

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CRECIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD DE *Coffea arabica* var. Esperanza (L4A5)  
ASOCIADA A TRES ESPECIES FORESTALES CON APORTES DIFERENCIADOS  
DE FERTILIZANTES EN SUELOS DE ORIGEN ALUVIAL DE LA REGIÓN CARIBE  
DE COSTA RICA

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrados  
en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales para optar al grado y título de Doctorado  
Académico en Ciencias Agrícolas

VICTOR HUGO MORALES PEÑA

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2024

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de investigación a mi esposa, Sirlen Kimberly Shedden Núñez, y a mi hija, Valentina Morales Shedden, por su infinita paciencia y amor. ¡Las amo con todas las fuerzas de mi corazón y por siempre!

A mis amados padres, Gladys y Carlos, cuya presencia espiritual siempre me brindan fuerza y apoyo.

A mis hermanos, Juan, Rocío, Marta y Alicia, lo mejor que la vida me ha dado. Mi amor más puro para cada uno de ustedes.

A mis amados sobrinos, Sofía, Juan y Minerva.

A la familia Shedden-Núñez, por acogerme como uno más. ¡Todo mi cariño y aprecio para todas ustedes!

¡A Dios por sobre todas las cosas!

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Universidad EARTH por el apoyo brindado a lo largo de todo el proceso de investigación, por creer en esta idea y por hacer posible lo que ahora y en futuro podrá ser.

Al Dr. Alfredo Alvarado por su incondicional apoyo durante todo el proceso de investigación y por ser una guía importante.

Al Dr. Argenis Mora Garces, profesor y amigo, a quien admiro profundamente y quien me dio su apoyo en las etapas cruciales de la investigación.

Al Dr. Elias De Melo por sus valiosos aportes a la investigación y su apoyo incondicional.

Al Dr. Mario Villatoro por su gran e invaluable apoyo para la culminación de este trabajo doctoral.

A Carlos Sandí, por todo su apoyo y amistad.

A los compañeros Mainor Cubillos, Carlos Mata y Luis Quiros por todo el trabajo en el proyecto.

A todos los graduados y estudiantes de la Universidad EARTH que apoyaron y apoyan las actividades del ensayo con el formidable esfuerzo y voluntad de trabajo.

Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Doctorado Académico en Ciencias Agrícolas



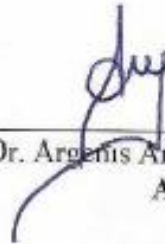
---

Dra. Cristina Chinchilla Soto  
**Representante de la Decana  
Sistema de Estudios de Posgrado**



---

Dr. Mario Villatoro Sánchez  
**Director de Tesis**



---

Dr. Argemis Antonio Mora Garcés  
**Asesor**



---

Dr. Elias de Melo Virginio Filho  
**Asesor**



---

Dra. Catalina Salas Durán  
**Directora**

**Programa de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales**



---

Victor Hugo Morales Peña  
**Candidato**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
HOJA APROBACIÓN .....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	v
RESUMEN .....	x
ABSTRACT.....	xi
ÍNDICE DE CUADROS .....	xii
ÍNDICES DE FIGURAS .....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS .....	xvii
1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
2. OBJETIVOS .....	6
2.1. Objetivo general.....	6
2.2. Objetivos específicos .....	6
3. REVISIÓN DE LITERATURA .....	7
3.1. El café en Costa Rica: una breve reseña histórico-económica .....	7
3.2. <i>Coffea arabica</i> var. Esperanza L4A5: aspectos generales de la planta .....	8
3.3. El manejo agronómico del café .....	11
3.4. La nutrición y fertilización del café.....	12
3.5. La agroforestería en zonas bajas: una opción clave.....	13
3.6. El café de altura versus el café de bajura en Costa Rica.....	14
Literatura citada .....	15

4. CAPITULO 1. CRECIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD DE *Coffea arabica* VAR. ESPERANZA L4A5 A PLENO SOL Y EN ARREGLOS AGROFORESTALES CON FERTILIZACIONES DIFERENCIADAS EN LA REGIÓN CARIBE DE COSTA RICA.

20

<b>Resumen</b> .....	20
<b>4.1. Introducción</b> .....	21
<b>4.2. Materiales y métodos</b> .....	23
4.2.1. Ubicación del área del proyecto.....	23
4.2.2. Zona de vida y geomorfología.....	24
4.2.3. Suelos.....	24
4.2.4. Diseño experimental del ensayo agroforestal basado en Esperanza L4A5 .....	27
4.2.5. Ubicación espacial de los componentes en el diseño experimental.....	28
4.2.6. Prácticas de manejo .....	30
4.2.7. Fertilizaciones diferenciadas.....	31
4.2.8. Variables cuantitativas y cualitativas del estudio .....	33
4.2.8. Registro espacio temporal del porcentaje de sombra.....	36
4.2.9. Análisis de los datos .....	37
<b>4.3. Resultados y discusión</b> .....	40
4.3.1. Evolución del porcentaje de sombra.....	40
4.3.2. Efecto de los tratamientos y sub-tratamientos sobre el crecimiento.....	43
4.3.3. Análisis del crecimiento.....	48
<b>4.4. Conclusiones</b> .....	60
<b>Literatura citada</b> .....	61
5. CAPITULO 2. FENOLOGÍA DE <i>Coffea arabica</i> var. ESPERANZA L4A5 A PLENO SOL Y EN ARREGLOS AGROFORESTALES CON FERTILIZACIONES DIFERENCIADAS EN LA REGIÓN CARIBE DE COSTA RICA. ....	66

<b>Resumen</b> .....	66
<b>5.1. Introducción</b> .....	67
<b>5.2. Materiales y métodos</b> .....	68
5.2.1. Ubicación del área del proyecto.....	68
5.2.2. Clima.....	69
5.2.3. Zona de vida y geomorfología .....	69
5.2.4. Suelos.....	70
5.2.5. Características del diseño experimental.....	70
5.2.6. Registro de datos.....	71
5.2.7. Análisis estadístico .....	74
<b>5.3. Resultados y discusión</b> .....	75
5.3.1. Caracterización fenológica de Esperanza L4A5 establecido en el Caribe de Costa Rica.....	75
5.3.2. Aspectos relevantes del patrón fenológico de Esperanza L4A5 considerando los factores meteorológicos .....	81
5.3.3. Análisis cuantitativo general de la fenología del híbrido Esperanza L4A5.....	84
5.3.4. Análisis de la presencia de nudos florales desarrollados considerando las asociaciones agroforestales y a pleno sol, las fertilizaciones diferenciadas y los factores climáticos temperatura, humedad y lluvias .....	85
5.3.6. Análisis de la presencia de antesis considerando las asociaciones agroforestales y a pleno sol, las fertilizaciones diferenciadas y los factores climáticos temperatura, humedad y lluvias .....	88
5.3.7. Análisis de la presencia de frutos considerando las asociaciones agroforestales y a pleno sol, las fertilizaciones diferenciadas y los factores climáticos temperatura, humedad y lluvias .....	90
<b>5.4. Conclusiones</b> .....	91
<b>Literatura citada</b> .....	93

6. CAPITULO 3. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL HIBRIDO ESPERANZA (L4A5) A <i>Hemileia vastatrix</i> (ROYA) Y <i>Mycena citricolor</i> (OJO DE GALLO) ESTABLECIDOS BAJO DIFERENTES ARREGLOS AGROFORESTALES Y A PLENO SOL BAJO FERTILIZACIONES DIFERENCIADAS EN EL CARIBE DE COSTA RICA.....	97
<b>Resumen</b> .....	97
<b>6.1. Introducción</b> .....	98
<b>6.2. Materiales y métodos</b> .....	99
6.2.1. Ubicación del área del proyecto.....	99
6.2.2. Clima.....	99
6.2.3. Característica del ensayo agroforestal .....	100
6.2.4. Prácticas de manejo de los componentes del ensayo.....	101
6.2.5. Toma de datos .....	103
6.2.6. Análisis de los datos .....	106
<b>6.3. Resultados y discusión</b> .....	108
6.3.1. Análisis de la incidencia de <i>H. vastatrix</i> en los años 2022 y 2023.....	108
6.3.2. Análisis de la severidad de <i>H. vastatrix</i> en hojas y planta.....	109
6.3.3. Análisis del daño por ojo de gallo causada por <i>Mycena citricolor</i> .....	115
<b>6.4. Conclusiones</b> .....	118
6.4.1. Incidencia de roya.....	118
6.4.2. Severidad de roya en hojas y plantas .....	119
6.4.3. Daño por Ojo de Gallo.....	119
<b>Literatura citada</b> .....	120
7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN GENERAL.....	123
<b>7.1. Discusión general</b> .....	123
7.1.1. Crecimiento y productividad de <i>Coffea arabica</i> var. Esperanza L4A5.....	123

7.1.2. Fenología de <i>Coffea arabica</i> var. Esperanza L4A5 a pleno sol y en arreglos agroforestales con fertilizaciones diferenciadas en la Región Caribe de Costa Rica.	124
7.1.3. Evaluación de la resistencia de los híbridos Esperanza (L4A5) a <i>Hemileia vastatrix</i> (roya) y <i>Mycena citricolor</i> (ojo de gallo) establecidos bajo diferentes arreglos agroforestales y a pleno sol bajo fertilizaciones diferenciadas en el Caribe de Costa Rica.	125
<b>7.2. Conclusiones generales</b>	<b>126</b>
<b>Literatura citada</b>	<b>127</b>

## RESUMEN

**Introducción:** El estudio se centró en la evaluación de *Coffea arabica* var. Esperanza (L4A5) en el Caribe de Costa Rica, una región no tradicional para el cultivo de café. Este híbrido se ha estudiado por su adaptabilidad y productividad en zonas bajas, donde las condiciones climáticas y edáficas difieren significativamente de las áreas cafetaleras tradicionales. La investigación consideró la asociación del híbrido con diferentes arreglos agroforestales y la aplicación de fertilizaciones diferenciadas para analizar su impacto en el crecimiento, productividad, fenología y resistencia a enfermedades como la roya (*Hemileia vastatrix*) y el ojo de gallo (*Mycena citricolor*). **Objetivo:** Evaluar el crecimiento y la productividad de *Coffea arabica* var. Esperanza (L4A5) asociado a tres especies forestales y a pleno sol, bajo fertilizaciones diferenciadas. **Área de estudio:** El proyecto se encuentra establecido en la provincia de Limón de Costa Rica, en los predios de la Finca Forestal en la Universidad EARTH, en el cantón Guácimo de la provincia de Limón-Costa Rica. **Metodología:** El arreglo experimental de los diferentes componentes se realizó a través de un diseño experimental de parcelas divididas en bloques completamente aleatorizados, donde se implementaron diferentes tratamientos que incluyeron asociaciones con las especies arbóreas Cenízaro (*Albizia saman*), Guapinol (*Hymenaea courbaril*), Espavel (*Anacardium excelsum*) y Poró (*Erythrina poeppigiana*) y tres tipos de fertilización: física (F1), química (F2) y un control de acidez (Cal). **Resultados:** Los cafetos asociados a los tratamientos con cobertura mostraron mayor crecimiento en altura y menor mortalidad en comparación con los tratamientos a pleno sol. La fertilización diferenciada también tuvo un impacto significativo en la productividad, con diferencias significativas entre los tratamientos. La fenología del café en el Caribe de Costa Rica difiere significativamente de las zonas tradicionales cafetaleras de Costa Rica, principalmente debido a las variaciones climáticas y de altitud. En el Caribe, la floración del híbrido Esperanza L4A5 se caracteriza por dos picos distintivos: uno en marzo y otro en mayo. Este patrón de floración no es uniforme y muestra una considerable variabilidad entre los años. Desde el punto de vista de resistencia, la asociación con árboles y la fertilización diferenciada influyen en la resistencia del híbrido a las enfermedades. **Conclusión:** Los resultados sugieren que es posible cultivar café en zonas bajas mediante el uso de sistemas agroforestales bajo prácticas de manejo adecuadas y adaptadas a la variabilidad climática de la región.

## ABSTRACT

**Introduction:** The study focused on the evaluation of *Coffea arabica* var. Esperanza (L4A5) in the Caribbean region of Costa Rica, a non-traditional area for coffee cultivation. This hybrid has been studied for its adaptability and productivity in low-altitude areas where climatic and soil conditions differ significantly from traditional coffee-growing regions. The research considered the hybrid's association with different agroforestry arrangements and the application of differentiated fertilization to analyze its impact on growth, productivity, phenology, and resistance to diseases such as coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) and American leaf spot (*Mycena citricolor*). **Objective:** To evaluate the growth and productivity of *Coffea arabica* var. Esperanza (L4A5) associated with three tree species and in full sun, under differentiated fertilization. **Study Area:** The project is established in Limón province, Costa Rica, on the grounds of the EARTH University's Forest Farm in Guácimo, Limón province, Costa Rica. **Methodology:** The experimental arrangement of the different components was carried out through a split-plot design in completely randomized blocks, implementing various treatments that included associations with tree species Cenízaro (*Albizia saman*), Guapinol (*Hymenaea courbaril*), Espavel (*Anacardium excelsum*), and Poró (*Erythrina poeppigiana*) and three types of fertilization: physical (F1), chemical (F2), and acidity control (Cal). **Results:** Coffee plants associated with shaded treatments showed greater height growth and lower mortality compared to full-sun treatments. Differentiated fertilization also had a significant impact on productivity, with notable differences among treatments. The phenology of coffee in the Caribbean region of Costa Rica differs significantly from traditional coffee-growing areas in Costa Rica, mainly due to climatic and altitude variations. In the Caribbean, the flowering of the Esperanza L4A5 hybrid is characterized by two distinct peaks: one in March and another in May. This flowering pattern is not uniform and shows considerable variability between years. From a resistance perspective, the association with trees and differentiated fertilization influences the hybrid's resistance to diseases. **Conclusion:** The results suggest that it is possible to cultivate coffee in low-altitude areas by using agroforestry systems with suitable management practices adapted to the region's climatic variability.

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Caracterización de los perfiles de suelo .....	25
Cuadro 2. Análisis químico del área del proyecto considerando profundidades de 0 – 25 y 25 – 50 centímetros .....	26
Cuadro 3. Información general de los componentes del ensayo agroforestales. ....	29
Cuadro 4. Diseño del programa de fertilización con base a la información química del suelo. ....	32
Cuadro 5. Escala basada en el grado de maduración para la selección del grano en las cosechas. ....	34
Cuadro 6. ANOVA de dos factores para las variables diámetro basal y altura. ....	44
Cuadro 7. Comparaciones múltiples de medias de Tukey para las variables diámetro y altura a nivel de tratamiento.....	45
Cuadro 8. Comparaciones múltiples de medias de Tukey para las variables diámetro y altura a nivel de sub-tratamientos. ....	46
Cuadro 9. Mortalidad acumulada a nivel de tratamientos (coberturas y a pleno sol).....	46
Cuadro 10. Mortalidad acumulada a nivel de sub-tratamientos (fertilizaciones diferenciadas).....	47
Cuadro 11. Parámetros de los modelos ajustados para la variable diámetro de la base. ....	51
Cuadro 12. Parámetros de los modelos ajustados para la variable altura de los cafetos ....	52
Cuadro 13. Tasas máximas de crecimiento alcanzadas a nivel de semanas para la variable diámetro de la base. ....	56
Cuadro 14. Tasas máximas de crecimiento alcanzadas a nivel de semanas para la variable altura. ....	56
Cuadro 15. Numero de cafetos por tratamientos (asociación agroforestal).....	73
Cuadro 16. Análisis cuantitativo del desarrollo fenológico del híbrido Esperanza L4A5 (2020-2023) .....	84
Cuadro 17. Resultados de la regresión lineal múltiple para el número de cafetos con nudos floreales desarrollados .....	86
Cuadro 18. Resultados de la regresión lineal múltiple para el número de cafetos con preantesis .....	88

Cuadro 19. Resultados de la regresión lineal múltiple para el número de cafetos con antesis .....	89
Cuadro 20. Resultados de la regresión lineal múltiple para el número de cafetos con frutos .....	90
Cuadro 21. Cuadro de frecuencias de la severidad en hojas de café considerando los componentes del ensayo (adaptación de Capucho et al. 2011).....	113
Cuadro 22. Cuadro de frecuencias de la severidad en plantas de café considerando los componentes del ensayo (Eskes y Toma-Braghini, 1989).....	114
Cuadro 23. Cuadro de frecuencias de daño a partir de la escala diagramática de daño de la enfermedad desarrollada por Pacheco (2012).....	117

## ÍNDICES DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área del ensayo agroforestal basado en híbridos de Coffea arabica var. Esperanza L4A5.....	23
Figura 2. Toma de muestras para la caracterización física de perfiles del suelo siguiendo la guía del USDA-NRC y la tabla Munsell de colores de suelos. ....	25
Figura 3. Diseño de parcelas divididas con estructura de parcelas en bloques completamente aleatorizados. 3a) Distribución de los bloques y tratamientos (interacción árboles-café): C = Albizia saman asociado a café, G + P = Hymenaea courbaril + Erythrina poeppigiana asociado a café, E + P = Anacardium excelsum + Erythrina poeppigiana asociado a café, pleno sol 1 y pleno sol 2 (controles experimentales). 3b) Distribución de los sub-tratamientos (fertilización diferenciada): F1 = fertilización física, F2 = fertilización química y Cal = parcelas solo con encalado (controles).....	28
Figura 4. Distribución espacial en coordenadas XY de los individuos del ensayo agroforestal. ....	29
Figura 5. Control manual de malezas: a) Mantenimiento de drenajes y b) Realización de rodajas o cortas con machete a un radio de 2 metros de la planta. ....	30
Figura 6. Realización de podas. a) Podas generalizadas en los cafetos con el propósito de mantener el área de fertilización y b) Podas de formación de las coberturas arbóreas (en la imagen se realiza la poda del Cenízaro). ....	31
Figura 7. Medición de las variables diámetro a la base (a) y altura total (b) de los cafetos en la semana 24 (inicio de las mediciones). En la fotografía se observa el proceso de medición de la semana 24.....	34
Figura 8. Registro de cosechas. a) recolección de granos maduros. b) clasificación de cerezas de café. c) contabilización de la recolección a nivel de sub-tratamientos. d) proceso de secado al natural.....	35
Figura 9. Metodología del registro del porcentaje de cobertura (sombra) con el uso de la aplicación Canopeo. a) Puntos de toma de datos a nivel de interacción arboles-café y controles experimentales pleno sol 1 y 2. b) Determinación de porcentaje de sombra mediante el uso de la aplicación Canopeo sobre imagen tomada con dron. c) Toma de datos para la verificación de porcentajes de sombra obtenidos desde los cafetos. En la imagen se observa la primera medición del 2020.....	37

Figura 10. Registro aéreo de la evolución espacio temporal de las coberturas de los diferentes componentes del ensayo agroforestal. ....	42
Figura 11. Evolución del porcentaje de sombra a nivel de tratamientos (coberturas). ....	42
Figura 12. Influencia de las coberturas de Cenízaro sobre el control experimental denominado Pleno Sol 1. ....	43
Figura 13. Evolución espacial de la mortalidad en el periodo 2020-2023. ....	47
Figura 14. Valores promedio de diámetro de la base y altura de los cafetos a nivel de tratamientos y sub-tratamientos. ....	50
Figura 15. Curvas de Crecimiento del Diámetro de la Base de cafetos bajo diferentes combinaciones. ....	53
Figura 16. Curvas de crecimiento de la altura de los cafetos bajo diferentes combinaciones .....	54
Figura 17. Curvas de crecimiento de las variables a.) diámetro de la base y b.) altura. ....	58
Figura 18. Producción de cerezas a nivel de asociaciones agroforestales y fertilizaciones diferenciadas .....	59
Figura 19. Ubicación del ensayo agroforestal basado en el híbrido Esperanza L4A5. ....	69
Figura 20. Arreglo espacial del ensayo agroforestal basado en el híbrido Esperanza L4A5. a) Ubicación espacial de los tratamientos (asociación agroforestal). b) Ubicación espacial de los sub-tratamientos (fertilización diferenciada).....	71
Figura 21. Ubicación en coordenadas XY de los cafetos del ensayo. ....	72
Figura 22. Caracterización de los órganos vegetativos aéreos. a) Nudo con la inflorescencia desarrollado. b) nudo con botones florales desarrollados. c) preantesis y d) antesis floral. .	73
Figura 23. Caracterización fenológica del primer año. a) Etapa de adaptabilidad del material vegetal en el vivero. b) Establecimiento de los cafetos en el área del ensayo. c) Mantenimiento del área del ensayo a nivel de control de malezas. d) Primera fertilización de los cafetos considerando las fertilizaciones diferenciadas y las áreas de control experimental con solo encalado. e) Desarrollo pleno de los botones florales. f) Floración. g) Inicio del proceso de llenado de los frutos. h) Desarrollo general de los frutos. i) Desarrollo pleno del fruto. j) Madurez del fruto que da inicio al proceso de cosechas.....	78
Figura 24. Patrón fenológico general del híbrido Esperanza L4A5 establecido en el Caribe de Costa Rica (2019-2023). ....	80

Figura 25. Variaciones mensuales de los factores meteorológicos (2020-2023): a) Temperatura promedio (°C), b) Humedad relativa (%) y c) Precipitación acumulada (mm). .....	83
Figura 26. Ubicación del ensayo agroforestal a largo plazo basado en híbridos de Coffea arabica var. Esperanza L4A5 .....	99
Figura 27. Diseño de parcelas divididas con estructura de parcelas en bloques completamente aleatorizados. a) Ubicación espacial de los bloques, tratamientos (asociación arboles-café) y las áreas con cafetos a pleno sol (Pleno sol 1 y Pleno sol 2). b) Diagrama de fertilizaciones en sub-parcelas dentro del tratamiento. ....	100
Figura 28. Prácticas de control de malezas. a) Uso de moto guarañas para el control de las malezas. b) Uso de azadones para el deshierbe. ....	102
Figura 29. Construcción de la red de drenajes del ensayo. a) Vista frontal del trabajo de excavación para la construcción del sistema de drenajes del ensayo. b) Red final de drenajes construidos (2019).....	102
Figura 30. Poda de las coberturas asociadas a los híbridos de Esperanza L4A5. a) Poda de formación en Espavel ( <i>A. excelsum</i> ) b) Poda de ramas en Cenízaro ( <i>A. saman</i> ) .....	103
Figura 31. Ubicación espacial de los cafetos censados para la determinación de la incidencia de roya ( <i>H. vastatrix</i> ) y ojo de gallo ( <i>M. citricolor</i> ).....	104
Figura 32. Determinación de la severidad de la roya en Esperanza L4A5. a) Escala para la evaluación de la severidad de la roya del café propuesta por Capucho et al. (2011). b) Categorías para la evaluación de la severidad de la roya del café en plantas propuestas por Eskes y Toma-Braghini (1989).....	105
Figura 33. Escala diagramática de daño de la enfermedad ojo de gallo causada por <i>Mycena citricolor</i> desarrollada por Pacheco (2012).....	107
Figura 34. Frecuencias de Incidencia de <i>H. vastatrix</i> en los años 2022 y 2023 .....	110
Figura 35. Escala de evaluación de severidad en hojas establecida a través del procesamiento con la aplicación Leaf Doctor.....	110
Figura 36. Escala de daño de la enfermedad ojo de gallo establecida a través del procesamiento con la aplicación Leaf Doctor.....	116
Figura 37. Cafeto con evidencia de defoliación asociada a <i>M. citricolor</i> .....	116

## LISTA DE ABREVIATURAS

1. ANOVA: Análisis de varianza.
2. TCA: Tasa de crecimiento absoluta.
3. DAB: Diámetro de la base.
4. AT: Altura total del cafeto.
5. ICO: International Coffee Organization.
6. ICAFE: Instituto del Café de Costa Rica.
7. WCR: World Coffee Research.
8. PROCOMER: Promotora de Comercio Exterior de Costa Rica.
9. CATIE: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
10. PROMECAFE: Programa Cooperativo Regional para el Desarrollo Tecnológico y Modernización de la Caficultura.
11. CIRAD: Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.
12. GAIA: Gaia Artisan Coffee.
13. FONTAGRO: Fondo único de cofinanciamiento sostenible para el desarrollo de tecnología agropecuaria en América Latina, el Caribe y España.
14. IICA: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
15. USDA-NRC: United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service - National research council.

