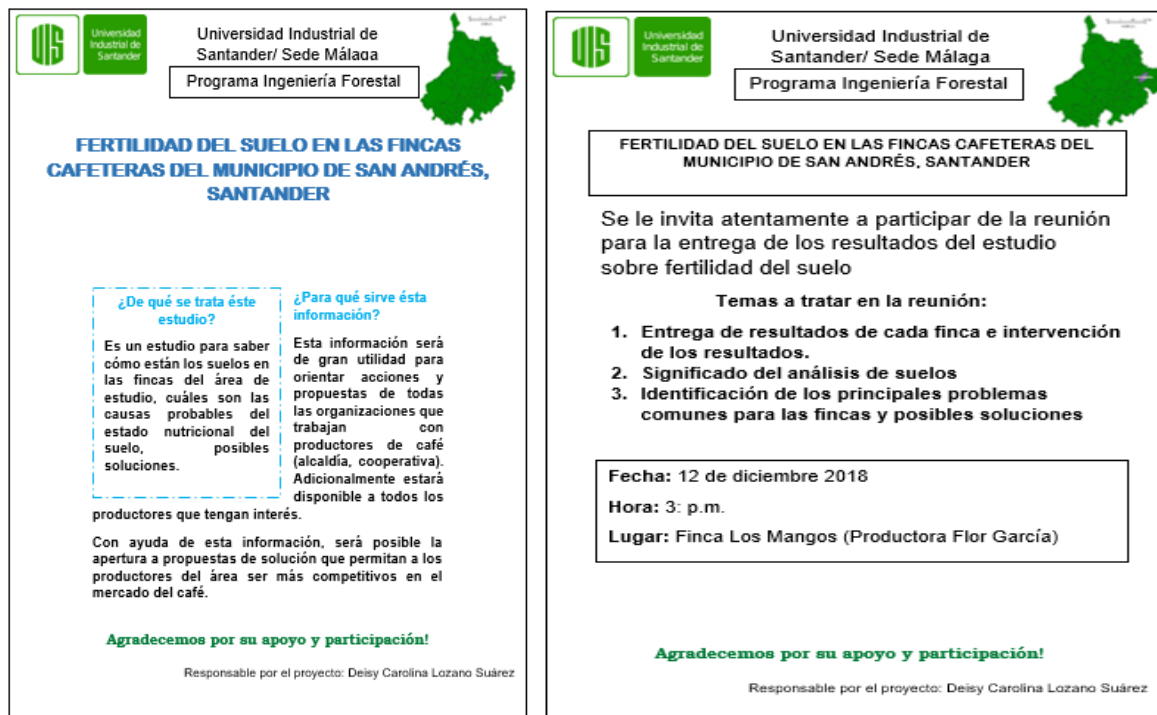


Figura 23. Reunión sobre fertilidad del suelo a los productores del área de estudio

6.3 Variables morfológicas y fisiológicas del café

6.3.1 Variables morfológicas del café: Para visualizar las mediciones realizadas para las fincas (ver Apéndice M).

Las mediciones de las variables morfológicas se realizaron en 7 fincas, de acuerdo a la disponibilidad de los productores. Comenzaron el día 8 de octubre del año 2018 hasta el día 10 de marzo del año 2019.

6.3.1.1 Altura de las plantas: Para la obtención de los valores que se ven en la Figura 24 se promediaron los valores de altura de las 30 plantas por cada medición.

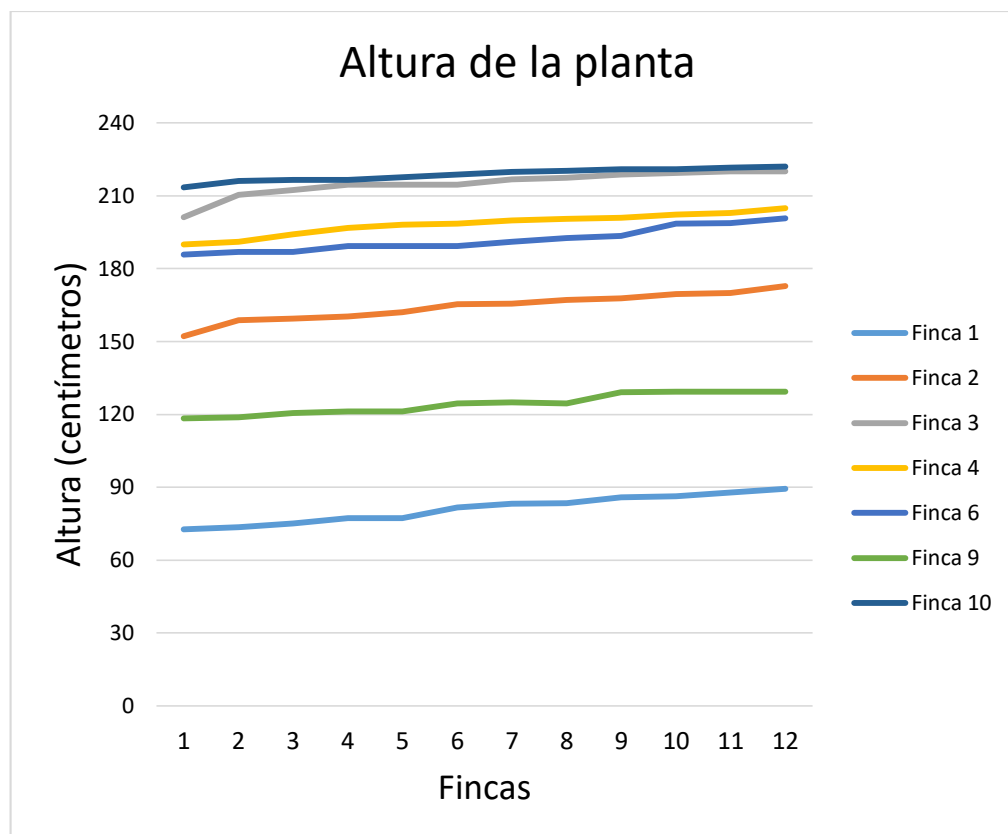


Figura 24. Altura promedio de las plantas para las 12 semanas de medición

Para calcular los valores presentados en la Tabla 22 para cada semana por productor se promediaron los valores de las 30 plantas.

El crecimiento en la finca 1 fue de 16,87 centímetros, en la finca 2 fue de 20,70 centímetros, en la finca 3 fue de 18,93 centímetros, en la finca de 4 fue de 14,87 centímetros, en la finca 5 fue de 15,07 centímetros, en la finca de 6 fue de 11,07 centímetros y en la finca de 7 fue de 18,23 centímetros.

Tabla 22.

Altura promedio de las plantas de café en las fincas

Semana	Altura de la planta (centímetros)						
	Finc1	Finc2	Finc3	Finc5	Finc7	Finc9	Fin10
Semana 1	72.60	152.13	201.13	190.00	185.73	118.27	213.53
Semana 2	73.50	158.73	210.33	191.00	186.93	118.80	216.13
Semana 3	75.10	159.47	212.50	194.27	186.93	120.63	216.57
Semana 4	77.23	160.23	214.70	196.80	189.33	121.33	216.67
Semana 5	77.23	162.20	214.70	198.17	189.33	121.33	217.60

Semana 6	81.67	165.37	214.70	198.50	189.33	124.60	218.70
Semana 7	83.13	165.67	216.70	199.90	191.00	124.93	219.97
Semana 8	83.53	167.17	217.37	200.53	192.57	124.60	220.23
Semana 9	85.93	167.87	218.73	200.90	193.43	129.07	220.87
Semana 10	86.30	169.57	219.53	202.20	198.57	129.27	220.93
Semana 11	87.80	170.00	220.07	202.90	198.80	129.30	221.70
Semana 12	89.47	172.83	220.07	204.87	200.80	129.33	222.07
Incremento en altura	16.87	20.70	18.93	14.87	15.07	11.07	8.53

De los cafetales que tienen la misma edad (6 años) ver Tabla 23: Fincas 2,4,6 y 9 presentan incremento en altura similar son en las fincas 4 y 6. En la finca 3 el poco incremento de la altura de las plantas puede deberse a que es un cafetal llegando a la fecha en que debe realizarse el proceso de zoca o renovación, la finca 2 tiene un incremento mayor porque es un cultivo más joven, igual que las plantas de las fincas 4,6 y 9.

Tabla 23.
Incremento en la altura de las plantas de café por semana

Productor	Edad cultivo	Incremento en altura
Finca 3	7 años	18,93
Finca 2	6 años	20,70
Finca 6	6 años	15,07
Finca 9	3 años	11,07
Finca 10	6 años	8,53
Finca 1	2,5 años	16,87
Finca 4	6 años	14,87

6.3.1.2 Número de bandolas: Para calcular los valores que se muestran en la Tabla 24 se procedió a obtener el promedio de número de bandolas de las 30 plantas para las 12 semanas de medición.

Tabla 24.
Estadística descriptiva variable Número de bandolas

	Finca 1	Finca 2	Finca 3	Finca 4	Finca 6	Finca 9	Finca 10
Semana 1	72.50	49.77	73.90	48.50	59.17	33.90	78.03
Semana 2	70.20	54.13	72.03	49.70	58.47	37.57	78.93
Semana 3	75.17	48.13	67.07	49.97	59.87	40.27	80.50
Semana 4	77.27	50.13	62.77	50.57	60.40	42.33	80.50

Semana 5	77.27	51.43	65.80	50.77	60.10	43.03	81.00
Semana 6	81.67	52.03	68.03	52.57	61.13	43.87	82.03
Semana 7	83.20	52.70	70.20	53.67	61.80	45.00	83.13
Semana 8	83.53	53.43	70.47	54.50	62.47	45.87	83.70
Semana 9	85.93	54.77	73.17	54.83	63.40	46.43	84.67
Semana 10	86.30	55.03	76.10	56.77	64.30	47.33	86.20
Semana 11	87.87	57.17	78.20	58.13	66.03	47.33	87.17
Semana 12	89.47	58.30	78.17	59.33	67.33	47.33	88.00

El número de bandolas aumentó en las fincas, pero cuando disminuye puede deberse a la pérdida de ramas por daños mecánicos en el momento de realizar la recolección del fruto de café.

6.3.1.3 Longitud de la rama: Para la obtención de los se realizó el cálculo del promedio de la longitud de cada una de las ramas: superiores, medias e inferiores para las 30 plantas por semana y posteriormente, se calculó la longitud promedio para las 12 semanas. Se tuvo en cuenta para las gráficas el promedio de las mediciones para la semana 1 y la semana 12.

En la Figura 25 se visualizan los incrementos en la longitud de la rama en cada uno de los tercios inferior, medio y superior de las plantas de café.

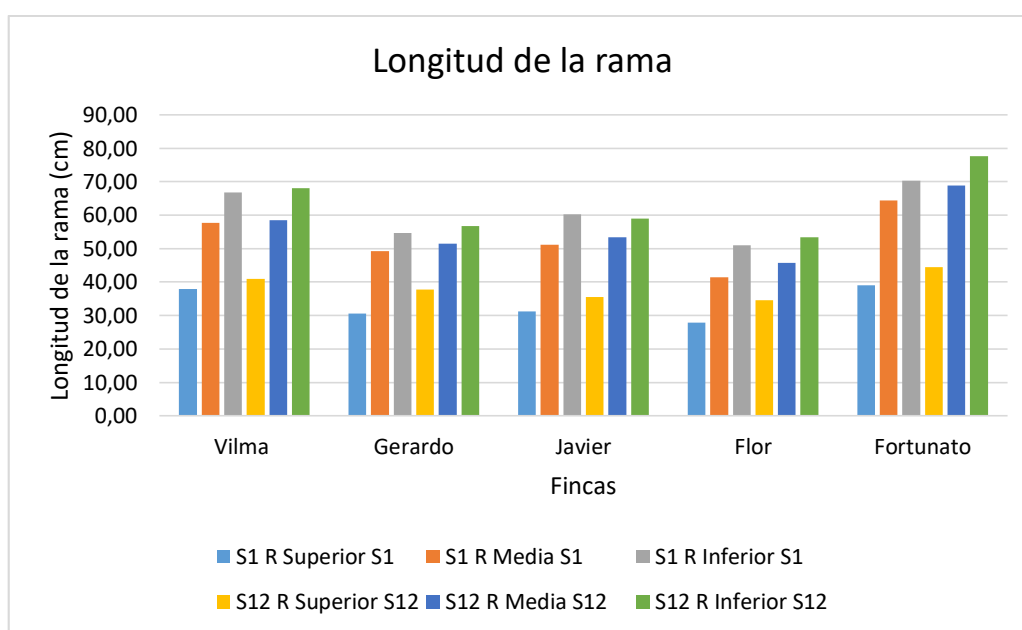


Figura 25. Longitud de la rama de las plantas de café en las fincas

En la Figura 26 se visualizan los incrementos en la longitud de la rama en cada uno de los tercios inferior, medio y superior de las plantas de café.

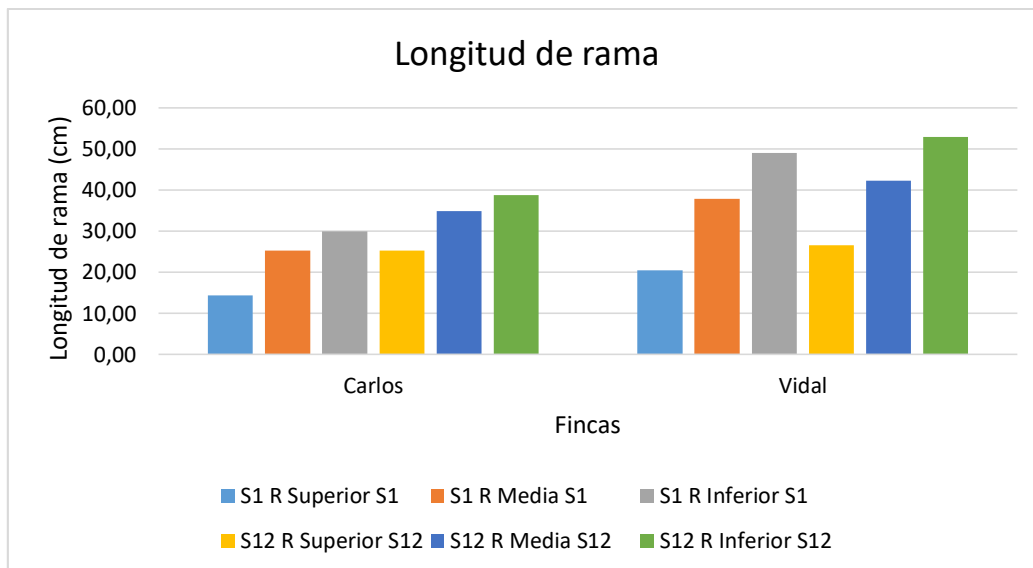


Figura 26. Longitud de la rama de las plantas de café en las fincas

En la Figura 27 se visualiza el incremento en el diámetro de las ramas del tercio superior, medio e inferior de las plantas de café.

