

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**PROPUESTA DE UN DISEÑO AGROFORESTAL CON
CAFÉ (*Coffea arabica*, Linn) Y MANEJO ORGÁNICO
EN LA REGIÓN DE MONTEVERDE, COSTA RICA.**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

GABRIEL FERNÁNDEZ VICENTE

CARTAGO, COSTA RICA, 2018.

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**PROPUESTA DE UN DISEÑO AGROFORESTAL CON
CAFÉ (*Coffea arabica*, Linn) Y MANEJO ORGÁNICO
EN LA REGIÓN DE MONTEVERDE, COSTA RICA.**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

GABRIEL FERNÁNDEZ VICENTE

CARTAGO, COSTA RICA, 2018



Esta obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

PROPUESTA DE UN DISEÑO AGROFORESTAL CON CAFÉ (*Coffea arabica*, Linn) Y MANEJO ORGÁNICO EN LA REGIÓN DE MONTEVERDE, COSTA RICA.

Gabriel Fernández-Vicente¹

RESUMEN

Ante la falta de sostenibilidad del modelo intensivo de producción de café en Costa Rica, algunos caficultores han optado por modelos alternativos, como la producción orgánica. Existe poca información científica que guíe a los productores a tomar decisiones de manejo. El objetivo del presente trabajo fue elaborar un diseño experimental que permita monitorear en el tiempo, parámetros productivos y ambientales en función del tipo de sombra y la variedad de café en un sistema agroforestal bajo manejo orgánico en Monteverde, Costa Rica. Se evaluaron las condiciones de área, topografía, edafología, capacidad de uso de suelo y composición florística del sitio donde se desarrollará el ensayo. Se seleccionaron especies forestales y variedades de café a utilizar adecuadas para las condiciones agroecológicas existentes. En el sitio potencial existen pasturas con 31 especies arbóreas y una densidad de 106 árb/ha. Lo cual es uso de la tierra insostenible dadas las limitaciones de pendiente y pedregosidad. Los suelos son fértiles y ricos en materia orgánica, pero deficientes en fósforo y potencialmente en magnesio. Se utilizarán las especies forestales guaba (*Inga punctata*), poró (*Erythrina lanceolata*) y cedro (*Cedrela odorata*) y las variedades de café Costa Rica 95 y Obatá. El diseño propuesto consiste en 12 parcelas divididas de 1000 m² donde se evaluarán 6 tratamientos (2 variedades de café x 3 tipos de sombra). Cada tratamiento tendrá 4 repeticiones. El diseño le permitirá conocer a los productores locales de café orgánico cuales variedad y cuales tipos de sombra usar para obtener los mejores rendimientos.

Palabras Clave: Café, Sistemas Agroforestales, Manejo Orgánico, Sombra, Diseño experimental

¹ Fernández-Vicente, G. (2018). *Propuesta de un diseño agroforestal con café (Coffea arabica, linn) y manejo orgánico en la región de Monteverde, Costa Rica.* (tesis de Licenciatura). Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

ABSTRACT

The lack of sustainability of the intensive coffee production model in Costa Rica has caused some coffee producers to adopt alternative agricultural systems, such as organic farming. There is little scientific information available to guide producers to adopt proper farming practices. The objective of this document is to develop an experimental design that enables to monitor over time, productive and environmental parameters depending on the type of shade and coffee variety in an organic agroforestry system in Monteverde, Costa Rica. Usable area, topography, soils, floristic composition, and soil usage capacity were assessed on the land where the experiment will take place. Tree species and coffee varieties to utilize were selected according to the existing agroecological conditions. The land is currently used as pastures with 31 tree species and a density of 106 trees/ha. This method of land use is unsustainable given the limitations caused by slope and stoniness. The soil is fertile and rich in organic matter, but deficient in phosphorus and potentially in magnesium. The selected tree species are guaba (*Inga punctata*), poró (*Erythrina lanceolata*) and cedar (*Cedrela odorata*), the coffee varieties were Costa Rica 95 and Obatá. The proposed design consists of twelve 1000 m² split plots to test 6 treatments (2 coffee varieties x 3 types of shade). Each treatment will have 4 repetitions. The design will allow local organic coffee producers to know the best type of shade and coffee variety to use to maximize yield.

Keywords: Coffee, Agroforestry Systems, Organic Agriculture, Shade, Experimental Design.

Acreditación

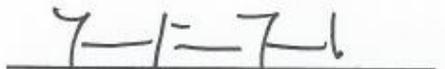
Este trabajo final de graduación fue defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador conformado por M. Sc. Mario Guevara Bonilla, M.Sc. Maribel Jiménez Montero, y M.Sc. Fabricio Camacho Céspedes como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

PROPUESTA DE UN DISEÑO AGROFORESTAL CON CAFÉ (Coffea arabica, Linn) Y MANEJO ORGÁNICO EN LA REGIÓN DE MONTEVERDE, COSTA RICA.

Miembros del tribunal


Mario Guevara Bonilla M. Sc
Escuela de Ingeniería Forestal
Director de tesis


Fabricio Camacho Céspedes M. Sc
Universidad de Georgia,
Campus Costa Rica.


Maribel Jiménez Montero M. Sc
Escuela de Ingeniería Forestal
Lectora


Dorian Carvajal Venegas M. Sc
Coordinador de trabajos finales
de graduación


Gabriel Fernández Vicente
Estudiante

Dedicatoria

A mi familia quien han sido la piedra angular
de mi formación como ser humano.
Especialmente a mis padres que en todo momento
me han guiado y apoyado en mis decisiones.
Gracias por luchar y darme la oportunidad de ser feliz.

Agradecimientos

A la Universidad de Georgia con sede en Costa Rica y todo su personal, por permitirme desarrollar mi proyecto de tesis en sus instalaciones. Especialmente a Fabricio Camacho por darme la idea del tema de mi proyecto, admitirme como pasante de agricultura sostenible y apoyarme durante este proceso.

A mi profesor guía Mario Guevara y a la Profesora Maribel Jiménez por introducirme al tema de los sistemas agroforestales, y por sus recomendaciones que permitieron orientar el rumbo del presente trabajo.

Al personal de la cocina del ecolodge. Por preparar comida deliciosa y nutritiva que me llenó de energía e hizo este trabajo posible.

A Elliot, James, Ashley, Fernanda, Juliana y Jacob. Por ayudarme con la recolecta de datos durante el trabajo de campo.

A todos mis compañeros y profesores de la Escuela de Ingeniería Forestal. Los últimos 5 años han estado llenos de aprendizaje y crecimiento. Todos ustedes me han enseñado algo que me ha ayudado a forjar mis convicciones y mi personalidad y por ello estaré siempre agradecido.

Índice general

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Acreditación.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
3.1 Café.....	4
3.1.1 Origen	4
3.1.2 Requerimientos agroecológicos.....	4
3.1.3 Establecimiento y manejo.....	5
3.2 Desafíos de la caficultura en Costa Rica.....	7
3.3 Sistemas agroforestales con café	8
3.3.1 Servicios ecosistémicos de los SAF de café.....	9
3.3.2 Productividad de los SAF de café.....	11
3.3.3 Diseños experimentales en SAF.....	14
3.4 Producción de café orgánico	15
3.4.1 Rentabilidad de la producción orgánica.....	16
3.4.2 Producción de café orgánico en Monteverde.....	17
4. MATERIALES Y MÉTODOS	18
4.1 Área de estudio.....	18
4.2 Caracterización del sitio.....	19
4.2.1 Área y topografía	19
4.2.2 Condiciones edáficas.....	19
4.2.3 Capacidad de uso de la tierra	21
4.2.4 Composición florística.....	22

4.3	Especies forestales y variedades de café a utilizar en el ensayo	23
4.3.1	Selección de especies forestales	23
4.3.2	Selección de variedades de café	23
4.4	Diseño experimental del sistema agroforestal	24
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
5.1	Caracterización del sitio	24
5.1.1	Área y topografía	24
5.1.2	Condiciones edáficas	25
5.1.3	Capacidad de uso de la tierra	31
5.1.4	Composición florística	32
5.2	Especies forestales y variedades de café a utilizar en el ensayo	38
5.2.1	Selección de especies forestales	38
5.2.2	Selección de variedades de café	45
5.3	Diseño experimental del sistema agroforestal	46
6.	CONCLUSIONES	50
7.	REFERENCIAS	51
8.	ANEXOS	65

Índice de cuadros

Cuadro 1. Parámetros para evaluar la acidez del suelo en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.....	26
Cuadro 2. Bases intercambiables del suelo en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.....	27
Cuadro 3. Relaciones catiónicas del suelo en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.....	28
Cuadro 4. Fósforo y elementos menores del suelo en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.....	29
Cuadro 5. Contenido de materia orgánica del suelo en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.....	30
Cuadro 6. Evaluación de la capacidad de uso de la tierra en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.....	31
Cuadro 7. Número de individuos de árboles por especie, según la función que cumplen en el sistema agroforestal. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.....	33
Cuadro 8. Lista de especies forestales potenciales a utilizar en un ensayo agroforestal de café orgánico, Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.....	39

Índice de figuras

Figura 1. Climograma para el periodo 2009-2017 de la estación meteorológica de la Universidad de Georgia con sede en San Luis de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.	19
Figura 2. Estaciones de muestreo de suelo en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.	20
Figura 3. Distribución del terreno según categoría de pendiente en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.	25
Figura 4. Ubicación de árboles según su función en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.	34
Figura 5. Distribución diamétrica del área basal de los árboles según su función en un área potencial para establecer un ensayo agroforestal, Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.	35
Figura 6. Área de copas en sitios potenciales para el establecimiento de un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.	37
Figura 7. Distribución de las parcelas y los tratamientos de una propuesta de diseño experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.	46
Figura 8. Dimensiones del diseño de parcelas divididas a utilizar en un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.	48
Figura 9 Distribución de las plantas de café y los árboles para dos tratamientos distintos de tipo de sombra a utilizar en un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.	49

Índice de anexos

Anexo 1. Recomendaciones de manejo del componente arbóreo del sistema agroforestal.....	65
---	----

1. INTRODUCCIÓN

En Costa Rica el café (*Coffea arabica*, Linn) es el producto agrícola más cultivado con 84 133 hectáreas (INEC, 2014). Se encuentra localizado principalmente en el Valle Central, Valle Central Occidental, Pérez Zeledón, Turrialba, Coto Brus, Tarrazú y Zona Norte (Jiménez, 2013). Durante el 2017 las exportaciones de café representaron el 3,16 % de las exportaciones nacionales, ubicándolo como el sexto producto de importancia comercial para el país y segundo del sector agropecuario (INEC, 2017).

A pesar de la importancia que tiene el café para la economía costarricense, tanto la productividad como el área plantada han decrecido en las últimas dos décadas, algo sin precedentes en la historia de Costa Rica. (Jiménez, 2013). El Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE) atribuye la baja productividad a que existen en el país más de 40 000 hectáreas de café, que ya han cumplido su ciclo productivo, y no han sido renovadas por los caficultores (ICAFFE, 2017).

El desgaste de las plantaciones de café puede ser atribuido al modelo de producción intensivo impulsado a partir de la segunda mitad del siglo XX, el cual promueve sistemas sin sombra, con alta densidad de variedades de porte bajo como caturra y catuaí y un alto requerimiento de insumos químicos (Fernández & Muschler, 1999; Vaast & Snoeck, 1999). Este modelo genera una mayor vulnerabilidad económica para los caficultores, debido al alto costo de los insumos agrícolas, la alta variabilidad de los precios del café y la dependencia de una sola fuente de ingreso (Lyngbæk, Muschler, & Sinclair, 2001; Damiani, 2005), lo que deja rezagados a los pequeños productores que no tienen suficiente capital para adoptar las prácticas de manejo recomendadas, ni para reinvertir en su cafetal (Hagggar et al., 2011).

El modelo intensivo ha sido criticado fuertemente desde la perspectiva de rendimiento ambiental, debido a que su implementación involucra mayor degradación del suelo (Vaast y Snoeck, 1999; Tully, Lawrence & Scanlon, 2012), contaminación por uso excesivo de agroquímicos (Meylan et al., 2017) y pérdidas de biodiversidad (Philpott et al., 2008). Consecuentemente, los sistemas se ven afectados por una menor

longevidad de las plantas de café provocada por el desgaste que implica una alta intensidad de manejo (Chaves, Martins, Batista, Celin, & DaMatta, 2012).

Ante los desafíos económicos y ambientales que presenta el modelo de producción intensivo, ciertos caficultores han adoptado alternativas que permitan incrementar la sostenibilidad del sistema, como el cultivo de café orgánico en asocio con árboles de sombra (Philpott, Bichier, Rice & Greenberg, 2007; Blackman y Naranjo, 2012). Esta tecnología genera un menor impacto ambiental y además ofrece beneficios económicos como costos de producción más bajos y estables, diversificación de la oferta de bienes y la oportunidad de acceder a mercados especializados (Lyngbæk, Muschler, & Sinclair, 2001).

Varios autores han realizado esfuerzos por comparar la productividad y rentabilidad de los sistemas de producción orgánicos y los convencionales (Lyngbæk et al., 2001; Philpott et al., 2007; Martínez-Sánchez, 2008; Blackman & Naranjo, 2012; Ibañez & Blackman, 2016); sin embargo, han basado sus estudios en recolección de datos de fuentes secundarias donde inherentemente existen muchas variables no controladas. Solo los esfuerzos de Hagggar et al. (2011) y Virginio Filho et al. (2015) han buscado desarrollar la temática de producción orgánica de café bajo manejo agroforestal, desde una perspectiva experimental con diseños estadísticos preestablecidos y estricto control de las variables de manejo.

Tanto el estudio de Virginio Filho et al. (2015) como el de Hagggar et al. (2011), se ubican en altitudes menores a los 700 m.s.n.m, por lo que existe un vacío de información sobre la producción orgánica de café en rangos altitudinales mayores. Ante esta problemática, la Universidad de Georgia (UGA) mediante su campus en Monteverde, Costa Rica, desea establecer a partir del año 2019 ensayos científicos con plantaciones de café bajo manejo orgánico en la comunidad de San Luis (1200 m.s.n.m), con la finalidad informar a los más de 40 productores locales acerca de los rendimientos productivos y ambientales de la combinación de las variedades de café que actualmente se utilizan en la zona y los diferentes tipos de sombra.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Elaborar un diseño experimental que permita monitorear en el tiempo, parámetros productivos y ambientales en función del tipo de sombra y la variedad de café en un sistema agroforestal bajo manejo orgánico en Monteverde, Costa Rica.

2.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar las condiciones topográficas, edáficas, capacidad de uso de la tierra y composición florística del área de estudio.
2. Seleccionar las especies forestales y variedades de café a utilizar en el ensayo.
3. Definir el diseño experimental del sistema agroforestal.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Café

3.1.1 Origen

La especie de café *Coffea arabica* la cuál es la única que se cultiva actualmente en Costa Rica, es originaria de las regiones montañosas de Etiopía y Yemen entre los 11° y los 9° grados de latitud norte, sobre los 1500 msnm (León, 2000). Existen dos variedades principales de cafés arábigos: *C. arabica var. Typica* llamado popularmente como café arábigo típica, que fue la principal variedad sembrada en Costa Rica hasta principios del siglo XX y *C. arabica var. bourbon* que fue introducido a Costa Rica proveniente de El Salvador por su alta productividad y cuyo cultivo se expandió entre los caficultores nacionales a partir de la segunda mitad del siglo XX (Jiménez, 2013). En la actualidad casi un 100 % del parque cafetalero de Costa Rica proviene de alguna de estas dos variedades o cruces de estas (Cárdenas, 2007).

3.1.2 Requerimientos agroecológicos

Altitud: crece en rangos altitudinales comprendidos entre 500 y 1700 msnm, aunque en el país se siembra inclusive hasta los 2000 msnm (ICAFFE, 2011). La altitud influye notablemente en la calidad del grano, a mayor altura se produce una bebida más aromática y con mayor acidez (Jiménez, 2016).

Precipitación: el café crece idealmente en regiones con precipitaciones comprendidas entre 1500 y 2300 mm de lluvia anuales, con un mínimo de 145 días de precipitación, un máximo de 245 días, y un periodo seco bien definido (Jiménez, 2013). Las precipitaciones son fundamentales para el café debido a que regulan su floración, el café florea en los siguientes ocho a doce días después de la primera lluvia fuerte que rompe con el periodo seco (ICAFFE, 2011).

Temperatura: las temperaturas óptimas para el desarrollo del café oscilan entre los 17 y 25 °C, arriba de este rango el desarrollo y maduración de los frutos es acelerado lo cual repercute en la calidad del grano (De Matta, 2004), y limitan la floración (Jiménez,

2016). Temperaturas por debajo de este rango retardan el crecimiento (DaMatta, 2004).

Humedad relativa: el rango de humedad relativa adecuado para el desarrollo del café se encuentra entre 70 % y 80 %, humedades superiores propician el ataque de enfermedades fúngicas (ICAFFE, 2011).

Vientos: fuertes vientos ocasionan desecación y daño mecánico en los cafetos (ICAFFE, 2011), y causan la caída prematura de flores y frutos (Jiménez, 2016).

Suelos: el café es capaz de adaptarse a diversos tipos de suelos, siendo los aluviales y los derivados de cenizas volcánicas los más aptos (Jiménez, 2016). En suelos con pendientes mayores al 25 % pero menores al 45 % es necesario implementar prácticas de conservación de suelo, para controlar la erosión (Muschler, 1999). Como por ejemplo siembra a contorno, labranza mínima, barreras vivas y acequias de ladera.

3.1.3 Establecimiento y manejo

Densidad de siembra: la densidad de siembra depende de factores como la variedad de café, el sistema de sombra y el sistema de poda (Jiménez, 2014). Las variedades de porte bajo como *caturra*, *catuaí*, e *híbridos F1*, se siembran a densidades comprendidas entre 4000 y 5000 plantas por hectárea (2,2 m a 1,9 m entre hileras y 0,9 m a 1,1 m entre plantas) (ICAFFE, 2011). Las variedades de porte alto como *typica* y *bourbon* se suelen plantar a distanciamientos de 2,5 m x 2,5 metros lo que equivale a unas 1600 plantas por hectárea (ICAFFE, 2011).

Establecimiento: antes de establecer la plantación el terreno debe ser limpiado de todo tipo de arvenses. Se recomienda hacer un marcaje del terreno siguiendo las curvas de nivel de la plantación como una estrategia de conservación de suelo (Jiménez, 2016). Un hoyo de 30 cm de profundidad y 20 cm de ancho se considera apropiado para plantar plántulas con edad de 6 meses a un año (ICAFFE, 2011).

Manejo de la sombra: existen dos factores fundamentales a considerar al emplear la sombra en cafetales: la homogeneidad y la intensidad. La homogeneidad se refiere a

que toda el área del cafetal este expuesta a un porcentaje de radiación solar similar. La intensidad está relacionada con la cantidad de rayos solares que permiten pasar las copas de los árboles (Muschler, 1999).