## 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

*Coffea arabica* es una planta originaria de Etiopía que se distribuye naturalmente en hábitats naturales originales que proveen sombra (Kufa,2012). La primera descripción botánica del café fue realizada en 1713 por A. de Jussieu quién estudió una sola planta procedente del jardín botánico de Ámsterdam y la llamó *Jasminum arabicanum* la cual Linneo clasificó como *Coffea arabica* en 1737 (Clifford, 1985). Desde entonces, los especialistas en botánica no han conseguido consenso en cuanto a un sistema de clasificación preciso de la especie. Existe un nivel de dificultad de clasificar e incluso designar una planta como miembro auténtico del género *Coffea* dada la gran variedad de plantas y semillas existentes. Todas las especies de *Coffea* son leñosas, pero comprenden desde arbustos pequeños hasta árboles grandes de más de 10 metros de altura; las hojas pueden ser de color amarillento, verde oscuro, bronce o matizado de púrpura (ICO, 2018).

*C. arabica* es un arbusto perenne cuyo ciclo de vida en condiciones comerciales alcanza hasta 25 años dependiendo de las condiciones o sistema de cultivo. A libre crecimiento, la planta comienza a producir frutos en ramas de un año, continúa su producción durante varios años y alcanza su máxima productividad entre los 6 y 8 años. Su ciclo de vida se caracteriza por la formación de estructuras no reproductivas, como raíces, ramas, nudos y hojas, en una fase conocida como desarrollo vegetativo (Dedecca, 1957). Durante esta etapa, se establece la base para la subsiguiente formación y desarrollo de estructuras de reproducción, como flores y frutos, en lo que se conoce como desarrollo reproductivo. La planta de café puede mantener su actividad a lo largo de varios años con niveles de productividad reducidos que con el paso del tiempo estará marcado por una disminución gradual en su vitalidad, conocida como la fase de senescencia (Arcila, 2007).

*C. arabica* es una especie que naturalmente prospera en condiciones de sombra, por lo tanto, está adaptada a ambientes frescos, sombreados y secos (Perfecto y Vandermeer, 2015). En particular, las hojas del café están sujetas a fotoinhibición y a fotorrespiración en condiciones de alta radiación, que no permiten fotosíntesis e incluso pueden provocar daños permanentes en el aparato fotosintético (Chaves *et al.* 2008). Otros aspectos importantes, tienen que ver con las condiciones climáticas y el manejo del cultivo. Según Montagnini *et al.* (2015), la fotosíntesis del café es sensible a las altas temperaturas, y la sombra permite

reducir los extremos de temperatura en el dosel del café, esto puede influir más sobre la fotosíntesis en ambientes cálidos que en ambientes frescos. En términos generales, la sombra en el cafetal es un factor importante que contribuye en los procesos de descomposición de materia orgánica y en la actividad microbiana, que, aunado a la disponibilidad de nutrientes, influirán significativamente sobre las funciones de crecimiento, desarrollo y producción de las plantas considerando si se encuentran a pleno sol o bajo sombra (Montero, 2017). Desde el punto de vista de la fertilización nitrogenada, esta incrementa la tasa de fotosíntesis, y, por lo tanto, también aumenta la capacidad del cultivo de aprovechar altas intensidades de radiación solar. En consecuencia, en algunos casos, la sombra podrá tener efectos menos positivos en plantaciones con alta fertilización de N (Montagnini *et al.* 2015).

En atención a lo anterior, hay una serie de aspectos que se consideran importantes a la hora de establecer un proyecto de producción de café. El primero de ellos es la altitud, la cual incide sobre los factores de temperatura y humedad. Tradicionalmente, se tiene establecido que la altitud óptima para el cultivo de café se encuentra en el rango de entre los 500 y 1700 m.s.n.m. El segundo aspecto, se refiere a las lluvias donde un rango entre los 1000 y 3000 mm anuales se considera idóneos. Según (ICAFE, 2011a), con lluvias menores a 1000 mm anuales, los crecimientos de los cafetos se ven seriamente afectados lo que incide negativamente sobre las cosechas. Si la sequía se da en periodos prolongados, se estaría propiciando la defoliación y en casos extremos la muerte de los árboles. En lo que respecta a lluvias superiores a 3000 mm, la calidad física del café oro y la calidad de taza puede comenzar a verse afectada y el control fitosanitario de la plantación resulta más difícil y costoso (Peña *et al.* 2012).

Otros factores por considerar a nivel del cultivo son: la temperatura, la humedad relativa y el viento. Las temperaturas óptimas deben estar en el rango de entre los 17 y 23 °C, humedades relativas inferiores al 85%, y en lo concerniente a vientos se recomienda la asociación con árboles o el establecimiento de cortinas rompe vientos que contribuirán a la disminución de daños mecánicos y a la baja probabilidad de diseminación de enfermedades (WCR, 2018a). En relación con la asociación de árboles con el cultivo del café, emerge el concepto de sistema agroforestal la cual, es una forma de manejo sostenible que permite la

producción de bienes y servicios ecosistémicos y la generación de medios de vida de las familias de pequeños productores (Somarriba *et al.* 2017).

En el contexto de Costa Rica y otros países del neotrópico central, el café que mayoritariamente se cultiva es de la especie *Coffea arabica* (Jiménez, 2013). Tradicionalmente, *C. arabica* se ha distribuido entre los 700 y 2100 m.s.n.m. (López *et al.* 1972) y es en este rango altitudinal donde se ha documentado, en el marco de la ciencia del café, gran parte de la información en términos de adaptabilidad y producción. En pisos altitudinales por debajo de los 700 m.s.n.m., *C. arabica* es percibida de baja calidad, por lo que ha recibido poca atención en cuanto a su cultivo, manejo y desde la propia investigación. No obstante, las variedades provenientes de *Coffea canephora* (café robusta) han tenido mayor presencia en zonas bajas. El *C. Canephora* tiene el doble de cafeína que el *C. arabica*, se desarrolla tanto en zonas secas como húmedas y es poco exigente en cuanto a suelos y manejo. Respecto a la calidad, se considera de media a baja y reportan precios inferiores en el mercado si se lo compara con las variedades arábicas (Lambot *et al.* 2017).

En Costa Rica, el café ha sido promovido internacionalmente a través de la Marca País (PROCOMER, 2021). Además de resaltar el sabor y calidad, se ha destacado el enfoque de sostenibilidad. Los esfuerzos en producción se han dirigido principalmente hacia la preservación del cultivo en las regiones de mayor altitud, así como en la implementación de prácticas que agregan valor a lo largo de toda la cadena productiva, un ejemplo de ello es la asociación del cultivo de café con especies forestales, en el marco de la agroforestería. Desde la perspectiva de las asociaciones árboles-café, Montagnini *et al.* (2015) destacan dos puntos de vista esenciales: el aspecto ecológico, para cuyo desarrollo se han estudiado las compatibilidades entre las especies; y el aspecto económico, que ha determinado las mejores opciones para el establecimiento de los cultivos y la consecuente rentabilidad de estos. Los beneficios de la asociación de árboles con café agrupan diversos factores: el aprovechamiento diversificado de productos como madera, leña, forraje o alimentos (en particular frutos); la conservación de los suelos; el aumento en la fertilidad de los suelos; la mejora del microclima; la captura de carbono; la protección y recuperación de la biodiversidad y el control de arvenses y malezas (Villarreyna-Acuña *et al.* 2016).

A nivel de mejoramiento genético del café en Costa Rica, en 1992, el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en cooperación con el Programa Cooperativo Regional para el Desarrollo Tecnológico (PROMECAFE), el Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo (CIRAD) y la participación de institutos de cuatro países centroamericanos: Guatemala, El Salvador, Honduras y Costa Rica, iniciaron los cruzamientos de las variedades comercialmente cultivadas como Caturra, Catuaí y Catimores o Sarchimores (estos últimos resistentes a la roya), con materiales silvestres. El resultado de estos cruzamientos ha generado un total de 115 familias de híbridos F1 que han sido ensayadas en dos proyectos de evaluación inicial, seleccionándose plantas promisorias agronómica y comercialmente. Los híbridos preseleccionados se multiplican en cultivos *in vitro* por medio de la embriogénesis somática. Estos nuevos híbridos también se han adaptado bien a diferentes alturas y regiones cafetaleras, comprendiendo alturas bajas (menores de 1.000 m.s.n.m.), medias (1.000-1.200 m.s.n.m.) y altas (más de 1.200 m.s.n.m.) (GAIA, 2008). Mesén y Jiménez (2016), estudiaron el desarrollo de los híbridos F1, en especial Esperanza L4A5, y observaron que es una variedad que en etapas iniciales presenta altos índices productivos y es proclive a adaptarse en zonas bajas pues posee tolerancia a varias razas de roya (*Hemileia vastatrix*). Sin embargo, no existe la validación pertinente en términos de crecimiento y desarrollo en una escala de tiempo de cultivo y consecuente producción.

Si bien han existido iniciativas de investigación en asociaciones entre árboles y café, no existen suficientes datos de experiencias agroforestales con este cultivo en zonas de bajura que usualmente son ocupadas por cultivos a gran escala de piña, palma aceitera, banano y otras especies agrícolas de ciclo corto y ornamentales. Considerando la escasa información existente de los sistemas de producción agroforestales con café en zonas de bajura, se hace indispensable la generación de datos que permitan determinar las potencialidades del cultivo del café mejorado en cuanto al crecimiento, desarrollo y producción agroforestal en zonas de bajura. Por otro lado, la innovación en el cultivo y el ensayo de nuevas líneas de investigación, permitirán conocer opciones de adaptabilidad de nuevos híbridos de café, ello aunado a la determinación de los posibles beneficios que las asociaciones con individuos arbóreos maderables provean. Es de suma importancia destacar las implicaciones de la investigación en el ámbito socio productivo. Las posibilidades en el

apropiamiento de nuevos y mejorados materiales genéticos en zonas de bajura pueden influir en la activación económica de los productores de la zona, a través de la generación de proyectos tendientes al manejo sostenible y a la búsqueda de tasas aceptables de calidad, aunque lidien con la presión del clima y las políticas nacionales de mantener el marco de calidad Costa Rica. Como una de las posibles aplicaciones de las necesidades puestas de manifiesto por el análisis anterior, este trabajo tiene como propósito la evaluación del crecimiento, desarrollo y la productividad de híbridos *Coffea arabica* var. Esperanza (L4A5) en suelos de origen aluvial, considerando aportes diferenciados de fertilizantes y bajo diferentes asociaciones con árboles maderables de valor comercial y de servicio para el café.

La investigación propuesta busca contribuir al conocimiento y la práctica de la agroforestería basada en *Coffea arabica* en zonas de bajura. Aunque la caficultura es una actividad arraigada en muchas regiones del mundo, aún existen vacíos en cuanto a su aplicación en áreas de menor altitud. El cultivo del café, con su especie principal *C. arabica*, ha sido históricamente asociado en zonas de mayor elevación, pero su potencial en zonas de bajura ha sido poco explorado. En dicho contexto, la propuesta de valor del presente estudio se basa en varias aristas. En primer lugar, la evaluación de la adaptación del café a diferentes ambientes de sombra, su ciclo de vida en la zona y las condiciones para su crecimiento son fundamentales para comprender cómo puede prosperar en las zonas de bajura en el marco de la agroforestería y en la búsqueda de mejorar la resiliencia de los sistemas de producción de café. A través de la evaluación del crecimiento, desarrollo y productividad del híbrido Esperanza L4A5, se pretende llenar el vacío de conocimiento existente en cuanto a la viabilidad y los beneficios de la agroforestería basada en café en zonas de bajura. Los resultados obtenidos podrían proporcionar información valiosa para los productores, extensionistas agrícolas, investigadores y responsables de políticas, ayudando a mejorar las prácticas de manejo del café y promoviendo su cultivo de manera sostenible en una variedad más amplia de entornos. Esta investigación aspira a establecer no solo los fundamentos del conocimiento científico sobre la producción de café en áreas de menor altitud, sino también a proporcionar enfoques prácticos y soluciones para abordar los desafíos presentes y futuros que confronta la caficultura en dichas zonas.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general

Evaluar el crecimiento y la productividad de *Coffea arabica* var. Esperanza (L4A5) establecido en suelos de origen aluvial asociado a tres especies forestales y a pleno sol, bajo fertilizaciones diferenciadas.

### 2.2. Objetivos específicos

- Determinar el crecimiento y la productividad del híbrido Esperanza (L4A5) considerando la fertilización, las diferentes asociaciones con árboles y las condiciones de cultivo a pleno sol.
- Determinar las fases fenológicas del híbrido Esperanza (L4A5) considerando la fertilización y las diferentes asociaciones con árboles.
- Determinar la resistencia de los híbridos Esperanza (L4A5) a la roya (*Hemileia vastatrix*) y ojo de gallo (*Mycena citricolor*).

### 3. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1. El café en Costa Rica: una breve reseña histórico-económica

La historia del café en Costa Rica se remonta al siglo XVIII. Se cree que el café fue introducido en el país a finales del siglo XVIII, probablemente por colonos españoles que lo trajeron desde Cuba o Santo Domingo, pero es a partir de la década de 1820, cuando se comenzó a cultivar café a gran escala en el Valle Central, especialmente en zonas como Alajuela, Heredia y Cartago, donde el cultivo demostró tener un crecimiento y desarrollo importante en términos de productividad (Jiménez, 2013). Este período marcó el comienzo del auge de la industria cafetalera en el país, lo que conllevó el desarrollo de nuevos emprendimientos y al aumento de las áreas cultivables (Renjifo, 1989). En ese momento, el próspero negocio cafetalero condujo al vertiginoso establecimiento de compañías comerciales que exportaban el café a Europa y al mismo tiempo importaban del viejo continente mercancías manufacturadas como máquinas de moler maíz y trigo, planchas de hierro, etc., que comercializaban en suelo costarricense (ICAFE, s/f).

Sin embargo, según Jiménez (2013), con el transcurrir de los años y posteriormente a la suspensión del sistema de cuotas de exportación por parte del Convenio Internacional del Café de julio de 1989, el cultivo de café en Costa Rica entró en crisis. El aumento de la producción de café por parte de Vietnam y su liberación en el mercado internacional, también influyó en la caída del precio, que pasó de 137,60 centavos de dólar por libra en 1988 a 64,04 en 1992. Dicha situación, causó la primera reducción de la productividad y de la producción nacional de café en la historia costarricense: entre la cosecha de 1988-89 y la del 2010-11, la producción nacional disminuyó de 167 222 t de café oro, hasta 94 499 t, y la productividad desde 1672 kg/ha hasta los 953 kg/ha.

Posteriormente para el 2016, según datos del Banco Central de Costa Rica, el subsector café generó la cantidad de USD 308 673 092 en divisas para el país, un 0,89 por ciento superior respecto a 2015 (ICAFE, 2017). El aumento en la cantidad de café exportado, a pesar de sus bajos precios, fue el precursor de esta leve mejoría en el ingreso de divisas. Por otra parte, otro de los aspectos que incidieron en el aumento sostenido de la producción y la

colocación en los mercados internacionales de los últimos años, han sido las prácticas culturales que han dado un mayor valor agregado.

Después del aumento en la cantidad de café exportado del 2016, los precios del café experimentaron una tendencia a la baja, llegando a su punto más bajo en mayo de 2019. El mercado estuvo marcado por incertidumbre debido a factores fundamentales del cultivo y condiciones climáticas, que tuvieron su efecto sobre la disminución de la producción mundial para la cosecha 2021-22. Observar la evolución de los precios del café desde 1990 hasta 2022, muestra periodos de precios altos en 2011 y 2014, con el café alcanzando hasta \$300 USD/45.36kg en 2011 (ICAFFE, 2021).

La evolución del cultivo del café en Costa Rica ha llegado al punto de promocionarse como Marca País Café de Costa Rica y se ha posesionado en mercados específicos de calidad como rasgo distintivo. La caracterización de las 8 zonas productoras, así como la dimensión social y ambiental de la actividad cafetalera costarricense, han contribuido a dicha distinción. Un ejemplo destacado de esta cooperación se evidencia en la participación conjunta del sector en ferias especializadas en cafés finos, las cuales se llevan a cabo en diversas regiones del mundo. En estos eventos, se promociona ampliamente a través de medios de comunicación, tanto impresos como digitales, con un enfoque particular en la difusión en Internet (Café de Costa Rica, 2018). La escala del país, así como la imposibilidad de producir los volúmenes requeridos internacionalmente, es el motivo fundamental para que las actividades cafetaleras se orienten a las calidades, que tradicionalmente se alojan a zonas de altura. Según Fournier (1981), productores costarricenses ensayaron sistemas de cultivos diferentes a los que tradicionalmente se empleaban en Europa y combinaron varias especies de plantas en un mismo sitio, esto originó la tendencia de sistemas agroforestales. Los sistemas agroforestales no solo contribuyen al aprovechamiento del potencial de productividad del sitio, sino que favorecen la diversificación del sistema productivo.

### 3.2. *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5: aspectos generales de la planta

En el marco del programa de mejoramiento genético del café, desarrollado por el esfuerzo del Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo

(CIRAD), la red regional de institutos nacionales del café en Centroamérica (PROMECAFE) y el banco de germoplasma de café del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) (WCR, 2023a), se planteó como objetivo principal la obtención de materiales con una capacidad productiva significativamente alta (Virginio Filho y Astorga, 2021). Las nuevas líneas genéticas son una opción viable para potenciar la resistencia o la tolerancia a enfermedades y plagas, así como a la adaptación a condiciones bioclimáticas diferentes a las estandarizadas.

Según Gómez (2018), en Costa Rica se han evaluado variedades e híbridos de café con el fin de hacerle frente a la roya (*Hemileia vastatrix*), la cual ha atacado muy severamente a las variedades tradicionales tales como Caturra y Catuai. Aunado a la presión de enfermedades y plagas, se adicionan las variaciones en la temperatura, precipitaciones y eventos climáticos extremos que afectan el crecimiento, rendimiento, calidad y el sabor del café, además de aumentar la incidencia de plagas y enfermedades (Girma, 2023). Así mismo, una situación de larga data es el cultivo de café en sistemas de monocultivo y el uso excesivo de pesticidas que han contribuido al aumento de los problemas relacionados con el parasitismo telúrico (Bertrand *et al.* 1999).