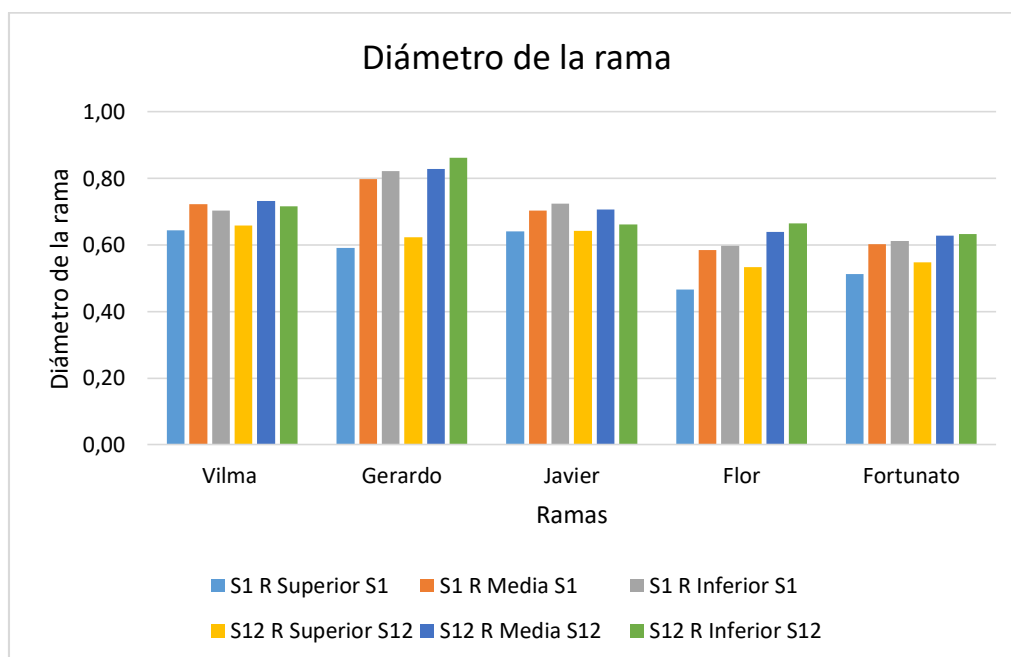


Figura 27. Diámetro de las ramas de las plantas de café en las fincas

En la Figura 28 se visualiza el incremento en el diámetro de las ramas del tercio superior, medio e inferior de las plantas de café.

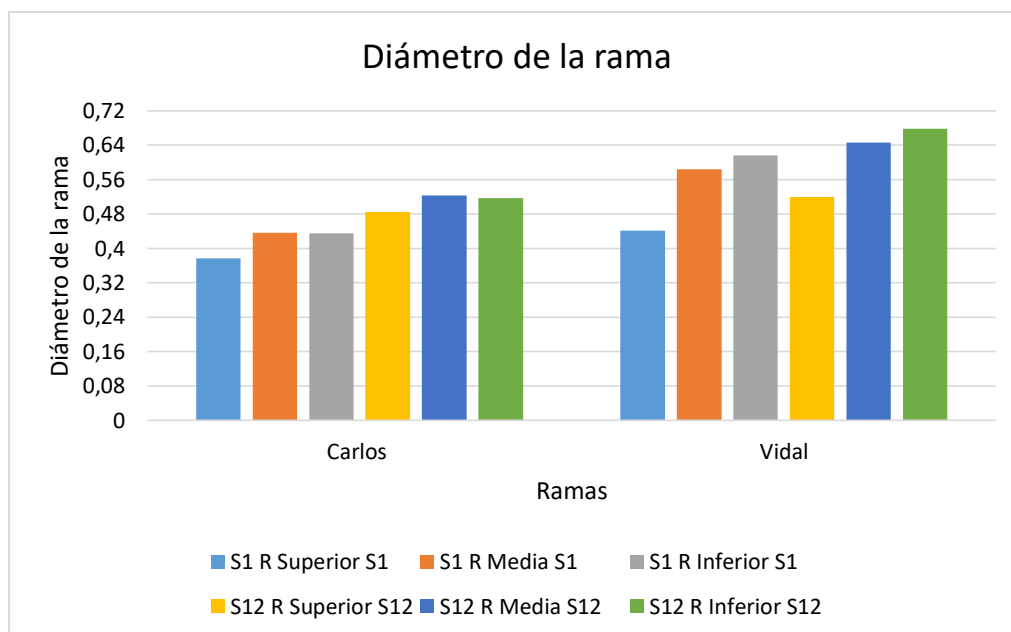


Figura 28. Diámetro de las ramas de las plantas de café en las fincas

En la Figura 29 se visualiza el número de nodos para las ramas del tercio inferior, medio y superior de las plantas de café.

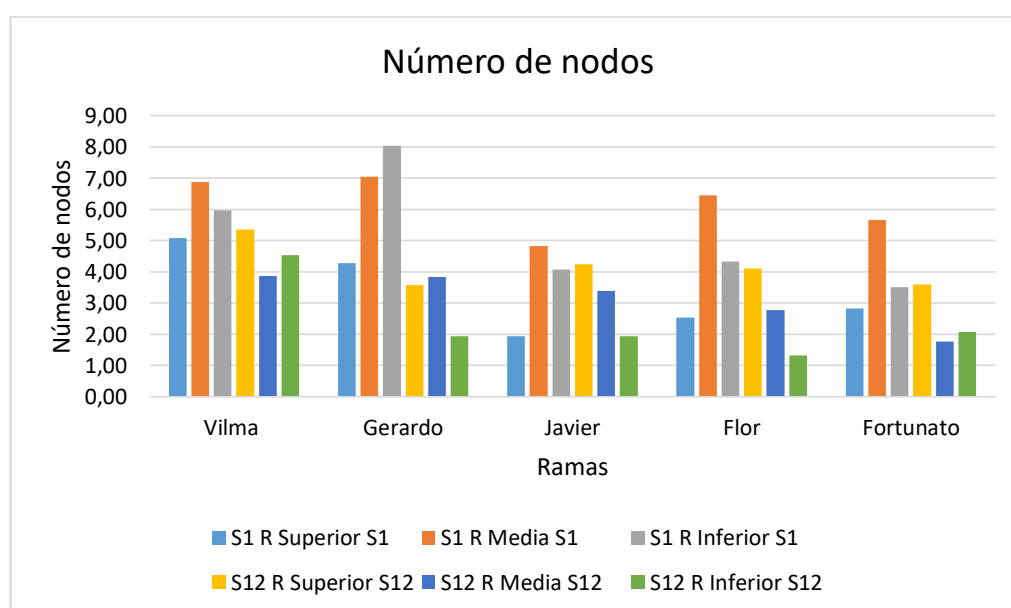


Figura 29. Número de nodos de las plantas de café en las fincas

En la Figura 30 se visualiza el número de nodos de las ramas de los tercios inferiores, medios y superiores de las plantas de café.

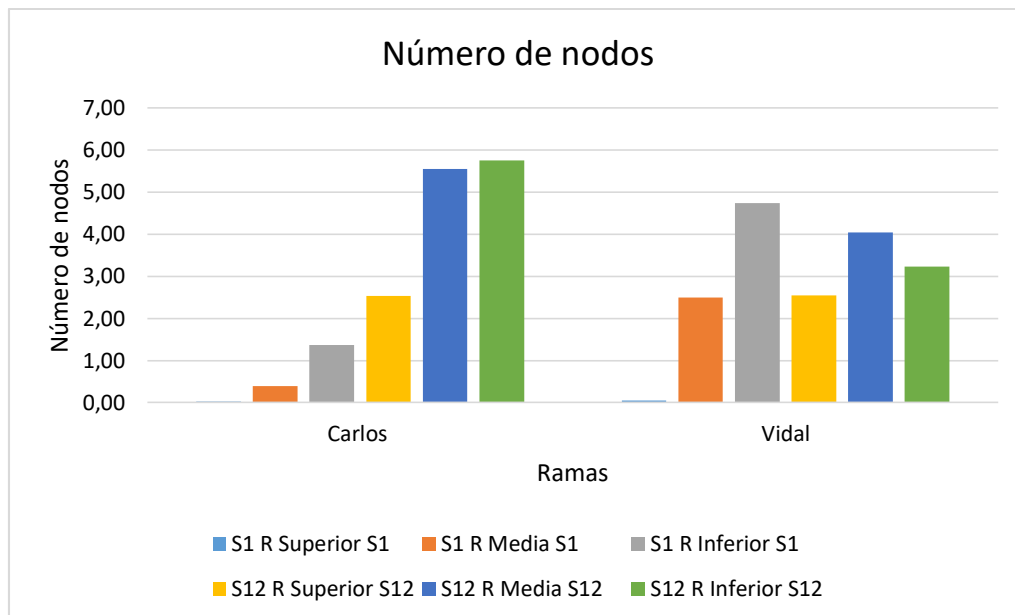


Figura 30. Número de nodos de las plantas de café en las fincas

De acuerdo con los resultados, el número de nodos es menor en los cultivos más sombreados correspondientes a las fincas 3,7 y 10, concuerda con lo expresado por (Campanha, de Freitas, Santos y Martínez, 2012).

Según Salazar et al., (1988) el potencial de producción de la planta está determinado por la cantidad de nodos en las ramas y la cantidad de frutos en los nodos, es decir, en los cafetales con mayor porcentaje de sombra la productividad puede ser menor.

En la Figura 31 se visualiza el número de frutos de las ramas del tercio inferior, medio y superior de las plantas de café.

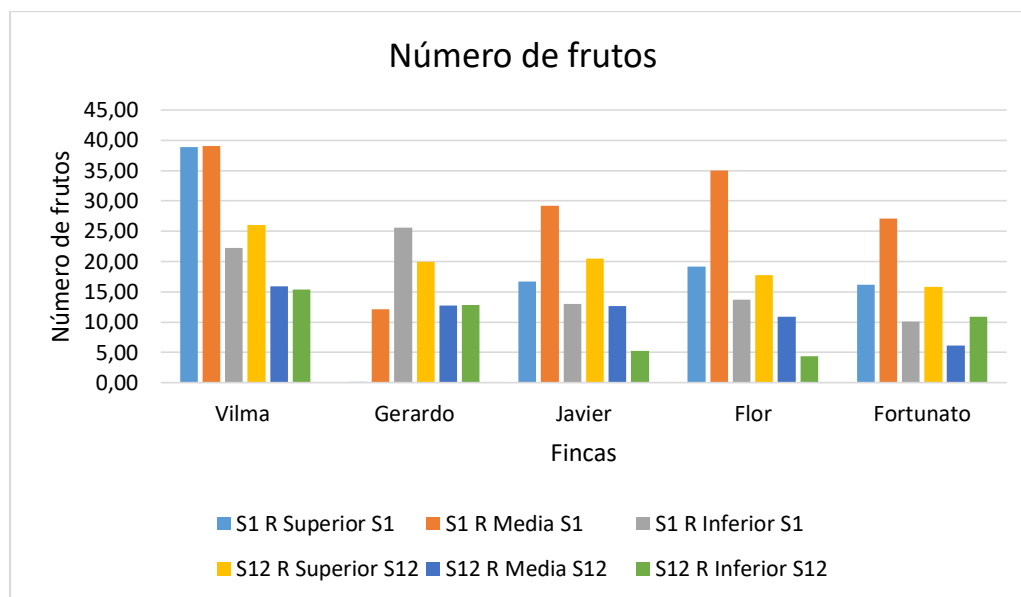


Figura 31. Número de frutos de las plantas de café en las fincas

En la Figura 32 se visualiza el número de frutos para las ramas del tercio inferior, medio y superior de las plantas de café.

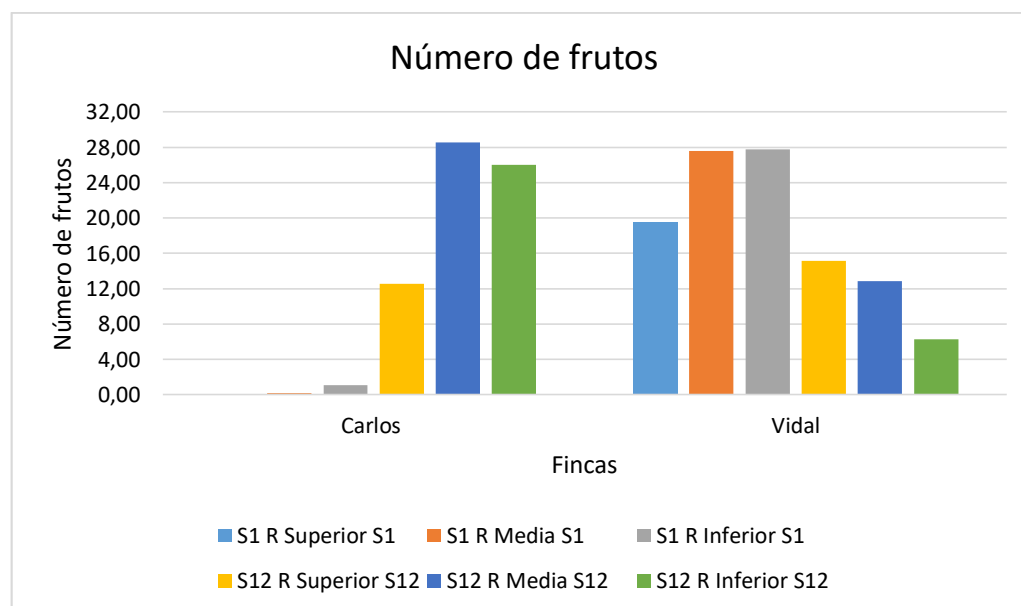


Figura 32. Número de frutos de las plantas de café en las fincas

El número de frutos es menor en las fincas 3,7 y 10, correspondientes a aquellas con mayor porcentaje de sombrío, lo cual concuerda con lo expresado por (Haggar et al., 2011).

El número de frutos disminuyó en las fincas a partir de la cuarta semana de medición debido a la recolección del grano de café.

En la Figura 33 se visualiza el número de cojines florales de las ramas del tercio inferior, medio y superior de las plantas de café.

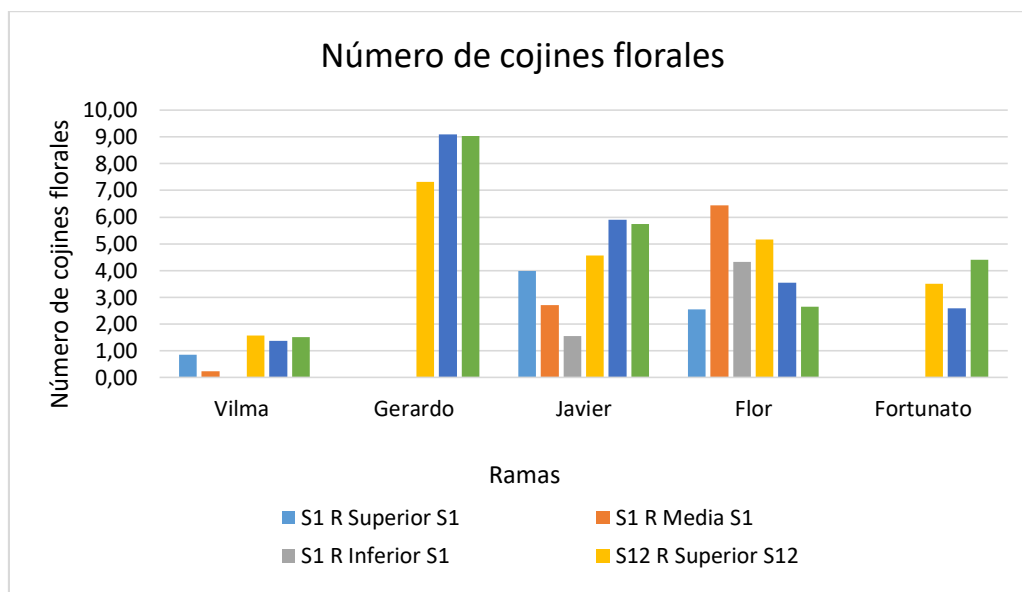


Figura 33. Número de cojines florales en las plantas de café en las fincas

En la Figura 34 se visualiza el número de cojines florales en las ramas del tercio inferior, medio y superior de las plantas de café.