Para mantener una homogeneidad e intensidad de sombra adecuadas, se recomienda sembrar los árboles de sombra en la misma hilera del café, e implementar un sistema de podas parciales, donde se cortan ciertas ramas seleccionadas y se le dejan dos a tres ramas al árbol. Manteniendo los porcentajes de sombra alrededor del 60 % en la temporada seca y 30 % en la lluviosa (Muschler, 1999; Jiménez, 2014).

Poda: el tejido leñoso del café eventualmente pierde la capacidad de producir hojas y frutos nuevos, por lo cual se podan las ramas desgastadas con el fin de remover el tejido viejo y promover la salida de nuevas ramas, que son más vigorosas y productivas. A estas podas se les conoce como podas de producción (ICAFE, 2011; Jiménez, 2016).

Existen tres sistemas de podas: 1) poda selectiva: cada planta es valorada individualmente y se poda según el grado de agotamiento; 2) poda sistemática: de cada 3, 4 o 5 calles, se poda una totalmente, de tal forma que se genera un patrón cíclico y 3) poda total por lote: la poda se realiza por lotes completos, sin importar la condición de las plantas (ICAFE, 2011).

Deshija: la poda ocasiona que las plantas de café generen brotes nuevos, por lo cual dos o tres meses después de la poda es necesario seleccionar 3 o 4 ejes vigorosos por planta, y eliminar el resto, esta operación se conoce como deshija. (ICAFE, 2011).

Fertilización: ICAFE (2011) recomienda fertilizar los cafetales con 15 % de Nitrógeno (N), 0,33 % de Boro (B), 3 % de Fósforo (P₂O₅), 4 % de Magnesio (MgO) y entre 10-15 % de Potasio (K₂O). O inclusive mejor, realizar un análisis de suelos que dicte con exactitud la formula química a utilizar.

Control de malezas: para controlar malezas, el método más ampliamente utilizado en Costa Rica es la aplicación de herbicidas sistémicos, aunque en bastantes cafetales

de pequeña dimensión es común que el control de malezas se efectuó manualmente utilizando machete, palas o chapeadoras mecánicas (Jiménez, 2016).

Encalado: Para cafetales que no cuentan con análisis de suelo (ICAFE, 2011) aconseja aplicar de 20 a 40 sacos de cal dolomita por hectárea, cada dos a tres años.

3.2 Desafíos de la caficultura en Costa Rica

A partir de la segunda mitad del siglo XX hubo una transformación tecnológica de la producción de café en Costa Rica, el paquete tecnológico incluía la eliminación de los árboles de sombra, incremento en la densidad de plantación e intensificación en el uso de fertilizantes y agroquímicos (Jiménez, 2013). Estos cambios generaron aumentos de la productividad en el corto plazo (Picado, Ledezma y Granados, 2009) pero también generaron consecuencias ambientales negativas en los paisajes cafetaleros como pérdida de la fertilidad (Babbar & Zak, 1995; Tully, Lawrence & Scanlon, 2012) y disminución de la biodiversidad (Philpott & Armbrecht, 2006).

Las nuevas tecnologías de producción cafetalera también ocasionan problemas sociales, dado a que no son adaptables a todas las escalas de producción, lo que deja rezagados a pequeños productores, principalmente por las altas inversiones que requiere adoptar este sistema. Por ejemplo, el uso de fertilizantes representa hasta un 55 % de los costos variables totales del manejo de cafetales convencionales (Lyngbæk, Muschler, & Sinclair, 2001).

Como respuesta ante estos problemas económicos, ambientales y sociales, iniciativas de certificación como Organic, Fair Trade, Rainforest Alliance, UTZ y carbono neutralidad, han surgido para premiar a aquellos agricultores que cumplan con ciertos criterios de sostenibilidad (Ibañez y Blackman, 2016). A pesar de que gestionar estas certificaciones implica para los productores incurrir en costos, también generan beneficios económicos como precios más competitivos y acceso a nuevos mercados (Dragusanu, Giovanucci & Nunn, 2014).

Los criterios de sostenibilidad que debe cumplir un caficultor para optar por las certificaciones son muy variadas. Castro-Tanzi, Dietsch, Ureña, Vindas, y Chandler (2012) enfatizan en eficiencia en el uso de fertilizantes orgánicos, mejor calidad del suelo, alto rendimiento del café y excelente calidad de taza. Nonato de Souza et al. (2012) indican que la biodiversidad de los cafetales y los servicios ambientales que brinda también deben ser considerados al evaluar la sostenibilidad de estos. Bacon, Getz, Kraus, Montenegro y Holland (2012) insisten en la importancia de incluir variables socioeconómicas en los marcos referenciales encargados de evaluar la sostenibilidad de los agroecosistemas de café. Los sistemas agroforestales, así como la producción orgánica son alternativas para lograr una producción de café más sostenible (Cerdeira et al., 2017; Meylan et al., 2017; Jose, 2009; Damiani, 2005)

3.3 Sistemas agroforestales con café

Los sistemas agroforestales (SAF) corresponden a una modalidad de uso de la tierra que combina espacialmente y/o temporalmente especies forestales con especies agrícolas o animales (Montagnini, 1992; Nair, 1993). La agroforestería procura asignar eficientemente los recursos de luz, agua y nutrientes con el objetivo de aumentar el rendimiento económico y ambiental en busca de generar agroecosistemas sostenibles y resilientes (Meylan et al., 2017).

Esta forma de uso del suelo se utiliza desde el inicio de la agricultura hace unos 12 000 años, pero a partir de la segunda mitad de la década de los 90's recobró importancia como una respuesta ante la demanda de una agricultura capaz de proveer múltiples servicios ambientales (Jose, 2009), lo que ha permitido el desarrollo de nuevos enfoques conceptuales y metodológicos en esta disciplina.

Rapidel et al. (2015) considera que en América Latina se pueden clasificar los sistemas agroforestales con café en dos grupos: los que asocian el café con árboles de servicio y los que lo asocian con árboles de producción de madera y frutos.

Los árboles de servicio son aquellos que se establecen y manejan en función de las necesidades del café, su tarea principal es beneficiar la productividad del café (Rapidel et al., 2015). Las especies más comunes utilizadas para estos fines son porós (*Erythrina* spp.) y guabas (*Inga* spp.). Estas especies fijan nitrógeno, tienen una tasa de crecimiento alta y resisten a las podas, lo que les permite amortiguar la temperatura e insolación en temporada seca y proporcionar fertilización nitrogenada al sistema al inicio de la temporada lluviosa mediante la materia orgánica que ofrecen sus hojas y ramas (Beer, Muschler, Kaas, & Somarriba, 1998).

Los árboles productores de frutos y madera permiten crear condiciones microclimáticas que favorecen el desarrollo del café y a la vez diversifican la producción de la finca. Como los árboles maderables generan una sombra permanente es recomendable utilizar especies de copa abierta y rala (Rojas, Canessa, & Ramírez, 2004).

Mercer (2004) indica que la adopción de los sistemas agroforestales por parte de los agricultores se dificulta debido a que estos se consideran más complejos que la agricultura tradicional porque incorporan mayor cantidad de componentes y relaciones, tardan más años en brindar beneficios económicos y están asociados a mayor incertidumbre. Altieri y Nicholls (2013) difieren de esta percepción y aseguran que los Sistemas Agroforestales (SAF) al ser una tecnología asequible y capaz adaptarse a diversos tamaños y sistemas productivos, pueden ser implementados con facilidad, principalmente por pequeños productores de las regiones tropicales y subtropicales.

3.3.1 Servicios ecosistémicos de los SAF de café

Los SAF han sido promovidos por su capacidad de brindar mayor cantidad y calidad de servicios ecosistémicos que la agricultura tradicional. La incorporación de árboles a los sistemas productivos favorece a los procesos naturales que permiten mantener la fertilidad suelo, incrementar las capturas de carbono, preservar el recurso hídrico y conservar la biodiversidad (Meylan et al., 2017).

Los cafetales que integran árboles poseen menores tasas de erosión que los sistemas tradicionales (Beer et al., 1998). Las copas de los árboles, la capa de hojarasca y los residuos de podas que cubre al suelo actúan como una barrera física que disminuye la velocidad, y consecuentemente la capacidad erosiva de las gotas de lluvia. Además, los sistemas radicales de los árboles sujetan las partículas del suelo (Young, 1997).

Los árboles aportan materia orgánica al suelo por medio de las ramas, ramillas y hojarasca que contribuye al reciclaje de nutrientes, a la fertilidad, y a la mejora de la estructura (Jose, 2009). El aumento de la fertilidad del suelo puede ser potenciado al incorporar especies forestales leguminosas como árboles de servicio (Virginio Filho et al., 2015). Se estima que árboles fijadores manejados con podas bianuales, pueden aportar hasta 100 kg N/ha/año (Leblanc., McGraw & Nygren 2007).

Para otros elementos el balance nutricional no es claro ya que depende de procesos opuestos: la extracción de nutrientes por parte de las plantas de café y el reciclaje de nutrientes que aportan los árboles. Hagggar et al. (2011) encontró en un ensayo de 10 años que los sistemas agroforestales poseían mayor fertilidad que los convencionales, pero este fenómeno puede deberse a que también fueron menos productivos por lo que extrajeron menor cantidad de nutrientes del suelo.

La incorporación de árboles permite incrementar la cantidad de carbono que captura y retiene el sistema tanto en la vegetación como en el suelo, lo que convierte a los sistemas agroforestales en una alternativa de mitigación al cambio climático (Nair, Kumar, & Nair, 2009). Los sistemas agroforestales de café pueden capturar anualmente el doble de carbono que los sistemas convencionales llegando a almacenar entre 25 Mg C ha⁻¹ y 70 Mg C ha⁻¹ (Cerdeira et al., 2017; de Carvalho Gomes et al., 2016). La captura de carbono se puede incrementar si en el sistema se utilizan árboles de troncos altos y gruesos, capaces de almacenar considerables cantidades de carbono verticalmente sin reducir los rendimientos del café (Muschler, 1999).

Los sistemas agroforestales de café poseen varios beneficios hidrológicos, lo cual los hace más resilientes al cambio climático (Lin, 2010). Los cafetales con árboles son

capaces de retener mayor cantidad de humedad, ya que el componente arbóreo al controlar la temperatura, disminuye evaporación y reduce la transpiración de las plantas de café (van Kanten & Vaast, 2006). Adicionalmente, el aporte de materia orgánica de los árboles permite reducir las tasas de escorrentía y aumentar la infiltración del agua en el suelo (Cannavo et al., 2011; Gómez-Delgado et al., 2011; Meylan et al., 2017).

Al ampliar la variedad de microhábitats presentes en el agroecosistema, los SAF brindan servicios a la biodiversidad (Vergara & Badano, 2009). Varios estudios han confirmado que los cafetales bajo sistemas agroforestales poseen más diversidad y riqueza de especies que los convencionales en grupos como hormigas (Philpott, & Armbrecht, 2016; Arenas-Clavijo & Armbrecht, 2018), abejas (Jha & Vandermeer, 2010) aves (Greenberg, Bichier, Cruz, & Reitsma, 1997; Komar, 2006; Martínez-Salinas et al., 2016), reptiles (Macip-Ríos & Muñoz-Alonso, 2008), mamíferos terrestres pequeños (Caudill., DeClerck & Hudband, 2015) murciélagos (Williams-Guillén & Perfecto, 2010) y plantas epífitas (Godall., Bacon & Mendez, 2015).

3.3.2 Productividad de los SAF de café

Los caficultores comúnmente utilizan sistemas agroforestales debido a que la planta de café al haberse desarrollado originalmente en el sotobosque, posee un proceso de fotosíntesis sensible a las altas temperaturas. Las hojas de café sufren foto-inhibición y foto-respiración en condiciones de alta radiación solar, lo que inhibe el proceso fotosintético (Chaves, Ten-Caten, Pinheiro, Ribeiro, & DaMatta, 2008). Se ha encontrado que aplicación y manejo adecuado de la sombra al reducir la insolación y la temperatura beneficia la productividad del café, principalmente en regiones cálidas (Rapidel et al., 2015).

Los cafetales bajo sombra tienen a generar una producción constante cada año, mientras tanto, los que se manejan sin sombra, alternan entre años de alta floración y baja floración, generando un patrón de producción bianual (Canell, 1985). DaMatta (2004) atribuye este comportamiento a que la insolación estimula la producción de botones florales y nodos en las ramas, lo cual genera una gran producción de granos

a expensas del crecimiento vegetativo y agota las reservas de nutrientes del arbusto de café. Consecuentemente la planta desgastada exhibe baja productividad al año siguiente.

Se sospecha que los aspectos negativos de los cafetales expuestos al sol se expresan en una o dos décadas cuando estos comienzan a experimentar decrecimientos en productividad como consecuencia de la degradación ambiental que genera el manejo intensivo y el desgaste de las plantas de café expuestas a plena insolación (DaMatta, 2004).

Las condiciones microclimáticas que generan los árboles en una plantación de café repercuten en la productividad del cafetal no solo por su efecto en el metabolismo de las plantas de café, sino que también afectan las poblaciones de plagas y enfermedades. Hernández (2010) encontró menor incidencia de roya (*Hemileia vastatrix* Berk & Br) en cafetales a pleno sol. De igual manera, el ojo de gallo (*Mycena citricolor* Berk. & M.A.Curtis) ocasionó menos daños en cafetales desprovistos de árboles como consecuencia de un microclima más seco y aireado, lo que dificulta el establecimiento de la infección (Hernández, 2010).

La enfermedad de la mancha de hierro (*Cercospora coffeicola* Berk & Coke) presenta un comportamiento opuesto a la roya y al ojo de gallo, ya que es más común en condiciones de alta luminosidad (Hernández, 2010). Esto se debe a la combinación de dos factores: 1) el hongo causante de la mancha de hierro encuentra condiciones favorables para su crecimiento en ambientes de alta temperatura y radiación solar, y 2) los cafetos a pleno sol están más expuestos a estrés hídrico y nutricional, lo que los hace más vulnerables (Grandi, Grissi, Carvalho, Salgado & Veturin, 2007). Tanto la sombra en exceso como la plena exposición al sol estimulan el ataque de la broca (*Hypothenemus hampei* Ferrari), por lo cual esta plaga genera menos daños en niveles de sombra intermedios (Sánchez, 2011)

Las poblaciones de plagas y enfermedades en un sistema agroforestal también son afectadas por la nutrición y diversidad ornitológica que brindan los árboles. Las

especies leguminosas mediante la incorporación y fijación de nitrógeno promueven plantas de café más vigorosas, y menos susceptibles a los padecimientos fúngicos (Hernández, 2010). Por lo que las enfermedades como la roya, mancha de hierro, antracnosis (*Colletotrichum coffeanum*) y derrite (*Phoma costarricensis* Echaridi) mostraron menor incidencia bajo la sombra del poró (*Erythrina poeppigiana* E. F. Cook), en comparación a otras especies forestales. Martínez-Salinas et al. (2016) encontraron que cafetales con mayor diversidad funcional de aves presentan menor incidencia de la broca, debido a estos vertebrados fungen como control biológico del agente causal: un escarabajo curculiónido.

De Matta, (2004) indica que la implementación de sombra tiene efectos positivos en la productividad en sitios subóptimos, resultados similares revelan un modelo empírico desarrollado por Muschler, (1997) para café en Costa Rica, el cual indica que, en el rango ideal de elevaciones, y sitios con suelos sin limitaciones de humedad, profundidad y fertilidad, la máxima producción de café ocurrirá con cafetales expuestos al sol. En cambio, en lugares con condiciones subóptimas la implementación de árboles amortigua las deficiencias del sitio e incrementan la productividad de café.

Estos comportamientos de cafetales con y sin sombra expuestos por DaMatta, (2004) y Muschler (1997), no se han evidenciado en un ensayo de quince años en Turrialba, Costa Rica, el cual tiene condiciones de sitios subóptimas para el desarrollo del café. Schnabel et al. (2017) encontraron que la productividad media en un periodo de trece años fue entre 23 % y 37 % superior en cafetales a pleno sol que en sistemas agroforestales. Los autores hipotetizan a que esto se debe a la menor producción de nodos y botones florales de las plantas de café bajo la sombra, dado que variables morfológicas como altura, diámetro y número de ramas productivas fueron similares en ambas condiciones agroecológicas.

La relación entre la implementación de sombra en los cafetales y la productividad representa resultados contradictorios. De Matta, (2004) explica a que esto se debe a que las investigaciones suelen recolectar la información de fuentes secundarias por lo cual no existe un control estricto de variables importantes que afectan la productividad

del cafetal como: intensidad de la radiación solar, fluctuaciones diarias y estacionales de temperatura y humedad relativa, nutrición, manejo de la sombra, arquitectura de copa de los árboles de sombra, entre otras.

3.3.3 Diseños experimentales en SAF

La teoría de experimentación de campo está basada en la premisa de que el comportamiento observado en una serie de parcelas bajo un tratamiento es similar al que ocurrirá en escalas mayores (Langton, 1990). La necesidad de obtener resultados veraces y replicables obliga a controlar las variables externas que afectan el rendimiento productivo y ambiental de los SAF, para ello es necesario implementar ensayos cuidadosamente planificados que adopten una visión a largo plazo (Somarraiba, Beer & Muschler, 2001).

Las bases teóricas para elaborar diseños experimentales para SAF están fundamentadas en metodologías originalmente desarrolladas para experimentos agronómicos o forestales (Jaggi, Gupta, & Sharma, 2001). No obstante, el desarrollo de experimentos en la agroforestería posee un mayor grado de complejidad debido a varios factores: i) estudiar un componente agrícola y uno forestal, así como la interacción de ambos requiere usar parcelas grandes; ii) la extensión de área que ocupan los árboles implica la posibilidad de que estos afecten a las parcela vecinas y iii) la dificultad de encontrar sitios uniformes así como el gran tamaño de los bloques dificulta la labor de delimitar bloques homogéneos (Atangana, Khasa, Chang & Degrande, 2014).

Los arboles ejercen sus efectos en un gran radio de acción, debido a la extensión horizontal de sus raíces que ejercen competencia por agua y nutrientes, la sombra que despliega la copa disminuye el acceso a la radiación solar y la distancia que viaja la hojarasca antes de caer al suelo, lo cual afecta la distribución de la fertilidad (Somarraiba, Beer & Muschler, 2001). Para evitar que estos efectos alteren los resultados del experimento es necesario tomar precauciones a la hora de planear el ensayo agroforestal como elegir un diseño estadístico apropiado (Atangana et al.,

2014) y dejar áreas de amortiguamiento para atenuar el efecto de borde (Langton, 1990).