En relación con el material vegetal desarrollado, líneas de *C. arabica* poseen genes que están asociados a la resistencia a la roya y que están catalogados bajo los códigos SH1, SH2, SH4 y SH5 (Alkimim *et al.* 2013), por lo tanto, cuando se lleva a cabo la hibridación se procura hacerlo con las plantas que tengan estos genes y generar bases genéticas mejoradas. Se han desarrollado híbridos producto de cruzamientos entre variedades tradicionales americanas y cafés africanos con el fin de mejorar resistencia a enfermedades y a la bebida en cuanto a calidad de taza (Gómez, 2018). Como resultado del proceso descrito, se destaca el F1 designado como Esperanza L4A5. Este es un híbrido creado a partir del cruzamiento de Sarchimor T5296 y el Etiope 25.

Sarchimor T5296 es catalogado como una variedad adaptada a altitudes medias a bajas (400 a 1.000 m.s.n.m.), de altura compacta, de grano grande, tolerante a la roya y a la antracnosis de la cereza y con buen potencial de rendimiento, aunque no se recomienda para los agricultores debido a su falta de estabilidad de una generación a otra. Por su parte, la variedad Etiope 25, es un material silvestre de los bosques y cafetales de Etiopía, donde

la especie *C. arabica* se originó. Estas variedades son asociadas a una alta calidad de taza, pero son susceptibles a la mayoría de las enfermedades y plagas (WCR, 2023b).

World Coffee Research (WCR, 2023a), menciona que el híbrido Esperanza fue sometido a evaluación durante un extenso periodo de tiempo que abarcó las décadas de los años 90 y principios de los 2000, sin embargo, no fue elegida para su lanzamiento al mercado. Algunas plantas de Esperanza L4A5 fueron conservadas en una finca en Costa Rica, donde demostraron un buen desempeño en condiciones de elevada precipitación y humedad. Un estudio realizado por FONTAGRO-PROMECAFE-IICA (2005), evaluó las variables altura de la planta, largo de la bandola, número entre nudos y largo de entrenudos dos años después de la siembra y fue evaluado a una altitud de 1,060 metros en el año 2001. El híbrido Esperanza L4A5 registró una altura de planta de 134.8 cm, un largo de bandola de 57.5 cm, con un promedio de 13.5 entrenudos por bandola, con un largo de entrenudos de aproximadamente 4.3 cm. El análisis encontró que Esperanza L4A5 tiene una altura moderada de planta y una longitud de bandola que puede ser considerada como promedio en comparación con otros clones evaluados en el mismo período y lugar. La cantidad de entrenudos por bandola y su longitud también están dentro de los rangos observados para otros clones evaluados. El estudio proporcionó una descripción de las características morfológicas del clon en el lugar y tiempo de evaluación especificados. Sin embargo, no se continuó con la toma de datos para una evaluación completa de su potencial productivo y adaptabilidad.

En términos amplios, se encuentra insuficiente información o escasos reportes relacionados al comportamiento en condiciones de producción de mediana a gran escala o dentro de sistemas agroforestales del híbrido Esperanza L4A5. No obstante, a pesar del vacío de información, GAIA Artisan coffee (GAIA, 2018) ha llevado a cabo estudios preliminares tanto en almácigos como en campo, donde se han registrado observaciones pertinentes sobre este híbrido:

- Tiene un sistema radicular fuerte y abundante.
- El grano es de tamaño similar y a veces superior a las variedades tradicionales.
- La planta es apta para la venta cuando alcanza una altura de 20 a 30 centímetros.
- Son híbridos precoces para la primera cosecha.

- La densidad de siembra es de 4.000-5.000 plantas por hectárea.
- Son tolerantes a las enfermedades como la roya y ojo de gallo.
- Es crucial proporcionar una nutrición equilibrada, regulando especialmente la cantidad de nitrógeno (N), para facilitar un adecuado desarrollo radicular. Además, es importante tener en cuenta que las semillas derivadas de plantas híbridas pueden exhibir variaciones respecto a las características de las plantas progenitoras, debido a un fenómeno conocido como segregación. En este contexto, se hace referencia a que la descendencia puede no presentar las mismas características que los progenitores, lo que podría resultar en una disminución del rendimiento, la resistencia a enfermedades, la calidad u otros atributos de interés.
- Las catas hechas a lo largo de varios años por el proyecto PROMECAFE e ICAFE indican que estos híbridos producen un café de igual o mejor calidad organoléptica que las variedades tradicionales.

### 3.3. El manejo agronómico del café

El éxito del cultivo del café y la implementación efectiva de prácticas agronómicas adecuadas se basan en comprender en profundidad el crecimiento, desarrollo y rendimiento de la planta. Además, la consideración de los factores adversos es crucial, ya que influyen en la viabilidad y la posibilidad de éxito de los proyectos relacionados (Arcila, 2007). En Costa Rica se cultiva café utilizando distintos métodos de producción, que incluyen el sistema tradicional o artesanal, el sistema tecnificado, el sistema de producción con sombra parcial y el sistema de producción bajo sombra completa.

El método de producción tradicional o artesanal se fundamenta en la gestión familiar o convencional de áreas de producción. Este método familiar se caracteriza por desarrollarse en zonas relativamente pequeñas, donde las actividades cotidianas se llevan a cabo manualmente, de manera poco intensiva e incorporando árboles de servicios o maderables. En contraste, los sistemas de producción tecnificados abarcan territorios más extensos y hacen uso de tecnologías que requieren una inversión considerable. Por último, los sistemas de producción con sombra o semisombra se basan en los principios de la agroforestería y son una opción ampliamente adoptada por los productores, ya que en muchos casos representan un valor añadido y una mayor sostenibilidad a largo plazo.

El sector cafetalero de Costa Rica se ha destacado por mantener prácticas que han contribuido en cierta medida a mantener la producción y la calidad del café. En líneas generales, la caracterización de las condiciones agroecológicas es de alta relevancia y orientan las prácticas, que, durante el ciclo de vida del cultivo se aplican. Existen ciertos elementos que escapan al control humano, como las condiciones climáticas y las características del suelo, sin embargo, otros aspectos están directamente influenciados por las decisiones tomadas por el productor. Estas decisiones, en muchas ocasiones, están vinculadas al mercado y a las tecnologías disponibles, tales como la selección de variedades de plantas, el manejo del sombreado, los planes de fertilización y las prácticas agrícolas empleadas (IICA, 2020).

#### 3.4. La nutrición y fertilización del café

La cantidad de nutrimentos que absorben los árboles y arbustos, dependen en gran medida de la exigencia de las especies, la tasa de crecimiento de esta y de las condiciones edáficas y climáticas que afectan la disponibilidad de los nutrimentos (Alvarado y Raigosa, 2012). Desde el punto de vista de la planta mejorada y los nutrimentos requeridos, el café acumula en la conformación de tejidos y órganos vegetativos el 38% del nitrógeno de todos los macronutrientes distribuidos en la planta (Colodetti *et al.* 2015). Los nutrientes esenciales del café se agrupan según la cantidad necesaria para el crecimiento de la planta y se dividen en macronutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre, y micronutrientes: incluyendo hierro, cobre, manganeso, boro, cloro, níquel, zinc y molibdeno (White y Brown, 2010). En ese sentido, en función de la demanda de nutrientes por parte de los cafetos, así como de la respuesta de estos a la fertilización con fuentes puras, se han elaborado las llamadas fórmulas completas cafetaleras (F.C.), las cuales integran en su formulación los elementos nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y boro en proporciones adecuadas a los requerimientos de las plantas (Chaves, 1999).

El manejo de la fertilización en Costa Rica se basa en el empleo de fórmulas denominadas multi nutrientes diseñadas para cada ecorregión cafetalera y formuladas en función de la fertilidad de los suelos, de las condiciones edafoclimáticas y de la respuesta agronómica de las variedades. En vista de lo anterior, ICAFE (2011b) ha desarrollado fórmulas completas que toman en consideración los contenidos porcentuales de los nutrientes en el siguiente

orden: nitrógeno (N), fósforo ( $P_2O_5$ ), potasio ( $K_2O$ ), magnesio (MgO) y boro (B). Para el caso de las regiones de Coto Brus, Pérez Zeledón y Turrialba, los suelos se han caracterizado de menor fertilidad y la recomendación es utilizar la fórmula 16-4-19-7-0,30. Para la región Caribe, donde el cultivo del café nunca ha sido relevante, no existe el análisis que de soporte a una recomendación para la fertilización del café.

### 3.5. La agroforestería en zonas bajas: una opción clave

Debido a los efectos del cambio climático, los cultivos de café están migrando progresivamente hacia las zonas más altas y es un hecho extendido que las zonas bajas están siendo desproporcionadamente usadas para el establecimiento de monocultivos de periodos de producción corta lo que ciertamente, tiene implicaciones sobre los suelos, el ambiente y por supuesto sobre la salud de las personas. Gidey *et al.* (2020) establecen que los cambios climáticos futuros tendrán un impacto negativo en el rendimiento y calidad en los próximos años.

Por tal razón, una de las opciones reales, más allá de la adaptación, es la mitigación a los efectos del cambio climático. Es cada vez necesario incentivar proyectos agroforestales que diversifiquen la producción en zonas bajas con el mínimo impacto sobre el ambiente. La inclusión de pequeños y medianos productores de zonas bajas en modelos de producción agroforestales son una opción espacio temporal para en el tiempo crear opciones de desarrollo (Sousa *et al.* 2018). Esto último solo es posible con la generación de información extraída de modelos de experimentación adaptados a las condiciones de las zonas y bajo enfoques prácticos rentables.

Asociar el café con árboles maderables y de servicio dentro de un sistema agroforestal no solo aumenta la resiliencia frente al cambio climático futuro, sino que también fortalece la perspectiva de adoptar este enfoque de manejo como una estrategia para mitigar los efectos adversos del cambio climático en la producción de café en el futuro cercano (Gidey *et al.* 2020). La clave se orienta al control de la temperatura y las asociaciones arboles café son una realidad (Kajembe *et al.* 2016), que debe seguir experimentándose en contextos reales.

Desde el punto de vista socioeconómico, la agroforestería busca proveer en el corto, mediano y largo plazo, opciones económicas viables. El flujo de caja constante y la reinversión en los sistemas establecidos implican una serie de beneficios sobre los productores y colectivos. Los sistemas agroforestales representan un papel clave en lo que tiene que ver con las condiciones óptimas para que los cafetos crezcan y se desarrollen. Asimismo, desempeñan un papel esencial como refugio de fauna y garantizan la infiltración del agua y la conservación del suelo a través de sus procesos de adición, translocación y transformación de la materia orgánica (Tully *et al.* 2012).

En tal contexto, la agroforestería de bajura surge como una alternativa viable que puede proporcionar las condiciones que el café requiere para producir bajo las mejores condiciones y con estándares de calidad significativos. Manson *et al.* (2008), mencionan que los estudios de los sistemas agroforestales de café han ganado importancia en los últimos años y son vistos como una alternativa que contribuyen a disminuir la degradación de los recursos base: agua, suelo y biodiversidad, en las regiones cafetaleras del país.

### 3.6. El café de altura versus el café de bajura en Costa Rica

En Costa Rica, se han identificado ocho regiones según su productividad cafetalera. Estas regiones abarcan desde las áreas bajas, situadas a menos de mil metros de altitud, donde el café tiende a ser más suave, hasta las zonas de mayor altitud, que superan los 1.200 metros y se caracterizan por su origen volcánico. En estas últimas, el café exhibe un perfil más robusto, ácido y aromático. En cada región cafetalera de Costa Rica, se ha establecido un Convenio de Mejoramiento de la Calidad, en el que los propietarios de los beneficios cafetaleros se comprometen a producir café de la más alta calidad. Este compromiso implica recibir únicamente la fruta madura, asegurando así que solo se procesará el café de mejor calidad (ICAFE, 2018b). Dentro de ese escenario, ICAFE (2008) estableció los principales elementos que directamente influyen sobre las características especiales que ostenta el café con la Indicación Geográfica “Café de Costa Rica”, los cuales son: clima, suelo, factores físicos, factores económicos, factores humanos, factores de apoyo, factores productivos, factores de procesamiento, factores de comercialización y calidad y las variedades. En resumen, el café producido en zonas por encima a los 1200 m.s.n.m.

reportan altos estándares de calidad y mejor posicionamiento en los mercados nacionales e internacionales.

La producción de café en zonas bajas de Costa Rica, no existen investigaciones que provean información sobre el crecimiento y desarrollo del café en pisos altitudinales no convencionales (de 0 a 400 m.s.n.m.). Asimismo, no se han encontrado reportes de estudios sobre asociaciones de café con especies maderables de valor comercial en zonas de bajura. Por último, poco se sabe sobre el manejo y producción de café que permita aseverar de forma concluyente que los rendimientos y calidades no son apetecidos tanto para los productores de la zona, como para el mercado de consumo masivo.

#### Literatura citada

- Alkimim, E. R., Caixeta, E. T., Sousa, T. V., Oliveira, A. C. B., Pereira, A. A., Zambolim, E. M., Zambolim, L., & Sakiyama, N. S. (2013). Seleção assistida por marcadores moleculares para resistência à Ferrugem do cafeeiro. En VIII Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 25 a 28 de novembro de 2013, Salvador – BA. [http://www.sbicafe.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3784/174\\_VIII-SPCB-2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.sbicafe.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3784/174_VIII-SPCB-2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Arcila, J. (2007). Crecimiento y desarrollo de la planta de café. En J. Arcila, F. Farfán, A. Moreno, L. Salazar, y E. Hincapié, Sistemas de Producción de Café en Colombia. Cenicafe. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/720>
- Bertrand, B., Aguilar, G., Santacreo, R. y Anzueto, F. (1999). El mejoramiento genético en América Central. En B. Bertrand y B. Rapidel (eds). Desafíos de la caficultora en Centroamérica. San José, Costa Rica: IICA, pp. 407-456.
- Café de Costa Rica. (2018). Café de Costa Rica. Obtenido de <http://cafedecostarica.com/>
- Chaves, R., Ten-Caten, A., Pinheiro, H., Ribeiro, A., y DaMatta, F. (2008). Seasonal changes in photoprotective mechanisms of leaves from shaded and unshaded field-grown coffee (*Coffea arabica* L.) trees. *Trees*, 22: 351-361.
- Clifford, M. (1985). Coffee: botany, biochemistry, and production of beans and beverage. (M. N. Clifford, & K. C. Willson, Edits.) Westport, Connecticut: The AVI Publishing Company Inc. 13 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6657-1>

- Colodetti, T.V., W.N. Rodrigues, L.D. Martins, S.V.B. Brinate, M.A. Tomaz, J.F.T. Amaral y A.C. Verdin-Filho. (2015). Nitrogen availability modulating the growth of improved genotypes of *Coffea canephora*. African Journal of Agricultural Research, 10(32), 3150–3156. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.9692>
- Dedecca, D. (1957). Anatomia e desenvolvimento ontogenético de *Coffea arabica* L. var. Typica Cramer. Boletim Técnico do Instituto Agrônômico do Estado de São Paulo. Bragantia. 317 p. <http://www.scielo.br/pdf/brag/v16nunico/23.pdf>
- FONTAGRO (Estados Unidos de América). Programa Cooperativo Regional para el Desarrollo Tecnológico y Modernización de la Caficultura, Guatemala (PROMECAFE), e Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Costa Rica (IICA). (2005). Mejoramiento genético del café en América Central: Selección de clones de híbridos de *Coffea arabica*. Junio 2001-junio 2005. San José, pp. 1-15. Informe Final. ATN-SF-7382-RG IICA-BID.
- Fournier, L. (1981). Importancia de los sistemas agroforestales en Costa Rica. Agronomía Costarricense. 5 (1/2). 141-147.
- GAIA Artisan coffee (GAIA). (2018). Características a los híbridos F1 de café. [Manuscrito no publicado]. GAIA Artisan coffee.
- Gidey, T., Oliveira, T. S., Crous-Duran, J., et al. (2020). Using the yield-SAFE model to assess the impacts of climate change on yield of coffee (*Coffea arabica* L.) under agroforestry and monoculture systems. Agroforestry Systems, 94, 57–70. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00369-5>
- Girma, B. (2023). The Impact of Climate Change on Coffee Processing: A Review. Agriculture, Forestry and Fisheries, 12(4), 120-129. <https://doi.org/10.11648/j.aff.20231204.14>
- Gómez, L. (2018). Revista el cafetalero: al servicio de la caficultura. <http://www.revistaelcafetalero.com/variedades.html>
- Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE). (2008). Pliego de condiciones: Indicación Geográfica "Café de Costa Rica". San José, Costa Rica. [https://www.icafe.cr/wp-content/uploads/indicacion\\_geografica/Pliego%20de%20Condiciones.pdf](https://www.icafe.cr/wp-content/uploads/indicacion_geografica/Pliego%20de%20Condiciones.pdf)

- Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE). (2011a). Guía Técnica del cultivo del café. Barva, Heredia: ICAFFE-CICAFFE. <http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/cicafe/documentos/GUIA-TECNICA-V10.pdf>
- Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE). (2011b). ICAFFE recomienda manejo de fertilizantes con fórmulas completas regionales. Obtenido de <http://www.icafe.cr/icafe-recomienda-manejo-de-fertilizantes-con-formulas-completas-regionales/>
- Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE). (s.f.). Historia del café. <https://www.icafe.cr/nuestro-cafe/historia/>
- Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE). (2017). Informe sobre la actividad cafetalera en Costa Rica. [Informe de la actividad cafetalera-ICAFFE](#)
- Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE). (2021). Informe sobre la actividad cafetalera en Costa Rica. [Informe Actividad Cafetalera de Costa Rica 2021](#)
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2020. Guía práctica de caficultura. [Guía del caficultor](#).
- International Coffee Organization (ICO). (2018). Aspectos botánicos. [http://www.ico.org/es/botanical\\_c.asp](http://www.ico.org/es/botanical_c.asp)
- Jiménez, A. (2013). El Café en Costa Rica (Primera edición). San José, Costa Rica: Editorial UCR.
- Kajembe, J., Lupala, I., Kajembe, G., Mugasha, W., & Nuru, F. (2016). The Role of Selected Agroforestry Trees in Temperature Adaptation on *Coffea arabica*: A Case Study of the Moshi District, Tanzania. En R. Lal, D. Kraybill, D. Hansen, B. Singh, T. Mosogoya & L. Eik (Eds.), *Climate Change and Multi-Dimensional Sustainability in African Agriculture* (pp. 29-42). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-41238-2\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41238-2_29)
- Kufa, Taye. (2012). Biomass production and distribution in seedlings of *Coffea arabica* genotypes under contrasting nursery environments in southwestern Ethiopia. *Agricultural Sciences*. 3(6): 835-843. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/as.2012.36101>
- Manson, R., Contreras, A., y López Barrera, F. (2008). Estudios de la biodiversidad en cafetales. *Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, Manejo y conservación*, 1-14.

- Mesén, F., y Jiménez, L. D. (2016). Producción de clones de café por miniestacas. CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8176>
- Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H., y Eibl, B. (2015). Sistemas Agroforestales: Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales. Colombia - Costa Rica: CIPAV.
- Montero, D. (2017). Manual de Buenas Prácticas de Manejo en la Fertilización Nitrogenada del Café. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-1419.pdf>
- Lambot, C., Herrera, C., Bertrand, B., Sadeghian, S., Benavides, P., y Gaitan, A. (2017). Chapter 2 - Cultivating Coffee Quality. En Britta Folmer (Ed.), *The Craft and Science of Coffee*. Academic Press. (pp. 17-49).
- López C., Naranjo, F., Villegas, O., Valencia, E. (1972). Influencia de la altitud en el desarrollo de plántulas de café en almácigo. *Cenicafé* 23(4): 87-97.
- Peña, A., Ramirez, V., Valencia, J. y Jaramillo, R. (2012). La lluvia como factor de amenaza para el cultivo del café en Colombia. Gerencia Técnica/ Programa de Investigación Científica. Fondo Nacional del Café. CENICAFE. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0415.pdf>
- Perfecto, I. y Van der Voort, M. (2015). *Coffee Agroecology: a new approach to understanding agricultural biodiversity, ecosystem services and sustainable development*. (First edition). Editorial Routledge.
- Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica (PROCOMER). (2021). Marca país y grano de oro de costa rica brillan en el corte inglés de España. <https://www.procomer.com/noticia/comprador-internacional-noticia/marca-pais-y-grano-de-oro-de-costa-rica-brillan-en-el-corte-ingles-de-espana/>
- Renjifo, A. (1989). *El café en Costa Rica*. Organización Internacional del café.
- Sousa, K. de, Casanoves, F., Sellare, J., Ospina, A., Suchini, J. G., Aguilar, A., & Mercado, L. (2018). How climate awareness influences farmers' adaptation decisions in Central America? *Journal of Rural Studies*, 64, 11-19.
- Tully, K. L., Lawrence, D., & Scanlon, T. M. (2012). More trees less loss: Nitrogen leaching losses decrease with increasing biomass in coffee agroforests. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 161, 137–144.

- Villarreyña-Acuña, R. A., Van den Meersche, K., Rapidel, B., y Avelino, J. (2016). Efecto de los árboles de sombra sobre el suelo, en sistemas agroforestales con café, incluyendo la fenología y fisiología de los cafetos. CATIE; CIRAD; Conservation International. [https://publications.cirad.fr/une\\_notice.php?dk=581648](https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=581648)
- Virginio Filho, E. de M., y Astorga Domian, C. (2021). Estado del arte y manejo de los híbridos F1 (*Coffea arabica* L.) del Programa de Mejoramiento Genético de PROMECAFE (No. 112). Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- White, P., y Brown P. 2010. Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, 105, 1073–1080. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq085>
- Word Coffee Research (WCR). (2023a). Híbrido *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5. <https://varieties.worldcoffeeresearch.org/varieties/esperanza>
- Word Coffee Research (WCR). (2023b). Híbrido *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5. <https://varieties.worldcoffeeresearch.org/es/variedades/t5296>

#### 4. CAPITULO 1. CRECIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD DE *Coffea arabica* VAR. ESPERANZA L4A5 A PLENO SOL Y EN ARREGLOS AGROFORESTALES CON FERTILIZACIONES DIFERENCIADAS EN LA REGIÓN CARIBE DE COSTA RICA.