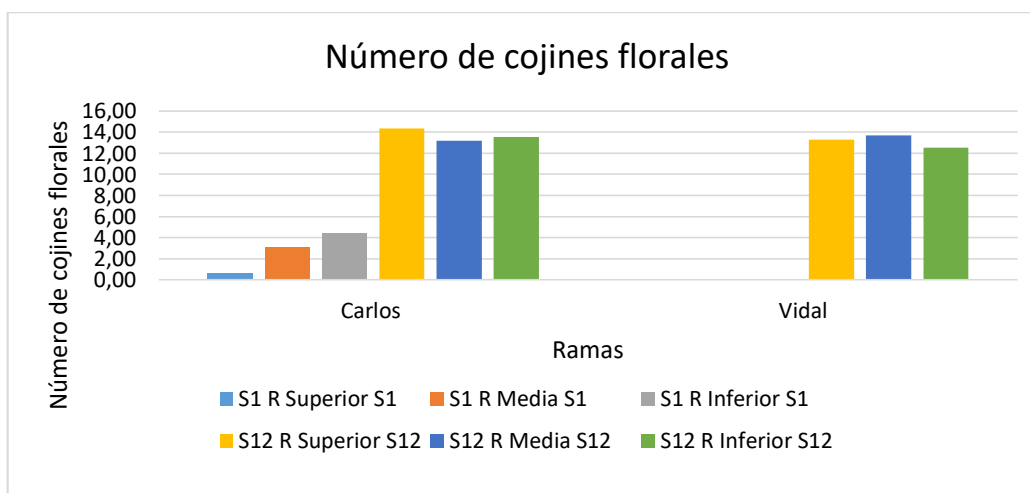


Figura 34. Número de cojines florales en las plantas de café en las fincas

Para las fincas aumentó el número de cojines florales, excepto en la finca 7, debido a que disminuyó desde la semana 3 y comenzó a aumentar desde la semana 9.

A inicios del mes de noviembre comenzó a aumentar el número de cojines, concordante con el período de inicio de floración de la planta de café (Ramírez et al., 2010).

6.3.2 Variables fisiológicas del café.

6.3.2.1 Fluorescencia de clorofila: Para visualizar los datos obtenidos durante las mediciones (ver Apéndice P)

En la Figura 35 se visualiza el comportamiento de la variable, siendo mayor para la finca 4.

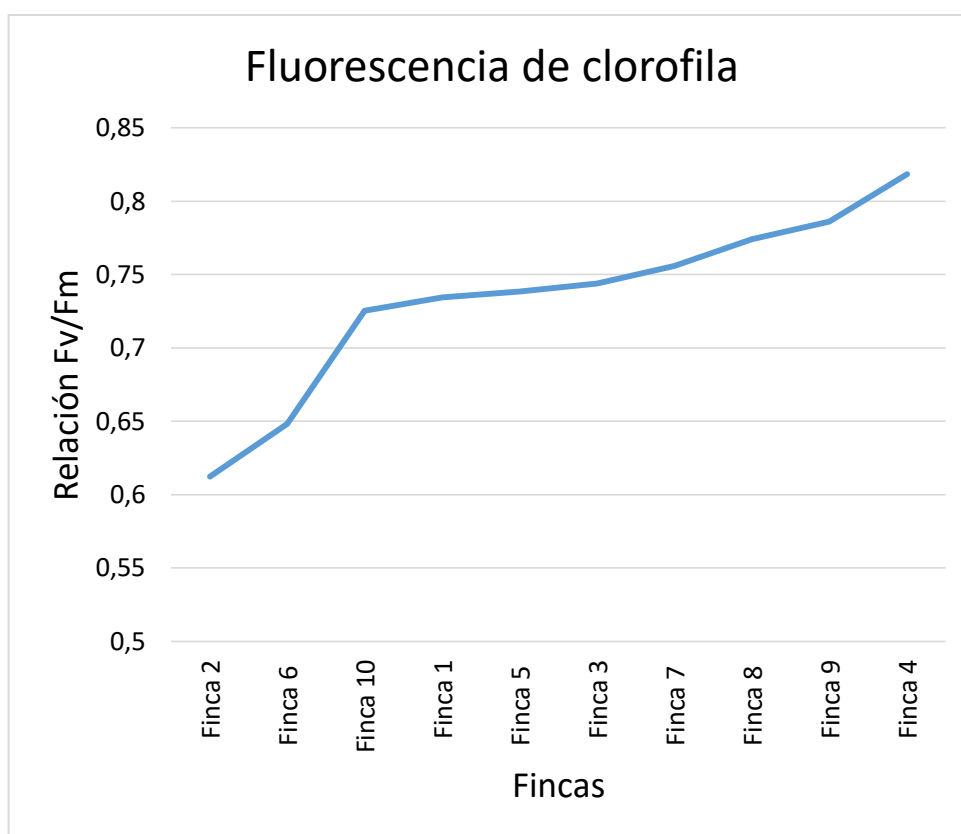


Figura 35. Valores de fluorescencia promedio para las 10 fincas del área de estudio.

En la gráfica anterior se puede visualizar que los menores valores son en la finca 2 y finca 6; los mayores valores en la finca 4, es decir, presenta un comportamiento diferente. De acuerdo con los resultados, el porcentaje de sombra ideal entre el 40 y 50% para la planta de café (Muschler, 2000) correspondiente a la finca 4. Los menores valores en las fincas pueden deberse a respuestas al estrés ambiental y la alta radiación (Carrasco y Escobar, 2002).

Las mediciones fueron realizadas en las 10 fincas objeto de estudio. Los valores mínimos, máximos, media, Coeficiente de variación y desviación estándar se muestran en Tabla 25.

Tabla 25.

Estadística descriptiva para la variable Fluorescencia de clorofila

Fluorescencia de clorofila					
Finca	Mínimo	Máximo	Media	C.V	S
Finca 1	0.658	0.798	0.7353	0.0530	0.0390
Finca 2	0.413	0.766	0.6202	0.1798	0.1115
Finca 3	0.587	0.809	0.7507	0.0912	0.0684
Finca 4	0.799	0.834	0.8194	0.0139	0.0114
Finca 5	0.677	0.806	0.7366	0.0660	0.0486
Finca 6	0.455	0.833	0.6688	0.1955	0.1307
Finca 7	0.525	0.827	0.7631	0.1240	0.0946
Finca 8	0.717	0.799	0.7733	0.0300	0.0232
Finca 9	0.763	0.805	0.7846	0.0173	0.0136
Finca 10	0.585	0.787	0.7238	0.0989	0.0716

Los valores obtenidos de fluorescencia de clorofila en el área de estudio se encuentran en promedio entre 0,62 y 0,8, se encuentra dentro de los rangos normales para plantas adaptadas a la sombra como el café de acuerdo con (Carrasco Rios y Escobar Araya, 2002) es de 0,75.

6.3.2.2 Conductancia estomática: En la Figura 36 se visualiza el comportamiento de la variable para las 10 fincas en las 4 hojas seleccionadas por planta (3 plantas). Los datos de las mediciones (ver Apéndice O).

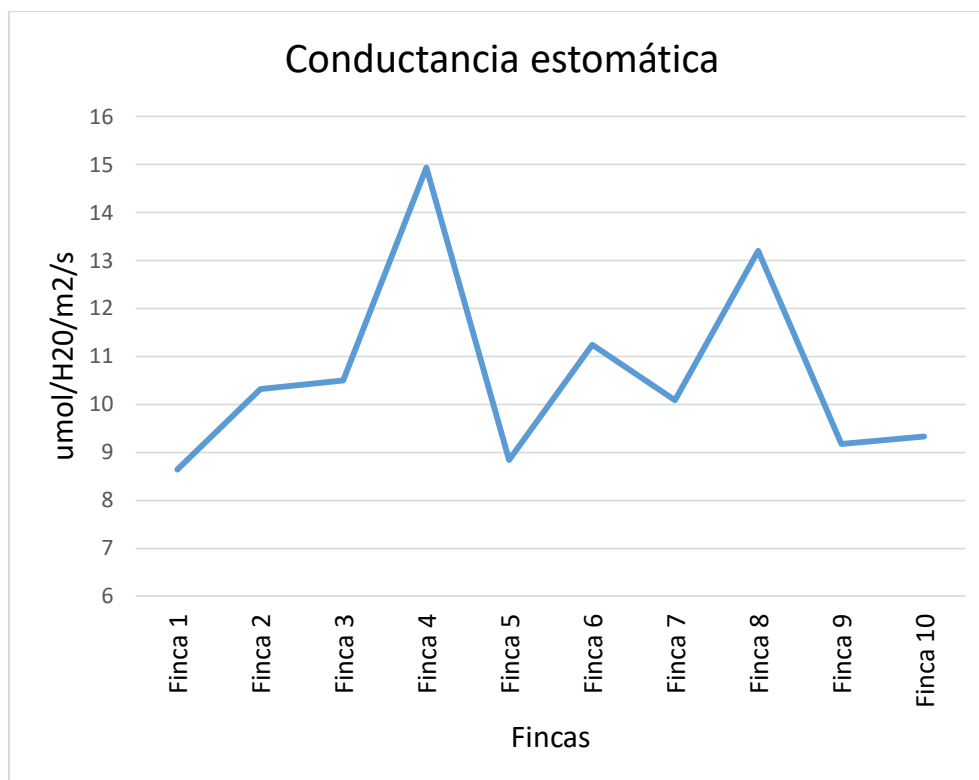


Figura 36. Conductancia estomática para las 10 fincas del área de estudio

Para la variable conductancia estomática la finca 5 presenta los mayores valores, los menores valores para la finca 8.

Para la variable conductancia estomática la finca 2 presenta diferencias significativas con casi todas las fincas a excepción de la finca 7, para la variable fluorescencia de clorofila no presenta diferencias significativas con la finca 6.

Para la variable conductancia estomática la finca 3 no presenta diferencias significativas con la finca 4, comportamiento similar para la variable fluorescencia de clorofila y humedad del suelo.

Para la variable conductancia estomática la finca 4 presenta diferencias significativas con las fincas del productor 5, 6, 7, 8, 9 y 10, para la variable fluorescencia de clorofila no presenta diferencias significativas con la finca 7 y para la variable humedad del suelo presenta diferencias significativas con la finca de 5, 9 y 10.

Para la variable conductancia estomática la finca 5 no presenta diferencias significativas con la finca 6, para la variable fluorescencia de clorofila presenta diferencias significativas con la finca 9 y para la variable humedad del suelo presenta diferencias con la finca 8.

Para la variable conductancia estomática la finca 6 presenta diferencias significativas con las fincas 7 y 9, para la variable fluorescencia de clorofila presenta diferencias con las fincas 8 y 9, para humedad del suelo no presenta diferencias significativas con ninguna finca.

Para la variable conductancia estomática la finca 8 no presenta diferencias significativas con la finca 10, para la variable fluorescencia de clorofila no presenta diferencias con las fincas 8, 9 y 10, para la variable humedad del suelo presenta diferencias significativas con la finca 8.

Para la variable conductancia estomática la finca 8 presenta diferencias significativas con la finca 10, para la variable fluorescencia de clorofila no presenta diferencias con la finca 9 y 10, para la variable humedad del suelo presenta diferencias con la finca 9.

Para la variable conductancia estomática la finca 9 presenta diferencias significativas con la finca 10, para la variable fluorescencia de clorofila no presenta diferencias y para humedad del suelo.

En la Tabla 26 se visualiza la estadística descriptiva de la variable conductancia estomática.

Tabla 26.

Estadística descriptiva para la variable Conductancia estomática

Conductancia estomática					
Hoja	Mínimo	Máximo	Media	C.V	S
Hoja 1	24.88	76.00	42.76	0.41	17.37
Hoja 2	28.96	65.97	43.29	0.33	14.32
Hoja 3	21.58	70.27	42.03	0.43	17.97
Hoja 4	24.74	56.11	39.58	0.29	11.68

Los valores de conductancia estomática para el área de estudio se encuentran entre 39 y 42 $\mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$ y los valores promedio para la variedad Castillo se encuentran en 108 $\mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$ de acuerdo con (DaMatta, Ronchi, Maestri y Barros, 2007).

Los cafetales con los mayores valores de conductancia estomática corresponden a aquellos con un porcentaje de sombra menor al 45% (Franck y Vaast, 2009) y los cafetales con menores valores de conductancia corresponden a fincas con un porcentaje de sombra mayor al 45%.

6.3.2.3 Humedad del suelo: La variable fue medida una vez, en la Figura 37 se visualiza el comportamiento para las 10 fincas, los mayores valores se presentan en las fincas 3, 4 y 8.

La humedad del suelo es uno de los factores que más influyen en el cultivo de café (Ramírez et al., 2010).

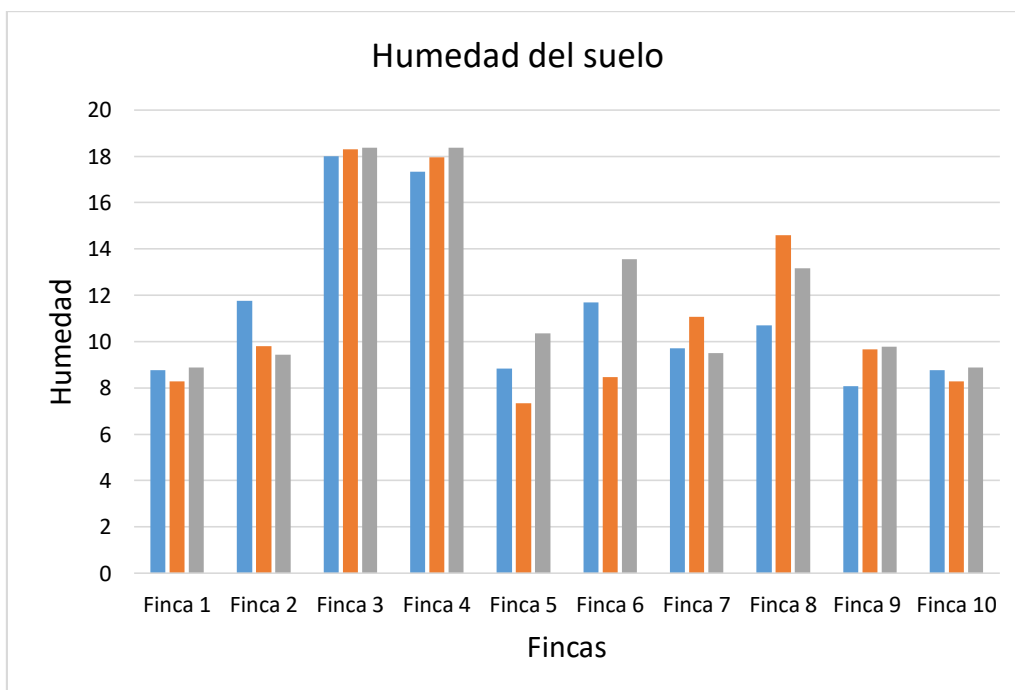


Figura 37. Humedad del suelo promedio para las fincas del área de estudio

En la Tabla 27 se visualiza estadística descriptiva de la variable humedad del suelo.

Tabla 27.
Estadística descriptiva para la variable Humedad del suelo

Humedad del suelo					
Planta	Mínimo	Máximo	Media	C.V	S
Planta 1	8.075	15.8625	10.84625	0.21304845	2.31077676
Planta 2	7.35	14.175	10.13125	0.22206171	2.24976272
Planta 3	8.875	15.2125	10.90375	0.20748725	2.26238912

La humedad del suelo es uno de los factores que más influyen en el cultivo de café (Ramírez et al., 2010), por lo tanto, de acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio los valores se encuentran bajos.

6.4 Indicadores económicos

En la Tabla 28 y Tabla 29 se visualizan los costos en cada una de las etapas tenidas en cuenta (producción de chapolas, plántulas, establecimiento, mantenimiento de la Etapa 1, Etapa 2 y Etapa 3), el costo total, el ingreso bruto y neto para las 10 fincas (ver Apéndice H).