En experimentos agroforestales que buscan entender la interacción entre varios factores, es necesario utilizar el diseño de arreglos factoriales como bloques completos al azar (BCA) o bloques incompletos al azar (BIA) (Jaggi, 2016). Las parcelas divididas, que corresponden a un caso especial del diseño de BIA, son frecuentemente utilizadas en diseños experimentales en SAF (Somarraiba, Beer & Muschler, 2001), este diseño permite establecer parcelas grandes donde se ejecuta un nivel de un tratamiento “A”, esta parcela es dividida en subparcelas para aplicar varios niveles de un tratamiento “B”, lo anterior tiene mucha utilidad cuando el tratamiento “A” es un factor que es más práctico aplicarlo en franjas continuas o cuando este factor puede ejercer efectos en las parcelas vecinas (Atangana et al., 2014).

El efecto de borde se refiere al comportamiento ocurrido cuando los bordes de una parcela muestran un patrón diferenciado de crecimiento al percibido en el centro de esta. Si el efecto de borde es ocasionado por el tratamiento de la parcela contigua, este es llamado efecto de vecindad (Langton, 1990). Para mitigar el efecto de borde se puede incorporar un área de amortiguamiento, estas son áreas establecidas en el perímetro de las parcelas que reciben el mismo tratamiento que el resto de la unidad experimental, pero no son tomadas en cuenta en la medición (Atangana et al., 2014).

3.4 Producción de café orgánico

La certificación de café orgánico requiere que los productores se adhieran a 5 principios de producción principales (IFOAM, 2011):

- Utilizar abonos orgánicos (compost) en lugar de fertilizantes químicos para mantener la fertilidad del suelo;
- Emplear métodos naturales para controlar enfermedades, plagas y arvenses en lugar de pesticidas y herbicidas sintéticos;
- Implementación de prácticas de conservación de suelo como siembra en contorno, implementar cultivos de cobertura y utilizar árboles de sombra;

- Minimizar el uso de combustibles fósiles en el proceso de producción; y
- Minimizar la contaminación en el manejo postcosecha.

La certificación orgánica ha sido criticada al ser primordialmente adoptada por productores que previo a optar por la certificación ya tenían estándares de producción similares a los que esta exige, por lo que la certificación no es efectiva en generar cambios de actitud en los productores ni beneficios ambientales adicionales (Philpott et al., 2007; Martínez-Sánchez, 2008). in embargo, Blackman y Naranjo (2012) al analizar datos de unas 6000 fincas cafetaleras en Turrialba, Costa Rica, donde existían 82 fincas certificadas o en proceso de certificarse orgánicas, descubrieron que esta crítica no aplica en Costa Rica, dado que se encontró que en este territorio la caficultura es altamente tecnificada, por lo que muy pocos productores pueden acceder a la certificación orgánica sin realizar cambios significativos en sus prácticas de manejo.

3.4.1 Rentabilidad de la producción orgánica

Blackman y Naranjo (2012) señalan que, desde la perspectiva de los productores, la certificación orgánica brinda múltiples beneficios como precios más competitivos del grano, ingreso a mercados especiales, acceso a servicios de extensión y disminución de la inversión en insumos agrícolas. Pero también genera aspectos negativos como reducción de la producción, incremento de los costos de mano de obra y los gastos adicionales que genera gestionar la certificación.

Las desventajas de la producción orgánica fueron corroboradas por Virginio Filo et al. (2012), que, al estudiar un ensayo de diez años en Turrialba, Costa Rica encontró que los sistemas de café bajo manejo orgánico mostraron rendimientos de café más bajos que aquellos bajo manejo convencional. Para ese mismo ensayo Salgado (2010), analizó los ingresos y costos del ciclo de vida de los cafetales, y determinó que tanto el manejo orgánico y el convencional tienen costos de manejo similares, porque lo que se ahorra en insumos al implementar manejo orgánico se gasta en mano de obra adicional. Los sistemas más rentables según el valor actual neto fueron los

convencionales a pleno sol, mientras que el sistema orgánico más rentable fue el que incorporó árboles de poró.

Ibanez y Blackman (2016) encontraron que los costos de producción de café orgánico por hectárea en el sureste de Colombia fueron el 75 % de los costos de producir café de manera convencional, mientras que la producción media por hectárea de café es un 70 % de la producción de café convencional, concluyendo que los beneficios económicos de la certificación orgánica son limitados. Philpott, Bichier, Rice y Greenberg (2007) obtuvieron conclusiones similares.

Una conclusión similar respecto a la rentabilidad alcanzó Lyngbæk et al. (2001) al indicar que a pesar de que los mayores precios del café logran compensar la disminución del rendimiento, al incluir los costos de la certificación la producción orgánica genera menores ingresos netos que la convencional.

No obstante, estos estudios únicamente contrastan los costos económicos de la producción convencional y la producción orgánica. Dada la capacidad de los sistemas agroforestales de café bajo manejo orgánico de brindar servicios ecosistémicos, es indispensable contar con un análisis comprensivo que considere también las externalidades ambientales y sociales de ambas modalidades productivas para poder realizar balances objetivos (Van der Vossen, 2005).

3.4.2 Producción de café orgánico en Monteverde

La conservación de la riqueza natural y la biodiversidad ha sido un punto esencial en la confección de la identidad en Monteverde, lo cual ha permitido desarrollar un sector turístico exitoso, que atrae cerca de 250 000 turistas anualmente y es el principal sostén de la economía (Lock, 2008). Sin embargo, esta actividad se concentra en la comunidad de Santa Elena y Cerro Plano, mientras que las zonas adyacentes de menor elevación siguen dependiendo de actividades agrícolas como la producción de carne y leche, así como el cultivo del café (CBPC, 2011).

La cultura conservacionista, así como el desarrollo del sector turístico de la región ha jugado un rol importante en moldear la naturaleza de las actividades agrícolas en Monteverde. Algunos productores han aprovechado el nicho del agroturismo para diversificar sus actividades; actualmente unos 20 000 turistas anuales visitan fincas productoras de café, cacao, caña de azúcar entre otras (Stuckey, Camacho, Vargas, Stuckey & Vargas, 2014).

Los caficultores han identificado que los bienes agrícolas producidos sosteniblemente en la región de Monteverde son sumamente atractivos para los miles de turistas que visitan anualmente la zona. Por lo que varios productores han optado diferenciar sus productos por medio de certificaciones orgánicas y venderlos a precios muy competitivos en mercados locales como restaurantes y hoteles. Esto ha promovido la proliferación de micro beneficios y tostadoras que procesan las doce marcas locales de café (Stuckey et al., 2014).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Área de estudio

El estudio se efectuó en un sitio ubicada el Valle de San Luis en Monteverde, que pertenece a la provincia de Puntarenas, Costa Rica, este valle se encuentra en la vertiente pacífica de la Cordillera de Tilarán, en altitudes comprendidas entre los 800 y los 1300 msnm. Geográficamente se sitúa en las coordenadas 10° 16' 22" N y 84° 49' 7" W.

El área de estudio pertenece a la zona de vida de Bosque Muy Húmedo Premontano (bmh-P) (Holdridge, 1967). Datos de una estación meteorológica ubicada a menos de 500 metros del sitio, instalada en el 2009 muestran que la temperatura promedio varía entre 20 °C y 22 °C, la precipitación anual se ubica entre los 2100 y los 3400 mm, con un promedio de 2900 mm, y 4 meses de poca precipitación (Figura 1)

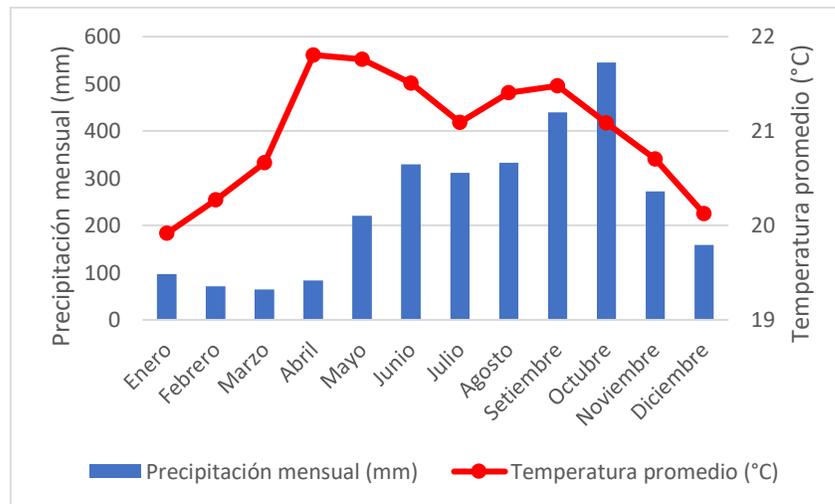


Figura 1. Climograma para el periodo 2009-2017 de la estación meteorológica de la Universidad de Georgia con sede en San Luis de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.

4.2 Caracterización del sitio

4.2.1 Área y topografía

Para determinar el área del sitio se realizó un levantamiento del perímetro del sitio tomando puntos georreferenciados con un GPS marca Garmin, modelo Oregon. Los puntos fueron transformados en un polígono para así calcular el área mediante el uso de Quantum GIS versión 3.0.2 (QGIS Development Team, 2018).

En cada una de las secciones del sitio con pendientes contenidas en un rango similar, se tomaron mediciones de pendiente media, mediante el uso de un clinómetro sunnto. Luego se elaboró un mapa de estas secciones utilizando el programa computacional Quantum GIS versión 3.0.2 (QGIS Development Team, 2018).

4.2.2 Condiciones edáficas

Para la determinación de las condiciones edáficas, el área del sitio se segmentó en tres lotes de muestreo de aproximadamente 1,8 hectáreas tomando en cuenta factores como uso del suelo y topografía (Figura 2). En cada lote se establecieron

sistemáticamente 16 puntos de muestreo y se tomaron muestras de suelo a las profundidades de 0 cm a 20 cm y de 20 cm a 40 cm.

A partir de las submuestras y utilizando la técnica del cuarteo se obtuvo una muestra representativa de 0.5 kg para cada uno de los tres lotes de muestreo y para cada categoría de profundidad. Las 6 muestras representativas fueron guardadas en una bolsa plástica hermética etiquetada para su posterior envío al laboratorio.

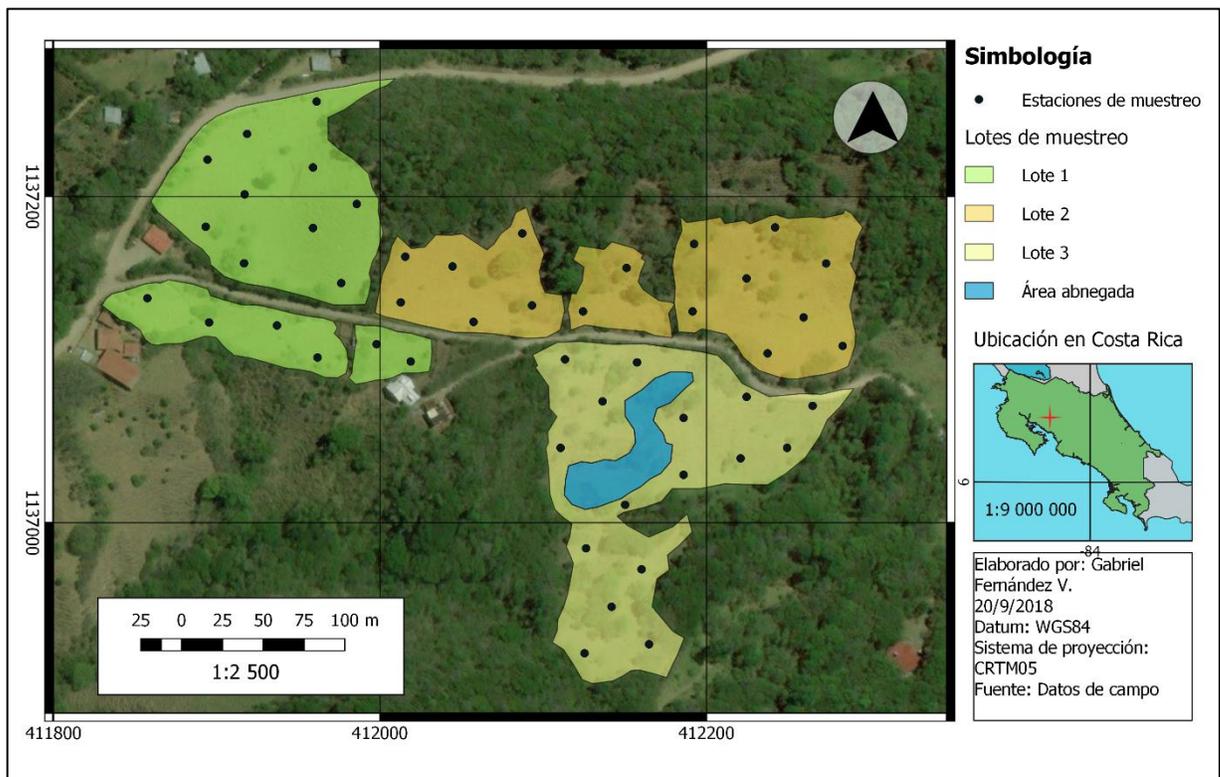


Figura 2. Estaciones de muestreo de suelo en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.

A cada muestra se le realizó un análisis químico completo, el cual incluye: pH (método de Potenciometría, relación 1:2,5- Suelo: Agua) potasio, calcio, magnesio, cobre, hierro, manganeso, zinc, fósforo (solución extractora Mehlich 3, metodología Espectrometría de Emisión de Plasma-ICP), carbono y nitrógeno (combustión seca) y acidez intercambiable (extracción KCl 1 Normal, metodología por volumetría). Los

resultados serán analizados según los parámetros de referencia expuestos por Briceño y Carvajal (1973), Molina y Méndez (2002) y Alvarado y Raigosa (2012).

4.2.3 Capacidad de uso de la tierra

La determinación de la capacidad de uso de la tierra se hizo de acuerdo con la metodología contenida en el Decreto Ejecutivo 23214-MAG-MIRENEM (1994), la cual busca establecer el nivel óptimo de aprovechamiento que tiene un área de terreno dada, con base en la calificación de sus limitantes para producir cultivos de forma sostenible.

La determinación de la categoría de las limitantes se realizó de la siguiente manera:

- Pendiente: con un clinómetro Suunto y un GPS Garmin se realizó un mapeo de las pendientes, luego se obtuvo una media ponderada de las pendientes en el área efectiva.
- Erosión: observaciones de campo
- Profundidad efectiva: en la mitad de las estaciones de muestreo (figura 2) se taladró con el barreno hasta alcanzar una capa muy compacta o roca; los resultados de profundidad fueron promediados.
- Textura de suelo: con la metodología propuesta por (Brady y Weil, 1996).
- Pedregosidad: observaciones de campo.
- Fertilidad: análisis químico, ver sección 4.2.2.
- Toxicidad de cobre: análisis químico ver sección 4.2.2.
- Salinidad: se estimó a partir de la conductividad eléctrica del análisis químico, ver sección 4.2.2.
- Drenaje: observaciones de campo.
- Riesgo de inundación: observaciones de campo.
- Zona de vida: Atlas Digital de Costa Rica (ITCR, 2014)
- Periodo seco: datos de la estación meteorológica del campus de la Universidad de Georgia en Costa Rica.

- Neblina: observaciones de campo.
- Viento: observaciones de campo.

4.2.4 Composición florística

Se censaron todos los árboles que poseen un diámetro a 1,3 metros de altura mayor o igual a 10 cm, a cada uno de estos árboles se le determinó el diámetro a la altura del pecho con una cinta diamétrica, la altura con un hipsómetro suunto, la identificación taxonómica, la función que cumplen, el diámetro de copa y las coordenadas geográficas.

Se consideraron como árboles de cerca, todos aquellos que se encuentran a menos de dos metros del perímetro de los sitios, estos suelen tener una copa podada y dan sostén a alambres de púas. Árboles en cortinas rompevientos a los que se encuentran en arreglos ordenados de dos o tres hileras usualmente de una a cinco especies, o a los árboles que no formaban parte del arreglo original, pero crecieron entre estos. Y árboles de sombra a los que crecen a más de dos metros del perímetro y no forman parte de un arreglo, estos suelen contar con copas amplias y redondas.

Para aquellos árboles que poseen más de un eje con diámetro a la altura del pecho mayor a 10 cm, se unificaron los valores en una sola cifra mediante la fórmula:

$$D_u = \sqrt{(D_1)^2 + (D_2)^2 + \dots + (D_n)^2}$$

Donde:

D_u : diámetro a la altura del pecho unificado.

D_1 : diámetro a la altura del pecho del primer eje.

D_2 : diámetro a la altura del pecho del segundo eje.

D_n : diámetro a la altura del pecho del enésimo eje.

Para determinar el diámetro de copa se tomaron 2 medidas con una cinta métrica en los extremos de la circunferencia que proyecta la copa; una en dirección norte-sur y otra en dirección este-oeste, ambos valores fueron promediados.

4.3 Especies forestales y variedades de café a utilizar en el ensayo

4.3.1 Selección de especies forestales

Para la selección de las especies forestales, se hizo un levantamiento de aquellas que cumplieran con al menos uno de los siguientes criterios: a) especies que ya se encuentran establecidas en el sitio, b) especies que son utilizadas por los caficultores de la zona de Monteverde y c) especies que recomienda la literatura para sistemas agroforestales de café.

Para cada especie se elaboró una revisión bibliográfica para conocer sus requerimientos ambientales, manejo requerido, crecimiento potencial, usos, experiencias en SAF y servicios ecosistémicos que brinda. A partir de dicha información y sujeto a la disponibilidad de germoplasma se seleccionaron las especies que serán utilizadas en los ensayos agroforestales.

4.3.2 Selección de variedades de café

Se seleccionó una variedad de café de amplia utilización en la zona. Debido a que se desea comparar el rendimiento de estas respecto a variedades recientes o menos tradicionales. Para ello se consultó con productores locales, así como funcionarios del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).

La segunda variedad se seleccionó entre variedades resistentes a la roya, dado a que es la principal enfermedad que afecta el rendimiento del café en Costa Rica (Jiménez, 2013), y como el cafetal tendrá un manejo orgánico es necesario utilizar variedades que tengan mecanismos genéticos que le permitan mantener la vigorosidad ante el ataque de dicho hongo. Para ello se inquirió con técnicos del Instituto Costarricense

del Café (ICAFE). Se le dio prioridad a aquellas variedades que han probado ser productivas en condiciones agroecológicas similares a las de la zona de estudio y que tengan disponibilidad de almácigos o semilla para la compra.