<https://doi.org/10.3390/agriculture14101723>

##### Resumen

**Introducción:** El cultivo del café es crucial para muchas regiones tropicales como Costa Rica y demanda de estrategias para mejorar su crecimiento y productividad. El mejoramiento genético se destaca entre estas estrategias, donde se han desarrollado variedades como el híbrido Esperanza L4A5, reconocido por su adaptabilidad inicial. Factores como el clima, el suelo y el manejo agronómico representan un reto para la caficultura de zonas bajas, sin embargo, los sistemas agroforestales emergen como una opción viable para desarrollar la caficultura basada en líneas mejoradas. La combinación de árboles y la fertilización diferenciada son puntos de arranque en la generación de datos en zonas subestimadas en la producción de café. **Objetivo:** Determinar el crecimiento y la productividad del híbrido Esperanza (L4A5) considerando las diferentes asociaciones con árboles de sombra y la fertilización diferenciada bajo el enfoque del mínimo fisiológico. **Metodología:** El estudio se llevó a cabo en la provincia de Limón, Costa Rica, en la Finca Forestal de la Universidad EARTH. La zona presenta un clima tropical húmedo, con temperaturas promedio de 25 °C y precipitaciones anuales de 3702 mm. Los suelos son Inceptisoles con propiedades como pH ácido y alto contenido de materia orgánica. El diseño experimental se centró en evaluar diferentes arreglos agroforestales asociados a Esperanza L4A5. Las asociaciones estudiadas fueron *Albizia saman* asociado a café, *Hymenaea courbaril* + *Erythrina poeppigiana* asociado a café, *Anacardium excelsum* + *Erythrina poeppigiana* asociado a café, pleno sol 1 y pleno sol 2 (controles experimentales sin asociación con árboles). Se aplicaron dos tipos de fertilizantes diferenciados en parcelas divididas (fertilización física, química y solo enclado como control experimental), y se monitoreó durante 4 años el crecimiento de las variables diámetro de la base y altura de los cafetos y la producción de cerezas de café, así mismo, se registró la evolución del porcentaje de sombra utilizando imágenes tomadas desde el suelo y con drones, procesadas

con la herramienta Canopeo para estimar la cobertura del dosel. **Resultados:** El efecto de las coberturas con árboles y las fertilizaciones resultaron altamente significativas encontrándose diferencias claras entre los tratamientos sin cobertura y con cobertura arbórea. Así mismo, se encontró que la mayor mortalidad se dio en las zonas donde los cafetos estaban expuestos completamente al sol. Se evidenció la relación de menor porcentaje de sombra mayor crecimiento del diámetro de la base y mayor cantidad de sombra mayor registro en la variable altura de la planta. Respecto a producción de cerezas de café, se observó un aumento continuo en la cantidad de cerezas recolectadas en la mayoría de los tratamientos, destacando la productividad de los tratamientos *A. excelsum* + *E. poeppigiana* e *H. courbaril* + *E. poeppigiana*. Según los modelos de crecimiento logístico y las tasas de crecimiento absoluto, el crecimiento acelerado de los cafetos en las etapas iniciales de crecimiento es crucial en la consecuente producción de cerezas de café. **Conclusión:** Los resultados obtenidos servirán de línea base para el manejo del café de zonas bajas y contribuye a la caficultura de bajura de híbridos mejorados de *Coffea arabica* en el contexto agroforestal. Las evaluaciones preliminares demuestran ventajas importantes a favor de los sistemas asociados con árboles en comparación al pleno sol, en particular vinculado con menor mortalidad de cafetos, mayores alturas de planta y mayores niveles de producción en las primeras cosechas.

#### 4.1. Introducción

El cultivo del café (*Coffea arabica*) representa una pieza fundamental en la economía y la identidad cultural de muchas regiones tropicales del mundo, incluyendo Costa Rica. En este contexto, la búsqueda de estrategias para mejorar el crecimiento y la productividad de variedades específicas de café es de gran importancia para garantizar la sostenibilidad y la rentabilidad de esta actividad agrícola. El mejoramiento genético del café es una de las estrategias claves y las variedades derivadas de estas, han despertado interés en los últimos años. Entre tantas nuevas variedades, se encuentra *el* híbrido Esperanza L4A5, conocido por sus características particulares de sabor y aroma, así como por su potencial de adaptación a ambientes poco usuales para el cultivo, sobre todo en rangos entre los 500 y 1000 m.s.n.m. (WCR, 2023b).

Un aspecto general sobre el crecimiento y la productividad del café es la influencia de una serie de factores, que van desde las condiciones climáticas y edáficas hasta las prácticas de manejo agronómico empleadas en los cafetales (Villarreyna *et al.* 2020). Desde la perspectiva del manejo holístico y sostenible del café, existe el interés de la implementación de sistemas agroforestales para el cultivo, los cuales buscan integrar árboles maderables y de servicio en los cafetales con el fin de mejorar la sostenibilidad ambiental y la resiliencia del sistema productivo (Deheuvels *et al.* 2019). Estos sistemas agroforestales pueden tener beneficios significativos, como la conservación del suelo, la diversificación de ingresos para los productores y la promoción de la biodiversidad. En general, entendiendo las diferentes formas de producción cafetalera, los sistemas agroforestales de café, ya sea con baja o alta diversidad, presentan una mayor capacidad para ofrecer servicios ecosistémicos en comparación con los monocultivos de café expuestos completamente al sol (Cerdea *et al.* 2017).

Además de la introducción de árboles, sean para madera y sombra o en sentido amplio árboles de servicio, se ha reconocido la importancia de una fertilización adecuada para optimizar el crecimiento y la productividad del café. La aplicación de fertilizantes puede ser crucial en suelos de origen aluvial, que a menudo presentan limitaciones nutricionales y pueden requerir suplementación para garantizar un suministro adecuado de nutrientes esenciales para las plantas (Sancho *et al.* 1989).

Además del suelo, otro factor determinante en el crecimiento y la productividad del café es el sistema de cultivo. En este estudio, exploraremos diferentes arreglos agroforestales, que incluyen la asociación del café con árboles maderables y de servicio, con el objetivo de evaluar el efecto en el crecimiento de las plantas de café y en la producción de granos. Asimismo, consideraremos el efecto de diferentes estrategias de fertilización diferenciada en el crecimiento y la productividad del café bajo el enfoque del mínimo fisiológico. La aplicación de fertilizantes de manera adecuada y en dosis óptimas es crucial para garantizar un suministro adecuado de nutrientes y promover un crecimiento saludable de las plantas, sin comprometer la calidad del suelo ni el equilibrio ambiental (Buresh y Witt, 2007).

Las conclusiones de este estudio no solo contribuirán al conocimiento científico sobre el manejo del café en sistemas agroforestales y en suelos de origen aluvial, sino que también

proporcionarán información práctica y recomendaciones para los productores y los encargados de la toma de decisiones en el sector agrícola de las zonas de bajura. Además, se espera que este estudio fomente la adopción de prácticas agronómicas más sostenibles y resilientes, en línea con los objetivos de conservación ambiental y desarrollo socioeconómico de la Región Caribe de Costa Rica.

## 4.2. Materiales y métodos

### 4.2.1. Ubicación del área del proyecto

El ensayo agroforestal basado en híbridos de *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5 se encuentra ubicado en la provincia de Limón de Costa Rica, en los predios de la Finca Forestal en la Universidad EARTH, en el cantón Guácimo de la provincia de Limón-Costa Rica en las coordenadas 10°13'00.0"N 83°35'27.0"W (Google Earth, 2024) (Figura 1). La temperatura promedio de la zona del experimento es de 25 °C, la cual se expresa entre los 20 °C y 33 °C (24 horas). Además, las precipitaciones anuales son de 3701,99 mm, con una humedad relativa promedio de 86 % y una radiación solar máxima de 0,85 MJ/m<sup>2</sup>-día (Universidad Earth, 2024).

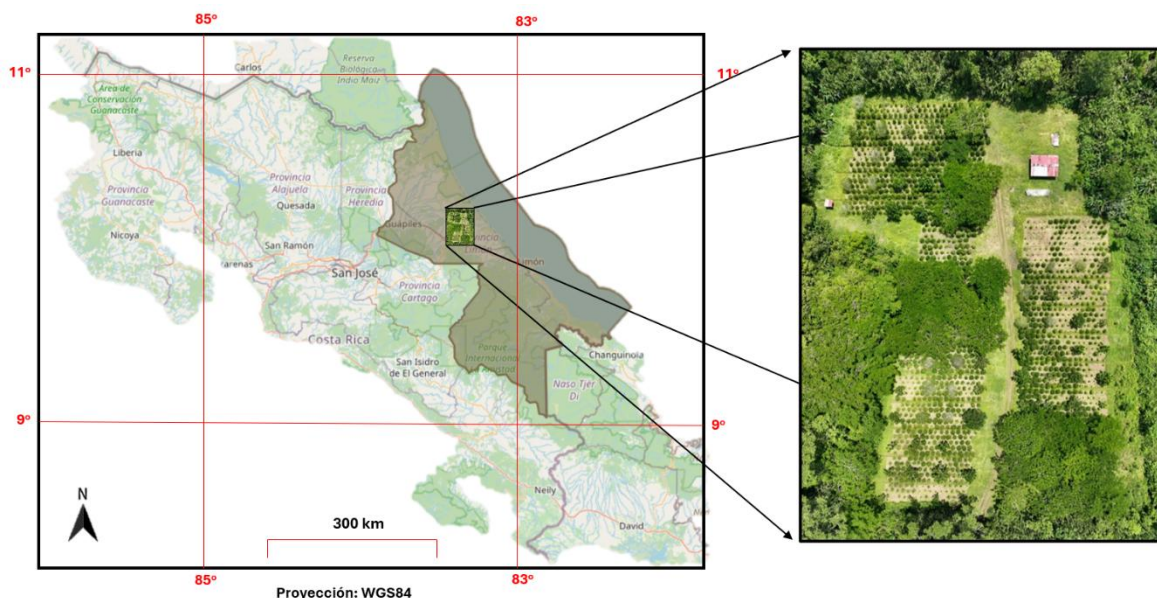


Figura 1. Ubicación del área del ensayo agroforestal basado en híbridos de *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5.

#### 4.2.2. Zona de vida y geomorfología

Según datos meteorológicos históricos y el sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge, el proyecto se encuentra situado en el corazón del Bosque Muy Húmedo Tropical (bmh-T) de la región Caribe de Costa Rica (Holdridge, 1967). Desde el punto de vista geomorfológico, los terrenos donde se ubica la EARTH se encuentran en la llanura aluvial entre las cordilleras del Valle Central y el mar Caribe que se extienden desde el río Colorado hasta la frontera con Panamá (CICG, 2024).

#### 4.2.3. Suelos

Los suelos presentes en la región de Guácimo se clasifican como Inceptisoles, específicamente del suborden Udepts. Estos se forman a partir de la meteorización de sedimentos aluviales y coluviales cuando no reciben aportes de sedimentos durante períodos prolongados. Algunas propiedades de los Inceptisoles de esta región suelen presentar un pH ácido, pueden contener arcillas amorfas; presentan alto contenido de materia orgánica y presentan diferenciación de horizontes en el subsuelo evidentes por cambios en estructura, color o contenido de arcillas. (INTA, 2015). Los Inceptisoles del valle del río Parismina son reconocidos por su destacado potencial agrícola en Costa Rica (Henríquez *et al.*, 2006).

#### Análisis físico

El análisis físico del suelo se llevó a cabo a través de la toma de 11 puntos de muestreo. Se utilizó un barreno holandés con el propósito de analizar el suelo cada 20 cm de profundidad, desde 0 cm hasta los 200 cm. Posteriormente se procedió a colocar las muestras sobre una bolsa negra con divisiones según la profundidad de la muestra, y consecuentemente se hizo la caracterización del perfil, evaluando textura, color y estructura siguiendo la guía del USDA-NRC y la tabla Munsell de colores de suelos (Munsell® Color, 1994; Schoeneberger *et al.* 2002) (Figura 2). En general, se notó una homogeneidad en el perfil del suelo desde la superficie hasta los 200 cm de profundidad. En el horizonte O, que comprende los primeros 20 cm, se encontraron texturas de tipo franco con tonos pardos. A medida que se profundiza, la textura se vuelve más arenosa y el color del suelo se aclara.

Alrededor de los 100 cm de profundidad, se evidencia la presencia de agua, lo que sugiere la posibilidad de un nivel freático elevado, seguramente asociado con los cambios en el color y la textura de los perfiles. A partir de los 140 cm, se observa un perfil con una estructura masiva de color grisáceo-amarillento, indicando la existencia del nivel freático (Chanto, 2017) (Cuadro 1).

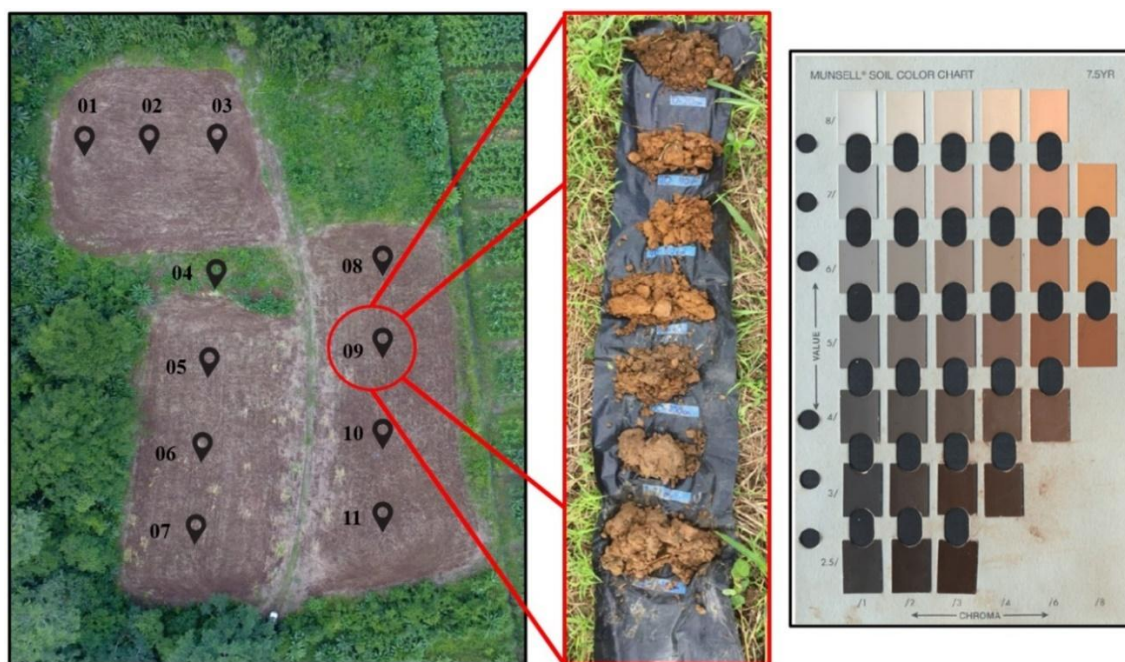


Figura 2. Toma de muestras para la caracterización física de perfiles del suelo siguiendo la guía del USDA-NRC y la tabla Munsell de colores de suelos.

Cuadro 1. Caracterización de los perfiles de suelo

Ubicación	Horizontes	Profundidad (cm)	Textura	Color	Estructura
<b>Bloques 1, 2 y 3</b>	O	0 – 20	F	7.5 YR 4/3	Bloques angulares y subangulares
	A	20 – 80	FA	7.5 YR 6/6	Bloques angulares y subangulares
	B	80 – 140	FAr	10 YR 6/2	Bloques subangulares (agua a los 100 cm)
	C	140 – 200	Ar	2.5 Y 8/3	Masiva

## Análisis químico

Paralelamente a la extracción de muestras para el análisis físico, se llevó a cabo el análisis químico (Cuadro 2). Los valores de pH oscilaron entre 4.03 y 4.97, indicando que el suelo es ligeramente ácido en todas las muestras. Los valores de acidez extractable varían entre 1.80 y 4.00 cmol+/kg, lo que sugiere diferencias en la capacidad del suelo para retener iones hidrógeno. La concentración de nutrientes se observó con significativa variabilidad en las magnitudes de los nutrientes importantes como potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), fósforo (P), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn) y manganeso (Mn). Estos nutrientes son esenciales para el crecimiento y desarrollo del café y sirvieron de base para el posterior diseño de las fertilizaciones diferenciadas (Chanto, 2017).

Cuadro 2. Análisis químico del área del proyecto considerando profundidades de 0 – 25 y 25 – 50 centímetros

Punto	pH	Ac. Ext.	K	Ca	Mg	P	Fe	Cu	Zn	Mn	C	N	MO	
														---- cmol+/kg ----
01	4,67	3,20	0,28	3,97	2,17	1,9	114	2,8	0,8	189	1,03	0,31	1,78	
02	4,86	2,50	0,22	3,88	2,03	1,6	122	2,4	0,7	168	2,00	0,48	3,45	
03	4,76	2,70	0,26	2,59	1,47	1,7	91	1,7	0,3	104	2,08	0,63	3,59	
04	4,16	2,30	0,31	3,06	2,59	1,4	96	1,9	0,7	105	*	*	*	
05	0 - 25 centímetros de profundidad	4,85	1,80	0,17	2,51	1,14	1,7	83	1,2	0,2	96	2,00	0,33	3,45
06		4,97	2,90	0,26	2,97	1,47	2,3	96	1,4	0,2	65	2,67	0,50	4,60
07		4,85	2,90	0,18	3,15	1,76	1,3	86	1,4	0,1	80	2,33	0,40	4,02
08		4,03	4,00	0,16	2,01	0,97	1,2	70	1,0	0,1	48	*	*	*
09		4,92	2,20	0,18	3,62	2,41	2,1	115	2,9	0,6	253	1,92	0,66	3,31
10		4,78	3,10	0,15	2,56	1,60	1,6	106	2,2	0,5	166	2,12	0,58	3,65
11		4,76	3,20	0,17	2,40	1,44	1,8	108	2,1	0,5	179	2,51	0,59	4,33
<b>Promedio</b>		<b>4,69</b>	<b>2,80</b>	<b>0,21</b>	<b>2,98</b>	<b>1,73</b>	<b>1,7</b>	<b>99</b>	<b>1,9</b>	<b>0,4</b>	<b>132</b>	<b>2,07</b>	<b>0,50</b>	<b>3,57</b>
Punto		pH	Ac. Ext.	K	Ca	Mg	P	Fe	Cu	Zn	Mn	C	N	MO
01		25 - 50 centímetros de profundidad	5,15	0,90	0,16	6,04	4,84	2,9	84	1,6	0,1	51	2,13	0,51
02	5,06		1,10	0,13	3,66	2,40	1,3	73	1,1	0,2	39	0,96	0,38	1,66
03	5,06		1,90	0,24	3,08	1,43	1,2	85	1,0	0,1	67	1,39	0,48	2,40
04	4,53		2,70	0,19	2,49	2,00	1,1	66	0,9	0,1	38	*	*	*

<b>05</b>	5,55	0,40	0,16	3,37	1,61	0,7	74	0,7	0,1	28	0,81	0,18	1,40
<b>06</b>	5,11	0,60	0,15	3,29	1,17	0,8	59	0,6	0,0	15	1,19	0,36	2,05
<b>07</b>	5,32	1,10	0,11	2,64	1,83	0,9	49	0,5	*	16	1,16	0,31	2,00
<b>08</b>	3,99	4,50	0,11	1,77	0,72	1,1	50	0,5	*	16	*	*	*
<b>09</b>	5,41	0,80	0,12	4,02	3,43	2,2	83	1,4	*	96	1,00	0,51	1,72
<b>10</b>	5,31	1,70	0,09	2,63	1,83	1,0	70	0,7	*	55	0,80	0,49	1,38
<b>11</b>	5,23	1,70	0,10	2,67	1,20	0,8	71	0,7	*	52	1,30	0,55	2,24
<b>Promedio</b>	<b>5,07</b>	<b>1,58</b>	<b>0,14</b>	<b>3,24</b>	<b>2,04</b>	<b>1,3</b>	<b>69</b>	<b>0,9</b>	<b>0,1</b>	<b>43</b>	<b>1,19</b>	<b>0,42</b>	<b>2,06</b>

#### 4.2.4. Diseño experimental del ensayo agroforestal basado en Esperanza L4A5

El diseño experimental consideró dos aspectos fundamentales: 1.- El arreglo espacial de los árboles maderables y de servicio asociados con los híbridos de café, y 2.- Fertilizaciones considerando una carga mínima de nutrientes en dos presentaciones diferenciadas: fertilización física y química. Con base a los aspectos mencionados, el arreglo de los componentes se realizó de acuerdo con un diseño de parcelas divididas con estructura de parcelas en bloques completamente aleatorizados. El modelo lineal fue:

$$Y_{ijk} = \mu + Y_k + \tau_i + (Y\tau)_{ki} + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

$Y_{ijk}$  = observaciones de la unidad experimental.