Tabla 28.
Costos en cada una de las etapas de producción del café

	Finca1	Finca2	Finca3	Finca4	Finca5
Descripción	Monto	Monto	Monto	Monto	Monto
Costo producción de chapolas	555200	540000	0	281000	725200
Costo producción de plántulas	2412121	2004617	0	3452240.4	2697872
Costo establecimiento	4335000	3750000	4075000	4310000	4270000
Costo de mantenimiento (Etapa 1)	1520000	1150000	1135000	1120000	1520000
Costo de mantenimiento (Etapa 2)	2380000	542500	1042500	1395000	1160000
Costo de mantenimiento (Etapa 3)	0	4850000	1900000	2700000	0
Años cosechas	4	4	4	4	4
Total costos	11202321	12837117	8152500	13258240.4	10373072
Ingreso Bruto	5175000	5107500	5600000	7600000	12965000
Ingreso Neto	-6027321	-7729617	-2552500	-5658240.4	2591928

Tabla 29.
Costos en cada una de las etapas de producción del café

	Finca6	Finca7	Finca8	Finca9	Finca10
Descripción	Monto	Monto	Monto	Monto	Monto
Costo producción chapolas	711000	640000	153600	622000	640000

	Finca6	Finca7	Finca8	Finca9	Finca10
Costo producción plántulas	1436170	3669500	1382370	1436170	3669500
Costo establecimiento	6921000	6685000	4030000	4231000	6685000
Costo mantenimiento (Etapa 1)	2593000	3320000	1090000	2610000	3320000
Costo mantenimiento (Etapa 2)	862500	1680000	1042500	910000	1680000
Costo mantenimiento (Etapa 3)	4120000	3830000	2000000	3000000	3830000
Años cosechas	4	4	4	4	4
Total costos	16643670	19824500	9698470	12809170	19824500
Ingreso Bruto	46480000	7085000	26100000	10956000	0
Ingreso Neto	29836330	-12739500	16401530	-1853170	-19824500

Las fincas que obtuvieron un ingreso neto negativo puede deberse a que tienen altos costos en la mano de obra necesaria para los procesos de limpias, fertilizaciones y recolección del grano de café.

Los productores realizan préstamos a entidades tales como el Banco Agrario de Colombia y la Fundación Crezcamos, lo cual les permite compensar las pérdidas en el proceso de obtención del café.

Costos variables de producción: Son costos operacionales relacionados con la producción cafetera (mano de obra e insumos) para las actividades de renovación, fertilización, manejo de arvenses, manejo de plagas y enfermedades, recolección. (Serna, Trejos, Cruz y Calderón, 2010).

Con base en la producción y los precios de venta del producto obtenidos en cada finca, se calcularon los ingresos totales.

Todos los productores del área de estudio venden el café a la cooperativa de la Federación Nacional de Cafeteros en el municipio de San Andrés. El precio promedio al que les pagaron fue \$6.048 por kilogramos de café pergamino seco.

A continuación, se presenta en la *Figura 38* el porcentaje de costos en mano de obra e insumos totales, se tuvo en cuenta el promedio para todas las etapas.

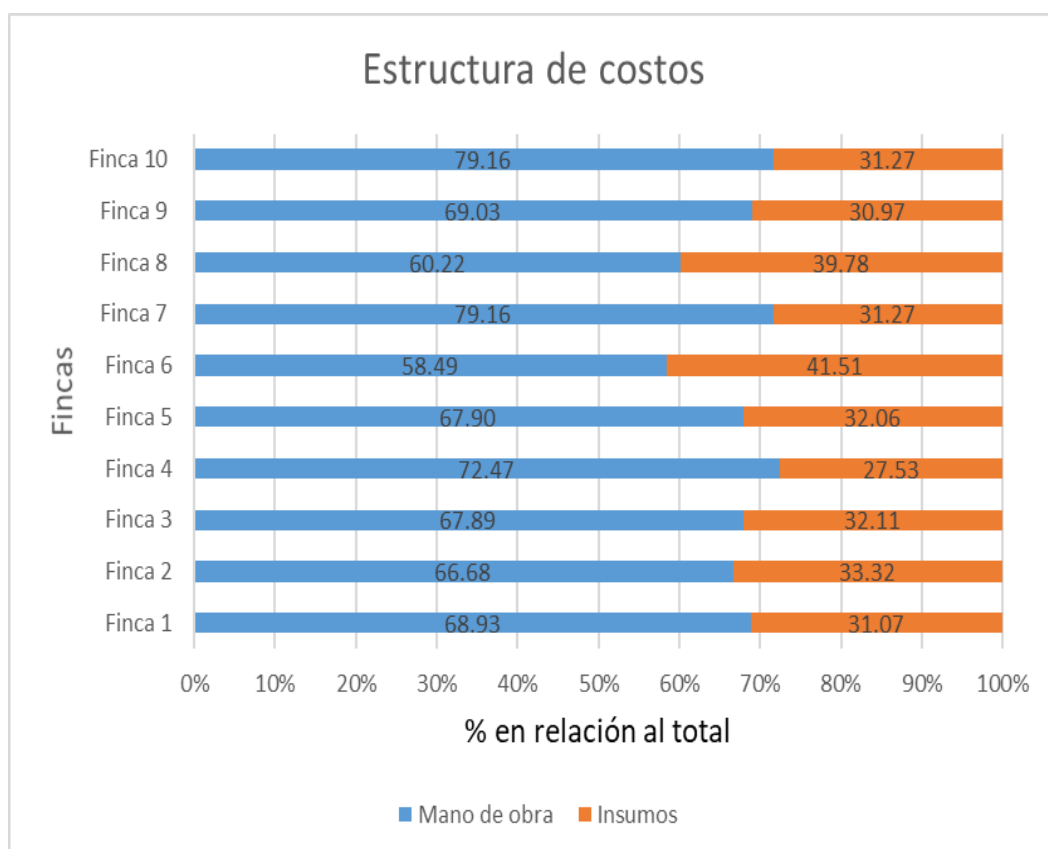


Figura 38. Estructura de costos (Porcentaje de mano de obra e insumos) utilizados durante el proceso productivo del café

6.5 Sostenibilidad ambiental

6.5.1 Variables químicas: En la Tabla 30 se visualizan los rangos utilizados para establecer la sostenibilidad de las fincas del área de estudio.

Tabla 30.

Rangos utilizados para la determinación del grado de sostenibilidad con la metodología Farfán (2014).

Rango	Sostenibilidad
0-0.2	Muy baja sostenibilidad
0,21-0.4	Baja sostenibilidad
0.41-0.6	Sostenibilidad media
0.61-0.8	Alta sostenibilidad
0.81-1	Muy alta sostenibilidad

En la *Figura 39* se visualiza el grado de sostenibilidad ambiental para las 10 fincas del área de estudio, siendo sostenibilidad alta para las fincas 5 y 10, las demás presentan sostenibilidad media.

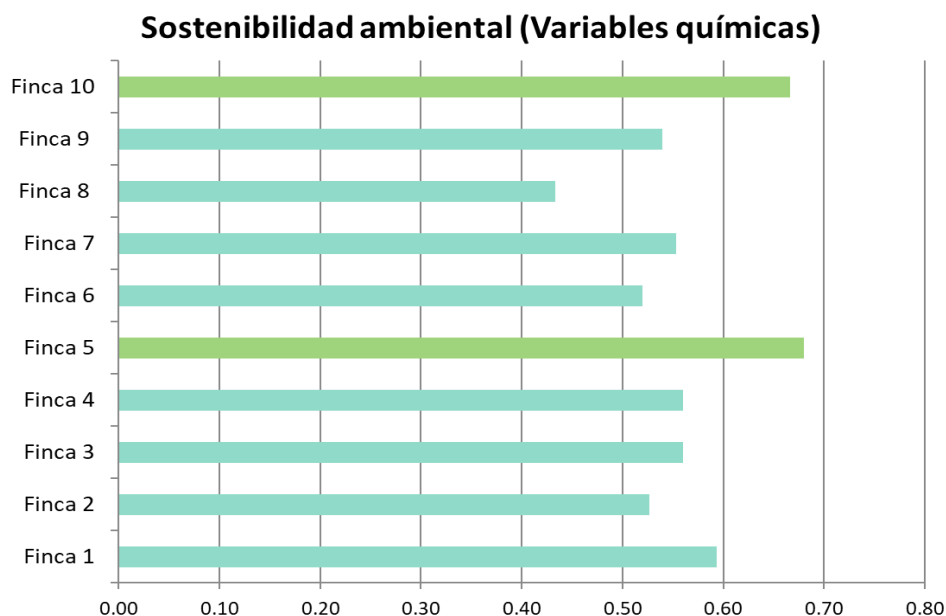


Figura 39. Grado de sostenibilidad ambiental para las fincas del área de estudio

En la *Figura 40* se visualiza el grado de sostenibilidad ambiental en un redegrama para las 10 fincas del área de estudio.

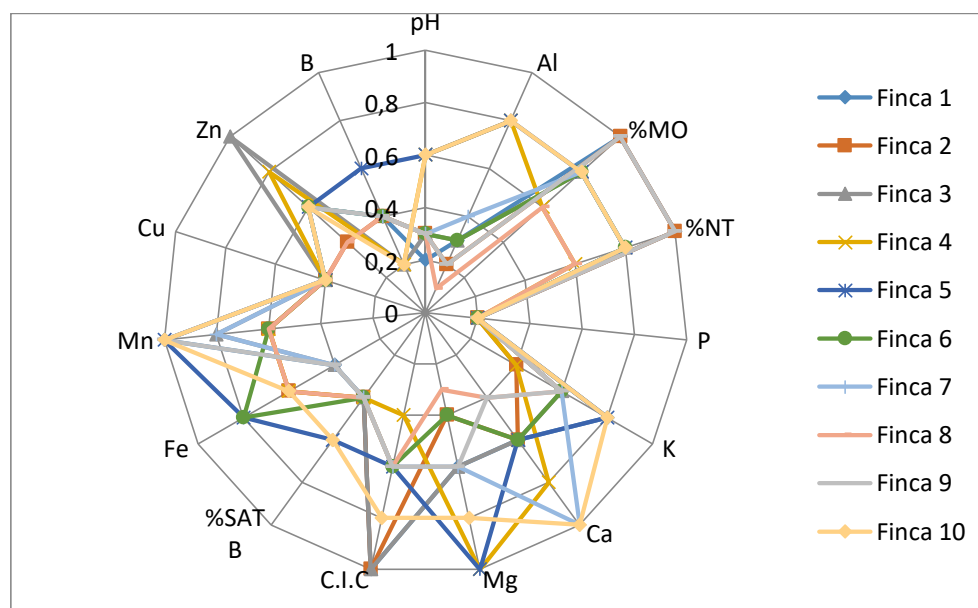


Figura 40. Redegrama del grado de sostenibilidad ambiental en las fincas del área de estudio

En la Figura 41 se visualiza la conformación de grupos de acuerdo con el Análisis de Agrupamiento Jerárquico (clúster).

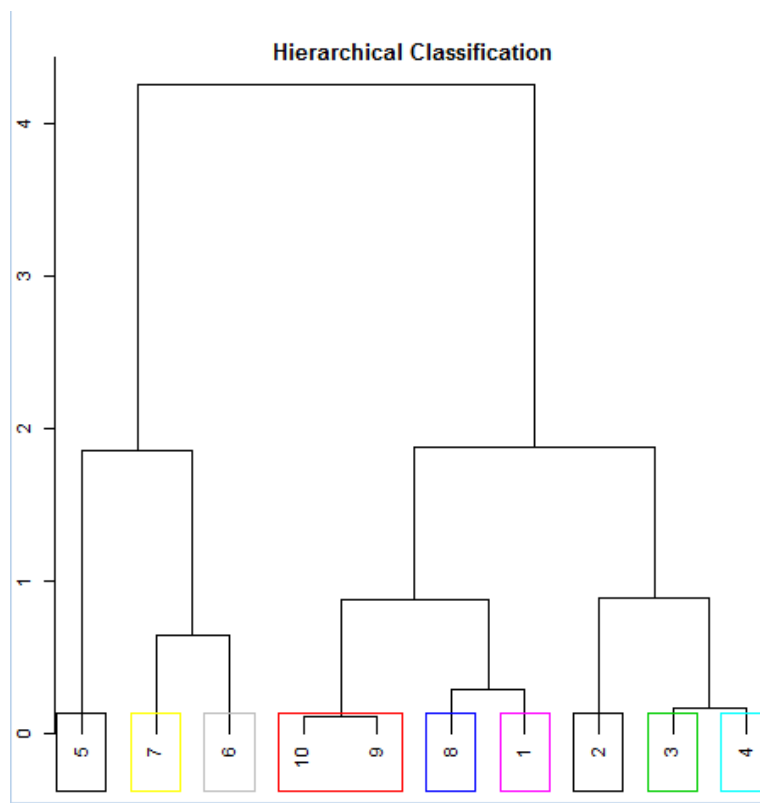


Figura 41. Análisis de agrupamiento jerárquico

Se conforman 4 grupos de acuerdo con el análisis de agrupamiento jerárquico:

El grupo 1: Fincas 2 (Flor), 3 (Teófilo), 4 (Javier), el grupo 2: Fincas 1 (Joaquín), 8 (Fortunato), 9 (Vidal) y 10 (Carlos), el grupo 3: Fincas 6 (Jaime) y 7 (Vilma) y el grupo 4: Finca 5.

En la Figura 42 se visualizan los valores y grado de restricción para variables químicas del suelo en sistemas agroforestales con café.

		%			ppm	meq/100 g					%	Ppm							mS/cm
Productor	pH	C.O	M.O	N.T	P	K	Ca	Mg	Al	C.I.C	SAT. B	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B	C.E.	
Finca 1	4.5	6.15	10.6	0.53	5	0.35	2.89	1.12	1.9	26	16.78	1	229	16	0.2	1.2	0.1	0.18	
Finca 2	4.68	4.18	7.21	0.36	3	0.16	2.61	0.82	2.3	25	14.37	1	139	5	0.3	0.8	0.12	0.14	
Finca 3	4.52	3.71	6.4	0.32	3	0.25	2.49	1.07	1.7	22	17.39	1	200	70	0.2	3.6	0.09	0.24	
Finca 4	5.31	2.53	4.36	0.22	2	0.17	10.15	2.21	0.4	10	25.32	2	105	185	0.3	2	0.09	0.22	
Finca 5	5.18	3.50	6.03	0.30	2	0.4	2.76	1.97	0.3	13	39.48	1	76	33	0.3	1	0.2	0.2	
Finca 6	4.57	3.80	6.55	0.33	7	0.22	2.01	0.89	1.9	12	26.02	1	63	9	0.3	1.4	0.1	0.12	
Finca 7	4.86	4.13	7.12	0.36	6	0.27	3.44	1.19	1.4	15	32.69	1	205	13	0.2	1.7	0.18	0.12	
Finca 8	4.55	2.06	3.55	0.18	1	0.23	1.31	0.52	2.6	14	14.75	1	141	9	0.2	0.7	0.13	0.16	
Finca 9	4.61	4.69	8.09	0.40	2	0.24	1.92	1.05	2.4	15	21.42	1	210	34	0.2	1.5	0.18	0.13	
Finca 10	5.37	3.18	5.48	0.27	2	0.31	4.99	1.45	0.2	18	37.58	1	121	21	0.2	1.2	0.05	0.13	

	Sin restricción
	Con bajas restricciones
	Medianamente restrictivo
	Altamente restrictivo
	Muy restrictivo

Figura 42. Valores y grado de restricción para variables químicas de los suelos en sistemas agroforestales con café.

En la Figura 43 se visualiza el grado de restricción de acuerdo a las variables químicas en suelos en sistemas agroforestales con café.