4.4 Diseño experimental del sistema agroforestal

Se generó un diseño experimental siguiendo los principios de aleatorización, repetición, y control local. Esto implicó maximizar el número de tratamientos y repeticiones, utilizando parcelas homogéneas y de un tamaño apropiado que permitan apreciar el efecto de las variables de sombra y variedad. Considerando en todo momento las restricciones que impone el área, la topografía y la vegetación del terreno. Una vez determinadas el tamaño, la forma y la dirección de las parcelas, se ubicaron en el área definida para llevar a cabo el estudio con el software Quantum GIS versión 3.0.2 (QGIS Development Team, 2018).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Caracterización del sitio

5.1.1 Área y topografía

El área para el establecimiento de los sitios experimentales es de 5.5 ha. El uso actual es de pastos con árboles dentro de los potreros y en los linderos. Más de la mitad del área total está en terrenos con una pendiente superior al 15 %, incluyendo un 31 % del área con pendientes superiores al 50 % (Figura 3).

Dado que en Costa Rica el Decreto Ejecutivo 23214-MAG-MIRENEM (1994), indica que terrenos con pendientes superiores al 50 % deben tener cobertura boscosa, en caso de que el uso actual sea diferente a bosque, se debe procurar la restauración forestal, y que no se recomienda la siembra de café en pendientes superiores al 45 %

(Muschler, 1999). Se recomienda reforestar las áreas con pendientes superiores al 50 % lo que resulta en un área experimental efectiva de 3,8 ha.

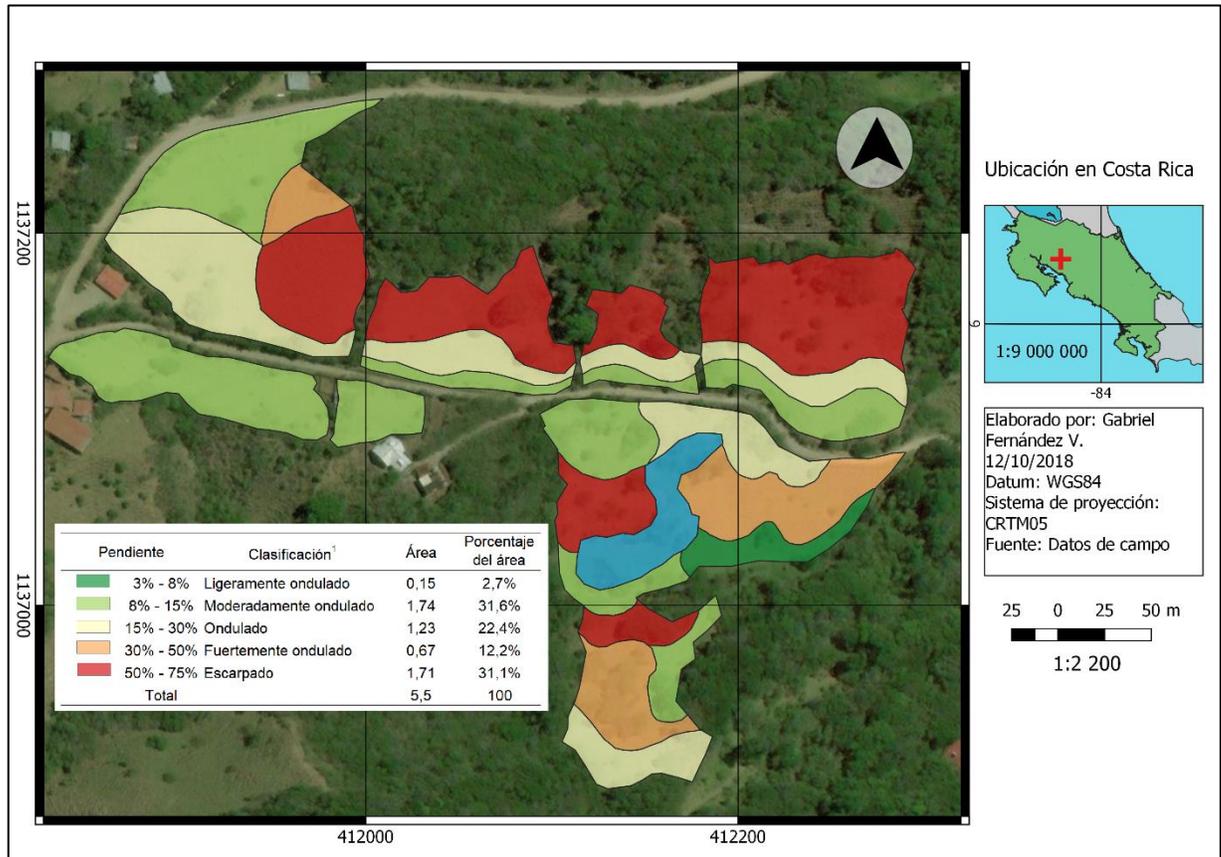


Figura 3. Distribución del terreno según categoría de pendiente en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.

¹ clasificado de acuerdo con las categorías del Decreto Ejecutivo 23214-MAG-MIRENEM (1994).

5.1.2 Condiciones edáficas

Acidez

Los suelos analizados no muestran limitaciones relacionadas con la acidez (Cuadro 1). Estos presentan una alta disponibilidad de bases, por lo que una fracción muy pequeña del complejo de intercambio catiónico está ocupada por los cationes Al^{3+} y H^+ , los cuales constituyen los principales causantes de la acidez intercambiable en suelos tropicales (Alvarado & Raigosa, 2012).

Cuadro 1. Acidez del suelo en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.

Área de muestreo	Profundidad	pH		Suma de bases (cmol(+)/L)		Acidez intercambiable (cmol(+)/L)		% de saturación de acidez	
		Valor	Rango ¹	Valor	Rango ¹	Valor	Rango ¹	Valor	Rango ¹
1	0-20 cm.	6,0	M	19,54	O	0,13	O	0,70	O
	20-40 cm.	6,2	O	19,16	O	0,12	O	0,60	O
2	0-20 cm.	6,1	O	17,96	O	0,11	O	0,60	O
	20-40 cm.	6,3	O	15,4	O	0,11	O	0,70	O
3	0-20 cm.	5,8	M	15,24	O	0,14	O	0,90	O
	20-40 cm.	6,2	O	13,94	O	0,11	O	0,80	O

¹Clasificado de acuerdo con Alvarado & Raigosa (2012). B: Bajo. M: Moderado. O: Óptimo. A: Alto.

Las muestras exhiben un valor de suma de bases superior a 12, esto señala que el suelo presenta fertilidad alta, debido a que los suelos exentos de problemas de acidez están asociados a una menor solubilidad de elementos tóxicos y una mayor disponibilidad de nutrientes (Bertsch, 1986). El café crece de manera óptima en suelos con pH comprendidos entre 5 y 6 (Jiménez, 2016) por lo que los sitios experimentales cuentan con un pH adecuado para el crecimiento de este cultivo.

Bases Intercambiables

Todas las muestras estudiadas presentan una Capacidad de Intercambio Catiónico (CICE) dentro del rango considerado como óptimo (Cuadro 2). La CICE de un suelo se puede interpretar como una medida de la fertilidad potencial de este, ya que cuantifica los sitios de intercambio con carga negativa donde son absorbidos tanto los iones ácidos como las bases intercambiables (Bertsch, 1998).

Cuadro 2. Bases intercambiables del suelo en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.

Área de muestreo	Profundidad	Ca (cmol(+)/L)		Mg (cmol(+)/L)		K (cmol(+)/L)		CICE (cmol(+)/L)	
		Valor	Rango ¹	Valor	Rango ¹	Valor	Rango ¹	Valor	Rango ¹
1	0-20 cm.	15,38	A	3,16	O	1,00	A	19,67	O
	20-40 cm.	15,74	A	2,49	M	0,93	A	19,28	O
2	0-20 cm.	13,44	O	3,34	O	1,18	A	18,07	O
	20-40 cm.	11,92	O	2,51	M	0,97	A	15,51	O
3	0-20 cm.	11,97	O	2,50	M	0,77	O	15,38	O
	20-40 cm.	11,25	O	1,95	M	0,74	O	14,05	O

Clasificado de acuerdo con Molina y Meléndez (2002). B: Bajo. M: Moderado. O: Óptimo. A: Alto.

El calcio y el potasio presentaron niveles de óptimos a altos (Cuadro 2), esto es sumamente positivo dado que ambos elementos están relacionados con el desarrollo adecuado de las plantas de café y el desempeño esperado del cultivo (Castro-Tanzi, 2017).

Relaciones catiónicas

El análisis de suelo muestra que las relaciones entre los cationes de los lotes estudiados están en su mayoría en su rango ideal (Cuadro 3), estas relaciones son de importancia dado que puede haber suficiente cantidad de cada elemento disponible, pero debido a desbalances y antagonismo ciertos elementos no pueden ser correctamente absorbidos (Carvajal y Briceño, 1973). En los casos donde se muestra un desbalance de magnesio (Cuadro 3), ocurre que catión Ca^{2+} ejerce competencia por el acceso a la planta al catión Mg^{2+} , por lo que es posible que las plantas no puedan absorber suficiente cantidad de este elemento (Bertsch, 1998).

Cuadro 3. Relaciones catiónicas del suelo en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.

Área de muestreo	Profundidad	Ca/Mg		Ca/K		Mg/k		Ca+Mg/K	
		Valor	Rango ¹	Valor	Rango ¹	Valor	Rango ¹	Valor	Rango ¹
1	0-20 cm.	4,9	R	15,4	R	3,2	R	18,5	R
	20-40 cm.	6,3	Desb. Mg	16,9	R	2,7	R	19,6	R
2	0-20 cm.	4,0	R	11,4	R	2,8	R	14,2	R
	20-40 cm.	4,7	R	12,3	R	2,6	R	14,9	R
3	0-20 cm.	4,8	R	15,5	R	3,2	R	18,8	R
	20-40 cm.	5,8	Desb. Mg	15,2	R	2,6	R	17,8	R

Clasificado de acuerdo con Briceño y Carvajal (1973). R: Rango recomendado. Desb. Mg: desbalance de magnesio.

El desbalance de magnesio sumado a la disponibilidad media que muestra este elemento en los suelos estudiados (Cuadro 2) es un aspecto para monitorear debido a que la deficiencia de este elemento puede causar pérdidas de productividad significativas en el cultivo de café (da Silva et al., 2014).

Fósforo y elementos menores

Los resultados del análisis de fósforo y elementos menores del suelo mediante la técnica KCL-Olsen modificado, deben interpretarse con precaución puesto que poseen un rango de variación que oscila entre 15 % y 30 %. Las muestras analizadas exponen una baja disponibilidad de fósforo, especialmente en el subsuelo (Cuadro 4). Este elemento es el más limitante para la producción de cultivos en Costa Rica (Méndez, 2012). La escasez de fósforo restringe fuertemente la producción de café (Reis, Guimarães, Neto, Guerra, & Curi, 2011; Dias, Neto, Guimarães, Reis, & Oliveira, 2015), por lo que es fundamental proveer este nutriente al sistema agroforestal si se desea promover un rendimiento adecuado.

Tanto el hierro como el manganeso se encontraron en concentraciones fuera del rango recomendado. No obstante, no existen registros de problemas fisiológicos o productivos en café ocurridos por exceso de hierro o la deficiencia de manganeso por lo que se pueden considerar una preocupación menor.

Cuadro 4. Fósforo y elementos menores del suelo en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.

Área de muestreo	Profundidad	P (mg/L)		Zn (mg/L)		Mn (mg/L)		Fe (mg/L)		Cu (mg/L)	
		Valor	Rango ¹	Valor	Rango ¹	Valor	Rango ¹	Valor	Rango ¹	Valor	Rango ¹
1	0-20 cm.	6	B	4	O	4	B	131	A	11	O
	20-40 cm.	3	B	2,3	M	5	M	104	A	10	O
2	0-20 cm.	8	B	4,9	O	6	M	173	A	13	O
	20-40 cm.	3	B	2,6	M	7	M	133	A	7	O
3	0-20 cm.	8	B	4,5	O	6	M	196	A	10	O
	20-40 cm.	5	B	2,8	M	7	M	150	A	8	O

¹Clasificado de acuerdo con Molina y Meléndez (2002). B: bajo. M: Moderado. O: Óptimo. A: Alto.

Materia orgánica

La materia orgánica del suelo (MOS) se define como un conjunto de residuos orgánicos de origen animal y/o vegetal, que están en diferentes etapas de descomposición, y que se acumulan tanto en la superficie como dentro del perfil del suelo (Martínez, Fuentes y Acevedo, 2008). Mantener una alta proporción de MOS es un pilar de la agricultura orgánica, debido a que esta propiedad está relacionada con la calidad, la sostenibilidad y la capacidad productiva del mismo (Osman, 2013).

Los suelos del sitio contienen un porcentaje de MOS dentro del rango óptimo (cuadro 5). La MOS cumple un rol fundamental en las funciones físicas, químicas y biológicas del suelo (Osman, 2013). Los suelos con altos contenidos de MOS poseen agregados de partículas de mayor tamaño, por lo que son menos compactos y exhiben excelente capacidad de retención y disponibilidad de agua (Martínez, Fuentes y Acevedo, 2008).

La MOS es una fuente de almacenamiento de nutrientes contenidos en los desechos vegetales. Suelos ricos en MOS presentan mayor actividad biológica de hongos, macroinvertebrados y microinvertebrados, estos organismos cumplen un rol vital en la descomposición de los residuos orgánicos (Martínez, Fuentes y Acevedo, 2008). El proceso de descomposición libera continuamente nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y calcio en formas disponibles para las plantas (Osman, 2013).

Cuadro 5. Contenido de materia orgánica del suelo en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.

Área de muestreo	Profundidad	Porcentaje de materia orgánica	
		Valor	Rango ¹
1	0-20 cm.	9,34	O
	20-40 cm.	6,92	O
2	0-20 cm.	7,92	O
	20-40 cm.	5,93	O
3	0-20 cm.	6,99	O
	20-40 cm.	4,83	O

¹Clasificado de acuerdo con Molina y Meléndez (2002). B: bajo. M: Moderado. O: Óptimo. A: Alto.

Los suelos forestales tropicales suelen tener niveles del MOS constantes, dado un equilibrio dinámico entre las tasas de descomposición y el aporte de materia orgánica de la vegetación (Osman, 2013). No obstante, cuando estos son deforestados y empleados para actividades agrícolas sufren pérdidas de MOS que oscilan entre un 30 % a 50 %, alcanzado inclusive el 100 % en suelos expuestos a fuertes procesos erosivos (Reicosky, 2002. Citado por Martínez, Fuentes y Acevedo, 2008). En un manejo sostenible la MOS debe mantenerse o aumentarse (Lorenz y Lal, 2015).

La disminución de la MOS ocasiona incrementos de las emisiones de gases de infecto invernadero, ya que los suelos pasan de ser sumideros de dióxido de carbono a ser fuentes de emisión (Nair, Kumar, & Nair, 2009). Los SAF tienen la capacidad de

incrementar las proporciones de MOS por los aportes de follaje, ramas y raíces que brindan al sistema. Se estima que los suelos manejados con prácticas agroforestales pueden almacenar entre 30 y 300 Mg C/ha (Nair, Kumar, & Nair, 2009). Para potenciar la cantidad de MOS que contiene un SAF es recomendable plantar especies forestales mixtas que incluyan leguminosas, incorporar los residuos de las podas al suelo y suplementar la nutrición de los cultivos con abonos orgánicos (Lorenz y Lal, 2015).

5.1.3 Capacidad de uso de la tierra

De acuerdo con la metodología para evaluar la capacidad de uso de la tierra, el sitio estudiado se encuentra en la unidad de manejo $IVe_{12}S_{123}d_{12}C_{1234}$. Las principales limitantes para el desarrollo de cultivos son la pendiente y la pedregosidad (Cuadro 6). Las tierras categoría IV son recomendadas para vegetación permanente a semipermanente. Actualmente el terreno es utilizado para pastoreo, lo que corresponde a un uso más intensivo que el permitido por las limitantes agroecológicas del sitio.

Cuadro 6. Capacidad de uso de la tierra en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.

Limitante	Categoría	valor	clase
Pendiente (e_1)	Ondulado (20 %)	4	IV
Erosión (e_2)	Moderada	3	III
Profundidad efectiva (s_1)	Moderadamente profundo (82 cm)	3	III
Textura del suelo (s_2)	Moderadamente fina	2	II
Pedregosidad (s_3)	Pedregoso	4	IV
Fertilidad (s_4)	Alta	1	I
Toxicidad de cobre (s_5)	Leve	1	I
Salinidad (s_6)	Leve	1	I
Drenaje (d_1)	Moderadamente excesivo	2	II
Riesgo de inundación (d_2)	Leve	2	II
Zona de vida (c_1)	bmh -P	3	III
Periodo seco (c_2)	Moderado	2	II
Neblina (c_3)	Moderada	2	II
Viento (c_4)	Moderado	2	II

Cambiar el uso de la tierra actual de pastos arbolados hacia un sistema agroforestal, brindará múltiples beneficios. Cultivos perennes como el café son un uso de la tierra apropiado para el sitio estudiado. Adicionalmente, incorporar árboles al sistema disminuye la tasa de erosión (Beer et al., 1998), producto de una menor escorrentía (Gómez-Delgado et al., 2011; Meylan et al., 2017; Cannavo et al., 2011) y mejoras en la estructura de suelo (Young, 1997). Lo cual brinda mayor fertilidad (Jose, 2009).

En la categoría de uso de la tierra IV es recomendable implementar prácticas de conservación de suelo y aguas muy intensivas (Decreto Ejecutivo 23214-MAG-MIRENEM, 1994). Los sistemas agroforestales son considerados una práctica de conservación apropiada y puede ser complementados con otras como barreras rompevientos, labranza mínima, siembras de contorno, acequias de ladera y aplicación de compost y abonos verdes.

5.1.4 Composición florística

La diversidad arbórea del sitio estudiado consistió en 31 especies (Cuadro 7), pertenecientes a 28 géneros y 21 familias, la especie más abundante fue el Tubú (*montanoa guatemalensis* B.L. Rob. & Greenm.) con 121 individuos, seguida del madero negro (*Gliricidia sepium* Jacq.), guachiplín (*Diphysa americana* [Mill.] M.Sousa) y yos (*Sapium glandulosum* [L.] Morong) con 61, 54 y 51 individuos respectivamente. El 56 % de los individuos censados pertenecen a una de estas 4 especies.

Cuadro 7. Número de individuos de árboles por especie, según la función que cumplen en el sistema agroforestal. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.