$\mu$  = media general del ensayo.

$Y_k$  = efecto de los bloques.

$\tau_i$  = efecto del tratamiento  $\tau$  de la parcela.

$(Y\tau)_{ki}$  = error de la parcela.

$\beta_j$  = efecto del tratamiento  $\beta$  de la subparcela.

$(\tau\beta)_{ij}$  = efecto de la interacción de los tratamientos de la parcela y subparcela.

$\varepsilon_{ijk}$  = error de la subparcela.

El diseño en parcelas divididas permitió la evaluación del efecto de los tratamientos denominados árboles-café (Figura 3a), la fertilización diferenciada (Figura 3b) y las interacciones por ambos factores.

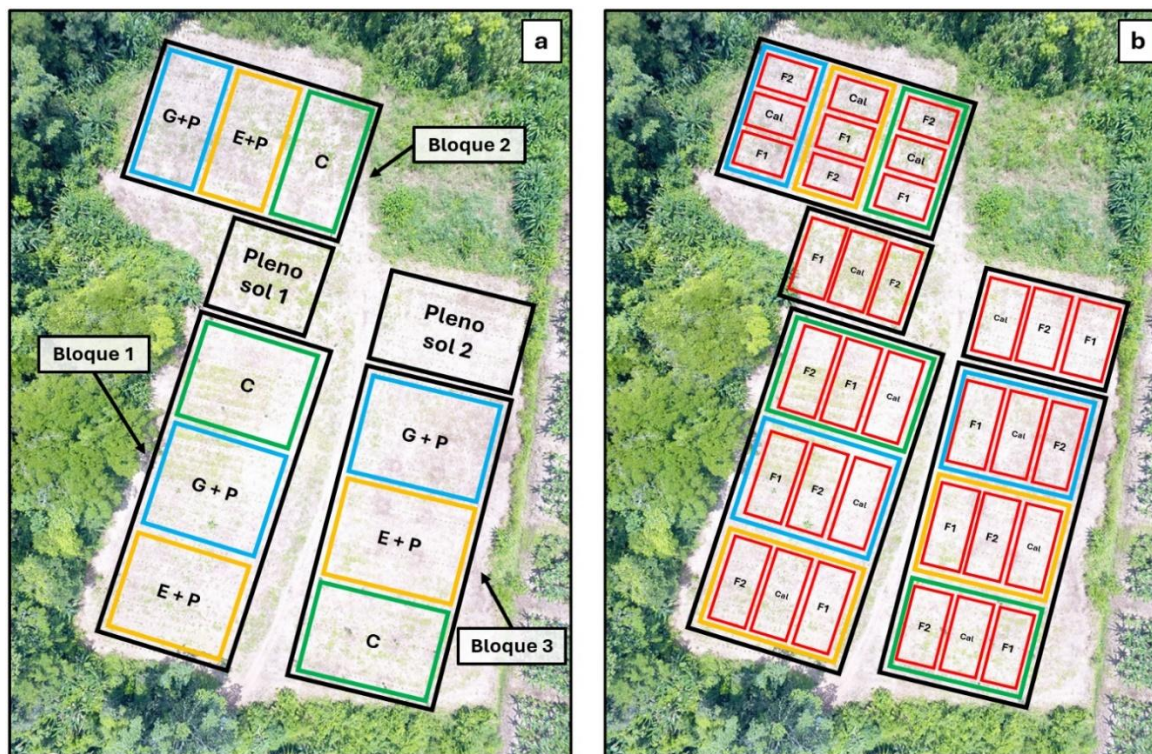


Figura 3. Diseño de parcelas divididas con estructura de parcelas en bloques completamente aleatorizados. 3a) Distribución de los bloques y tratamientos (interacción árboles-café): C = *Albizia saman* asociado a café, G + P = *Hymenaea courbaril* + *Erythrina poeppigiana* asociado a café, E + P = *Anacardium excelsum* + *Erythrina poeppigiana* asociado a café, pleno sol 1 y pleno sol 2 (controles experimentales). 3b) Distribución de los sub-tratamientos (fertilización diferenciada): F1 = fertilización física, F2 = fertilización química y Cal = parcelas solo con encalado (controles).

#### 4.2.5. Ubicación espacial de los componentes en el diseño experimental

La selección de las especies arbóreas consideró la procedencia, las características auto ecológicas y su valor comercial. En dicho marco, las especies seleccionadas fueron: cenízaro (*Albizia saman*), guapinol (*Hymenaea courbaril*), espavel (*Anacardium excelsum*) y como árbol de servicio poró (*Erythrina poeppigiana*). Desde el punto de vista espacial, los mismos fueron plantados bajo un distanciamiento cuadrado 10 x 10 metros, y todos localizados bajo un sistema de coordenadas cartesianas (X y Y). Un criterio importante en

la selección del distanciamiento se debió a las dimensiones del área del proyecto, la cual es de 8 500 m<sup>2</sup>. Los estudios previos del área permitieron el ordenamiento de los componentes en función del concepto del diseño espacial en parcelas divididas. Para la introducción de los cafetos en el ensayo se tomó como base la distribución espacial de los árboles en coordenadas X Y (Figura 4).

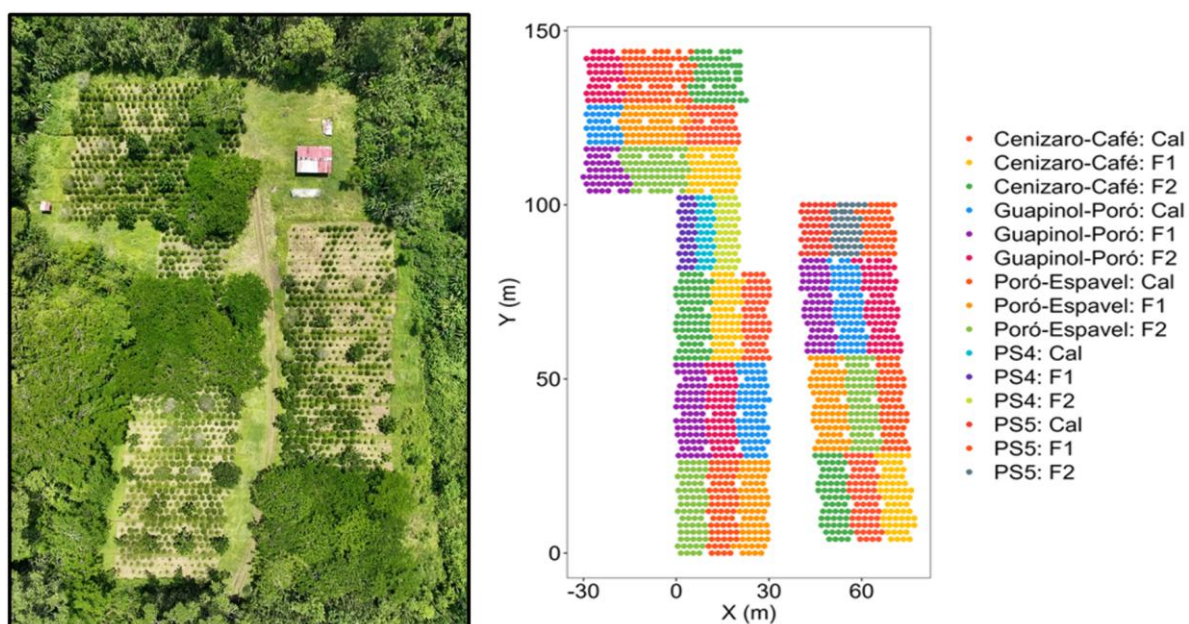


Figura 4. Distribución espacial en coordenadas XY de los individuos del ensayo agroforestal.

La densidad de plantación óptima del café es diferente según la variedad y las condiciones a las que estará expuesto (Arcila *et al.* 2007), por tal razón se planteó un distanciamiento al tresbolillo de 2,2 x 2,2 metros, lo que permitió tener una densidad importante de árboles de café, favoreciéndose inicialmente la aireación y la entrada de luz a los diferentes sistemas o tratamientos (árboles-café). La densidad total del ensayo fue de 2 032 individuos: 1 936 árboles de café (2386 plantas/ha) y 96 árboles maderables (100 árboles/ha) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Información general de los componentes del ensayo agroforestales.

Componente	Usos principales *	Método de plantación	Distanciamiento (m)**	Cantidad de árboles
Esperanza (L4A5)	PC	Tresbolillo	2,2 x 2,2	1936
<i>Albizia saman</i>	M, O, S			30
<i>Hymenaea courbaril</i>	M, S	Cuadrado	10 x 10	19
<i>Anacardium excelsum</i>	M, S			19

<i>Erythrina poeppigiana</i>	O, S	28
<b>Total</b>		2032
* PC = producción de café; M = madera aserrío; O = materia orgánica; S = sombra		
**Densidad de plantas de café y árboles: 2386 plantas/ha y 100 árboles/ha.		

#### 4.2.6. Prácticas de manejo

Las prácticas de manejo aplicadas sobre los cafetos se basaron en el control de malezas, mantenimiento de drenajes, control de plagas y podas. El control de malezas se llevó a cabo de forma manual y consistió en el uso de moto guarañas y machetes (Figura 5a). Al inicio del proyecto se realizaban cortas generalizadas con moto guarañas y machetes, pero con el pasar del tiempo y el crecimiento de los cafetos se fue localizando hasta hacer las cortas a un radio de 2 metros de la planta (Figura 5b).



Figura 5. Control manual de malezas: a) Mantenimiento de drenajes y b) Realización de rodajas o cortas con machete a un radio de 2 metros de la planta.

Desde el punto de vista de control de plagas, se reportó en dos oportunidades ataque de hormigas zompopas (*Atta cephalotes*) las cuales fueron controladas a tiempo. A nivel de podas, se realizaron en los primeros dos años y solo se orientaron a mantener el área de fertilización de los cafetos (6a) y eliminar ramas bajas de los árboles de cobertura para garantizar una formación homogénea (6b).



Figura 6. Realización de podas. a) Podas generalizadas en los cafetos con el propósito de mantener el área de fertilización y b) Podas de formación de las coberturas arbóreas (en la imagen se realiza la poda del Cenízaro).

#### 4.2.7. Fertilizaciones diferenciadas

El enfoque de fertilización se orientó en ofrecer a las plantas de café la cantidad necesaria de nutrientes que permitiera satisfacer sus demandas fisiológicas y mantener el crecimiento y desarrollo de forma óptima. Este enfoque se basa en la idea de que las plantas necesitan ciertos nutrientes en cantidades mínimas para realizar funciones vitales como la fotosíntesis, el crecimiento de tejidos y la reproducción. Suministrar nutrientes por encima de estas cantidades mínimas no proporciona beneficios adicionales y puede resultar en un desperdicio de recursos y posiblemente en impactos ambientales negativos, como la contaminación del agua y el suelo (Engels *et al.* 2012).

En vista del enfoque planteado y los análisis químicos realizados, se tuvo en cuenta la distribución espacial a nivel de sub-tratamientos, se identificaron deficiencias de potasio, fósforo, cobre, zinc y nitrógeno, además de una baja relación entre el calcio y el magnesio. Se determinaron las necesidades de encalado, las cuales se calcularon bajo el método combinado con la premisa de reducir la acidez en un 25% (Espinosa y Molina, 1999).

La formulación 1 denominada fertilización física (F1), consistió en la aplicación de cloruro de potasio (KCL), la cual es la fuente más común de potasio en los fertilizantes disponibles comercialmente en Costa Rica. Esta formulación, que incluye cloro como ion acompañante, se aplicó a una dosis de 13 g por planta. Además, se utilizó MKP (0-52-34), aplicado a 5 g

por planta, como principal fuente de fósforo en forma de  $P_2O_5$ , aportando un 34% de potasio (KCL). Por último, se empleó nitrato de amonio (33,5-0-0), una fuente de nitrógeno  $NH_4NO_3$ , para cubrir las necesidades de nitrógeno de la planta, aplicado a una dosis de 20 g por planta. La dosis por planta se calculó a razón de 30,74 g/planta. La formulación 2 denominada química (F2), compuesta por NPK (9-23-30); fuente principal de fosforo ( $P_2O_5$ ) y potasio (KCL), fue aplicado a una dosis de 57 g, sulfato de cobre a 0,12 g y sulfato de zinc a 0,29 g, todos por planta. La urea (46-0-0); usada como fuente de nitrógeno se aplicó 42 g por planta. El total de la mezcla fue de 79,53 g/planta. Se contempló un área de 0,3 m<sup>2</sup> por planta, correspondiente al área de aplicación de la enmienda nutricional (Cal). Esto permitió reducir el área de fertilización y proporcionar una aplicación localizada, convirtiendo la necesidad por hectárea de 10,000 m<sup>2</sup> en una necesidad por área/planta de 0,3 m<sup>2</sup> (Cuadro 4) (Martins y Guzmán, 2019).

Cuadro 4. Diseño del programa de fertilización con base a la información química del suelo.

Formula	Tipo	Composición	Cantidad (g/planta)	Total (g/planta)**	
F1 (Física)	Simple	Cloruro de potasio (KCL)	0-52-34	10,4	30,74
		Fosfato Monopotásico (MKP)	0-52-34	4,0	
		Nitrato de amonio	33,5-0-0	16,0	
		Sulfato de zinc	0-0-0-35,5 (Zn) / 17,5 (S)	0,24	
		Sulfato de cobre	0-0-0 – 25,2 (Cu) / 12,8 (S)	0,096	
F2 (Química)	Compuesto	NPK	9-23-30	45,6	79,53
		Sulfato de cobre	0-0-0-35,5 (Zn) / 17,5 (S)	0,096	
		Sulfato de zinc	0-0-0 – 25,2 (Cu) / 12,8 (S)	0,232	
		Urea	46-0-0 (N)	33,6	
Cal *	Enmienda	Carbonato de calcio	CaCO <sub>3</sub>	-	41,32

\* Control de acidez para 1936 plantas

\*\* Los valores están calculados en función de una fertilización.

Finalmente, se aplicó el programa considerando tres fertilizaciones anuales en el periodo 2020-2022. En 2023 se realizaron muestreos de suelos y vegetativos (foliares) con el propósito de hacer ajustes en las formulaciones.

#### 4.2.8. Variables cuantitativas y cualitativas del estudio

Las mediciones proporcionan información valiosa sobre el crecimiento de las plantas a lo largo del tiempo. El diámetro basal y la altura de los cafetos son indicadores claves del desarrollo de las plantas, lo que permite el seguimiento del progreso individual y masivo de las plantas además de detectar cualquier cambio significativo (Salisbury y Ross, 1994). En dicho contexto, el programa de medición del ensayo inició en la semana 24 después de haberse plantado los cafetos. La última medición fue realizada en la semana 218 abarcándose un periodo de mediciones de cuatro años (2020-2023). Se procuro levantar información al menos dos veces por año: una en la temporada de menor precipitación y la otra en la temporada propiamente lluviosa. Así mismo, se tuvo en cuenta el monitoreo trimestral desde el punto de vista fenológico (observación de cambios significativos).

##### Variables cuantitativas

A nivel de los árboles maderables y de servicio se registraron las variables diámetro a la altura de pecho (DAP) y altura total (AT). A los cafetos se les midió las siguientes variables cuantitativas:

##### Diámetro de la base (DAB)

El diámetro es una variable importante en la determinación del crecimiento y la salud de los cafetos (Hagggar y Schepp, 2012). Para los objetivos de esta investigación, se llevó a cabo un análisis espaciotemporal del desarrollo de los cafetos. Las mediciones se realizaron utilizando un vernier analógico, asegurando que se ubicara a ras del suelo, pero lo suficientemente distanciado del suelo para evitar cualquier irregularidad que pudiera influir en la precisión del dato (Figura 7a).

##### Altura del cafeto (A)

De la misma forma que el diámetro a la base, la altura de los cafetos resulta ser un factor fundamental que refleja su progreso y evolución en crecimiento. El seguimiento continuo de la altura proporciona valiosa información acerca de la adaptación de las plantas a su entorno, abarcando aspectos como la luminosidad, el suministro de agua y la disponibilidad

de nutrientes (DaMatta, 2004). Inicialmente se midió la altura con una cinta métrica metálica (Figura 7b), sin embargo, conforme la altura fue aumentando se utilizó una vara hipsométrica.




Figura 7. Medición de las variables diámetro a la base (a) y altura total (b) de los cafetos en la semana 24 (inicio de las mediciones). En la fotografía se observa el proceso de medición de la semana 24.

#### Producción de cerezas

Se registró la producción de cerezas a nivel de sub-tratamientos. Se cosecharon granos maduros de los cafetos de las diferentes subparcelas (F1, F2 y Cal) teniendo en cuenta una escala de maduración predeterminada (Cuadro 5). Una vez realizada la cosecha se pesaron en una balanza electrónica para su contabilización. En todas las recolecciones de cerezas maduras se llevaba a cabo un proceso de clasificación que incluía el lavado de las cerezas y la eliminación de frutos irregulares, vanos o vacíos. Lo que finalmente se peso fue el material viable para el proceso de beneficio y consecuente generación de café para el consumo humano (Figura 8).

Cuadro 5. Escala basada en el grado de maduración para la selección del grano en las cosechas.

NIVEL DE MADURACIÓN	COLOR
Verde	
Verde-amarillo	

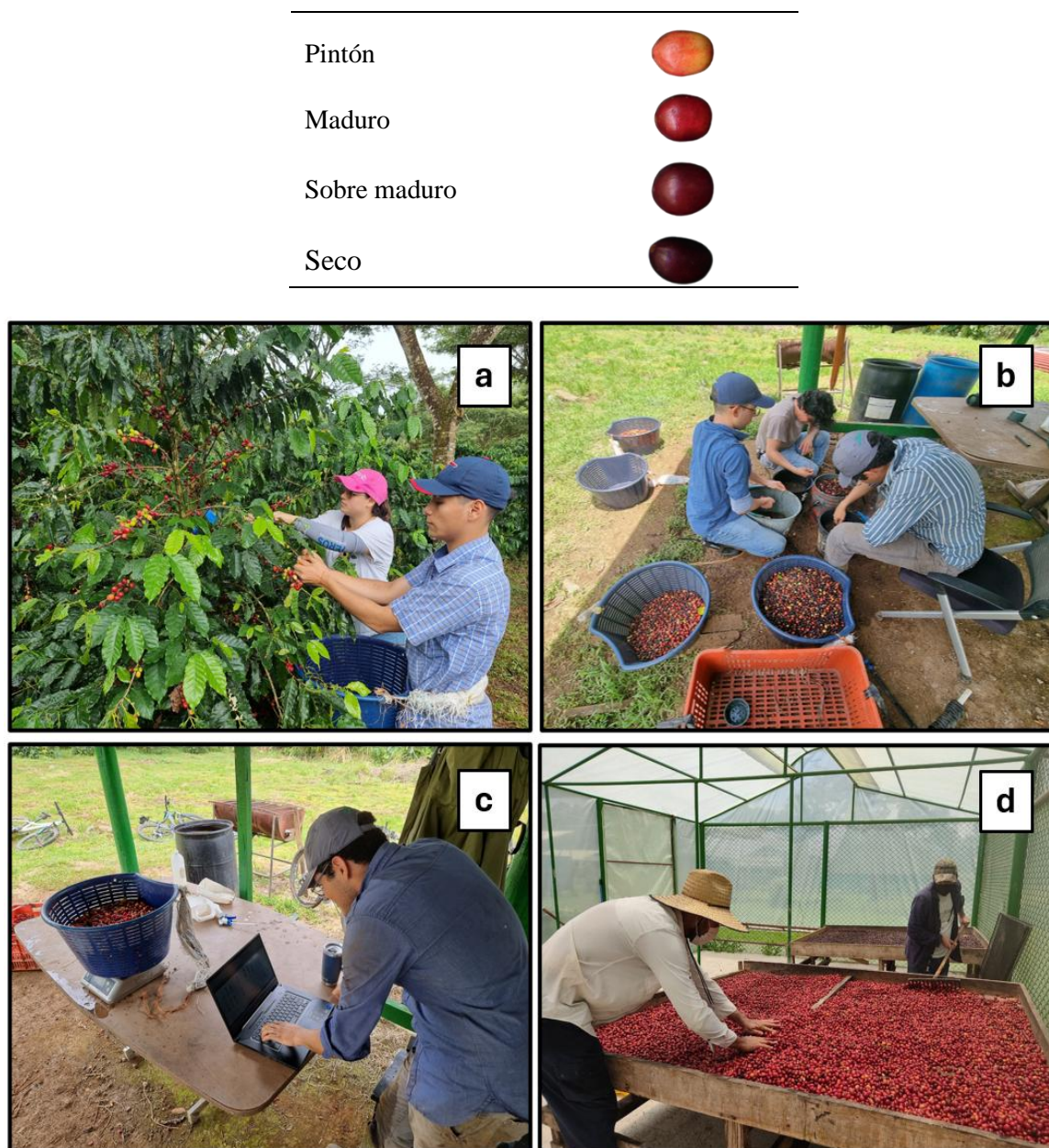


Figura 8. Registro de cosechas. a) recolección de granos maduros. b) clasificación de cerezas de café. c) contabilización de la recolección a nivel de sub-tratamientos. d) proceso de secado al natural.