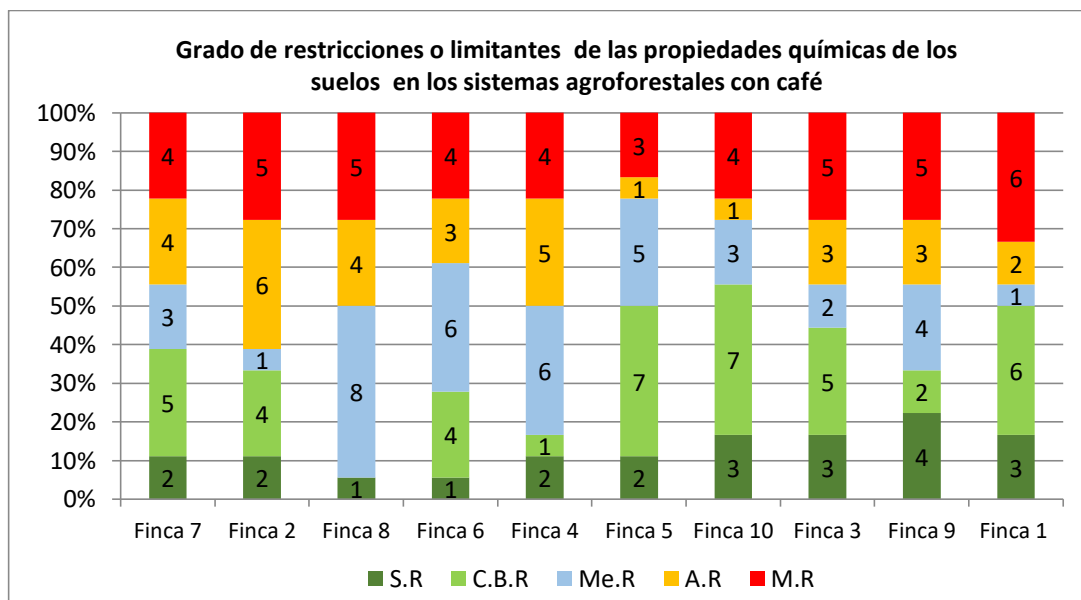


Figura 43. Grado de restricción en las fincas con sistemas agroforestales con café

De acuerdo a la Figura 43 se presenta gran variabilidad en los grados de restricción de las variables químicas de los suelos. Las variables muy restrictivas están asociadas a contenidos de P, S, Cu, Fe y en menor escala B y Al. Las variables altamente restrictivas están asociadas a pH, K, Al, %Sat. B., Fe, Mn, Zn y B. Las variables medianamente restrictivas están asociadas a pH, K, Ca, Mg, CIC, Mn, Zn y en menor escala %C.O, %M.O y %N.T. Las variables con bajas restricciones y sin restricción asociadas son %C.O, %M.O y %N.T, Mg y C.E.

Las fincas 4, 6, 8 y 9 tienen un 70% de variables químicas asociadas a muy restrictivas, altamente restrictivas y medianamente restrictivas. Mientras que las fincas 2, 3 y 7 presentan un 60% de restricción y las demás fincas un 50%. Desde el punto de vista químico, los mejores suelos estarían ubicados en los sistemas agroforestales de las fincas 1,5,7 y 10.

6.5.2 Variables físicas: En la Figura 44 se visualiza el grado de sostenibilidad ambiental en el componente físico para las fincas del área de estudio.

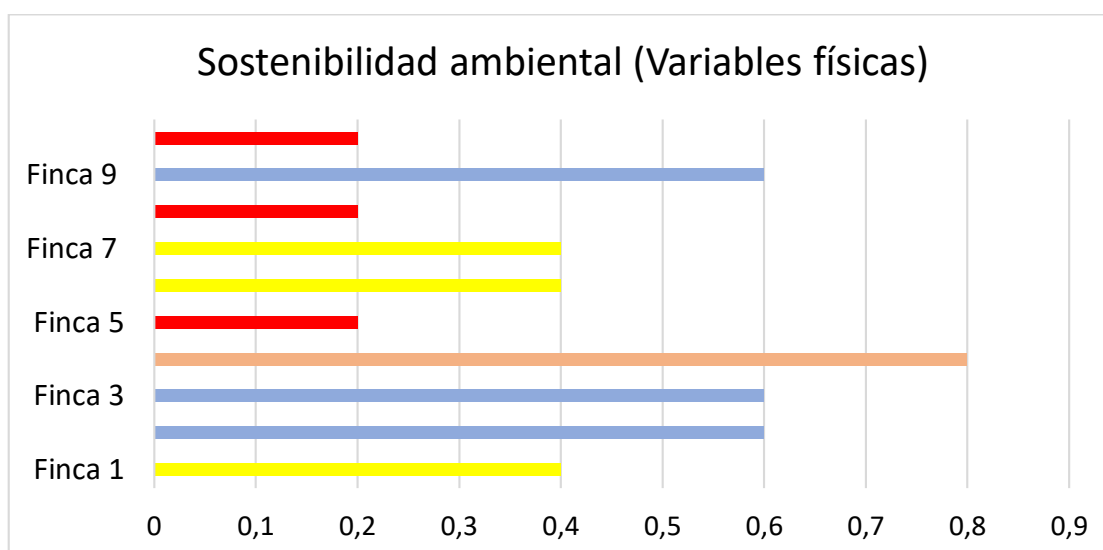


Figura 44. Grado de sostenibilidad ambiental para las variables físicas en el área de estudio.

En la Figura 45 se presentan los valores y grado de restricción de las variables físicas de los suelos en sistemas agroforestales con café.

Productor	Textura				Densidad aparente (g/cm ³)	Profundidad efectiva (cm)	Pendiente (%)	Grado de recubrimiento de rocas en superficie y en perfil
	ARENA	LIMO	ARCILLA	Clase Textural				
Finca 1	30	41	29	Franco Arcillosa	1.03	20	69.2	Abundante
Finca 2	17	50	33	Franco Arcillo Limosa	1.06	23	70.7	Mediana
Finca 3	26	45	29	Franco Arcillosa	1.08	30	31.7	Mediana
Finca 4	70	21	9	Franco Arenosa	1.36	23	22.7	Poca
Finca 5	67	22	11	Franco Arenosa	1.19	48	53.7	Muy abundante
Finca 6	58	23	9	Franco Arenosa	1.25	23	38.3	Abundante
Finca 7	59	27	14	Franco Arenosa	1.15	45	46.7	Abundante
Finca 8	53	27	20	Franco Arcillo Arenosa	1.2	40	54.2	Muy abundante
Finca 9	59	30	11	Franco Arenosa	1.19	28	72.7	Mediana
Finca 10	48	29	23	Franca	1.19	20	36.0	Muy abundante

	Sin restricción
	Con bajas restricciones
	Medianamente restrictivo
	Altamente restrictivo
	Muy restrictivo

Figura 45. Valores y grado de restricción de las variables físicas de los suelos en sistemas agroforestales con café

En la Figura 46 se presenta el grado de restricción de las propiedades físicas de los suelos en sistemas agroforestales con café.

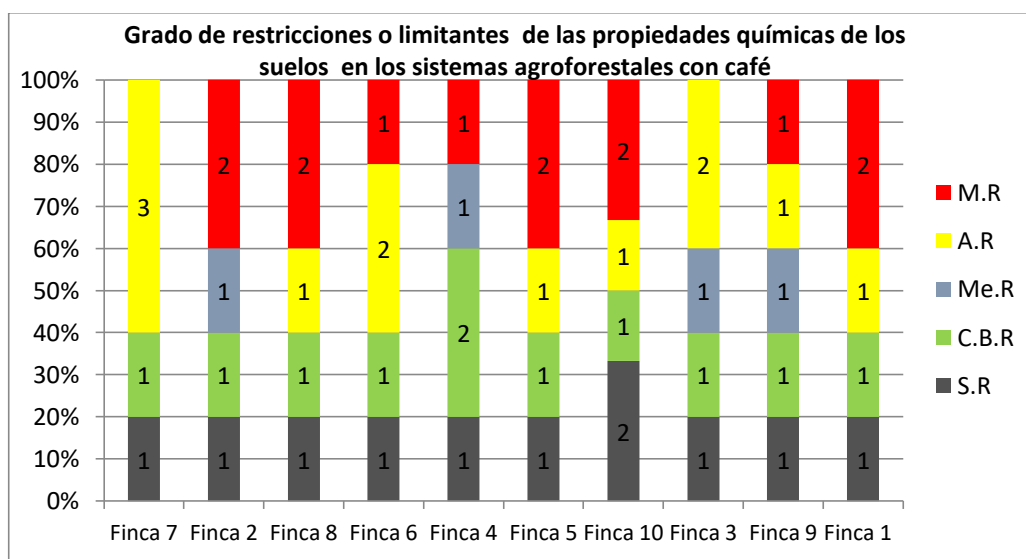


Figura 46. Grado de restricciones o limitantes de las propiedades físicas de los suelos en sistemas agroforestales con café

De acuerdo a la Figura 45 y Figura 46, 8 fincas (Finca 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8 y 9) presentan niveles muy restrictivos, altamente restrictivos y medianamente restrictivos en un 60%, para las fincas 4 y 10 presentan condiciones muy restrictivas, altamente y medianamente restrictivas entre un 40 y 50%. La densidad aparente no presenta restricciones, la clase textural presenta bajas restricciones en 9 fincas excepto la 10. La profundidad efectiva y pendiente son muy restrictivas en el 50% de los productores y altamente restrictivas en el otro 50%. La profundidad efectiva y pendiente generan las mayores limitantes en la productividad del cultivo de café, plantas arbustivas y árboles que son utilizadas como sombrío al cafetal.

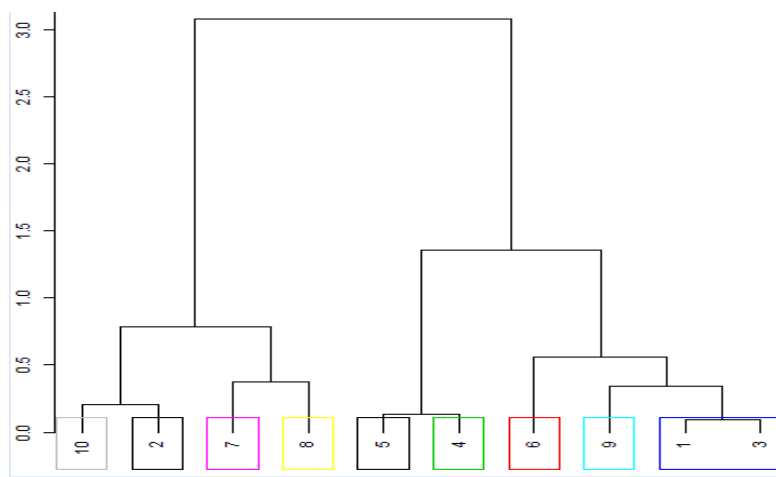


Figura 47. Análisis de agrupamiento jerárquico

De acuerdo con los resultados del Análisis de Agrupamiento Jerárquico se conforman 4 grupos: El grupo 1: Finca 1 (Joaquín), Finca 3 (Teófilo), Finca 6 (Jaime) y Finca 9 (Vidal), el grupo 2: Finca 4 (Javier) y Finca 5 (Gerardo), en el grupo 3: Finca 7 (Vilma) y Finca 8 (Fortunato), grupo 4: Finca 2 (Flor) y Finca 10 (Carlos).

6.5.3 Variables: Porcentaje de sombra, Índice de Margalef, Shannon, Simpson y Densidad de Lombrices: En la Figura 48 se visualiza el grado de sostenibilidad ambiental de las fincas, en alta sostenibilidad están las fincas: Finca 6, 9 y 10, en sostenibilidad media las fincas: Finca 1,2,3,5,7 y 8.

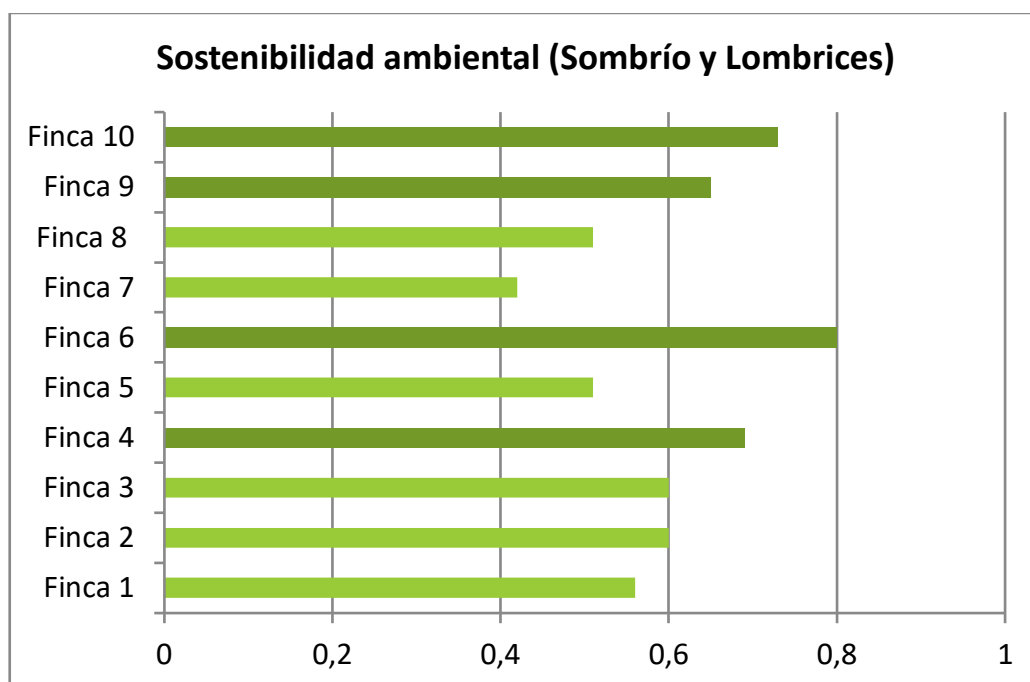


Figura 48. Grado de sostenibilidad ambiental de las fincas del área de estudio.

De acuerdo con Muschler (2000) el límite para la sombra en el café se encuentra entre el 40-70% de acuerdo con (Beer et al., 1998) es así que la selección y manejo adecuado de las especies de sombra pueden reducir los costos de la mano de obra y el deshierbe; los cuales representan el 70% de los costos durante los primeros dos o tres años de la plantación de café.

En la Figura 49 se visualiza el redegrama de sostenibilidad para las variables: Índices de diversidad y Densidad de Lombrices.

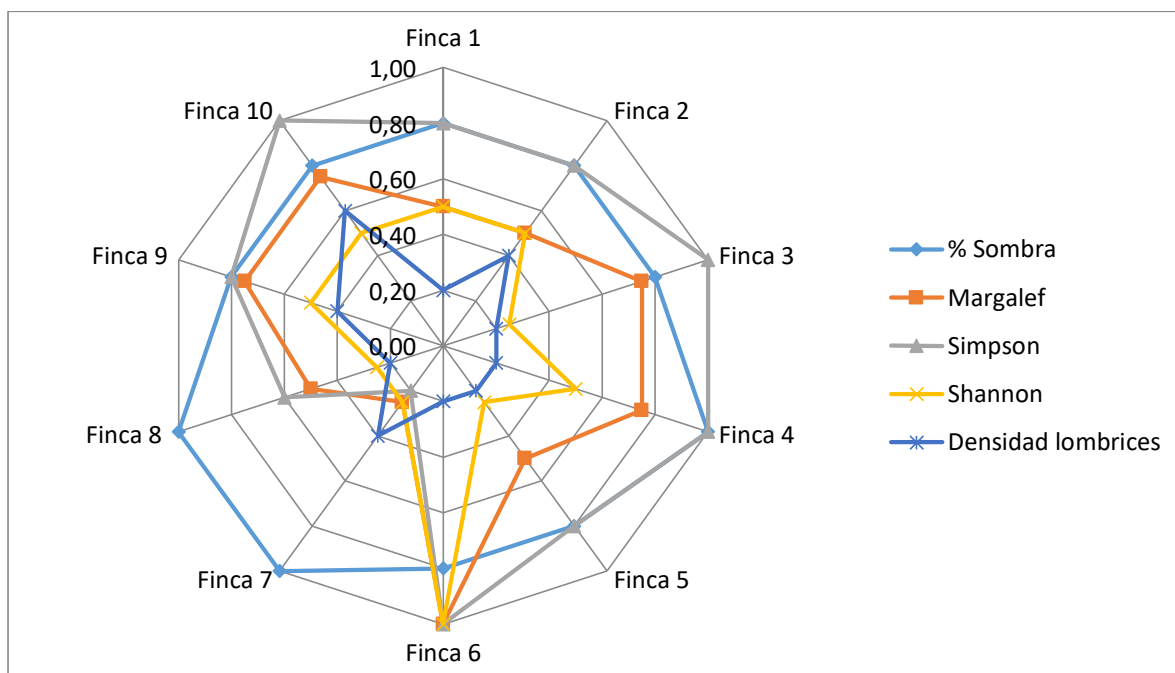


Figura 49. Redegrama de sostenibilidad para las variables: Índices de diversidad y Densidad de Lombrices.