Especie	Cerca	Rompevientos	Sombra	Total
<i>Montanoa guatemalensis</i>	7	114	0	121
<i>Gliricidia sepium</i>	61	0	0	61
<i>Diphysa americana</i>	7	40	7	54
<i>Sapium glandulosum</i>	20	1	30	51
<i>Daphnopsis americana</i>	14	5	24	43
<i>Myrsine Coriacea</i>	25	6	6	37
<i>Trichilia havanensis</i>	8	6	22	36
<i>Ehretia latifolia</i>	0	2	24	26
<i>Zanthoxylum fagara</i>	2	14	6	22
<i>Inga punctata</i>	4	1	15	20
<i>Psidium guajava</i>	6	0	11	17
<i>Bursera simaruba</i>	4	12	0	16
<i>Acnistus arborescens</i>	5	3	7	15
<i>Tapirira mexicana</i>	0	8	1	9
<i>Croton niveus</i>	9	0	0	9
<i>Yucca guatemalensis</i>	0	0	7	7
<i>Cupania glabra</i>	0	0	7	7
<i>Croton draco</i>	1	0	5	6
<i>Ficus pertusa</i>	0	0	4	4
<i>Ficus Aurea</i>	1	0	3	4
<i>Zanthoxylum monophyllum</i>	1	0	1	2
<i>Diospyros sp.</i>	0	0	2	2
<i>Citrus sp.</i>	1	0	1	2
<i>Cordia eriostigma</i>	0	0	2	2
<i>Lasianthea fruticosa</i>	1	1	0	2
<i>Erythrina lanceolata</i>	1	0	1	2
<i>Cestrum rasemosum</i>	2	0	0	2
<i>Cecropia obtusifolia</i>	0	1	1	2
<i>Lonchocarpus oliganthus</i>	0	0	1	1
<i>Casimiroa edulis</i>	0	0	1	1
<i>Nectandra salicina</i>	1	0	0	1
Total	180	215	189	584

El sitio contiene un total de 584 individuos con diámetro superior a los 10 cm (Cuadro 7), para una densidad de 106,2 individuos por hectárea, esta densidad es escasa, si se compara con los 555 individuos por hectárea encontrados por Nadkarni, Matelson y Haber (1995), para un bosque primario montano bajo en Monteverde. El área basal encontrada en el sitio fue de apenas de 7,15 m²/ha, muy inferior a los 62 m²/ha reportados por Nadkarni et al. (1995). El sistema agroforestal actual a pesar de que incluye árboles de sombra, cercas vivas y barreras rompevientos (Figura 4) es en términos estructurales muy disímil al bosque ya que apenas aporta un 19 de los individuos y un 12 % del área basal que provee un bosque primario.

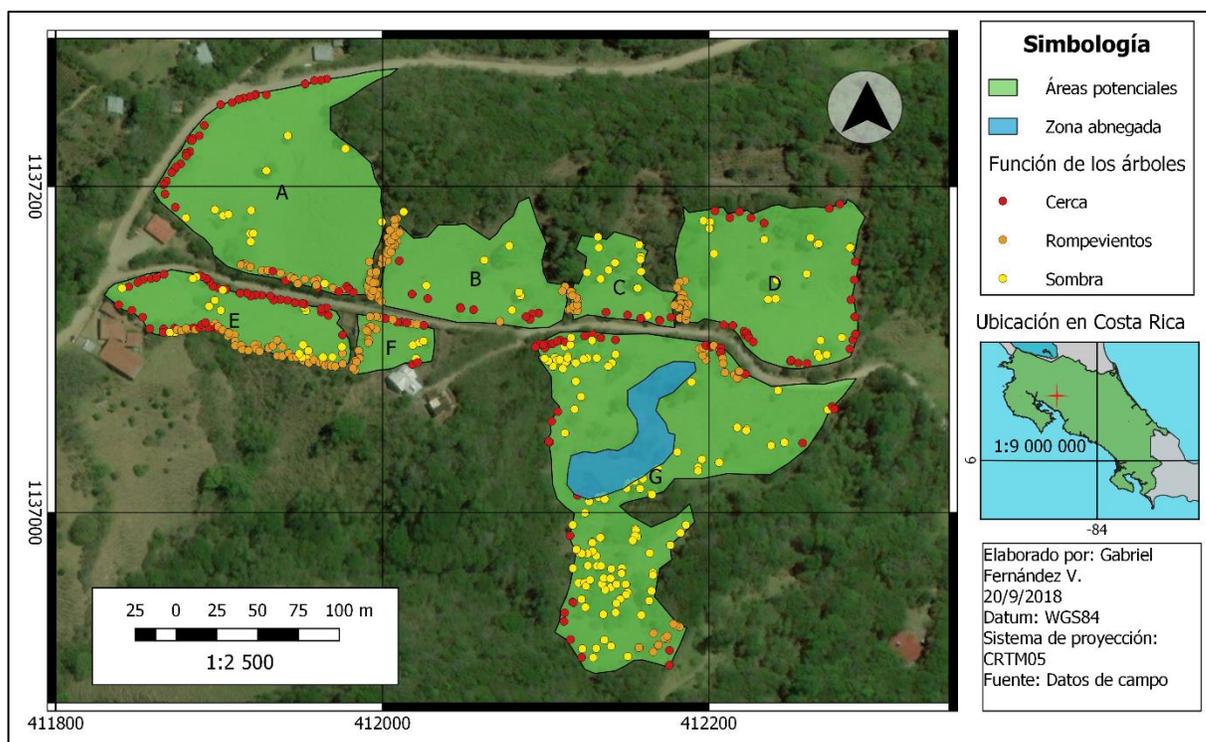


Figura 4. Ubicación de árboles según su función en un área potencial para establecer un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.

La proporción de los árboles por función es relativamente similar; el 36,8 % de los árboles censados cumplen la función de rompevientos, el 32,4 % fueron árboles de sombra, mientras que el 30,8 % de los árboles servían de cerca viva. No obstante, su aporte a la estructura horizontal es muy distinto (Figura 6). El 51 % del área basal es

aportada por árboles de sombra, ya que en muchos casos estos son árboles remanentes del bosque que gozan de grandes dimensiones, las barreras rompevientos aportan el 32 % del área basal, y muestra un pico de área basal en la clase diamétrica comprendida entre 30 y 40 cm, dado que son árboles plantados hace aproximadamente 18 años y que han crecido en condiciones similares, las cercas vivas aportan apenas un 17 % del área basal.

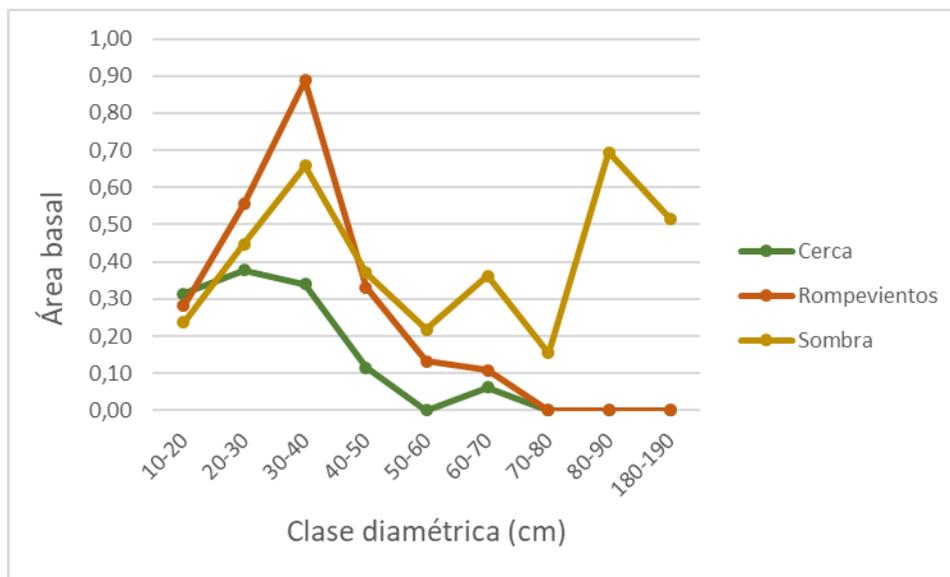


Figura 5. Distribución diamétrica del área basal de los árboles según su función en un área potencial para establecer un ensayo agroforestal, Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.

Harvey (2000) indica que las barreras rompevientos en Monteverde están compuestas por cuatro especies, Tubú (*M. guatemalensis*), Casuarina (*Casuarina equisetifolia* L.), ciprés (*Cupressus lusitánica* Mill.) y Colpachí (*Croton niveus* Jacq.), en el presente estudio se encontraron 15 especies dentro de las barreras rompevientos del Valle de San Luis (Cuadro 7), no obstante, únicamente 5 de estas especies fueron plantadas para cumplir ese fin; Tubú, guachipelín, Limoncillo (*Zanthoxylum fagara* L.), Cirrí (*Tapirira mexicana* Marchand) e indio desnudo (*Bursera simaruba* [L.] Sarg), el resto de las especies dadas sus dimensiones y abundancia, se presume que se han

establecido naturalmente en las barreras rompevientos, las cuales proveen un hábitat apropiado para la germinación y el establecimiento de semillas (Harvey, 2000; Piper, 2006).

Se encontró una densidad de 34,4 árb/ha para individuos que cumplen el rol de proveer sombra. Esto coincide con lo expuesto por Harvey y Haber (1999) quienes al analizar el rol de los árboles remanentes en la conservación de la biodiversidad en 237 hectáreas de pasturas en Monteverde, encontraron una densidad media de 25 árb/ha. En SAF de café en Costa Rica el número de árboles de sombra por hectárea oscila entre 100 y 300 (Somarraiba, Beer y Muschler, 2001), por lo que el cambio de uso de la tierra implicaría aumentos en la cobertura forestal.

Los árboles de sombra ocasionan que un 14,3 % del área del sitio potencial tenga cobertura de copas (figura 5). La cobertura de copas no se encuentra uniformemente distribuida; Sitios como el C y el G, tienen más de un 20 % de su área cubierta, mientras que Los sitios B y F tienen menos de 7 % de cobertura de copas. El diseño de experimentos agroforestales exige homogeneidad la aplicación de los tratamientos (Atangana, Khasa, Chang & Degrande, 2014). Por lo cual la distribución desigual de la cobertura de copas en el terreno, impide que se puedan utilizar los árboles existentes en para brindar sombra al ensayo agroforestal.

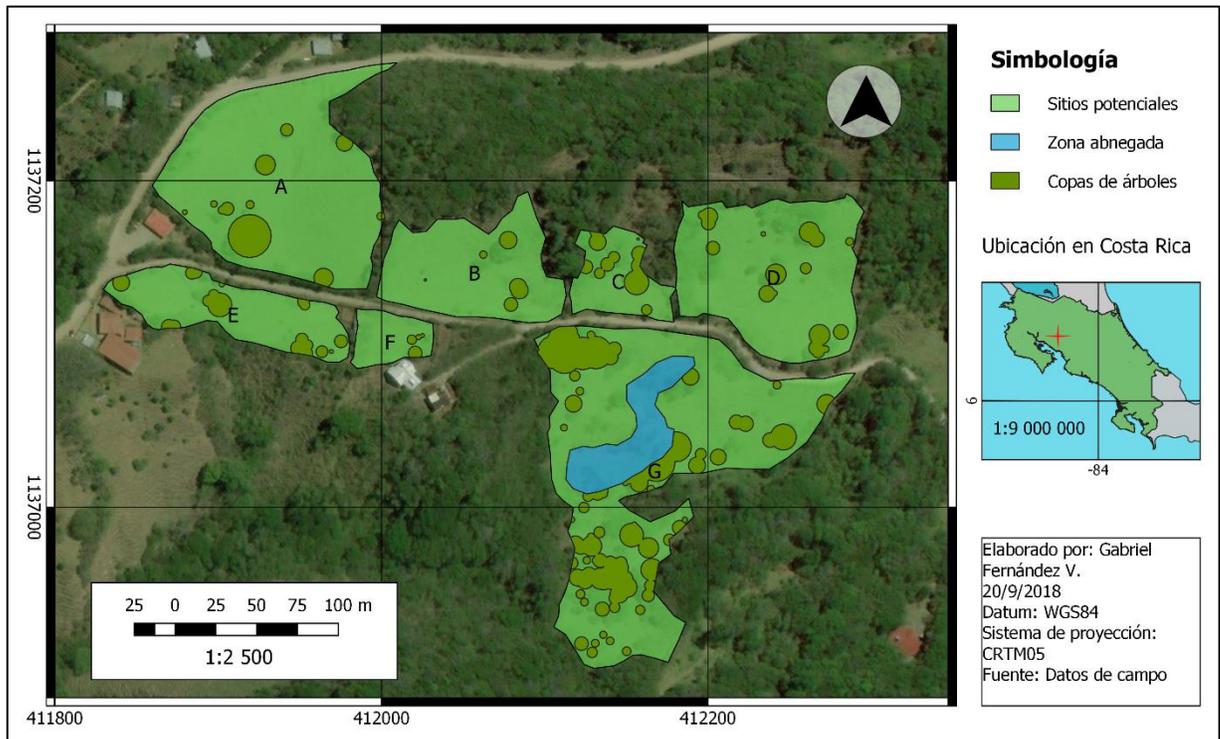


Figura 6. Área de copas en sitios potenciales para el establecimiento de un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica

El valle de San Luis limita al este con la Reserva Biológica Bosque Nuboso Monteverde, un área silvestre que abarca casi 27 000 hectáreas de ecosistemas boscosos y está ubicado dentro del Corredor Biológico Pájaro Campana (CBPC), el cual tiene como objetivo fomentar la conectividad ecológica entre el bosque nuboso de Monteverde y el bosque de manglar del Golfo de Nicoya para facilitar la migración altitudinal de especies nativas (CBPC, 2011). El CBPC se caracteriza por su amplia biodiversidad debido a que alberga el 47 % de las especies de reptiles de Costa Rica, el 51 % de las aves y el 48 % de los mamíferos (CBPC, 2011)

En este corredor biológico los bosques representan un 44,81 % del uso de la tierra, sin embargo, esta cobertura está concentrada en las partes montañosas, o en pequeños parches fragmentados inmersos en una matriz de pastos o cultivos, lo que ocasiona que un 56 % del corredor tenga conectividad estructural boscosa de moderada a muy baja (Chinchilla, 2015).

Cambiar áreas de pastos que a pesar de ser arboladas presentan baja conectividad de copas (figura 5) por sistemas agroforestales implicaría mejorar la conectividad entre los parches de bosque aislados. Los fragmentos interconectados por SAF tienen mayor capacidad de sostener poblaciones viables de flora y fauna y procesos ecológicos intactos que los fragmentos aislados (Laurance, 2004). Lo cual convierte a esta modalidad de uso de la tierra en una excelente alternativa para favorecer a las poblaciones de fauna del CBPC, especialmente a aquellas que enfrentan el desafío de efectuar migraciones altitudinales en busca de recursos alimenticios en un paisaje compuesto por parches boscosos aislados.

5.2 Especies forestales y variedades de café a utilizar en el ensayo

5.2.1 Selección de especies forestales

Se seleccionaron 13 especies forestales que podrían ser potencialmente utilizadas en el ensayo (Cuadro 8). Esta selección está compuesta por grupo de nueve especies presentes en el área de estudio que serán priorizadas en el diseño dado que han demostrado su adaptación a las condiciones de la zona. Entre estas se encuentran árboles como el mastate (*Daphnopsis americana* [Mill.] J.R. Johnst.), el yos, la uruca (*Trichilia havanensis* Jacq.) y la guayaba (*Psidium guajava* L.) los cuales son de importancia para la fauna local. Y árboles como tubú, madero negro, guachipelín, guaba (*Inga punctata* Willd.) y poró (*Erythrina lanceolata* Standl.) que son especies comúnmente utilizadas en sistemas agroforestales por los servicios y productos que proveen.

Además, se investigaron cuatro especies que no estaban presentes en el sitio de estudio guaba (*Inga edulis* Mart.), poró gigante (*Erythrina poeppigiana* [Walp.] O.F. Cook), aguacate (*Persea americana* Mill.) y cedro amargo (*Cedrela odorata* L.) que son ampliamente recomendadas en los sistemas agroforestales de café por sus beneficios como árbol de servicio o por su capacidad de generar ingresos suplementarios.

Cuadro 8. Especies forestales potenciales para utilizar en un ensayo agroforestal de café orgánico, Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.

Nombre común	Nombre científico	Justificación¹
Tubú	<i>Montanoa guatemalensis</i>	1,2
Madero negro	<i>Gliricidia sepium</i>	1,2
Guachipelín	<i>Diphysa americana</i>	1,2,3
Yos	<i>Sapium glandulosum</i>	1
Mastate	<i>Daphnopsis americana</i>	1
Uruca	<i>Trichilia havanensis</i>	1
Guaba	<i>Inga punctata</i>	1,2,3
Guaba	<i>Inga edulis</i>	2,3
Guayaba	<i>Psidum guajava</i>	1,2
Poró	<i>Erythrina lanceolata</i>	1,2,3
Poró gigante	<i>Erythrina poeppigiana</i>	2,3
Aguacate	<i>Persea americana</i>	3
Cedro amargo	<i>Cedrela odorata</i>	3

¹ 1: Especie encontrada en los sitios experimentales, 2: Especie utilizada en sistemas agroforestales de café en Monteverde, 3: Especie recomendada en la literatura para sistema agroforestales de café.

Tubú (*Montanoa guatemalensis*)

Tubú es un árbol de pequeñas dimensiones (3-15 m de altura) que pertenece a la familia Asteraceae. Esta especie es plantada comúnmente como barrera rompevientos en el área de Monteverde, debido a que posee un patrón de crecimiento en varios fustes, tiene una copa densa y tupida, presenta resistencia al viento y exhibe tasas de supervivencia muy altas (Piper, 2006). En la zona de Monteverde aprovechan la madera resistente del tubú para hacer postes de cerca.

Madero Negro (*Gliricidia sepium*)

El madero negro es una especie de árbol pequeña (2-15 m) de altura perteneciente a la familia Fabaceae, es comúnmente utilizada en los sistemas agroforestales como cerca viva debido a que es posible establecer esta especie fácilmente utilizando estacas. Una vez plantada requiere poco manejo salvo a descopas para controlar su tamaño, los residuos de la poda sirven como abono orgánico en el suelo dado que se

descomponen rápidamente y tienen un alto contenido de nitrógeno (Cordero y Boshier, 2003).

Guachipelín (*Diphysa americana*)

Es una especie de árbol que puede alcanzar alturas de hasta 15 metros, tiende a ramificar desde una baja altura y producir una copa extensa. Por ser una especie leguminosa fijadora de nitrógeno capaz de proveer madera altamente resistente a la pudrición, ha sido incorporada en sistema agroforestales como cerca vivas y cortinas rompevientos (Cordero y Boshier, 2003). Debido a su alta tasa de crecimiento en tamaño y en diámetro de copa es recomendable para sombra de especies perennes (Hall & Ashton, 2016).

Yos (*Sapium glandulosum*)

Es un árbol pequeño de la familia Euphorbiaceae que rara vez supera los 12 metros de altura. Tiene la capacidad de colonizar zonas abiertas y perturbadas lo cual explica su abundancia en las pasturas de Monteverde (Harvey & Haber, 1999). No cumple con funciones de importancia para el ser humano, pero es una especie fundamental para conservar la diversidad; en la zona de Monteverde Sheldon y Nadkarni (2013) reportan que individuos de esta especie que crecen en pasturas son visitados por 52 especies de aves distintas, mientras que (Wheelwright, Haber, Murray & Guindon, 1984) aseguran que en Monteverde los frutos de esta especie son consumidos por más de 20 especies de aves.