#### Variables cualitativas

La medición de las variables de crecimiento se realizó paralelamente al registro de las observaciones del estado fenológico de cada planta de café del ensayo. El estado fenológico proporcionó información crucial sobre el ciclo de vida de las plantas y su desarrollo, lo cual sirvió para los análisis posteriores desde el punto fenológico y de resistencia del híbrido. El

registro incluyó la observación de la presencia o ausencia de floración, así como el estado de la planta durante las etapas de preantesis y antesis. Además, se evaluó el estado fitosanitario general de las plantas y se registró la presencia o ausencia de enfermedades como la roya (*Hemileia vastatrix*) y el ojo de gallo (*Mycena citricolor*).

#### 4.2.8. Registro espacio temporal del porcentaje de sombra

Con el propósito de comprender la evolución espacio temporal del porcentaje de sombra bajo los diferentes socios agroforestales del experimento, se establecieron 11 puntos de toma de datos a nivel de las interacciones árboles café (Figura 9a). La toma de imágenes se hizo de dos formas, una toma de imagen con teléfono celular desde los cafetos en sentido de las copas de las coberturas y otra a partir de imágenes tomadas con dron (cenital). La metodología se generó pensando en su fácil acceso y uso, evitándose de esta manera los flujos de trabajo complejos que terminan en la elaboración de ortomosaicos y consecuentemente en analíticas como los índices de vegetación. Para tal fin, se utilizó la herramienta Canopeo, la cual fue capaz de generar estimaciones de cobertura del dosel en porcentaje en ambos sentidos (Patrignani y Ochsner, 2015). Canopeo ha mostrado fuertes correlaciones entre el porcentaje de color verde y la planta, la cual la hizo confiable para los propósitos de la medición (Chung *et al.* 2017). La metodología considera la toma de datos que recomienda el desarrollador (Figura 9b y 9c).

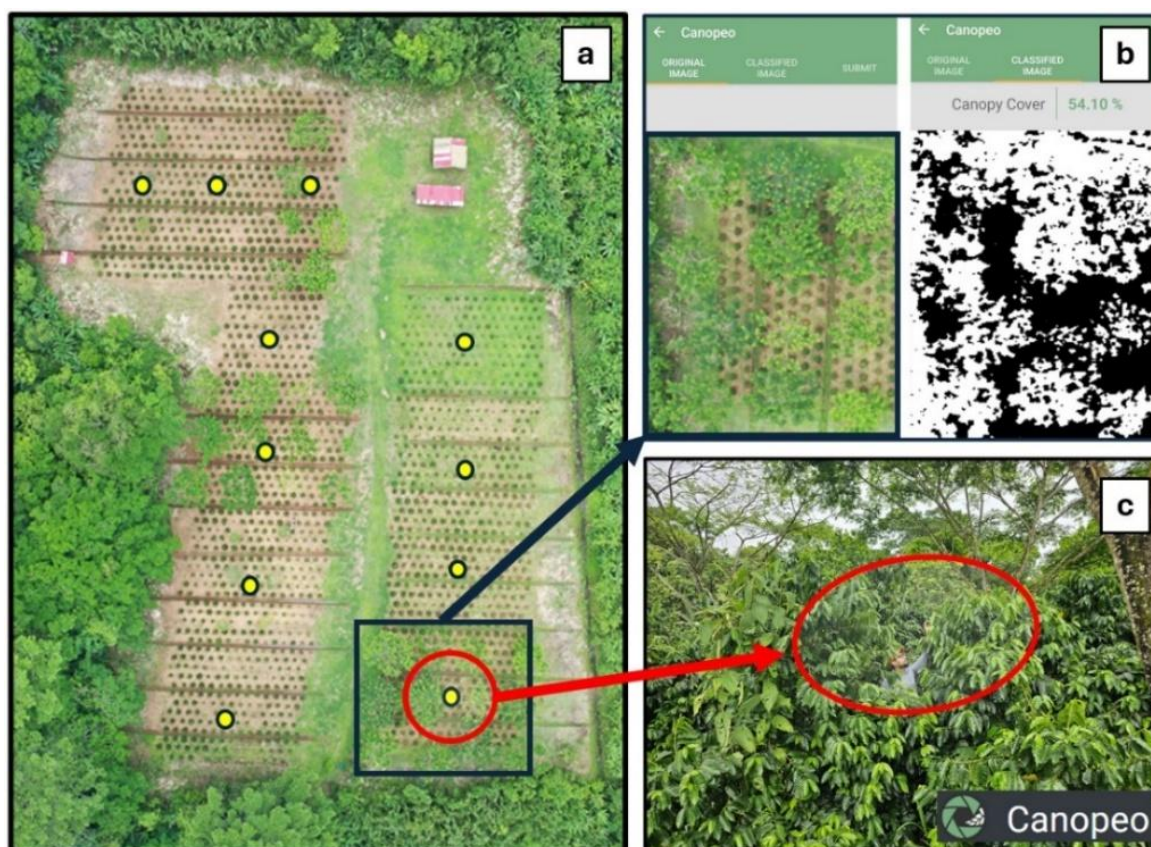


Figura 9. Metodología del registro del porcentaje de cobertura (sombra) con el uso de la aplicación Canopeo. a) Puntos de toma de datos a nivel de interacción árboles-café y controles experimentales pleno sol 1 y 2. b) Determinación de porcentaje de sombra mediante el uso de la aplicación Canopeo sobre imagen tomada con dron. c) Toma de datos para la verificación de porcentajes de sombra obtenidos desde los cafetos. En la imagen se observa la primera medición del 2020.

#### 4.2.9. Análisis de los datos

##### Análisis de varianza y comparación de medias

A fin de conocer los efectos de las coberturas arbóreas y la fertilización diferenciada sobre el crecimiento de los cafetos, se realizó un análisis de varianza de dos factores. Las variables respuesta fueron el diámetro y la altura de los cafetos, donde la interacción coberturas-café (tratamientos) y la fertilización diferenciada (sub-tratamientos) fueron las variables predictoras. También se consideraron las interacciones entre estas. La existencia del bloque en el experimento emergió como un factor aleatorio en el modelo para controlar la variabilidad no explicada por los tratamientos y sub-tratamientos.

Una vez realizado el ANOVA ( $p < 0.05$ ) y encontrado un efecto significativo de los tratamientos y sub-tratamientos, se realizó una comparación de medias de Tukey para determinar qué tratamientos diferían significativamente entre sí. Esta comparación permitió identificar los tratamientos que tuvieron un impacto estadísticamente significativo en el crecimiento de los cafetos. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando el software RStudio (RStudio Team, 2023).

#### Mortalidad acumulada

Se calculó la mortalidad acumulada considerando la siguiente fórmula:

$$\text{Mortalidad acumulada (\%)} = \left( 1 - \frac{\text{Plantas sobrevivientes}}{\text{Cafetos establecidos}} \right) * 100$$

La fórmula permitió comparar el número de plantas sobrevivientes en el año 2023 con el número de plantas que inicialmente se establecieron en el 2019. La sustracción del valor total inicial de cafetos, dividido por el número total inicial de plantas, facilitó calcular la proporción de plantas que han muerto en relación con el número total inicial, expresado en porcentaje. La mortalidad acumulada ofrece una idea sobre la pérdida de cafetos en el contexto específico de tratamientos y sub-tratamientos.

#### Análisis del crecimiento

En aras de comprender el crecimiento de las variables diámetro de la base y altura, se ajustó la función logística de crecimiento con el propósito de conocer el patrón general de crecimiento de las variables en función del tiempo. Así mismo, se calculó la tasa de crecimiento absoluto que proporciona una medida cuantitativa de la velocidad de crecimiento en términos absolutos (Macher *et al.* 1991).

#### Ajuste del modelo logístico de crecimiento para las variables diámetro y altura

Se ajustó la función logística de crecimiento con el propósito de entender las etapas de crecimiento de los cafetos: la etapa exponencial y la etapa asintótica, lo que permite describir como los cafetos crecen en el tiempo (Meek *et al.* 1991). La ecuación fue la siguiente:

$$y = \frac{\varphi 1}{\left\{ 1 + \exp \left[ -\frac{(T - \varphi 2)}{\varphi 3} \right] \right\}}$$

$y$ : Representa la variable estudiada (diámetro de la base o altura).

$T$ : Se refiere a las semanas de observación después de establecidas las plantas de café en campo.

$\varphi 1$ : Se refiere al valor de la asíntota o valor máximo de  $y$  alcanzado.

$\varphi 2$ : Se refiere al tiempo en el cual se alcanza la mitad del valor de la asíntota.

$\varphi 3$ : Se refiere al tiempo transcurrido entre el momento de haber alcanzado la mitad de la asíntota y los  $\frac{3}{4}$  de ella.

Cálculo de la tasa de crecimiento absoluto

La tasa de crecimiento absoluto de las variables diámetro de la base y altura de los cafetos en relación con el tiempo, permitió identificar los patrones de crecimiento y entender el efecto de los diferentes tratamientos, sub-tratamientos y sus interacciones sobre la velocidad a la que la variable está creciendo o disminuyendo en términos absolutos. Las ecuaciones T.C.A se obtuvieron a partir de la aplicación de la primera derivada en cada una de las ecuaciones logísticas ajustadas.

La ecuación de la tasa de crecimiento absoluto utilizada fue:

$$T.C.A = \frac{\frac{\varphi 1}{\varphi 3} * e^{\left(\frac{\varphi 2 - T}{\varphi 3}\right)}}{\left(1 + e^{\left(\frac{\varphi 2 - T}{\varphi 3}\right)}\right)^2}$$

Donde:

$T.C.A$ : Representa la tasa de crecimiento absoluto.

$\varphi 1$ : Representa la asíntota o valor máximo alcanzado de las variables diámetro y altura.

$\varphi 2$ : Se refiere a la semana en la que la variable, sea diámetro o altura alcanza su valor máximo.

$\varphi 3$ : Es un parámetro que representa una constante de escala que afecta la magnitud de la tasa de crecimiento.

$T$ : Es la variable independiente en la ecuación que representa las semanas de medición.

$e$ : Es la base del logaritmo natural, aproximadamente igual a 2.71828.

### 4.3. Resultados y discusión

#### 4.3.1. Evolución del porcentaje de sombra

La luz es crucial para el crecimiento y desarrollo del café, ya que proporciona la energía necesaria para la fotosíntesis. Este proceso permite que las plantas conviertan la luz en carbohidratos y oxígeno, fundamentales para su metabolismo y desarrollo (Ovalle-Rivera *et al.* 2016). La luz también influye en la fenología del café, regulando la floración, la formación de frutos y la maduración de los granos (DaMatta, 2004). Así mismo, se tiene por entendido que el café utiliza apenas alrededor del 1% de la radiación solar que recibe para llevar a cabo la fotosíntesis. Cuando la temperatura de las hojas supera los 34 °C, la capacidad de asimilación de la planta prácticamente se anula. Por lo tanto, las plantas de café que crecen bajo sombra tienen un coeficiente de fotosíntesis más alto en comparación con aquellas expuestas completamente al sol (Jiménez, 2007).

En términos agroforestales y de la cantidad de luz que filtran las coberturas arbóreas, el porcentaje de sombra juega un papel importante en términos de salud y el rendimiento de las plantas. El porcentaje de sombra es una forma de medir la entrada de luz, ya que determina cuánta luz solar alcanza las plantas debajo del dosel (Lin, 2007). La cantidad adecuada de sombra puede proporcionar protección contra el estrés por calor, reducir la pérdida de agua por evaporación y mejorar la calidad del suelo al promover la materia orgánica y la biodiversidad (Vaast y Bertrand, 2000). No obstante, un exceso de sombra puede disminuir la fotosíntesis y la producción de frutos, lo que afecta negativamente el rendimiento del café (Perfecto y Vandermeer, 2008).

Teniendo en cuenta lo anterior y en el marco del ensayo, el registro del porcentaje de sombra se llevó a cabo a través de mediciones anuales considerando la distribución espacial de los tratamientos. Se utilizó la aplicación Canopeo, la cual se basa en las proporciones de color de rojo a verde (R/G), de azul a verde (B/G) y un índice de exceso de verde ( $2G-R-B$ ) derivadas de imágenes tomadas con un dispositivo móvil (Patrignani y Ochsner, 2015).

Claramente existen instrumentos y métodos robustos para realizar las estimaciones de porcentaje, no obstante, estos requieren mucho tiempo de procesamiento y en general son costosas. La incorporación de drones en este análisis tiene un enorme potencial para los productores agroforestales, dado que la tecnología cada vez es más accesible para las personas (FAO, 2022) y la tendencia es la existencia de iniciativas donde hay subsidios, opciones de alquiler y modelos de propiedad grupal que permiten la apropiación en la práctica (Krishiviman, 2023).

Cronológicamente los árboles de Cenízaro fueron los primeros componentes introducidos en el ensayo, a finales del 2017. El resto de las coberturas como Guapinol, Espavel y Poró, se establecieron a finales de 2018 y a mediados del 2019. Una vez estando las coberturas establecidas, se plantaron los cafetos en septiembre-octubre de 2019. Se registró anualmente el desarrollo de las copas de las diferentes coberturas a través de registros aerofotográfico con dron (Figura 10).

La evolución de los porcentajes de sombra en los tratamientos Espavel-Poró, Guapinol-Poró y Pleno Sol 1 mostraron similitudes relativas (Figura 11). En la última medición del 2023, los valores registrados para estos tres tratamientos oscilaron entre el 18% y el 30%, siendo Pleno Sol 1 el que presentó la cifra más alta, aun siendo el de menor porcentaje de sombra. Es importante destacar que el tratamiento Pleno Sol 1, concebido originalmente como un área sin asociación arbórea en el diseño experimental, fue influenciado por la presencia cercana de los árboles de Cenízaro, debido a la aleatorización en los bloques experimentales, lo que condicionó en un porcentaje de sombra por encima del 65% en 2023 (Figura 12).

Cenízaro presentó el mayor desarrollo y por tanto los porcentajes de sombra más altos, lo que resulto consistente con el desarrollo del árbol que es reconocido por la amplia copa que desarrolla similar a la de un paraguas (Villalobos *et al.* 2017). Otro punto importante en el desarrollo de la copa del Cenízaro fue la realización de las podas, las cuales se orientaron a la formación general del tronco de los árboles y la regulación de la sombra dada por ramas bajas y laterales. Lo anterior se realizó de forma generalizada a los árboles del experimento.



Figura 10. Registro aéreo de la evolución espacio temporal de las coberturas de los diferentes componentes del ensayo agroforestal.

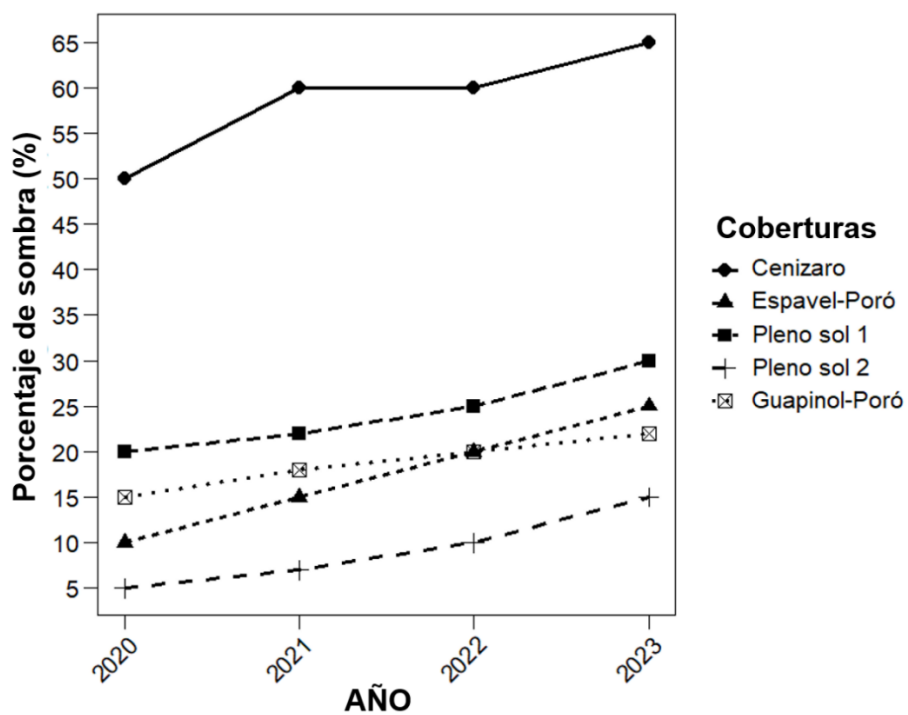


Figura 11. Evolución del porcentaje de sombra a nivel de tratamientos (coberturas).

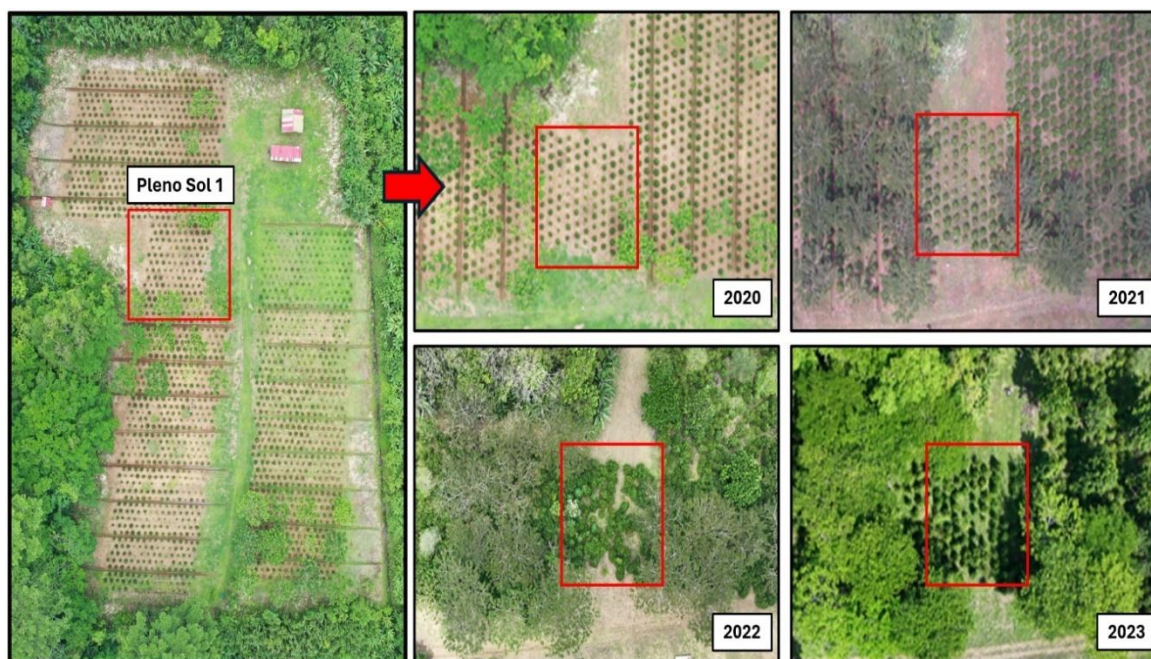


Figura 12. Influencia de las coberturas de Cenízaro sobre el control experimental denominado Pleno Sol 1.

#### 4.3.2. Efecto de los tratamientos y sub-tratamientos sobre el crecimiento

##### Análisis de varianza

El análisis de varianza ( $p < 0.05$ ) indicó que al menos una de las coberturas (tratamientos) tuvo un efecto significativo tanto en el diámetro como en la altura de los cafetos. El mismo resultado se observó en el caso de los sub-tratamientos (fertilizaciones diferenciadas) donde hubo una alta significancia. En relación con la ubicación de los bloques, el efecto fue altamente significativo lo que se traduce en que la variabilidad entre estos fue importante.

En la interacción coberturas y fertilizaciones diferenciadas, no se encontraron diferencias significativas, no obstante, en las interacciones coberturas-bloque, fertilizaciones diferenciadas-bloque, y la relación entre estos, se reveló que existió un efecto combinado sobre el crecimiento de las variables estudiadas y que varían dependiendo del tratamiento, sub-tratamientos y del bloque en el que se encuentran (Cuadro 6).

Cuadro 6. ANOVA de dos factores para las variables diámetro basal y altura.

<b>Diámetro basal</b>					
	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media cuadrática</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>
Tratamiento	4	949	237,13	84,56	0,001 ***
Sub-tratamiento	2	295	147,40	52,56	0,001 ***
Bloque	2	40	20,03	7,14	0,000803***
Tratamiento:Sub-tratamiento	4	37	4,58	1633,00	0,110059
Tratamiento:Bloque	4	30	7,60	2711,00	0,028548*
Sub-tratamiento:Bloque	4	65	16,29	5810,00	0,000117***
Tratamiento-Sub-tratamiento-Bloque	4	71	8,92	3182,00	0,001335*
Residuales	3567	10004	2,80		
<b>Altura</b>					
	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media cuadrática</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>
Tratamiento	4	201	50,25	84,56	0.001***
Sub-tratamientos	2	26	12,93	52,56	0.001***
Bloque	2	34	16,81	7,14	0.001***
Tratamiento:Sub-tratamiento	8	5	0,66	1633,00	0,09557.
Tratamiento:Bloque	4	9	2,31	2711,00	0.001***
Sub-tratamiento:Bloque	4	6	1,54	5810,00	0,00516**
Tratamiento-Sub-tratamiento-Bloque	8	10	1,19	3182,00	0,002006**
Residuales	3567	1394,20	0,39		
<b>Significancia: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1</b>					

### Prueba de Tukey

Se realizó un análisis de comparaciones múltiples de medias utilizando la prueba de Tukey para conocer las diferencias entre las variables diámetro y altura a nivel de tratamientos y sub-tratamientos. Los valores p se ajustaron utilizando un nivel de significancia de 0.05. Se observaron diferencias significativas para ambas variables entre los tratamientos Espavel-Poró y Cenízaro, Pleno-Sol-1 y Cenízaro, así como Pleno-Sol-2 y Cenízaro, lo que sugieren que los tratamientos tienen un efecto significativo y combinado sobre las variables.