En la Figura 50 se visualiza la conformación de grupos de acuerdo con las variables evaluadas para este componente de acuerdo con los resultados del Análisis de Agrupamiento Jerárquico.

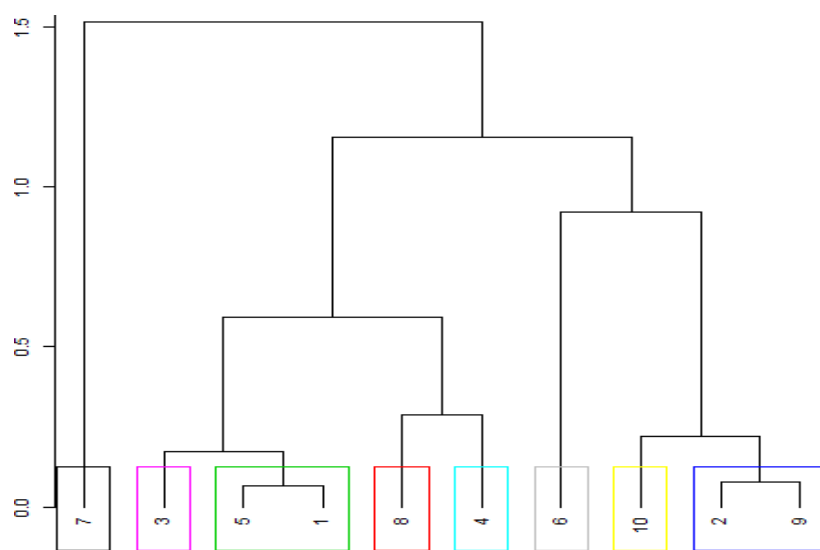


Figura 50. Análisis de agrupamiento jerárquico sostenibilidad ambiental.

Se conformaron 4 grupos de acuerdo con los resultados del análisis de agrupamiento jerárquico:

El grupo 1 las fincas: 2 (Flor), 9 (Vidal), 6 (Javier) y 10 (Vilma), en el grupo 2 las fincas: 1 (Carlos), 3 (Fortunato), 4 (Gerardo), 5 (Jaime) y 8 (Teófilo). En el grupo 3 la finca 7 (Joaquín).

6.6 Sostenibilidad económica: En la Figura 51 se visualiza el grado de sostenibilidad económica de las fincas del área de estudio. En muy baja sostenibilidad están las fincas: Finca 1, 2, 4 y 5, en sostenibilidad media: Finca 6 y 8

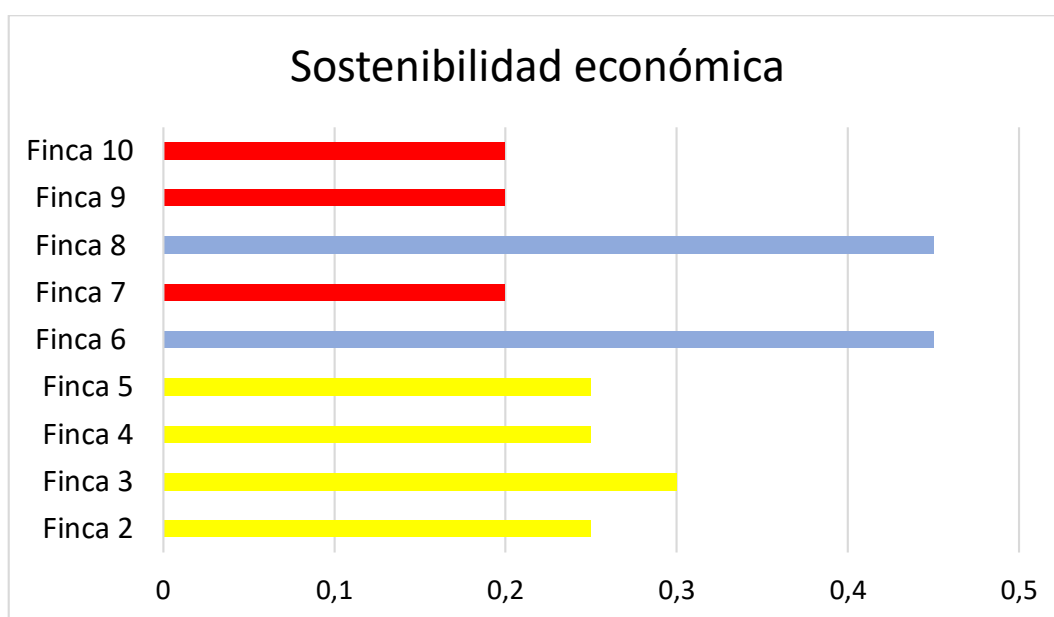


Figura 51. Grado de sostenibilidad económica de las fincas del área de estudio

En la Figura 52 se visualiza el redeograma de sostenibilidad económica para las fincas del área de estudio.

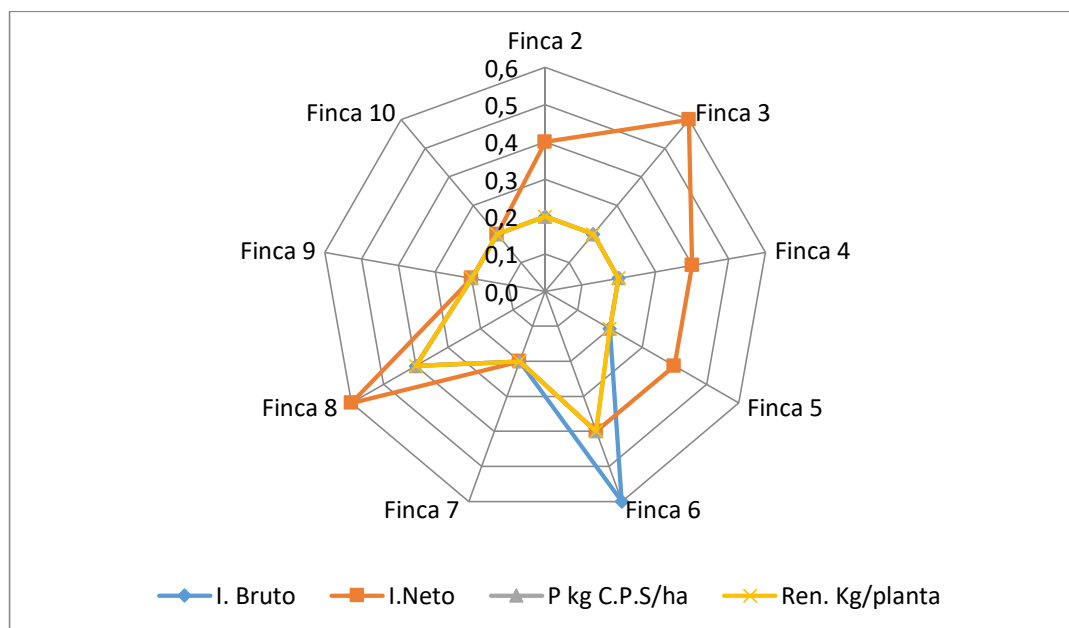


Figura 52. Redegrama del grado de sostenibilidad económica de las fincas del área de estudio.

En la Figura 53 se visualiza la conformación de grupos para las variables evaluadas en el Análisis de Agrupamiento Jerárquico.

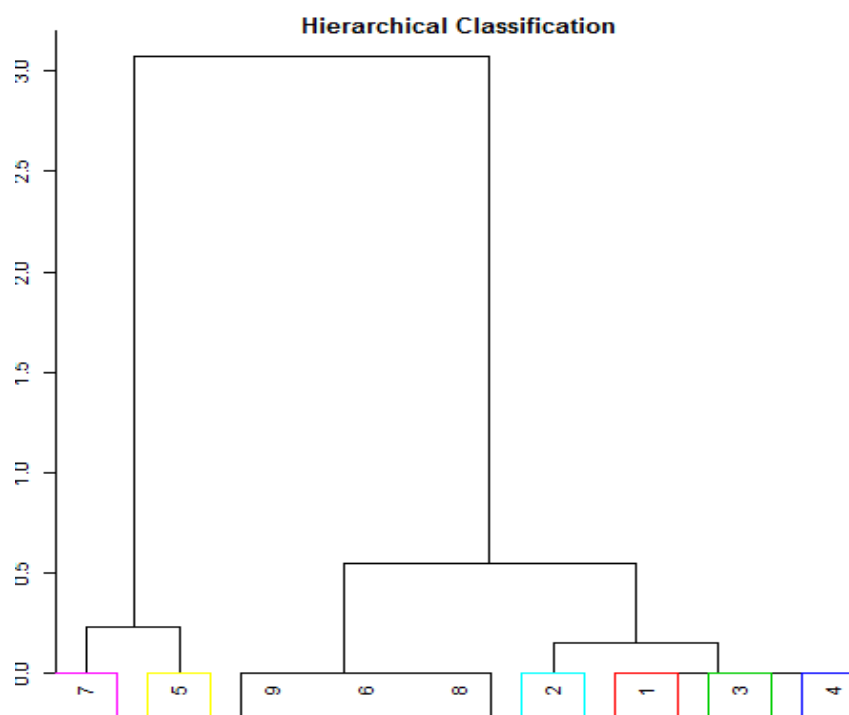


Figura 53. Análisis de agrupamiento jerárquico Sostenibilidad económica.

Se conformaron 3 grupos de acuerdo con el análisis de agrupamiento jerárquico:

Grupo 1: Fincas 1 (Flor), 2 (Fortunato), 3 (Gerardo) y 4 (Jaime), grupo 2 las fincas 6 (Joaquín), 8 (Vidal) y 9 (Vilma) y en el grupo 3 las fincas 5 (Javier) y 7 (Teófilo).

6.7 Sostenibilidad productiva

Las fincas que de acuerdo con el análisis de sostenibilidad productiva en relación a las variables: rendimiento, peso del fruto, diámetro polar, diámetro ecuatorial, fluorescencia de clorofila, conductancia estomática y porcentaje de humedad del suelo presentan alta sostenibilidad: 9, 10, 8, 7, 6, 5, 4 3 y 1, la finca con sostenibilidad media es la 2, ver en la Figura 54.

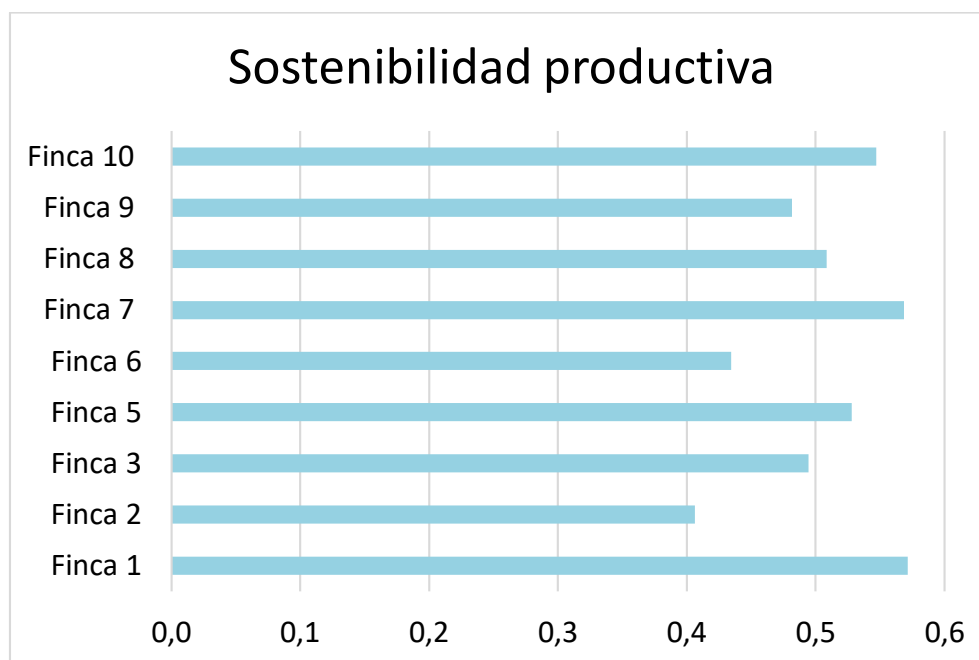


Figura 54. Grado de sostenibilidad productiva de las fincas del área de estudio.

En la Figura 55 se visualiza el redegrama de sostenibilidad productiva de las fincas del área de estudio.

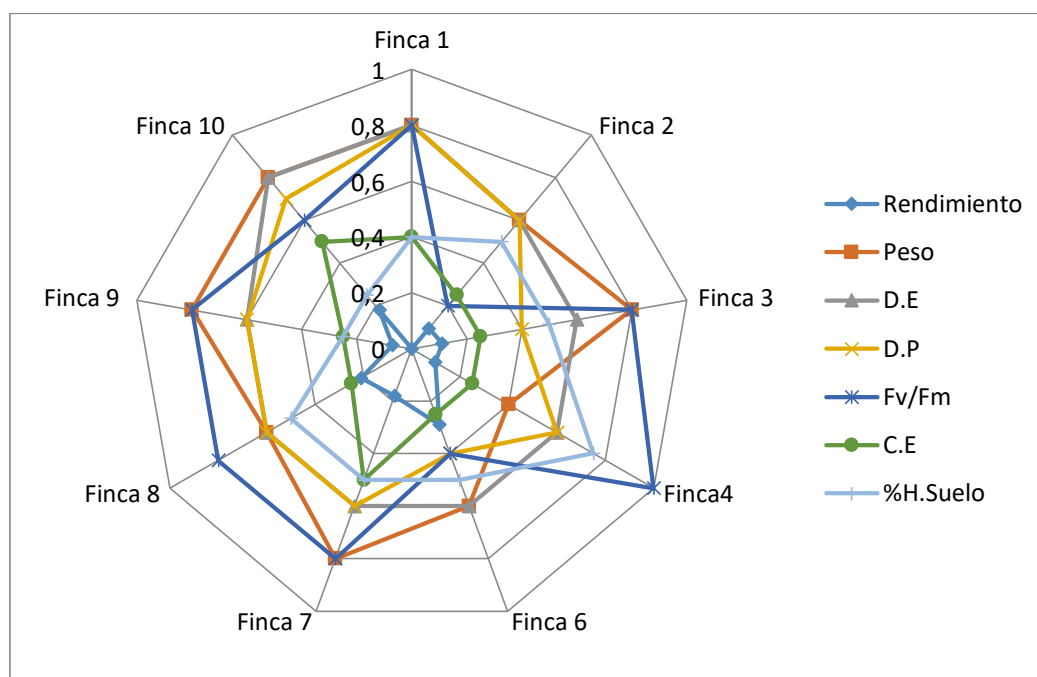


Figura 55. Redegrama del grado de sostenibilidad productiva de las fincas del área de estudio

En la Figura 56 se visualiza la conformación de grupos para las variables evaluadas según los resultados del Análisis de Agrupamiento Jerárquico.