Mastate (*Daphnopsis americana*)

El Mastate es un arbusto o árbol perteneciente a la familia Thymelaeaceae. No existen reportes sobre sus usos potenciales o historia natural. Se presume que su abundancia en las pasturas de Monteverde es producto de la capacidad que posee esta especie para colonizar en zonas abiertas y competir con efectivamente con las especies de pasto (Harvey, 2000). En el área de Monteverde se reportan 5 especies de aves que utilizan el fruto del mastate como alimento (Wheelwright, et al, 1984).

Uruca (*Trichilia havanensis*)

Es una especie de árbol de porte pequeño de la familia Meliaceae. Al igual que el mastate, la abundancia de esta especie en las pasturas de Monteverde se debe a su capacidad de establecerse naturalmente en estos sitios (Harvey, 2000), no a los productos o servicios que brinda. Se reportan que sus frutos son ingeridos únicamente por una especie de ave en el área de Monteverde: el toledo de cola larga (*Chiroxiphia linearis*) (Wheelwright, et al, 1984).

Guaba (*Inga punctata*)

Inga Punctata es una especie utilizada comúnmente como árbol de servicio en cafetales desde México hasta Colombia (Soto-Pinto, Perfecto, Castillo-Hernandez, & Caballero-Nieto, 2000), debido a su crecimiento rápido, copa baja y ancha, capacidad de brindar leña y frutos comestibles (Peeters, Soto-Pinto, Perales, Montoya, & Ishiki, 2003), resistencia a la herbívora (Koptur, 1984) y sobre todo su habilidad de fijar en el suelo nitrógeno atmosférico dada la relación simbiótica que establecen las raíces de la guaba con bacterias (Batterman, Wurzburger, & Hedin, 2013). Los caficultores de la Península de Nicoya consideran los árboles de guaba (*Inga spp.*) junto a los árboles de poró (*Eythina spp.*) como las mejores especies para brindar sombra al café (Albertin y Nair, 2004).

Guaba (*Inga edulis*)

Al igual que *Inga punctata*, *Inga edulis* es ampliamente utilizada como árbol de servicio tanto en cafetales como en plantaciones de cacao. Posee una alta tasa de supervivencia y crecimiento (Tiki & Fisher, 1998), capacidad de producir altas cantidades de biomasa e incrementar la disponibilidad de nitrógeno en el suelo (Kanmegne, Bayomock, Duguma, & Ladipo 2000). Puede soportar una amplia variedad de condiciones ambientales; suelos con acidez comprendida entre 4,5 y 8, precipitación entre 800 mm y 4000 mm y temperaturas entre 18 °C y 35 °C (Cordero y Boshier, 2003). Cuando se desea asociar esta especie con café, es recomendable establecerla de 1 año a 9 meses antes de sembrar el café para crear un ambiente

propicio, antes del establecimiento del café, se deben realizar podas de formación para eliminar las ramas bajas y fomentar la creación de una copa baja y circular, el programa de podas debe continuar todos los años antes de la estación lluviosa, a partir del tercer año es recomendable iniciar con un programa de raleos para mantener los niveles de sombra en los rangos deseados (Cordero y Boshier, 2003).

Guayaba (*Psidium guajava* L.)

Es un arbusto o árbol pequeño de la familia Myrtaceae, tiene un tronco ramificado a baja altura y una copa irregular, su importancia comercial se encuentra principalmente en su fruto el cual puede ser utilizado para pastas, jaleas y pulpas (Gutiérrez, Mitchell & Solís, 2008). Es común encontrar esta especie como árboles aislados en potreros dado que el ganado vacuno se alimenta de sus frutos y dispersan las semillas en las pasturas (Cordero y Boshier, 2003). Albertin y Nair (2004) encontraron que la guayaba se encuentra entre las especies más comúnmente utilizadas para brindar sombra al café entre caficultores de la Península de Nicoya, los productores afirman que este árbol se establece naturalmente y es compatible con el cultivo de café.

Poró (*Erythrina lanceolata*)

Erythrina lanceolata es un árbol de hasta 10 metros de alto, común en los bosques montanos desde Honduras hasta Panamá (Holdridge & Poveda, 1975). Ha sido ampliamente utilizado en la agroforestería como árbol de sombra en cultivos perennes o como cerca viva debido a su habilidad de producir biomasa rica en nitrógeno e incrementar la fertilidad del suelo cuando se le expone a un régimen de podas parciales (Frank & Eduardo, 2003). Esta especie es apreciada por los productores del área de Monteverde los cuales la plantan comúnmente como cerca viva (Harvey & Haber, 1999).

Poró gigante (*Erythrina poeppigiana*)

El poró gigante es una especie leguminosa cuyo rango natural está comprendido entre Bolivia y Panamá, sin embargo, ha sido naturalizada en todo América Central y México, así como en países africanos y del sudeste asiático (Cordero y Boshier, 2003).

La popularidad de esta especie en sistemas forestales se debe a que es una especie de rápido crecimiento, fácil propagación y que posee excelente respuesta ante las podas (Russo, 1991).

En sistemas agroforestales con café es recomendable plantar el poró gigante con un espaciamiento de 6x6 m y podarlo a unos 2 metros de altura dos veces por año para regular la entrada de luz, los residuos de la poda deben ser incorporados al suelo de manera homogénea como abono verde lo cual favorece al control de malezas y la fertilización del suelo (Tully, Lawrence & Scanlon, 2012). Esta especie es capaz de aportar entre 70 y 300 kg de nitrógeno y entre 5000 y 12 000 kg de materia orgánica por hectárea por año (Beer, 1988; Tully & Lawrence, 2011), lo anterior le permite a caficultores que incorporan el poró en sus plantaciones utilizar la mitad de fertilizante nitrogenado que utilizan los productores que siembran café sin sombra (Reynolds-Vargas & Richter, 1995). En un ensayo de café bajo manejo orgánico con diferentes especies de sombra, fueron las parcelas plantadas con *E. poeppigiana* las únicas que presentaron rendimientos similares a las de un sistema convencional (de Virginio Filho et al., 2015).

Esta especie es capaz de tolerar rangos muy amplios de condiciones ambientales; altitudes desde los 50 hasta los 2400 msnm, precipitaciones entre 1000 y 4000 mm por año y temperaturas ente 18 y 28 °C, crece bien en suelos ultisoles e inceptisoles, con pH de 4,5 a 7,2 (Cordero y Boshier, 2003).

Aguacate (*Persea americana*)

El aguacate es una especie de árbol originaria de México y Guatemala, esta especie no ha sido extensamente explorada como opción para asociar con el cultivo de café en Costa Rica, pero ha sido utilizada en sistemas tradicionales en México (Bandeira, Martorell, Meave & Caballero, 2005). Para cultivar aguacate asociado a café se recomienda utilizar un distanciamiento de 7 a 12 metros entre árboles, el aguacate se debe podar antes del inicio de la temporada lluviosa con el objetivo de darle una forma abierta al árbol y mantener los niveles de sombra apropiada, preservando ramas

gruesas capaces de soportar los embates del viento y el peso de los frutos (Anacafe, 2004). El sistema de aguacate con café tiene el potencial de ser altamente rentable (Castro, 2017), lo que convierte al aguacate en una especie llamativa para diversificar el cultivo de café. Este árbol crece desde los 400 hasta los 1800 msnm, soporta precipitaciones comprendidas entre 1200 y 2000 mm anuales, y temperaturas entre 18 y 25 °C, prefiere suelos con pendientes inferiores al 30 % con pH entre 5.5 a 6.5 (Pérez, Ávila y Coto, 2015).

Cedro amargo (*Cedrela odorata*)

Es un árbol de fuste recto y cilíndrico que alcanza hasta 40m de altura, posee una copa irregular y rala (Rojas-Rodríguez & Torres-Córdoba, 2013), estas características junto a la excelente calidad y precios de su madera ha hecho que el cedro amargo sea una especie común en los cafetales de México y Centroamérica. Existe información disponible sobre el establecimiento, manejo y crecimiento de esta especie en sistemas agroforestales (Cordero y Boshier, 2003). Esta especie tiene el potencial de crecer 3 cm de diámetro y 2,2 metros de alto por año en sistemas agroforestales con café (González-Rojas, Murillo-Cruz, Virginio-Filho & Ávila-Arias, 2017). La principal amenaza que enfrenta esta especie es la polilla barrenadora de tallos *Hypsipilla grandella*, pero el ataque de esta plaga disminuye cuando el cedro se planta en combinación con otras especies de árboles y cultivos perennes Centroamérica (Ramírez-García, Vera-Castillo, Carrillo-Anzures, & Magaña-Torres, 2008). En años recientes se han realizado esfuerzos para mejorar el material genético disponible de esta especie y actualizar los modelos de crecimiento existentes (Murillo et al., 2015). Las condiciones ambientales que prefiere el cedro amargo son una altitud de 0 a 1200 msnm, precipitación comprendida entre 1200 mm y 3000 mm, con una temperatura media anual de 20 °C a 32 °C, suelos profundos y fértiles con un pH entre 5 y 7 (Cordero y Boshier, 2003).

Se optó por utilizar en los diseños experimentales a las especies guaba (*Inga punctata*) y poró (*Erythrina lanceolata*), debido a que son dos especies leguminosas de las cuales se cuenta con bibliografía que respalda su adaptación a sistemas

agroforestales de café, dada su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico y resistir las podas. Cuentan con la ventaja de estar presentes en los sitios experimentales lo cual respalda su capacidad de adaptarse a las condiciones agroecológicas de la zona. Además, se propone un diseño que incorpore especies maderables, debido a la capacidad de incrementar las reservas de carbono del sistema y aportar un ingreso adicional a los productores. Se seleccionó la especie cedro amargo (*Cedrela odorata*) debido a que cuenta con experiencia de manejo en cafetales y material genético superior.

5.2.2 Selección de variedades de café.

Se utilizarán 2 variedades: Costa Rica 95 y Obatá. La primera fue desarrollada por el ICAFE, y liberada en 1995. Es una variedad de introgresión lo que significa que posee rasgos genéticos de la especie *Coffea canephora* lo cual le brinda resistencia a la roya (*Hemileia vastatrix*). Estos rasgos se obtienen al cruzar Híbrido de Timor (*C. arabica* x *C. canephora*) con caturra (por ello se encuentra dentro del grupo de los catimores). Costa Rica 95 es ampliamente utilizada en la zona de Monteverde, a pesar de que esta variedad es recomendada principalmente para zona cálidas debido a que es sumamente susceptible al ojo de gallo (*Mycena citricolor*), especialmente en regiones cafetaleras donde prevalecen las condiciones agroecológicas de alta precipitación, alta humedad relativa y frecuente nubosidad (Ramírez, 2014).

La variedad Obatá es también una variedad de introgresión, lo cual le brinda resistencia a la roya, esta variedad se obtuvo al cruzar Híbrido de Timor con Villa Sarchí (por ello se encuentra dentro del grupo de los sarchimores). Fue desarrollada por el instituto agronómico de Sao Paulo en 1999, y fue ofrecida en Costa Rica por el ICAFE a partir del 2014, después de haber sido sometida a diversas investigaciones en varias zonas cafetaleras del país, donde demostró ser una variedad altamente productiva, resistente a la roya y de buena calidad de taza (Ramírez, 2015).

5.3 Diseño experimental del sistema agroforestal

Se utilizará un diseño factorial en parcelas divididas con dos factores de tratamiento a saber: sombra y variedad, el primero con tres niveles (pleno sol, sombra con especies leguminosas y combinación de sombra entre especie leguminosa y especie maderable, el segundo con dos niveles (Costa Rica 95 y Obatá). para un total de 6 tratamientos, cada tratamiento tendrá 4 repeticiones, por lo que en total se establecerán 24 parcelas (Figura 7).

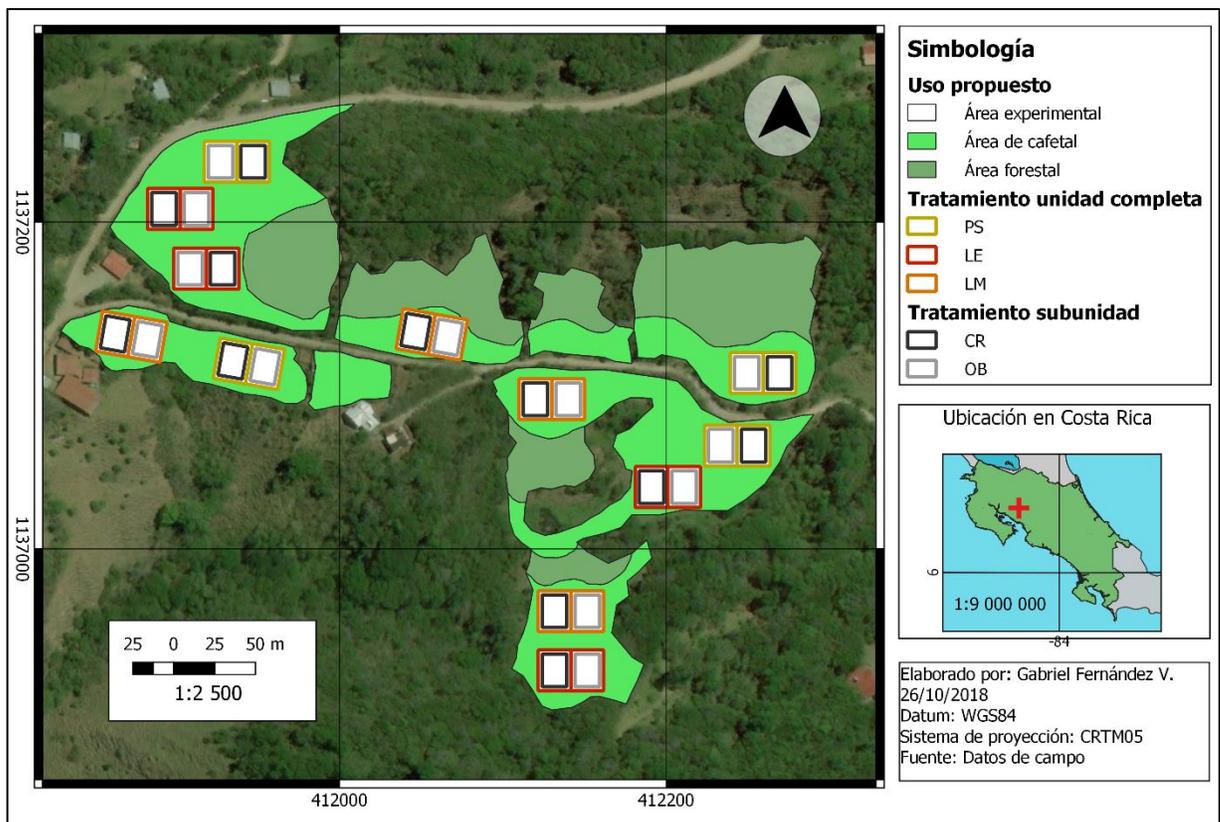


Figura 7. Distribución de las parcelas y los tratamientos de una propuesta de diseño experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.

El objetivo de este diseño es minimizar el número de tratamientos e incluir más de 3 repeticiones por tratamiento para así poder detectar diferencias entre estos, de acuerdo con lo recomendado por Somarraiba, Beer y Muschler (2001) para el establecimiento de ensayos en sistemas agroforestales.

La dificultad de encontrar sitios homogéneos con las dimensiones para acomodar las parcelas, ocasionada por la naturaleza quebrada y segmentada del terreno disponible para establecer el ensayo experimental, obliga a que las parcelas estén distribuidas de una manera irregular (figura 7). La distribución desarreglada de las parcelas en el terreno no es ideal, pero es común en experimentos de SAF (Atangana et al., 2014).

En ensayos agrícolas es recomendable evitar terrenos con fuertes pendientes, en caso contrario orientar el lado largo de la parcela paralelo a la dirección de la pendiente para abarcar homogéneamente la variabilidad que brinda la irregularidad del terreno (Steel y Torrie, 1997). Sin embargo, para experimentos de SAF se recomienda utilizar sitios marginales representativos de las áreas de influencia (Atangana et al., 2014), en este caso el relieve irregular y las fuertes pendientes reflejan las condiciones prevalentes de los suelos del CBPC.

Como se desean estudiar 2 factores y la manera en que estos interactúan es necesario adoptar un arreglo factorial. Se optó por un diseño de parcelas divididas dado que existe un factor (variedad de café) que es factible aplicarlo en las subunidades mientras que el factor de tipo de sombra se debe aplicar a las unidades completas, debido a que el tipo de sombra es más práctico aplicarlo a porciones grandes del terreno y porque los árboles pueden ejercer efectos en las parcelas vecinas afectando los resultados (Atangana et al., 2014). A las parcelas se les aplicó una doble aleatorización; el tratamiento de sombra se asignó aleatoriamente a las unidades completas, y el tratamiento de la variedad de café también se asignó al azar a las subunidades.

Las dimensiones de las parcelas (Figura 8) serán las mismas que las utilizadas por Virginio Filho et al. (2015) y Hagggar et al. (2011); parcelas de 500 m² (20 m x 25 m) con parcelas de medición de 300 m² (15 m x 20 m), al juntar estas dos parcelas, se obtiene una parcela grande de 1000 m² (40 m x 25 m). Cada parcela de medición tendrá un área de amortiguamiento de 2,5 metros de ancho, con miras a reducir el efecto de borde. Como las subparcelas contiguas tienen el mismo tratamiento de tipo

de sombra y las parcelas grandes no están contiguas (Figura 7), no se recomienda utilizar un borde de mayor dimensión (Langton, 1990).