Asimismo, los tratamientos Guapinol-Poró vs Espavel-Poró y Pleno-Sol-2 vs Espavel-Poró, resultaron no significativos (Cuadro 7).

Cuadro 7. Comparaciones múltiples de medias de Tukey para las variables diámetro y altura a nivel de tratamiento.

<b>Diámetro basal</b>			
<b>Comparación</b>	<b>Diferencia media</b>	<b>Intervalo de confianza (95%)</b>	<b>Valor p ajustado</b>
Espavel-Poró vs Cenízaro	0,3906	0,1497: 0,6315	0,0001
Guapinol-Poró vs Cenízaro	0,2561	0,0152: 0,4970	0,0307
Pleno-Sol-1 vs Cenízaro	0,6001	0,3592: 0,8410	< 0,0001
Pleno-Sol-2 vs Cenízaro	-0,8756	-1,1165: -0,6348	< 0,0001
Guapinol-Poró vs Espavel	-0,1346	-0,3754: 0,1063	> 0,5465
Pleno-Sol-1 vs Espavel	0,2094	-0,0314: 0,4503	> 0,123
Pleno-Sol-2 vs Espavel	-12663	-1,5071: -1,0254	< 0,0001
Pleno-Sol-1 vs Guapinol	0,344	0,1031: 0,5849	0,0009
Pleno-Sol-2 vs Guapinol	-11317	-1,3726: -0,8908	< 0,0001
Pleno-Sol-2 vs Pleno-Sol-1	-14757	-1,7166: -1,2348	< 0,0001
<b>Altura</b>			
<b>Comparación</b>	<b>Diferencia media</b>	<b>Intervalo de confianza (95%)</b>	<b>Valor p ajustado</b>
Espavel-Poró vs Cenízaro	-0,1082	-0,1982: -0,0183	0,0091
Guapinol-Poró vs Cenízaro	-0,2134	-0,3033: -0,1235	< 0,0001
Pleno-Sol-1 vs Cenízaro	-0,0869	-0,1769: 0,0030	0,0638
Pleno-Sol-2 vs Cenízaro	-0,6679	-0,7578: -0,5780	< 0,0001
Guapinol-Poró vs Espavel	-0,1052	-0,1951: -0,0152	0,0124
Pleno-Sol-1 vs Espavel	0,0213	-0,0686: 0,1112	0,9674
Pleno-Sol-2 vs Espavel	-0,5597	-0,6496: -0,4697	< 0,0001
Pleno-Sol-1 vs Guapinol	0,1264	0,0365: 0,2164	0,0012
Pleno-Sol-2 vs Guapinol	-0,4545	-0,5444: -0,3646	< 0,0001
Pleno-Sol-2 vs Pleno-Sol-1	-0,581	-0,6709: -0,4910	< 0,0001

A nivel de sub-tratamientos (Cuadro 8), se encontraron diferencias claramente significativas entre las fertilizaciones diseñadas (física y química) versus el control experimental denominado Cal. Entre las fertilizaciones químicas y físicas no se hallaron diferencias significativas: diámetro ( $p < 0.2114$ ) y altura ( $p < 0,9999$ ). En general, el análisis sugiere que las diferencias entre los tratamientos y sub-tratamientos no se deben

únicamente a la variabilidad aleatoria de las variables diámetro y altura, sino que reflejan diferencias reales en el contexto del diseño experimental.

Cuadro 8. Comparaciones múltiples de medias de Tukey para las variables diámetro y altura a nivel de sub-tratamientos.

<b>Diámetro</b>			
<b>Comparación</b>	<b>Diferencia media</b>	<b>Intervalo de confianza (95%)</b>	<b>Valor p ajustado</b>
F1 vs Cal	0,6075	0,4472: 0,7678	<0,0001
F2 vs Cal	0,6067	0,4464: 0,7670	<0,0001
F2 vs F1	-0,0008	-0,1611: 0,1595	0,9999245
<b>Altura</b>			
<b>Comparación</b>	<b>Diferencia media</b>	<b>Intervalo de confianza (95%)</b>	<b>Valor p ajustado</b>
F1 vs Cal	0,1974	0,1376: 0,2573	<0,0001
F2 vs Cal	0,1544	0,0946: 0,2143	<0,0001
F2 vs F1	-0,043	-0,1028: 0,0169	0,2114137

#### Mortalidad acumulada

La mortalidad general acumulada para el periodo 2019-2023 se contabilizó en un 6,92%. Los tratamientos sin asociación arbórea denominados Pleno Sol 1 y Pleno Sol 2, registraron los porcentajes de mortalidad más altos con 19,17% y 39,23% respectivamente (Cuadro 9). La asociación Cenízaro-café registro menos mortalidad que el resto de las asociaciones con un 2,22% (solo 12 cafetos muertos). Teniendo en cuenta que es el tratamiento con porcentajes de sombra de 75,7% (significativamente superior al resto).

Cuadro 9. Mortalidad acumulada a nivel de tratamientos (coberturas y a pleno sol)

<b>Tratamiento</b>	<b>Nº Cafetos establecidos</b>	<b>Nº Cafetos (2023)</b>	<b>Cafetos muertos</b>	<b>Mortalidad acumulada (%)</b>
Cenízaro	540	528	12	2,22
Espavel	616	586	30	4,87
Guapinol	530	512	18	3,40
Pleno sol 1	120	97	23	19,17
Pleno sol 2	130	79	51	39,23
<b>Total</b>	<b>1936</b>	<b>1802</b>	<b>134</b>	<b>6,92</b>

En las parcelas bajo fertilizaciones diferenciadas (sub-tratamientos), los porcentajes de mortalidad acumulada fueron: 6,43% (fertilización física), 6,40% (fertilización química) y 7,94% (Cal) (Cuadro 10). Tanto en tratamientos como sub-tratamientos la mayor mortalidad se encontró en los sitios donde los cafetos no estaban asociados a árboles y no recibían fertilización. En términos espaciales, se puede observar la evolución de la mortalidad y como en 2023 se concentra en los tratamientos mencionados (Figura 13).

Cuadro 10. Mortalidad acumulada a nivel de sub-tratamientos (fertilizaciones diferenciadas)

Sub-tratamientos	Nº Cafetos establecidos	Nº Cafetos (2023)	Cafetos muertos	Mortalidad acumulada (%)
Fertilización física (F1)	638	597	41	6,43
Fertilización química (F2)	656	614	42	6,40
Solo encalado (Cal)	642	591	51	7,94
<b>Total</b>	<b>1936</b>	<b>1802</b>	<b>134</b>	<b>6,92</b>

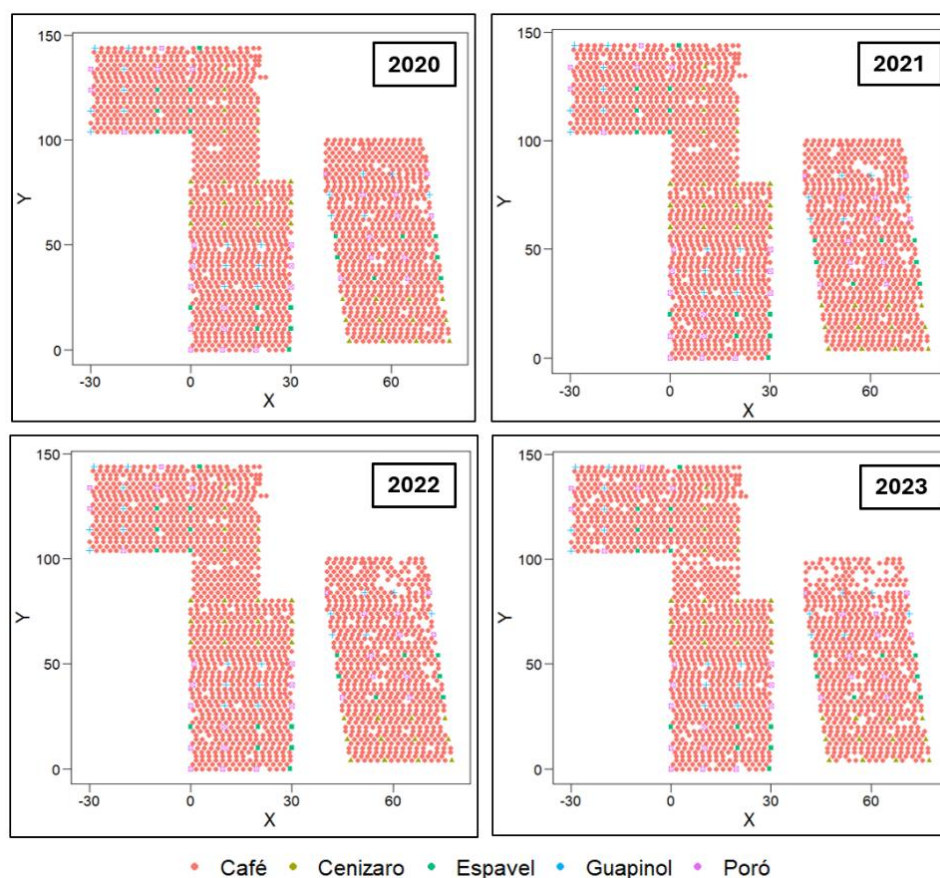


Figura 13. Evolución espacial de la mortalidad en el periodo 2020-2023.

### 4.3.3. Análisis del crecimiento

Las mediciones de las variables de crecimiento se llevaron a cabo en el periodo 2020-2023, realizándose en total 12 mediciones. La primera medición se llevó a cabo en la semana 24 posterior al establecimiento del ensayo (2019) y la última en la semana 218 a finales del 2023.

#### Crecimiento del diámetro de la base de los cafetos (DAB)

Los valores promedio del diámetro de la base, tanto para los tratamientos como para los sub-tratamientos, revelaron que los cafetos ubicados en el área a Pleno Sol 1 mostraron mediciones superiores en cuanto a magnitud. Además, se observaron valores promedio más altos en las subparcelas que recibieron fertilización diferenciada, ya sea física o química, ambos ligeramente superiores a los 7 cm de diámetro. Lo mismo ocurrió con el grupo de control experimental en la misma área de Pleno Sol 1, con mediciones por encima de los 6 cm de diámetro (Figura 14). Espavel-Poró y Guapinol-Poró ocuparon el segundo lugar en términos de diámetro de la base, con mediciones por debajo de los 7 cm, y en el grupo de control experimental, las mediciones estuvieron por debajo de los 6 cm. El promedio observado en la subparcela del control experimental del tratamiento Cenízaro fue similar.

#### Crecimiento de la altura de los cafetos (A)

El tratamiento Cenízaro destacó con valores promedio de altura superiores a los demás en todas las interacciones. Cenízaro-F1 y Cenízaro-F2 registraron alturas superiores a los 3 metros, mientras que Cenízaro-Cal promedió 2,75 metros de altura. Seguidos al Cenízaro, Pleno Sol 1, Espavel-Poró y Guapinol-Poró se ubicaron en torno a los 2,6 metros y Pleno Sol 2 registró valores por debajo de los 2,2 metros (Figura 14).

#### Ajuste del modelo logístico de crecimiento

El ajuste del modelo logístico de crecimiento se realizó considerando las diferentes combinaciones, lo que permitió determinar los coeficientes de crecimiento con base a: 1.) el valor máximo alcanzado de la variable diámetro de la base y altura, 2.) la tasa de crecimiento exponencial de estas y 3.) el tiempo en el que las variables alcanzan su valor

máximo de crecimiento (Lieth *et al.* 1996). En relación con el diámetro de la base de los cafetos, se observó que las combinaciones que mostraron el mayor potencial de crecimiento fueron el Pleno Sol 1 en la subparcela sin fertilización, Pleno Sol 1 en la subparcela fertilizada con una mezcla química, y Espavel-Poró fertilizado con una mezcla física, con valores de 6,85 cm, 7,59 cm y 7,74 cm respectivamente (Cuadro 11). Para esas mismas combinaciones, respecto al tiempo necesario para que el diámetro de la base alcanzara el 50% de su valor asintótico máximo, se encontró que para Pleno Sol 1 en la subparcela fertilizada con una mezcla química y Espavel-Poró fertilizado con una mezcla física, este punto se alcanzó en la semana 78. Mientras que para la combinación de Pleno Sol 1 en la subparcela fertilizada con una mezcla química, sucedió en la semana 67.

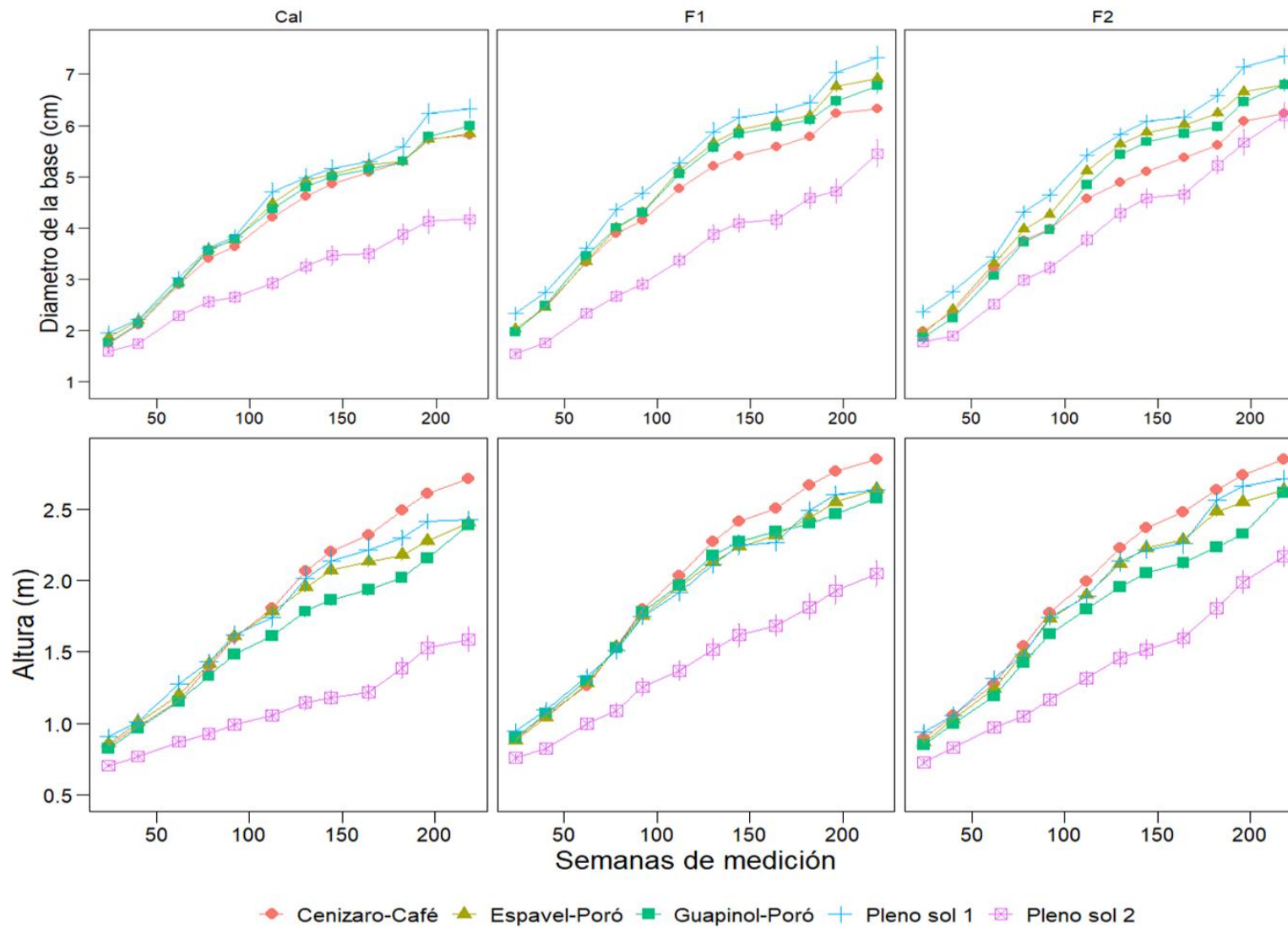


Figura 14. Valores promedio de diámetro de la base y altura de los cafetos a nivel de tratamientos y sub-tratamientos.

Cuadro 11. Parámetros de los modelos ajustados para la variable diámetro de la base.

<b>Combinación</b>	<b><math>\varphi 1</math></b>	<b><math>\varphi 2</math></b>	<b><math>\varphi 3</math></b>
Cenízaro/Cal	5.94 $\pm$ 0.28	67.44 $\pm$ 6.66	54.07 $\pm$ 7.35
Espavel-Poró/Cal	6.12 $\pm$ 0.27	65.31 $\pm$ 5.99	52.66 $\pm$ 6.82
Guapinol-Poró/Cal	5.84 $\pm$ 0.19	62.79 $\pm$ 4.42	44.14 $\pm$ 5.16
Pleno sol 1/Cal	6.85 $\pm$ 0.33	78.31 $\pm$ 6.93	55.78 $\pm$ 6.57
Pleno sol 2/Cal	4.26 $\pm$ 0.1	60.19 $\pm$ 10.24	58.38 $\pm$ 12.38
Cenízaro/F1	6.04 $\pm$ 0.17	55.95 $\pm$ 3.89	42.61 $\pm$ 4.87
Espavel-Poró/F1	7.74 $\pm$ 0.33	78.81 $\pm$ 6.13	55.66 $\pm$ 5.78
Guapinol-Poró/F1	6.99 $\pm$ 0.25	66.79 $\pm$ 4.9	50.62 $\pm$ 5.49
Pleno sol 1/F1	7.57 $\pm$ 0.31	67.79 $\pm$ 5.8	56.58 $\pm$ 6.33
Pleno sol 2/F1	5.91 $\pm$ 0.53	91.55 $\pm$ 14.44	66.75 $\pm$ 11.08
Cenízaro/F2	6.85 $\pm$ 0.45	76.24 $\pm$ 10.3	66.11 $\pm$ 9.61
Espavel-Poró/F2	7.21 $\pm$ 0.25	71.50 $\pm$ 4.71	49.30 $\pm$ 4.96
Guapinol-Poró/F2	7.24 $\pm$ 0.31	79.72 $\pm$ 6.04	53.50 $\pm$ 5.67
Pleno sol 1/F2	7.59 $\pm$ 0.28	67.65 $\pm$ 5.21	53.96 $\pm$ 5.73
Pleno sol 2/F2	7.07 $\pm$ 0.69	106.11 $\pm$ 16.34	70.62 $\pm$ 10.5

$\pm$  Error estándar

El tratamiento Pleno Sol 2 bajo las fertilizaciones física, química y el control experimental con solo encalado, reporto el menor crecimiento comparado con todas las combinaciones, sin embargo, en todos los casos la tasa de crecimiento inicial de la curva fue superior al resto.

La variable altura, se destaca el mayor potencial de crecimiento en las combinaciones donde se encuentra el Cenízaro (Cuadro 12). En el caso del Cenízaro fertilizado con mezcla física, química y en el grupo de control experimental, se observaron valores de 3,07 m, 3,49 m y 3,08 m, respectivamente. Además, el Pleno Sol 1, influenciado por la sombra del Cenízaro y bajo fertilización física y química, registró los segundos valores más altos con 2,91 m y 3,01 m. En cuanto al crecimiento inicial, se observó que los cafetos expuestos a mayores niveles de luz experimentaron un crecimiento más rápido en las primeras semanas, aunque con el paso del tiempo este crecimiento se fue estabilizando más rápidamente que en los tratamientos con menor exposición a la luz (Figura 15). Este patrón es similar con lo reportado en el experimento de Encalada *et al.* (2016), donde una mayor intensidad de luz resultó en un crecimiento inicial más acelerado en los tratamientos con menor sombra.