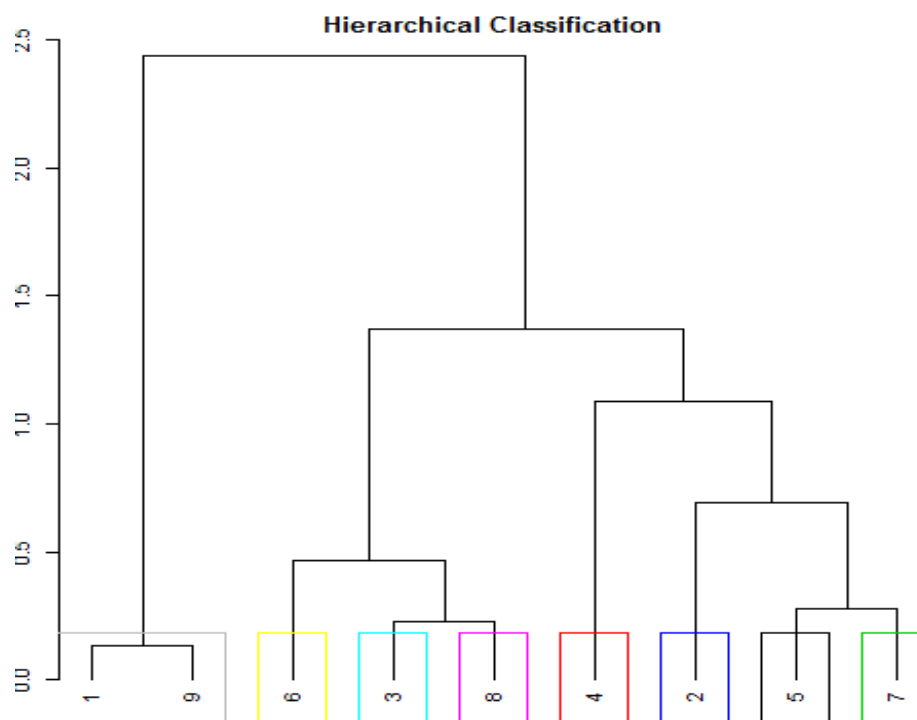


Figura 56. Análisis de agrupamiento jerárquico sostenibilidad productiva

De acuerdo con los resultados del análisis de agrupamiento jerárquico

Grupo 1: Finca 2 (Flor), 4 (Gerardo), 5 (Javier) y 7 (Teófilo), grupo 2: finca 3 (Fortunato), 6 (Joaquín) y 8 (Vidal), grupo 3: finca 1 (Carlos) y 9 (Vilma).

6.8 Sostenibilidad ambiental, económica y productiva

En la Figura 57 se visualiza un gráfico de barras que contiene la sostenibilidad ambiental, económica y productiva de las fincas del área de estudio. Las fincas con sostenibilidad media para los tres ítems son: Finca 1, 3, 8, 9 y 10.

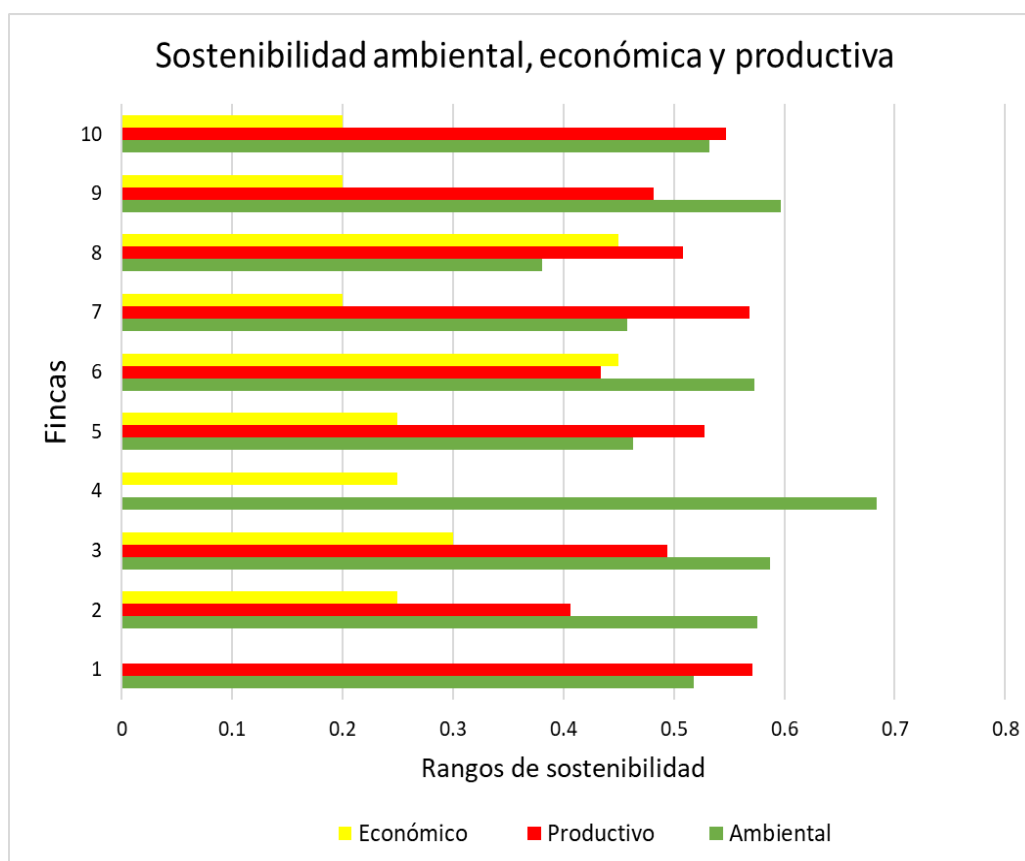


Figura 57. Gráfico de barras del grado de sostenibilidad ambiental, económica y productiva de las fincas del área de estudio.

7. Conclusiones

Las **variables** que tienen más relevancia para el monitoreo de las propiedades físicas y químicas del suelo a través del tiempo son: **Arena, Limo, Arcilla, Azufre, Calcio, C.I.C, Cloruros, Manganeso y Nitrato**, de acuerdo con el Análisis de Componentes Principales. Adicionalmente, se encontraron tres grupos en las fincas: **Grupo 1** (Fincas 1,3,4,6 y 7), **Grupo 2** (Fincas 10, 2 y 8), **Grupo 3** (Finca 5). El grupo 1 se caracteriza porque las fincas poseen suelos muy **fuertemente ácidos, bajos** contenidos de **materia orgánica** y textura franco-arenosa, en el **Grupo 2** las fincas tienen suelos **fuertemente ácidos, bajos** contenidos de **materia orgánica, textura franco-arcillosa**, en el **Grupo 3** la finca presenta **suelos ácidos, textura franco-arenosa**, con predominio de arena, altos contenidos de **Calcio**.

Las variables fisiológicas: conductancia estomática y fluorescencia de clorofila presentan diferencias significativas entre los grupos evaluados. Por otro lado, la humedad del suelo sólo con **algunos grupos** presenta diferencias.

De acuerdo con los resultados del análisis económico los 10 productores evaluados obtienen un ingreso neto negativo, es decir, está trabajando a pérdida, lo cual, puede deberse a varios factores, entre ellos: inversión alta en mano de obra para labores de manejo y recolección del grano de café, altos costos de los fertilizantes para la etapa de crecimiento y producción.

Para las **variables químicas** del suelo las **fincas 10 y 6** presentan alta sostenibilidad ambiental. Las fincas restantes presentan sostenibilidad ambiental media. Las fincas con sostenibilidad muy baja son: Finca 5, 8 y 10. Para las **variables físicas** la **finca 4** presenta sostenibilidad alta, las fincas con sostenibilidad baja son: Finca 6 y 7. Las fincas con sostenibilidad media son: Finca 2, 3 y 9. Para el componente ambiental de las variables

relacionadas con el sombrío y densidad de lombrices, las fincas con sostenibilidad ambiental media son: con sostenibilidad ambiental alta son: **Finca 4, Finca 6, Finca 9 y Finca 10**. Las fincas con sostenibilidad ambiental media son: Finca 1, Finca 2, Finca 3, Finca 5, Finca 7 y Finca 8. En el componente económico las fincas con sostenibilidad media son: Fincas 6 y 8. Las fincas con muy baja sostenibilidad son: Finca 7, 9 y 10, las fincas con baja sostenibilidad son: Finca 2, 3, 4, 5. En el componente productivo todas las fincas poseen sostenibilidad media para las variables. En el componente económico las fincas con muy baja sostenibilidad son: Finca 7, 9 y 10, las fincas con baja sostenibilidad son: Finca 2, 3, 4, 5, las fincas con sostenibilidad media son: Fincas 6 y 8. En el componente productivo todas las fincas poseen sostenibilidad media para las variables.

8. Recomendaciones

Para futuras investigaciones se recomienda tener en cuenta variables relacionadas con el estado de conservación del recurso suelo, entre ellas: espesor de la capa de hojarasca, cobertura muerta del suelo y compactación del suelo.

Analizar con detenimiento los resultados para realizar recomendaciones porque representan únicamente la fase intercambiable del suelo. Para evaluar la fertilidad física y química se recomienda complementar la información en cationes y aniones en solución, porosidad, infiltración, contenidos de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Se recomienda integrar las fases fenológicas del cultivo del café para realizar la comparación entre los estados de desarrollo de la planta y la morfología de la misma.

Se recomienda tener en cuenta si los productores realizan los registros de los costos en su unidad productiva para el análisis económico.

9. Referencias bibliográficas

- Ahmed, C. Ben, Rouina, B. Ben, Sensoy, S., Boukhris, M., & Abdallah, F. Ben. (2009). Changes in gas exchange, proline accumulation and antioxidative enzyme activities in three olive cultivars under contrasting water availability regimes. *Environmental and Experimental Botany*, 67(2), 345–352. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.07.006>
- Ahumada Cervantes, B., Pelayo Torres, M. C., & Arano Castañon, A. (2012). Sustentabilidad ambiental, del concepto a la práctica. Una oportunidad para la implemetacion de la evaluación ambiental estratégica en México. *Gestión Y Política Pública*, XXI, 42p.. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/gpp/v21n2/v21n2a1.pdf>
- Alarcón Aguila, G. (2016). Comportamiento de tres variedades de café (*Coffea arabica* L.) en el valle del Perené, Junín - Perú. Lima. Peru: *Universidad Nacional Agraria La Molina*. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1982?show=full>
- Anderson, J. M., & Ingram, J. S. . (2006). *Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods. The Journal of Ecology* Vol. 78. <https://doi.org/10.2307/2261129>
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 90(1), 25–45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)
- Astier-Calderón, M., Maass-Moreno, M., & Etchevers-Barra, J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36(5), 605–620. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30236511&iCveNum=1175>
- Ayuke, F. O., Brussaard, L., Vanlauwe, B., Six, J., Lelei, D. K., Kibunja, C. N., & Pulleman, M. M. (2011). Soil fertility management: Impacts on soil macrofauna, soil aggregation and soil organic matter allocation. *Applied Soil Ecology*, 48(1), 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.02.001>
- Baker, N. R., & Rosenqvist, E. (2004). Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: An examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 55(403), 1607–1621. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh196>
- Balladares Valdivia, D. D., & Calero Moraga, J. M. (2005). Efecto de la sombra y fertilizacion sobre el crecimiento, estructura productiva, rendimiento y calidad del café (*Coffea arabica*) variedad Costa Rica 95. Recuperado de: <http://cenida.una.edu.ni/Tesis/tnf04b188.pdf>
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D., Somarriba, E., Kass, D., & Somarriba, E. (1998). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*, V.38, 139–164. <https://doi.org/10.1023/A:1005956528316>
- Bermúdez Ballén, M. A. (2019). *Cadena productiva del café en Colombia*. Bogota :

- Colomba: Universidad Agustiniana. Recuperado de: <http://repositorio.uniagustiniana.edu.co/bitstream/handle/123456789/851/BermudezBallen-MonicaAlejandra-2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Blanco, M., Hagggar, J., Moraga, P., Madriz, J. del C., & Pavón, G. (2003). Morfología del café (*Coffea arabica* L.), en lotes comerciales. Nicaragua. *Agronomía Mesoamericana*, 14(1), 97–103. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/437/43714114.pdf>
- Boccalandro, H. E., Giordano, C. V., Ploschuk, E. L., Piccoli, P. N., Bottini, R., & Casal, J. J. (2012). Phototropins But Not Cryptochromes Mediate the Blue Light-Specific Promotion of Stomatal Conductance, While Both Enhance Photosynthesis and Transpiration under Full Sunlight. *Plant Physiology*, 158(3), 1475–1484. <https://doi.org/10.1104/pp.111.187237>
- Breshears, D. D., & Ludwig, J. A. (2010). Near-ground solar radiation along the grassland-forest continuum: Tall-tree canopy architecture imposes only muted trends and heterogeneity. *Austral Ecology*, 35(1), 31–40. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2009.02009.x>
- Campanha, M., de Freitas, G., Santos, R., & Martínez, H. (2012). Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. *CYF News*, 38(2), 35–37. <https://doi.org/10.1023/B>
- Cardona Salle, D. A., & Sadeghian Khalajabadi, S. (2005). Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. *Cenicafé*, 56(4), 348–364. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/197/1/arc056%2804%29348-364.pdf>
- Carrasco Rios, L., & Escobar Araya, H. (2002). Cambios en los contenidos de clorofila, proteínas y niveles de fluorescencia de clorofila en plantas de café (*Coffea arabica* L.) cultivadas en zonas áridas en diferentes condiciones de luminosidad. *Idesia*, 20(2), 111–118. Recuperado de: http://www.idesia.cl/Vols/Numeros/IDESIA_21/CAP4CA1.PDF
- Causas, D. (2005). Definición de las variables , enfoque y tipo de investigación. Bogotá. Colombia : *Universidad Nacional Abierta Y a Distancia (UNAD)*, 1–11. Recuperado de: http://www.mecanicahn.com/personal/marcosmartinez/seminario1/los_pdf/1-Variables.pdf
- Chaerle, L., Saibo, N., & Van Der Straeten, D. (2005). Tuning the pores: Towards engineering plants for improved water use efficiency. *Trends in Biotechnology*, 23(6), 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2005.04.005>
- Chaves, A., Pinheiro, H. A., Ribeiro, A., & DaMatta, F. M. (2008). Seasonal changes in photoprotective mechanisms of leaves from shaded and unshaded field-grown coffee (*Coffea arabica* L.) trees. *Trees*, 22(June), 351–361. <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0190-7>
- Cruz Aguilar, R., Leos Rodríguez, J. A., Uribe Gómez, M., & Rendón Medel, R. (2014). Evaluación socioeconómica del sistema agroforestal tradicional Café-plátano-cítricos en el municipio de Tlapacoyan, Veracruz, México. *Tropical and Subtropical*