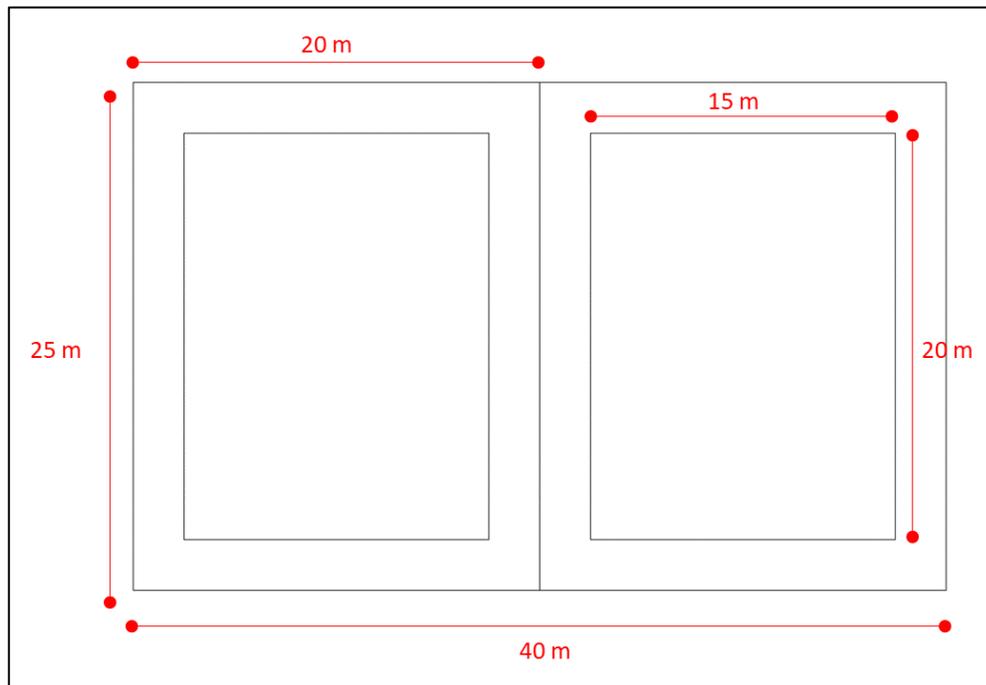


Figura 8. Dimensiones del diseño de parcelas divididas a utilizar en un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.

Las plantas de café se sembrarán con la densidad que recomienda el ICAFE (2011), un distanciamiento de 1 metro entre plantas y dos metros entre hileras, por lo que habrán 250 cafetos por parcela y 150 en la parcela de medición. Mientras que las especies forestales se establecerán con el distanciamiento inicial de 5x5 sugerido por Virginio Filho et al. (2015) lo que significa que habrán 20 árboles en cada parcela y 12 árboles en cada parcela de medición. Para el tratamiento de sombra de leguminosas se combinarán las especies guaba (*Inga punctata*) y poró (*Erythrina lanceolata*), mientras que para el tratamiento de leguminosa y maderable se utilizarán las especies guaba (*Inga lanceolata*) y cedro (*Cedrela odorata*) (Figura 9).

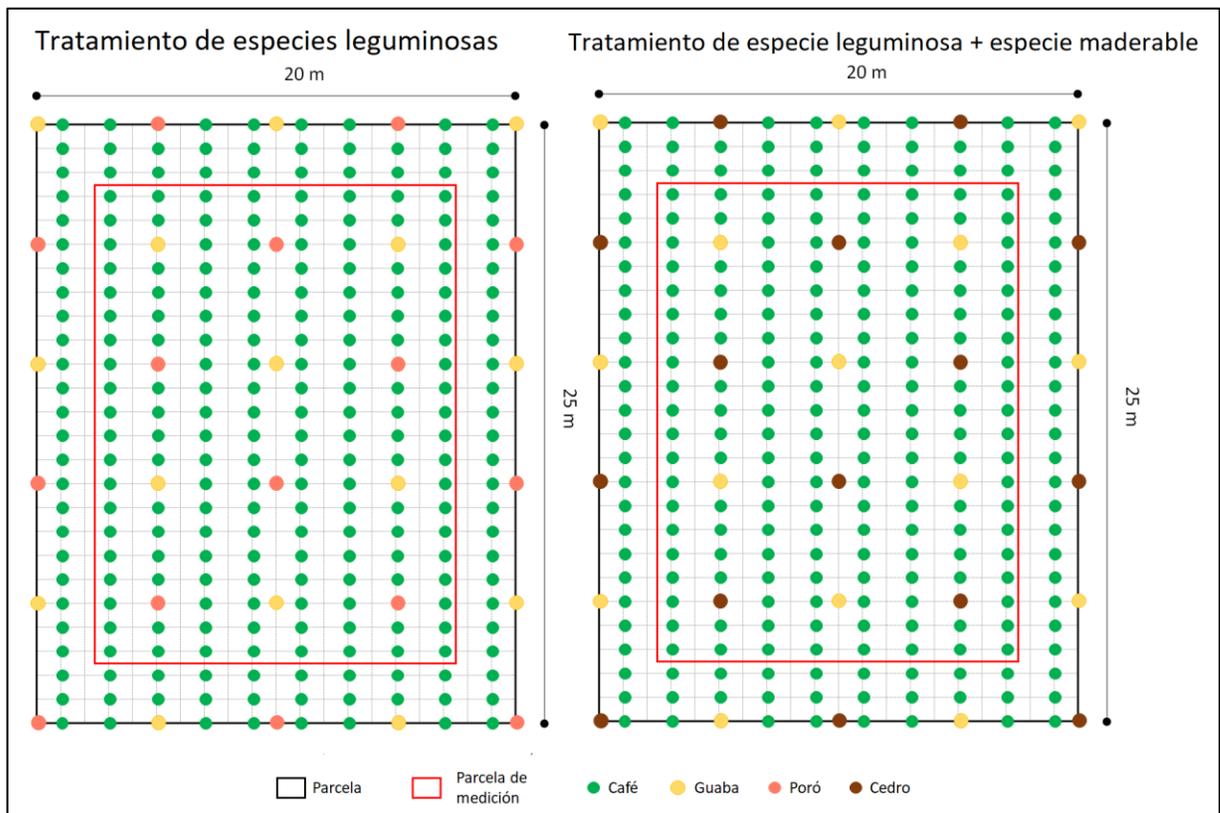


Figura 9 Distribución de las plantas de café y los árboles para dos tratamientos distintos de tipo de sombra a utilizar en un ensayo experimental de café orgánico. Monteverde, Puntarenas, Costa Rica.

El diseño experimental se realizó siguiendo las recomendaciones y lecciones encontradas en la literatura sobre ensayos agroforestales. No obstante, la misma literatura también hace hincapié en la importancia de discutir los objetivos de investigación y el diseño experimental con un estadista previo a la implementación en campo del experimento (Atangana et al., 2014).

Para establecer el experimento se desea eliminar la menor cantidad de árboles, no obstante, dada la homogeneidad que deben presentar las parcelas, es necesario eliminar todos aquellos árboles que se encuentren en el área experimental, así como podar árboles cuya copa ejerza sombra sobre estas áreas. En total se deberán cortar 62 árboles: principalmente yoses (12), mastates (10), y urucas (9). De los árboles a remover, solamente 5 se podrían considerar remanentes del bosque dadas sus dimensiones, se tratan de 1 higuerón blanco (*Ficus aurea*) de 190 cm de diámetro 2

raspaguacales (*Ehretia latifolia*) de 87 cm y 65 cm de diámetro, y dos higuitos (*Ficus pertusa*) de 65 y 63 cm de diámetro.

6. CONCLUSIONES

Se cuenta con un área de 5,5 hectáreas para establecer el ensayo. Sin embargo, 1,7 hectáreas se encuentran en áreas con alta pendiente y se recomienda reforestarlas por lo que el área efectiva es de 3,8 hectáreas.

Los suelos del sitio potencial no cuentan con problemas de acidez, poseen un contenido adecuado de bases intercambiables con excepción al magnesio el cual se encuentra cantidades medias y su disponibilidad puede verse limitada por el desbalance que muestra este elemento respecto al calcio. El fósforo también mostró una disponibilidad baja. El contenido de materia orgánica del suelo fue óptimo.

El desarrollo de cultivos anuales o pastos en el sitio analizado podría ser limitado por las condiciones de pendiente y pedregosidad, lo cual lo ubican en la clase de uso de la tierra IV. Esta clase es recomendada para cultivos perennes.

El área estudiada cuenta con un total de 584 árboles de 31 especies; 180 árboles en cerca viva, 215 árboles en barreras rompevientos y 189 árboles de sombra. La densidad arbórea es de 106 árb/ha y un área basal de 7.15 m²/ha.

Se optó por utilizar las especies guaba (*Inga punctata*), poró (*Erythrina lanceolata*) y cedro amargo (*Cedrela odorata*) debido a que se adaptan a las condiciones agroecológicas del sitio y existen experiencias en SAF de café con estas especies.

Se utilizarán las variedades de café Costa Rica 95 y Obatá. Ambas muestran alta producción, resistencia ante la roya, buena calidad de tasa y disponibilidad de semilla

En el diseño experimental se evaluarán 3 tratamientos de sombra (pleno sol, combinación de especies leguminosas y especie leguminosa con especie maderable) y dos tratamientos de variedades de café, en total 6 tratamientos, cada tratamiento tendrá 4 repeticiones por lo que se ocupan establecer 24 parcelas. Se optó por un

diseño de parcelas divididas, el tratamiento de sombra se empleará en las unidades completas, mientras que la variedad de café en las subunidades. Cada parcela de medición contará con 150 plantas de café y 12 árboles.

7. REFERENCIAS

- Albertin, A., & Nair, P. K. R. (2004). Farmers' perspectives on the role of shade trees in coffee production systems: An assessment from the Nicoya Peninsula, Costa Rica. *Human ecology*, 32(4), 443-463.
- Alvarado A., & Raigosa, J. (2012). *Nutrición y Fertilización Forestal en Regiones Tropicales*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. Editorama, S.A. San José, Costa Rica. 415 p.
- Anacafe. (2004). Cultivo de aguacate. Ciudad de Guatemala. 25 pp.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C.I. (2013). Agroecología y resiliencia al cambio climático: principios y consideraciones metodológicas. *Agroecología*, 8(1), 7-20.
- Arenas-Clavijo, A., & Armbrecht, I. (2018). Gremios y diversidad de hormigas (Hymenoptera: Formicidae) en tres usos del suelo de un paisaje cafetero del Cauca-Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 66(1).
- Atangana, A., Khasa, D., Chang, S., & Degrande, A. (2013). *Tropical agroforestry*. Springer Science & Business Media. 380 p.
- Babbar, L. I., & Zak, D. R. (1995). Nitrogen loss from coffee agroecosystems in Costa Rica: leaching and denitrification in the presence and absence of shade trees. *Journal of Environmental Quality*, 24(2), 227-233.
- Bacon, C. M., Getz, C., Kraus, S., Montenegro, M., & Holland, K. (2012). The social dimensions of sustainability and change in diversified farming systems. *Ecology and Society*, 17(4).
- Bandeira, F. P., Martorell, C., Meave, J. A., & Caballero, J. (2005). The role of rustic coffee plantations in the conservation of wild tree diversity in the Chinantec region of Mexico. *Biodiversity & Conservation*, 14(5), 1225-1240.

- Batterman, S. A., Wurzburger, N., & Hedin, L. O. (2013). Nitrogen and phosphorus interact to control tropical symbiotic N₂ fixation: a test in *Inga punctata*. *Journal of ecology*, 101(6), 1400-1408.
- Beer, J. (1988). Litter production and nutrient cycling in coffee (*Coffea arabica*) or cacao (*Theobroma cacao*) plantations with shade trees. *Agroforestry systems*, 7(2), 103-114.
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D., & Somarriba, E. (1997). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry systems*, 38(1-3), 139-164.
- Bertsch, F. (1986). *Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica*. EUCR. San José, Costa Rica. 78 p.
- ____ (1998). *La fertilidad de los suelos y su manejo*. San José: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Blackman, A., & Naranjo, M. A. (2012). Does eco-certification have environmental benefits? Organic coffee in Costa Rica. *Ecological Economics*, 83, 58-66.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (1996). *The nature and properties of soils* (No. Ed. 11). Prentice-Hall Inc.
- Briceño, J. A., & Carvajal, J. F. (1973). *El equilibrio entre los metales alcalinos y alcalinotérreos en el suelo, asociado con la respuesta del cafeto al potasio*. Turrialba, Costa Rica.
- Cannavo, P., Sansoulet, J., Harmand, J. M., Siles, P., Dreyer, E., & Vaast, P. (2011). Agroforestry associating coffee and *Inga densiflora* results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. *Agriculture, ecosystems & environment*, 140(1-2), 1-13.
- Cárdenas, S. (2007). *Caracterización morfológica y agronómica de la colección núcleo de café (Coffea arabica L.) del CATIE*. (Tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Cardona, D.A. & S. Sadeghiankh. (2005). *Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelo establecidas con café bajo sombra y a plena exposición solar*. *Cenicafé* 56, 348-364.

- Castro-Tanzi, S., Dietsch, T., Urena, N., Vindas, L., & Chandler, M. (2012). Analysis of management and site factors to improve the sustainability of smallholder coffee production in Tarrazú, Costa Rica. *Agriculture, ecosystems & environment*, 155, 172-181.
- Castro-Tanzi, S. (2017). El calcio es un nutriente limitante en cafetales bajo manejo intensivo de fertilizantes en ultisoles. *Agronomía Costarricense*, 41(1).
- Castro Solís, R.J. 2017. *Almacenamiento de carbono y análisis de rentabilidad en sistemas agroforestales con Coffea arabica en la Zona de los Santos, Costa Rica*. (Tesis de Licenciatura). Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Caudill, S. A., DeClerck, F. J., & Husband, T. P. (2015). Connecting sustainable agriculture and wildlife conservation: Does shade coffee provide habitat for mammals?. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 199, 85-93.
- Cerda, R., Allinne, C., Gary, C., Tixier, P., Harvey, C.A., Krolczyk, L., Mathiot, C., Clément, E., Aubertot, J.N., & Avelino, J. (2016). Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems. *Eur. J. Agron.* 82, 308–319.
- Chaves, R. M., Ten-Caten, A., Pinheiro, H.A., Ribeiro, A. C. F., & DaMatta, F. M. (2008). Seasonal changes in photoprotective mechanisms of leaves from shaded and unshaded field-grown coffee (*Coffea arabica* L.) trees. *Trees* 22:351-361.
- Chaves, A. R., Martins, S. C., Batista, K. D., Celin, E. F., & DaMatta, F. M. (2012). Varying leaf-to-fruit ratios affect branch growth and dieback, with little to no effect on photosynthesis, carbohydrate or mineral pools, in different canopy positions of field-grown coffee trees. *Environmental and experimental botany*, 77, 207-218.
- Chesney, P. (2008). Nitrogen and fine root length dynamics in a tropical agroforestry system with periodically pruned *Erythrina poeppigiana*. *Agroforestry systems*, 72(2), 149-159.

- Chinchilla, R. (2015). *Conservación y manejo integral a través del análisis del uso de la tierra y la fragmentación boscosa en el Corredor Biológico Pájara Campana, Pacífico Central, Puntarenas* (Licenciatura). Universidad de Costa Rica: San Pedro, (Costa Rica), 120 pp.
- Cordero, J., & Boshier, D.H. (Eds). (2003). *Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas*. CATIE/FPR, Turrialba, Costa Rica. 1079 p.
- Corrales, L., (2017). Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2017. San José, Costa Rica. Disponible en: https://estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/023/Ambientales/Corrales_L_2017a.pdf
- Corredor Biológico Pájaro Campana (CBPC). (2011). *Plan estratégico 2011-2016*. Monteverde, Costa Rica.
- de Carvalho Gomes, L., Cardoso, I. M., de Sá Mendonça, E., Fernandes, R. B. A., Lopes, V. S., & Oliveira, T. S. (2016). Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. *Agricultural and forest meteorology*, 224, 30-39.
- DaMatta, F.M. (2004). Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Res.* 86, 99–114.
- 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.
- Damiani, O. (2005). *Adversidad y cambio: estrategias exitosas de pequeños productores de café en Centroamérica*. 1 edición. San José: Serie de publicaciones RUTA
- Da Silva, D. M., Brandão, I. R., Alves, J. D., de Santos, M. O., de Souza, K. R. D., & de Silveira, H. R. O. (2014). Physiological and biochemical impacts of magnesium-deficiency in two cultivars of coffee. *Plant and soil*, 382(1-2), 133-150.
- Decreto Ejecutivo 23214-MAG-MIRENEM, Metodología Determinación Capacidad Uso Tierras Costa Rica. (1994). Diario Oficial La Gaceta.

- Dias, K. G. D. L., Neto, A. E. F., Guimarães, P. T. G., Reis, T. H. P., & Oliveira, C. H. C. D. (2015). *Coffee yield and phosphate nutrition provided to plants by various phosphorus sources and levels*. *Ciência e Agrotecnologia*, 39(2), 110-120.
- Dragusanu, R., Giovannucci, D., & Nunn, N. (2014). The economics of Fair Trade. *Journal of Economic Perspectives*, 28, 217–236.
- Fernandez C, Muschler R (1999) Aspectos de la sostenibilidad de los sistemas de cultivo de café en América Central. En: Bertrand B, Rapidel B (Eds). *Desafíos de la Caficultura en Centroamérica*. IICA, Costa Rica.
- Frank, B., & Eduardo, S. (2003). Biomass dynamics of *Erythrina lanceolata* as influenced by shoot-pruning intensity in Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 57(1), 19-28.
- Goodall, K. E., Bacon, C. M., & Mendez, V. E., (2015). Shade tree diversity, carbon sequestration, and epiphyte presence in coffee agroecosystems: A decade of smallholder management in San Ramón, Nicaragua. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 199, 200-206.
- Gómez-Delgado, F., Roupsard, O., le Maire, G., Taugourdeau, S., Pérez, A., van Oijen, M., Vaast, P., Rapidel, B., Harmand, J. M., Voltz, M., Bonnefond, J. M., Imbach, P., & Moussa, R. (2011). Modelling the hydrological behaviour of a coffee agroforestry basin in Costa Rica. *Hydrology and Earth System Sciences* 15:369-392.
- González-Rojas, M., Murillo-Cruz, R., Virginio-Filho, E., & Ávila-Arias, C. (2017). *Influencia de factores biofísicos y de manejo en el crecimiento de Cedrela odorata L. en asocio con café en Pérez Zeledón, Costa Rica*. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15(36), 46-58.
- Greenberg, R., Bichier, P., Cruz, A., & Reitsma, R. (1997). Bird populations in shade and sun coffee plantations in central Guatemala. *Conservation Biology*, 11, 448–459.
- Grandi, B; Grissi, R., Carvalho, V., Salgado, M., & Venturin, N. 2007. Progreso da ferrugem e da cercosporiose do cafeeiro consorciado com grevilea, com

- ingazeiro e a pleno sol em Lavras – MG. *Ciência e agrotecnologia*. 31(4):1067–1074.
- Gutiérrez, R. M. P., Mitchell, S., & Solis, R. V. (2008). Psidium guajava: a review of its traditional uses, phytochemistry and pharmacology. *Journal of ethnopharmacology*, 117(1), 1-27.
- Haggar, J., Barrios, M., Bolaños, M., Merlo, M., Moraga, P., Munguia, R.,...Virginio, E. de M. (2011). Coffee agroecosystem performance under full sun, shade, conventional and organic management regimes in Central America. *Agroforestry Systems* 82:285-301.
- Hall, J., & Ashton, M. (2016). *Guide to early growth and survival in plantations of 64 tree species native to Panama and the neotropics*. Smithsonian Tropical Research Institute.
- Harvey, C. A., & Haber, W. A. (1999). Remnant trees and the conservation of biodiversity in Costa Rican pastures. *Agroforestry systems*, 44(1), 37-68.
- Harvey, C. A. (2000). Colonization of agricultural windbreaks by forest trees: effects of connectivity and remnant trees. *Ecological Applications*, 10(6), 1762-1773.
- Hernández, J. (2010). *Incidencia de enfermedades foliares del café bajo diversos tipos de sombra y manejo de insumos, en sistemas agroforestales. Turrialba, Costa Rica*. (Licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica: Cartago (Costa Rica), 75 pp.
- Holdridge L.R. (1967). *Life Zone Ecology*. Tropical Science Center, San José, Costa Rica.
- Holdridge, L. R., & Poveda, L. J. (1975). *Árboles de Costa Rica, Vol. 1: Palmas, otras monocotiledóneas arbóreas y árboles con hojas compuestas o lobuladas*. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica
- Ibanez, M., & Blackman, A. (2016). Is eco-certification a win–win for developing country agriculture? Organic coffee certification in Colombia. *World Development*, 82, 14-27.
- Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE) (2004). *Informe sobre la Actividad Cafetalera de Costa Rica*. Heredia, Costa Rica. 70p.

- ____ (2011). *Guía técnica para el cultivo de café*. 1ra ed. Heredia, Costa Rica. 72p.
- ____ (2017). Plan anual operativo. Heredia, Costa Rica. Disponible en: [http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/plan operativo anual/2017-2018/Unidad%20de%20Apoyo%20al%20Financiamiento%20Cafetalero.pdf](http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/plan_operativo_anual/2017-2018/Unidad%20de%20Apoyo%20al%20Financiamiento%20Cafetalero.pdf)
- IFOAM (International Federation of Organic Agriculture Movements). (2011). *Normas básicas de IFOAM: Criterios de acreditación* (en línea). Disponible en <http://www.ifoam.org/>.
- Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2007). *Censo Cafetalero: Turrialba y Coto Brus 2003, Valle Central y Valle Occidental 2004, y Pérez Zeledón, Tarrazú y Zona Norte 2006*. San José, Costa Rica. INEC. 321p.
- ____ (2015). *VI Censo Nacional Agropecuario*. San José, Costa Rica. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00338.pdf>
- ____ (2017). *Estadísticas de Comercio Exterior 2016*. San José, Costa Rica. Disponible en: <http://www.inec.go.cr/sites/default/files/documentos-biblioteca-virtual/recomercioexterior-2016.pdf>
- Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). (2014). *Atlas Digital de Costa Rica 2014* (CD). Cartago, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 1 CD-ROOM
- Jaggi, S., Gupt, V. K., & Sharma, V.K. (2001). Design and analysis of agroforestry experiments: an overview. *Jour. Ind. Soc. of Agroforestry*, 3(2), 120-129.
- Jha, S., & Vandermeer, J. H. (2010). Impacts of coffee agroforestry management on tropical bee communities. *Biological Conservation*, 143(6), 1423-1431.
- Jiménez, A. (2013). *El café en Costa Rica: gran modelador del costarricense*. 1ra ed. San José, Costa Rica: UCR.
- Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry systems*, 76(1), 1-10.
- Kanmegne, J., Bayomock, L. A., Duguma, B., & Ladipo, D. O. (2000). Screening of 18 agroforestry species for highly acid and aluminum toxic soils of the humid tropics. *Agroforestry Systems*, 49(1), 31-39.
- Komar, O. (2006). Priority Contribution. Ecology and conservation of birds in coffee plantations: a critical review. *Bird Conservation International*, 16:1–23

- Koptur, S. (1984). Experimental evidence for defense of Inga (Mimosoideae) saplings by ants. *Ecology*, 65(6), 1787-1793.
- Laurance, S.G.W. (2004). Landscape connectivity and biological corridors. En Schroth, G.A., Fonseca, B., Harvey, C.A., Gascon, C., Vasconcelos, H.L. & Izac, A.M.N. *Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes*. (Eds). Washington, DC: Island Press.
- Leblanc, H. A., McGraw, R. L., & Nygren, P. (2007). Dinitrogen-fixation by three neotropical agroforestry tree species under semi-controlled field conditions. *Plant and Soil* 291(1-2):199-209.
- Leon, J. (2000). *Botánica de los cultivos tropicales*. 3 ed. aum. y rev. San José, CR, IICA. p. 350-364.
- 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.
- Langton, S. (1990). Avoiding edge effects in agroforestry experiments; the use of neighbour-balanced designs and guard areas. *Agroforestry Systems*, 12(2), 173-185.
- Lock, C. (2008). *Protection, production, prosperity: Costa Rican farmers respond to the Windbreaks Project* (Tesis de maestría). University of Missouri-Columbia, Columbia, Estados Unidos.
- Lorenz, K., & Lal, R. (2014). Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 443-454.
- Lyngbæk, A.E., Muschler, R.G., & Sinclair, F.L. (2001). Productivity and profitability of multistrata organic versus conventional coffee farms in Costa Rica. *Agroforest. Syst.* 53, 205–213.
- Macip-Ríos, R., & Muñoz-Alonso, A. (2008). Diversidad de lagartijas en cafetales y bosque primario en el Soconusco chiapaneco. *Revista mexicana de biodiversidad*, 79(1), 185-195.
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.

- Martínez-Salinas, A., DeClerck, F., Vierling, K., Vierling, L., Legal, L., Vílchez-Mendoza, S., & Avelino, J. (2016). Bird functional diversity supports pest control services in a Costa Rican coffee farm. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 235, 277-288.
- Martínez-Sánchez, J.C. (2008). The role of organic production in biodiversity conservation in shade coffee plantations. (Doctorado), University of Washington.
- Mercer, D. E. (2004). Adoption of agroforestry innovations in the tropics: a review. *Agroforestry systems*, 61(1-3), 311-328.
- Meylan, L., Gary, C., Allinne, C., Ortiz, J., Jackson, L., & Rapidel, B. (2017). Evaluating the effect of shade trees on provision of ecosystem services in intensively managed coffee plantations. *Agriculture, ecosystems & environment*, 245, 32-42.
- Méndez, J.C. (2012). *Estudio de la fertilidad de los suelos de Costa Rica con base en los registros de los análisis del laboratorio de suelos y foliares del CIA/UCR durante el período 2006-2010*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2007). *Propuesta de análisis con enfoque en agrocadena en café. Caso: Coope Santa Elena, Monteverde*. San José, Costa Rica.
- ____ (2016). *Informe al congreso cafetalero*. San José, Costa Rica. 66 p.
- Molina, E. y Meléndez, G. (2002). *Tabla de interpretación de análisis de suelos*. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica.
- Montagnini, F. (1992). *Sistemas agroforestales: principios y aplicaciones en los trópicos*. 2 ed. San José, Costa Rica. Organización para Estudios Tropicales (OET). 622 p.
- Murillo, O., Badilla, Y., Rojas, F., Torres, G., Carvajal, D., & Canessa, R. (2015). *Cultivo de especies maderables nativas de alto valor para pequeños y medianos productores*. Cartago, Costa Rica. Recuperado de https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6438/Doc_%20Informe_Final_Especies_Nativas.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Muschler, R., (1997). *Shade or sun for ecologically sustainable coffee production, a summary of environmental key factors*. En: III Semana Científica del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). CATIE, Turrialba, pp. 109–112.
- _____(1999). *Árboles en cafetales*. CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Navarro, S. y Navarro, G. (2003). *Química Agrícola*. Madrid: Mundi Prensa
- Nonato de Souza, H., Goede, de Ron G. M., Brussaard, L., Cardoso, I. M., Duarte, E. M. G., Fernandes, R. B. A., Gomes, L.C., Mirjam M., & Pulleman, M. M. (2012). Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 146: 179-196.
- Nadkarni, N. M., Matelson, T. J., & Haber, W. A. (1995). Structural characteristics and floristic composition of a neotropical cloud forest, Monteverde, Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology*, 11(4), 481-495.
- Nair, P. R. (1993). *An introduction to agroforestry*. Springer Science & Business Media.
- Nair, P. K., Mohan Kumar, B., & Nair, V. D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of plant nutrition and soil science*, 172(1), 10-23.
- Osman, K. T. (2013). *Forest Soils: Properties and Management*. Springer Science & Business Media. 217 p.
- Peeters, L. Y., Soto-Pinto, L., Perales, H., Montoya, G., & Ishiki, M. (2003). Coffee production, timber, and firewood in traditional and Inga-shaded plantations in Southern Mexico. *Agriculture, ecosystems & environment*, 95(2-3), 481-493.
- Pérez, S., Ávila, G., & Coto, O. (2015). El aguacatero (*Persea americana* Mill). *Cultivos Tropicales*, 36(2), 111-123.
- Philpott, S. M., & Armbrecht, I. (2006). Biodiversity in tropical agroforests and the ecological role of ants and ant diversity in predatory function. *Ecological Entomology*, 31(4), 369-377.
- Philpott, S.M., Bichier, P., Rice, R., & Greenberg, R. (2007). Field testing ecological and economic benefits of coffee certification programs. *Conservation Biology*, 21 (4), 975–985.

- Philpott, S. M., Arendt, W. J., Armbrecht, I., Bichier, P., Diestch, T. V., Gordon, C., ... Zolotoff, J. M. (2008), Biodiversity Loss in Latin American Coffee Landscapes: Review of the Evidence on Ants, Birds, and Trees. *Conservation Biology*, 22: 1093-1105.
- Piper, J. K. (2006). Colonization of Tubú (*Montanoa guatemalensis*, Asteraceae) Windbreaks by Woody Species 1. *Biotropica: The Journal of Biology and Conservation*, 38(1), 122-126.
- Picado, W., Ledezma, R., & Granados, R. (2009). Territorio de coyotes, agroecosistemas y cambio tecnológico en una región cafetalera de Costa Rica. *Revista de Historia*. 119-165.
- QGIS Development Team (2018). *QGIS Geographic Information System 3.0.2*. Open Source Geospatial Foundation Project.
- Ramírez, J. (2014). *Situación actual de la variedad CR-95 en Costa Rica*. Comunicaciones técnicas de café N° 4.
- ____ (2015). *Evaluación de nuevas variedades brasileñas con resistencia a roya en Costa Rica*. Comunicaciones técnicas de café N° 31.
- Rapidel, B., Alline, C., Cerdán, C., Meylan, L., Virginio Filho, E., & Avelino, J. (2015). Efectos ecológicos y productivos del asocio de árboles de sombra con café en sistemas agroforestales En F. Montagnini., E, Somarraiba., Murgueito, E., Fassola, H., & Eibl, B. (Eds.). *Sistemas agroforestales: funciones productivas, socioeconómicas y ambientales* (1ra ed., pp. 131-152). Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Reis, T. H. P., Guimarães, P. T. G., Furtini Neto, A. E., Guerra, A. F., & Curi, N. (2011). *Soil phosphorus dynamics and availability and irrigated coffee yield*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(2), 503-515.
- Reynolds-Vargas, J. S., & Richter Jr, D. D. (1995). Nitrate in groundwaters of the Central Valley, Costa Rica. *Environment international*, 21(1), 71-79.
- Rojas, F. R., Canessa, R., & Ramírez, J. (2004). ¿Cómo incorporar linderos de árboles maderables en cafetales?. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 1(3), 51-53.

- Rojas-Rodríguez, F., & Torres-Córdoba, G. (2014). Árboles del Valle Central de Costa Rica: reproducción Cedro amargo (*Cedrela odorata* L.). *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 11(26), 25-27.
- Russo, R. O. (1991). *Erythrina* (Leguminosae: Papilionoideae) A Versatile Genus for Agroforestry Systems in the Tropics. *Journal of Sustainable Agriculture*, 1(2), 89-109.
- Salgado, J.L. (2010). Fijación de carbono en biomasa aérea y rentabilidad financiera de sistema agroforestales con café en Turrialba, Costa Rica y Masatepe, Nicaragua. (Tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Schnabel, F., Virginio Filho, E., Xu, S., Fisk, I. D., Rounsard, O., & Haggard, J. (2017). Shade trees: a determinant to the relative success of organic versus conventional coffee production. *Agroforestry Systems*, 1-15.
- Sheldon, K. S., & Nadkarni, N. M. (2013). The use of pasture trees by birds in a tropical montane landscape in Monteverde, Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology*, 29(5), 459-462.
- Somarriba, E., Beer, J., & Muschler, R. G. (2001). Research methods for multistrata agroforestry systems with coffee and cacao: recommendations from two decades of research at CATIE. *Agroforestry Systems*, 53(2), 195-203.
- Soto-Pinto, L., Perfecto, I., Castillo-Hernandez, J., & Caballero-Nieto, J. (2000). Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 80(1-2), 61-69.
- Steel, R., & Torrie, J. (1997). *Bioestadística: Principios y procedimientos*. McGraw Hill. México, D.F. 622 p.
- Stuckey, D. S., Camacho, F., Vargas, G., Stuckey, S. A., & Vargas, L. (2014). Agriculture in Monteverde, Moving toward sustainability -update 2014. En Nadkarni, N. M., & Wheelwright, N. T. (Eds.). *Monteverde: ecology and conservation of a tropical cloud forest*. Bowdoin's Scholars' Bookshelf.
- Tilki, F., & Fisher, R. F. (1998). Tropical leguminous species for acid soils: studies on plant form and growth in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 108(3), 175-192.

- Tscharntke, T., Clough, Y., Bhagwat, S. A., Buchori, D., Faust, H., Hertel, D., & Scherber, C. (2011). Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes—a review. *Journal of Applied Ecology*, 48(3), 619-629.
- Tully, K. L., & Lawrence, D. (2011). Closing the loop: nutrient balances in organic and conventional coffee agroforests. *Journal of sustainable agriculture*, 35(6), 671-695.
- Tully, K.L., Lawrence, D., & Scanlon, T.M. (2012) More trees less loss: nitrogen leaching losses decrease with increasing biomass in coffee agroforests. *Agric Ecosyst Environ* 161:137–144.
- Van der Vossen, H. A. M. (2005). A critical analysis of the agronomic and economic sustainability of organic coffee production. *Experimental agriculture*, 41(4), 449-473.
- van Kanten, R., & Vaast, P. (2006). Transpiration of Arabica Coffee and Associated Shade Tree Species in Sub-optimal, Low-altitude Conditions of Costa Rica. *Agroforestry Systems* 67(2):187-202.
- Vast, P., & Snoeck, D. (1999). Hacia un Manejo Sostenible de la Materia Orgánica y de la Fertilidad Biológica de los Suelos Cafetaleros. En B. Bertrand & B. Rapidel, *Desafíos de la caficultura en Centroamérica* (1ra ed., pp. 139-169). San José, Costa Rica: CIRAD
- Vergara, C. H., & Badano, E. I. (2009). Pollinator diversity increases fruit production in Mexican coffee plantations: The importance of rustic management systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 129, 117-123.
- Virginio Filho, E. D. M., Casanoves, F., Hagggar, J., Staver, C., Soto, G., Avelino, J., ... Perdomo, Y. (2015). La productividad útil, la materia orgánica y el suelo en los primeros 10 años de edad en sistemas de producción de café a pleno sol y bajo varios tipos de sombra y niveles de insumos orgánicos y convencionales en Costa Rica. En F. Montagnini., E. Somarraiba., Murgueito, E., Fassola, H., & Eibl, B. *Sistemas agroforestales: funciones productivas, socioeconómicas y ambientales* (1ra ed., pp. 131-152). Turrialba, Costa Rica: CATIE.

- Wheelwright N, Haber WA, Murray KG and Guindon C (1984) Tropical fruit-eating birds and their food plants: a survey of a Costa Rican lower montane forest. *Biotropica* 16(3): 173–192
- Williams-Guillén, K., & Perfecto, I. (2010). Effects of agricultural intensification on the assemblage of leaf-nosed bats (Phyllostomidae) in a coffee landscape in Chiapas, Mexico. *Biotropica*, 42(5), 605-613.
- Young, A. 1997. *Agroforestry systems for soil management*. 2 ed. New York, US, CAB Internacional. 320 p.

8. ANEXOS

Anexo 1. Recomendaciones de manejo del componente arbóreo del sistema agroforestal.

Se recomienda durante los primeros años de la plantación con tratamientos de sombra, utilizar la especie higuera (*Ricinus comunis*) como sombra temporal. Esta será eliminada cuando las especies forestales establezcan una sombra permanente. La sombra de la higuera permitirá suprimir el crecimiento de arvenses y disminuir la intensidad de la luz que irradia a las plantas de café recién establecidas Hagggar et al. (2011).

La sombra debe ser manejada para asegurar que sea homogénea en toda la plantación y que tenga una intensidad adecuada para promover el desarrollo de las plantas (Virginio Filho et al. 2015), se recomienda porcentajes de sombra alrededor del 60 % en la temporada seca y 30 % en la lluviosa (Muschler, 1999). Para manejar la sombra que ejercen los árboles se deben adoptar dos prácticas: podas y raleos.

Para las especies leguminosas se deben realizar dos podas anuales; una al inicio de la temporada lluviosa en Julio-Agosto y otra al inicio de la temporada seca en Diciembre-Enero (Payán, Jones, Beer & Harmand, 2009). Las podas se deben realizar a una altura de 2 metros (Tully, Lawrence & Scanlon, 2012), preferiblemente utilizando una motosierra de extensión para incrementar la exactitud de esta labor. Es recomendable en cada poda dejar al menos dos ramas con follaje, para así disminuir el estrés fisiológico ocasionado al árbol y consecuentemente incrementar la cantidad de biomasa anual que este es capaz de producir (Chesney, 2007). Los residuos de la poda deben ser incorporados al suelo como abono verde.

Para el cedro se recomienda realizar anualmente una poda de ramas bajas hasta que el árbol alcance los 8 metros de altura, y realizar podas de formación en caso de que se detecte que el eje principal de crecimiento fue atacado por *Hypsipilla grandella* (González-Rojas, Murillo-Cruz, Virginio-Filho & Ávila-Arias, 2017). La poda de

formación consiste en elegir el mejor rebrote y podar el resto, para que el árbol conserve un fuste recto con valor comercial.

Los raleos se deben efectuar siguiendo criterios técnicos, especialmente para el caso de las especies maderables cuya sombra no es posible regular mediante las podas. La densidad inicial del cedro es de 400 árb/ha, se propone realizar un raleo del 50% en el año 4, un raleo del 50% en el año 8 y un raleo del 25% en el año 10. De esta manera se cumple con las recomendaciones de Elías de Melo que aconseja que la densidad de maderables en cafetales debe ser menor de 100 árb/ha después de los 8 años y de 75-80 árb/ha árboles cuando el cafetal alcance 10 años (Comunicación personal, 24 de Julio del 2018).

Para las especies leguminosas se recomienda efectuar un raleo con una intensidad del 25% en el año 8, y otra poda con intensidad del 33% en el año 10, de tal manera que el manejo de la densidad de especies forestales sea similar al utilizado para el poró (*Erythrina poeppigiana*) en el experimento de Virginio Filho et al. (2015).