- Agroecosystems*, 17(2), 315–319. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93931761024>
- DaMatta, F. M., Chaves, A. R. M., Pinheiro, H. A., Ducatti, C., & Loureiro, M. E. (2003). Drought tolerance of two field-grown clones of *Coffea canephora*. *Plant Science*, 164(1), 111–117. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00342-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00342-4)
- DaMatta, F. M., Cunha, R. L., Antunes, W. C., Martins, S. C. V., Araujo, W. L., Fernie, A. R., & Moraes, G. A. B. K. (2008). In field-grown coffee trees source-sink manipulation alters photosynthetic rates, independently of carbon metabolism, via alterations in stomatal function. *New Phytologist*, 178(2), 348–357. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02367.x>
- Damatta, F. M., & Ramalho, J. D. C. (2006). Impacts of drought and temperature stress on coffee. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18(1), 55–81. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100006>
- DaMatta, F. M., Ronchi, C. P., Maestri, M., & Barros, R. S. (2007). Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 485–510. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400014>
- Damatta, F., & Rodríguez, N. (2007). Producción sostenible de cafetales en sistemas agroforestales del Neotrópico: una visión agronómica y ecofisiológica. *Agronomía Colombiana* ISSN 0120-9965, 25(1), 113–123. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v25n1/v25n1a13.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación (2019). Producto Interno Bruto (PIB) Boletín Técnico, 1–32. Recuperado de: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib/bol_PIB_Ilttrim19_produccion_y_gasto.pdf
- Dumanski, J., Gameda, S., & Pieri, C. (1998). *Indicators of Land Quality*. (The world bank, Ed.) (Primera ed). Washington-Estados Unidos de América: Banco Mundial y Agricultura y Agroalimentación de Canadá. Recuperado de: <http://documents.worldbank.org/curated/en/487661468739557843/pdf/multi-page.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2014). *Agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/i3788s/i3788s.pdf>
- Farfán, F. (2014). *Agroforestería y sistemas agroforestales con café*. Recuperado de: [https://www.cenicafe.org/es/publications/Agroforestería_y_sistemas_agroforestales_con_café.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/Agroforesteria_y_sistemas_agroforestales_con_cafe.pdf)
- Farfán, F., & Mestre, A. (2004). Respuesta del café cultivado en un sistema agroforestal a la aplicación de fertilizantes, 55(2), 161–174. Recuperado de: <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc055%2802%29161-174.pdf>
- Farfán Valencia, F. (2007). *Sistemas de Producción de Café En Colombia*, 161–200. Recuperado de: <http://infocafes.com/portal/biblioteca/sistemas-de-produccion-de-cafe->

en-colombia/

- Farfán Valencia, F. (2014). Mantenimiento del componente arbóreo. *Avances Técnicos*, 440. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/486/1/avt0440.pdf>
- Farfán Valencia, F., & Hincapié Gómez, É. (2011). Valoración de la sostenibilidad ambiental mediante indicadores de calidad del suelo, en sistemas de producción de café en Colombia. *Cenicafé*, 62(1), 100–118. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/476/1/arc062%2801%29100-118.pdf>
- Farrell, J. G. (1983). Sistemas agroforestales, (Nair), 229–243. Recuperado de: https://socla.co/wp-content/uploads/2014/sistemasagroforestales_m.a._altieri.pdf
- Flores, M. I. N. (2007). Las variables: estructura y función en la hipótesis, 11(20), 163–179. Recuperado de: http://200.62.146.19/bibvirtualdata/publicaciones/inv_educativa/2007_n20/a12v11n20.pdf
- Franck, N., & Vaast, P. (2009). Limitation of coffee leaf photosynthesis by stomatal conductance and light availability under different shade levels. *Trees - Structure and Function*, 23(4), 761–769. <https://doi.org/10.1007/s00468-009-0318-z>
- García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos : una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos Y Forrajes*, 35(2), 125–137. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.12.004>
- Guillen, C., Soto, A., & Springer, F. (2006). Variables físicas, químicas y biológicas del suelo sobre las poblaciones de colémbolos en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, V.30, 19–29. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/436/43630202.pdf>
- Guillén, C., Soto, F., & Springer, M. (2006). Diversidad y abundancia de colémbolos edáficos en un bosque primario, un bosque secundario y un cafetal en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 30(2), 7–17. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/28206697_Diversidad_y_abundancia_de_colembolos_edaficos_en_un_bosque_primario_un_bosque_secundario_y_un_cafetal_en_Costa_Rica
- Haggar, J., Barrios, M., Bolaños, M., Merlo, M., Moraga, P., Munguia, R., ... de Virginio, E. M. F. (2011). Coffee agroecosystem performance under full sun, shade, conventional and organic management regimes in Central America. *Agroforestry Systems*, 82(3), 285–301. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9392-5>
- Hunt, N., & Gilkes, B. (1992). Soil structure and Drainage. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/soil-structure>
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Medellín. Colombia: *Facultad de ciencias. Universidad Nacional de Colombia*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Jiménez Suancha, S. C., Alvarado, O. H., & Balaguera López, H. E. (2015). Fluorescencia

- como indicador de estrés en *Helianthus annuus* L. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 9(1), 149–160. <https://doi.org/10.17584/rcch.2015v9i1.3753>
- Khalajabadi, S. (2011). Respuesta De Cafetales Al Sol y Bajo Semisombra a Nitrógeno Y Su Relación Con La Materia Orgánica Del Suelo. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 64(1), 5781–5791. Recuperado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/26380>
- Lin, B. B. (2007). Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144(1–2), 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.009>
- Lin, B. B. (2010). The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(4), 510–518. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.010>
- López, M. M., & Molina, L. R. R. (2007). Sistemas agroforestales - Nicaragua. *Universidad Nacional Agraria - Nicaragua*, 104. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Machado Vargas, M. M., Nicholls, C. I., Márquez, S. M., & Turbay, S. (2015). Caracterización de nueve agroecosistemas de café de la cuenca del río Porce, Colombia, con un enfoque agroecológico. *Idesia (Arica)*, 33(1), 69–83. Recuperado de: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/idesia/v33n1/art08.pdf>
- Malagón Manriquez, R., & Mosquera Martín, P. (2001). Enfoque de sistemas: una opción para el análisis de las unidades de producción agrícola. Palmira. Colombia: *Universidad Nacional de Colombia*, 169p.. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/10851/>
- Martínez Castillo, R. (2009). Sistemas de producción agrícola sostenible. *Tecnología En Marcha*, 22(2), 23. Recuperado de: https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/114
- Masera, O., Astier, M., & López Ridaura, S. (2000). *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales El marco de evaluación MESMIS*. (Grupo Inte). México. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/299870632_Sustentabilidad_y_manejo_de_recursos_naturales_El_Marco_de_evaluacion_MESMIS
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2011). *Sistemas Agroforestales y Restauración Ecológica como medidas de adaptación al cambio climático en alta montaña*. Bogota. Colombia: MINAMBIENTE : IDEAM. Recuperado <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022086/GUIASISTEMASFINA L.pdf>
- Molina Cárdenas, J. (2012). *Descripción de sistemas agroforestales, en asociación con cultivos perennes*. Cuenca. Ecuador: Universidad de Cuenca. Recuperado de: https://www.mendeley.com/research-papers/universidad-cuenca-facultad-ciencias-agropecuarias-carrera-ingenieria-agronomica/?utm_source=desktop&utm_medium=1.17.13&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7B34833fed-c31e-42ed-857c-8c3c2666623f%7D

- Moreira Da Silva, F., Menezes de Souza, Z., Pereira de Figueiredo, C. A., de Souza Vieira, L. H., & de Oliveira, E. (2008). Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. *Ciencias Agrotécnicas*, 32(1), 231–241. Recuperado de: [http://www.sbicafe.ufv.br/bitstream/handle/123456789/10925/Cienc. agrotec._v. 32_n. 1_p. 231 - 241_2008.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.sbicafe.ufv.br/bitstream/handle/123456789/10925/Cienc._agrotec._v._32_n.1_p.231-241_2008.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Moreno, A. (2007). Fundamentos sobre Sistemas de producción, 309 p. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/720/2/1.%20Fundamentos%20sistemas%20de%20producci%C3%B3n.pdf>
- Mouget, J. L., & Tremblin, G. (2002). Suitability of the Fluorescence Monitoring System (FMS, Hansatech) for measurement of photosynthetic characteristics in algae. *Aquatic Botany*, 74(3), 219–231. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(02\)00104-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(02)00104-3)
- Musálem Santiago, M. Á. (2001). SISTEMAS AGROSILVOPASTORILES: Una alternativa de desarrollo rural sustentable para el trópico mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 8(2), 91–100. <https://doi.org/9786074555318>
- Muschler, R. (2000). Árboles en cafetales. *Centro Agronomico Tropical de Investigación Y Enseñanza-CATIE*, 45(May), 139p.. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/333338233_Muschler_2000_Arboles_en_Cafetales_Modulo_de_Ensenanza_Agroforestal_No5_Proyecto_Agroforestal_CATIE-GTZ__compressed?_iepl%255BgeneralViewId%255D=xwj1ULTPYyws1GbryaiTVJPVkoseeRfFnv5kJ&_iepl%255Bcontexts%255D%255B0%255](https://www.researchgate.net/publication/333338233_Muschler_2000_Arboles_en_Cafetales_Modulo_de_Ensenanza_Agroforestal_No5_Proyecto_Agroforestal_CATIE-GTZ_compressed?_iepl%255BgeneralViewId%255D=xwj1ULTPYyws1GbryaiTVJPVkoseeRfFnv5kJ&_iepl%255Bcontexts%255D%255B0%255)
- Nair, P. K. (1993). *An introduction to agroforestry* Vol. 73. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(95\)90008-X](https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)90008-X)
- Obando Moncayo, F. H., Villegas Hincapié, A. M., Betancur, J., & Echeverri Tafur, L. (2005). Variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas en un typic udivitrand , arenoso de la región andina central colombiana. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 59(1), 3217–3235. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v59n1/a09v59n1.pdf>
- Oliveira, J. G. de, Aguiar Alves, P. L. da C., & Vitória, A. P. (2009). Alterations in chlorophyll a fluorescence, pigment concentrations and lipid peroxidation to chilling temperature in coffee seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 67(1), 71–76. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.05.007>
- Ordoñez Espinosa, C. M., Suárez Salazar, J. C., Oyola Polania, F., Vega Orozco, G., & Suarez Salazar, A. E. (2013). Caracterización socioeconómica de fincas con arreglos agroforestales de la zona sur cafetera de Colombia. *Momentos de Ciencia*, 10(1), 40–48. Recuperado de: <http://www.udla.edu.co/revistas/index.php/momentos-de-ciencia/article/view/250>
- Ospina, A. (2003). *Agroforesteria: Aportes conceptuales, metodologicos y practicos para el estudio agroforestal*. Santiago de Cali, Colombia Asociación del Colectivo de Agroecología del Suroccidente Colombiano. Recuperado de: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=CENIDA.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresi>

on=mfn=029257

- Ospina Salazar, O., Duque Orrego, H., & Farfán Valencia, F. (2003). Análisis económico de la producción de fincas cafeteras convencionales y orgánicas en transición, en el departamento de Caldas. *Cenicafé*, 54(3), 197–207. Recuperado de: <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc054%2803%29197-207.pdf>
- Palacios Vargas, J. G., & Mejia, B. (2007). *Técnicas de colecta, preservación y montaje de microartrópodos edáficos*. México: Recamier B.E.M. Recuperado de: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/44144380/2007_Tecnicas_Microartrópodos_Edaficos.pdf?response-content-disposition=inline%3Bfilename%3DTECNICAS_DE_COLECTA_PRESERVACION_Y_MONTA.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYY
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L., & Jackson, R. B. (2013). The Structure, Distribution, and Biomass of the World's Forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 44(1), 593–622. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135914>
- Paoletti, M. (1999). The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 106(74), 137–155. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00034-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00034-1)
- Perfecto, I., Vandermeer, J., Mas, A., & Pinto, L. S. (2005). Biodiversity, yield, and shade coffee certification. *Ecological Economics*, 54(4), 435–446. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.10.009>
- Ramírez, V., Arcila, J., Jaramillo, Á., Rendón, J., Cuesta, G., Menza, H., ... Peña, A. (2010). Floración Del Café En Colombia Y Su Relación Con La Disponibilidad Hídrica, Térmica Y De Brillo Solar. *Cenicafé*, 61(2), 132–158. Recuperado de: <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061%2802%29132-158.pdf>
- Ramírez Builes, V. H., Jaramillo Robledo, Arcila Pulgarín, J., & Montoya Restrepo, E. C. (2010). Estimación De La Humedad Del Suelo En Cafetales a Libre Exposición Solar. *Cenicafé*, 61(3), 251–259. Recuperado de: [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061\(03\)251-259.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061(03)251-259.pdf)
- Rey Mejías, C. (2002). Indicadores de sostenibilidad ambiental. *Observatorio Medioambiental*, (5), 79–99. https://doi.org/10.5209/rev_OBMD.2002.v5.22865
- Rivera, L., & Armbrrecht, I. (2005). Diversity of three ant guilds in shade and sun coffee plantations and forests of Risaralda. *Revista Colombiana de Entomología*, (June). Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-04882005000100015
- Rodríguez Garay, F. A. (2015). *Variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas en rendimiento y calidad de Café*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: http://bdigital.unal.edu.co/49987/1/Tesis_variabilidad_espacial_café.pdf
- Rodríguez Garay, F. A., Camacho Tamayo, J. H., & Rubiano Sanabria, Y. (2016). Variabilidad espacial de los atributos químicos del suelo en el rendimiento y calidad de

- café. *Ciencia Y Tecnología Agropecuaria*, 17(2), 237–254. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v17n2/v17n2a08.pdf>
- Roelfesema, M. R. ., & Hedrich, R. (2005). In the light of stomatal opening : new insights into “ the Watergate .” Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16101906>.
- Ronquim, C. C., Prado, C. H. B. ., & Novaes, P. (2006). Carbon gain in *Coffea arabica* during clear and cloudy days in the wet season. *Experimental Agriculture*, 42(April), 147–164. <https://doi.org/10.1017/S0014479705003121>
- Salazar Arias, J. N., Orozco Castaño, F. J., & Clavijo Porras, J. F. (1988). Características morfológicas, productivas y componentes del rendimiento de dos variedades de café: Colombia y Caturra. Chingjá. Caldas: *CENICAFE*, 43–60. Recuperado de <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/901/1/arc039%2802%2943-60.pdf>
- Salgado, J. (2015). Producción de madera en sistemas agroforestales con cafe, (January 2012), 145–161. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Arlene_Lopez_Sampson/publication/281235377_Agroforesteria_y_la_produccion_de_madera/links/55dc2d5708aec156b9b006b7/Agroforesteria-y-la-produccion-de-madera.pdf#page=146
- Schroeder, J. I., Allen, G. J., Hugouvieux, V., Kwak, J. M., & Waner, D. (2001). Guard Cell Signal Transduction. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, V.52, 627–658. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.52.1.627>
- Serna Giraldo, C. A., Trejos Pinzón, J. F., Cruz Cerón, G., & Calderón Cuartas, P. A. (2010). Estudio económico de sistemas de producción cafeteros certificados y no certificados en dos regiones de Colombia. *Cenicafé*, 61(3), 222–240. Recuperado de <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061%2803%29222-2403.pdf>
- Silveira Duarte, N. (2005). *Sostenibilidad socioeconómica y ecológica de sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) en la microcuenca del Río Sesesmiles , Copán , Honduras*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza Tropical.
- Syers, J. ., & Springett, J. . (1984). Earthworms and soil fertility. *Plant and Soil*, 76(1–3), 93–104. <https://doi.org/10.1007/BF02205570>
- USDA. (1999). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Recuperado de https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf
- Vásquez Polo, J. R., Baena García, D., & Menjivar Flores, J. C. (2010). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena (Santa Marta, Colombia). *Acta Agronómica*, 59(4), 449–456. Recuperado de https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/20129/21217
- Villavicencio-Enríquez, L. (2013). Caracterización agroforestal en sistemas de café tradicional y rústico, en San Miguel, Veracruz, México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 19(1), 67–80. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.051>

- Zapata, O., Espinoza, K., Melena, N., & Moncayo, J. (2015). Agro-Morphological Characterization Nine Varieties, (Año 2015) (2), 46–51. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/277020551_AGRO-MORPHOLOGICAL_CHARACTERIZATION_AND_MORPHOLOGY_BASED_GENETIC_DIVERSITY_ANALYSIS_OF_LANDRACES_OF_RICE_VARIETY_Oryza_sativa_L_OF_BANKURA_DISTRICT_OF_WEST_BENGAL
- Zapata Arango, Piedad Cecilia Andrade Castañeda, Hernan Jair Nieto Abril, Z. K. (2017). Comportamiento ecofisiológico del cafeto (*Coffea arabica* L.) cv. Castillo en sistemas agroforestales de Tibacuy, Cundinamarca. *U.D.C.A Actualidad Y Divulgación Científica*, 20(1), 61–70. <https://doi.org/https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n1.2017.63>
- Zelaya Urbina, F. J., & Sotelo Fittora, C. E. (2000). *Manejo de la fertilización orgánica e inorgánica en el cultivo del café (Coffea arabica L.) en dos años consecutivos*. Managua. Nicaragua: Universidad Nacional Agraria. Recuperado de <http://repositorio.una.edu.ni/1767/1/tnf04z49m.pdf>