Cuadro 12. Parámetros de los modelos ajustados para la variable altura de los cafetos

<b>Combinación</b>	<b><math>\phi 1</math></b>	<b><math>\phi 2</math></b>	<b><math>\phi 3</math></b>
Cenízaro/Cal	3.08 $\pm$ 0.17	87.78 $\pm$ 8.62	64.22 $\pm$ 7.02
Espavel-Poró/Cal	2.69 $\pm$ 0.14	72.26 $\pm$ 8.01	63.26 $\pm$ 7.99
Guapinol-Poró/Cal	2.58 $\pm$ 0.2	74.07 $\pm$ 12.9	73.89 $\pm$ 11.91
Pleno sol 1/Cal	2.65 $\pm$ 0.12	69.42 $\pm$ 6.71	59.39 $\pm$ 7.08
Pleno sol 2/Cal	2.59 $\pm$ 1.36	164.49 $\pm$ 143.41	133.22 $\pm$ 55.84
Cenízaro/F1	3.07 $\pm$ 0.1	76.46 $\pm$ 4.8	52.89 $\pm$ 4.71
Espavel-Poró/F1	2.71 $\pm$ 0.08	64.23 $\pm$ 4.12	48.80 $\pm$ 4.77
Guapinol-Poró/F1	2.66 $\pm$ 0.08	62.56 $\pm$ 4.44	50.68 $\pm$ 5.26
Pleno sol 1/F1	2.91 $\pm$ 0.14	71.99 $\pm$ 7.6	63.94 $\pm$ 7.59
Pleno sol 2/F1	2.30 $\pm$ 0.21	81.77 $\pm$ 15.23	73.14 $\pm$ 12.79
Cenízaro/F2	3.49 $\pm$ 0.2	97.29 $\pm$ 9.61	67.61 $\pm$ 6.88
Espavel-Poró/F2	2.83 $\pm$ 0.11	70.73 $\pm$ 5.94	57.43 $\pm$ 6.21
Guapinol-Poró/F2	2.62 $\pm$ 0.14	70.43 $\pm$ 8.17	63.51 $\pm$ 8.35
Pleno sol 1/F2	3.01 $\pm$ 0.15	75.43 $\pm$ 8.04	65.18 $\pm$ 7.58
Pleno sol 2/F2	3.42 $\pm$ 0.94	166.39 $\pm$ 59.24	103.79 $\pm$ 21.99

$\pm$  Error estándar

En relación con las curvas de crecimiento del diámetro de la base (Figura 15), se observa un patrón general donde la curva es similar a cualquier otro crecimiento vegetal (Richard, 1959). Para este caso en específico, las combinaciones con valores asintóticos más altos tienden a tener tasas de crecimiento inicial más lentas. Este patrón es evidente en las curvas de crecimiento de las combinaciones que incluyen Pleno Sol 1 en todas las modalidades de fertilización y control experimental, Espavel-Poró bajo fertilización física, y en tercer lugar Guapinol-Poró fertilizado con mezcla química. Por otro lado, se observa que los valores asintóticos mínimos están asociados con tasas de crecimiento inicial más altas, como se puede apreciar en la mayoría de las combinaciones con bajos porcentajes de sombra, como Guapinol-Poró y Pleno Sol 2 en todas sus modalidades de fertilización y control experimental. A nivel de la variable altura, se observa que las combinaciones con mayor sombra, como las registradas en Cenízaro y Pleno Sol 1, muestran los mayores valores asintóticos, aunque con tasas de crecimiento más lentas. Por el contrario, las combinaciones que tienen menor porcentaje de sombra tienen un efecto en el crecimiento que es bajo, pero con un crecimiento inicial más rápido (Figura 16).

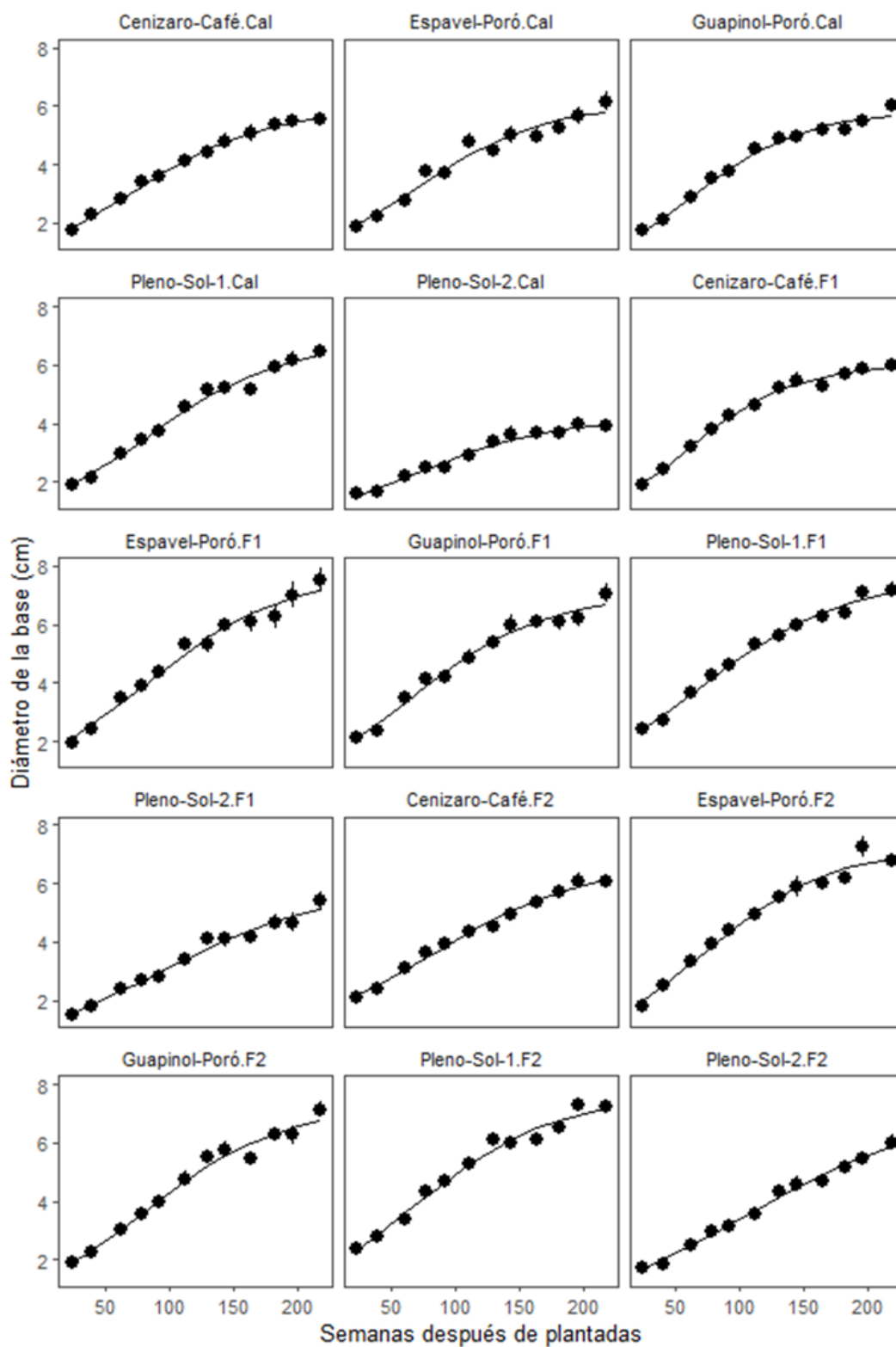


Figura 15. Curvas de Crecimiento del Diámetro de la Base de cafetos bajo diferentes combinaciones.

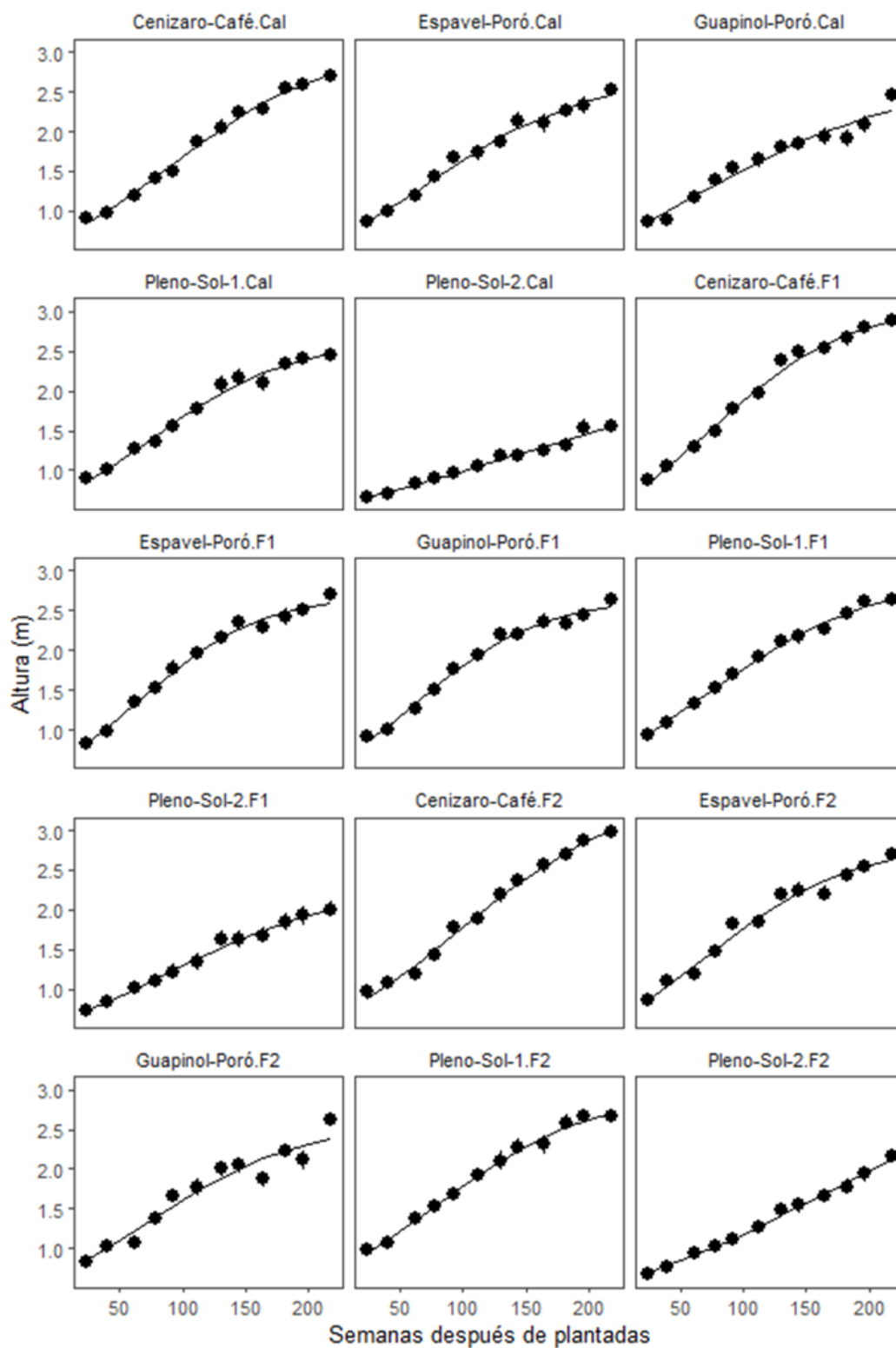


Figura 16. Curvas de crecimiento de la altura de los cafetos bajo diferentes combinaciones

### Tasa de crecimiento absoluto

La tasa de crecimiento absoluto se calculó a partir de la primera derivada del modelo logístico de crecimiento (Sokal y Rohlf, 2012), proporcionando la tasa a la que los cafetos crecen a nivel del diámetro de la base y la altura (Alonso, 2003). Para el propósito de los análisis de este estudio se consideraron las tres mediciones que se realizaron anualmente y se catalogaron a nivel de semanas de medición, lo que resultó en 12 semanas de medición. La primera semana de los datos correspondió a la semana 24 posterior al establecimiento de los cafetos y la última semana fue la 218, la cual fue la medición que se realizó a finales de 2023.

La tasa de crecimiento absoluto proporcionó una medida de la rapidez con la que las variables estudiadas experimentaron cambios en unidades absolutas (en centímetros para el diámetro de la base y metros para la altura), durante el período comprendido entre la semana 24 y la semana 218. Se pudo observar que en la variable diámetro de la base, las combinaciones Cenízaro (CCal) y Espavel-Poró (EPCal) sin ninguna fertilización asociada registraron la tasa máxima alcanzada entre las semanas 25 y 75, respectivamente, con valores de 0,046 cm y 0,034 cm. Para el caso de la fertilización física, las tasas máximas estuvieron niveladas entre las combinaciones Espavel-Poró (EPF1), Pleno Sol 1 (PS1F1), Cenízaro (CF1) y Guapinol-Poró (GPF1) con 0,039 cm, 0,037 cm, 0,035 cm y 0,030 cm, alcanzándose en las semanas 65, 160, 100 y 80, respectivamente. Bajo la fertilización química, las combinaciones Espavel-Poró (EPF2) y Pleno Sol 1 (PS1F2) registraron valores superiores con 0,051 cm y 0,038 cm, alcanzados en las semanas 75 y 85 (Cuadro 13).

Respecto a la variable altura, en los sectores sin fertilización asociada, se registró la tasa máxima de crecimiento en las combinaciones Cenízaro (CCal) y Espavel-Poró (EPCal), alcanzando valores de 0,0125 y 0,0110 metros respectivamente, durante las semanas 60 y 100. En contraste, en las combinaciones con fertilización física (CF1, EPF1, GPF1), se observaron tasas máximas similares entre las semanas 40 y 50, con alturas de 0,0114 metros para Cenízaro (CF1), y 1,110 metros para Espavel-Poró (EPF1) y Guapinol-Poró (GPF1). Por último, las combinaciones asociadas a la fertilización química (CF2, EPF2, GPF2) mostraron valores de altura de 0,0147 m, 0,0119 m y 0,0118 m respectivamente, alcanzados en las semanas 65, 60 y 50 (Cuadro 14).

Cuadro 13. Tasas máximas de crecimiento alcanzadas a nivel de semanas para la variable diámetro de la base.

Combinación	Diámetro	
	Semana	TMA (cm/semana)
CCal	75	0,046
EPCal	65	0,028
GPCal	25	0,034
PS1Cal	175	0,030
PS2Cal	220	0,018
CF1	100	0,035
EPF1	65	0,039
GPF1	80	0,030
PS1F1	160	0,037
PS2F1	80	0,019
CF2	65	0,028
EPF2	75	0,051
GPF2	65	0,033
PS1F2	85	0,038
PS2F2	220	0,029

TMA = Tasa máxima alcanzada

Cuadro 14. Tasas máximas de crecimiento alcanzadas a nivel de semanas para la variable altura.

Combinación	Altura	
	Semana	TMA (m/semana)
CCal	60	0,0125
EPCal	110	0,0110
GPCal	50	0,0099
PS1Cal	50	0,0068
PS2Cal	50	0,0061
CF1	40	0,0114
EPF1	70	0,0085
GPF1	50	0,0111
PS1F1	50	0,0111
PS2F1	75	0,0070
CF2	65	0,0147
EPF2	60	0,0119
GPF2	50	0,0118
PS1F2	75	0,0102
PS2F2	112	0,0092

TMA = Tasa máxima alcanzada

En términos generales, se observó que las combinaciones que mostraron en promedio los valores más altos en diámetro y altura (ver Figura 13), son aquellas que alcanzaron las tasas máximas de crecimiento en menos semanas. Sin embargo, una vez alcanzada esta tasa máxima, el crecimiento se desaceleró a un ritmo más rápido en comparación con las combinaciones que tardaron más en alcanzar su tasa máxima. En cuanto al diámetro, las combinaciones Espavel-Poró (EPF2) y Cenízaro (CCal) alcanzaron su tasa máxima en la semana 50 y 75 respectivamente, mostrando valores significativamente más altos que el resto de las combinaciones, pero experimentando una desaceleración más pronunciada en su crecimiento en comparación con las demás (Figura 17a).

En cuanto al crecimiento en altura, la combinación Cenízaro bajo la fertilización química, mostro la tasa de crecimiento máxima en la semana 65 (0,0147 metros). El patrón de desaceleración luego de registrada la tasa máxima se repite, al igual que en Espavel-Poró (EPF2) y Guapinol-Poró (GPF2) bajo la misma fertilización química y con valores de 0,0119 m (TMA=60) y 0,018 m (TMA=50). Pleno Sol 2 bajo la fertilización física, registra su máxima tasa de crecimiento en la semana 75 con 0,0070 metros, siendo diferente al crecimiento en las zonas fertilizadas con mezcla química y sin fertilización donde no pareciera no llegarse aún a su tasa máxima de crecimiento (Figura 17b).

#### Producción de cerezas

Las plantas de café asociadas con Cenízaro, Guapinol-Poró y Espavel-Poró demostraron un aumento constante en la producción de cerezas maduras desde 2020 hasta 2023. Los rendimientos más altos se observaron en 2023 bajo fertilización química (F2), con Cenízaro produciendo 2.65 t/ha, Guapinol-Poró 3.35 t/ha y Espavel-Poró 3.28 t/ha. Estos tratamientos con cobertura arbórea superaron consistentemente a los tratamientos a pleno sol, que registraron los niveles de producción más bajos. Pleno Sol 1 alcanzó su pico en 0.58 t/ha en 2021 bajo fertilización física (F1), mientras que Pleno Sol 2 logró un máximo de 0.43 t/ha en 2022 con fertilización química (F2).

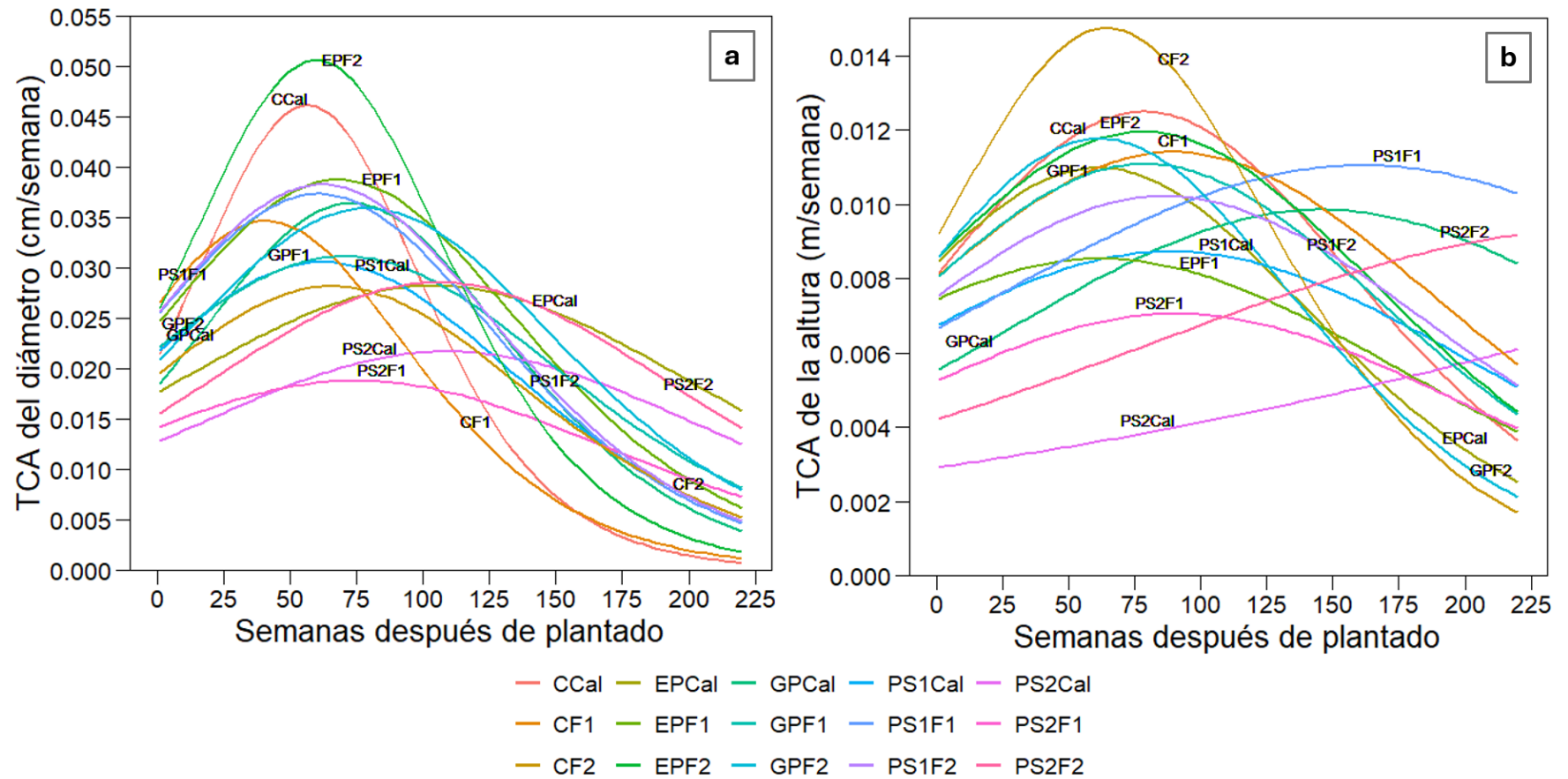


Figura 17. Curvas de crecimiento de las variables a.) diámetro de la base y b.) altura.

En el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de rangos múltiples de Duncan, se encontraron diferencias significativas en la producción de cerezas maduras de café entre las diferentes asociaciones agroforestales, áreas de pleno sol y tipos de fertilización durante el periodo de estudio ( $p < 0,05$ ). En el año 2023, la mayor producción de cerezas maduras se registró en los cafetos bajo cobertura Espavel-Poró y Guapinol-Poró, fertilizados con fertilización física (F1), alcanzando 3,35 t/ha y 3,28 t/ha, respectivamente (prueba de Duncan: “a”,  $p < 0,001$ ). Estos rendimientos fueron estadísticamente superiores en comparación con los cafetos en áreas de pleno sol, que mostraron niveles de producción significativamente menores. En el sistema agroforestal con Cenízaro, la producción en el año 2023 alcanzó 2,65 t/ha pero bajo fertilización química (F2) (prueba de Duncan: “ab”,  $p < 0,001$ ). Las plantas de café en las zonas de pleno sol 1 y pleno sol 2 no superaron las 0,8 t/ha y 0,25 t/ha, respectivamente. Sin embargo, en pleno sol 1, las plantas de café fertilizadas con fertilización química (F2) mostraron una mayor producción en comparación con los otros tratamientos de pleno sol (Figura 18).

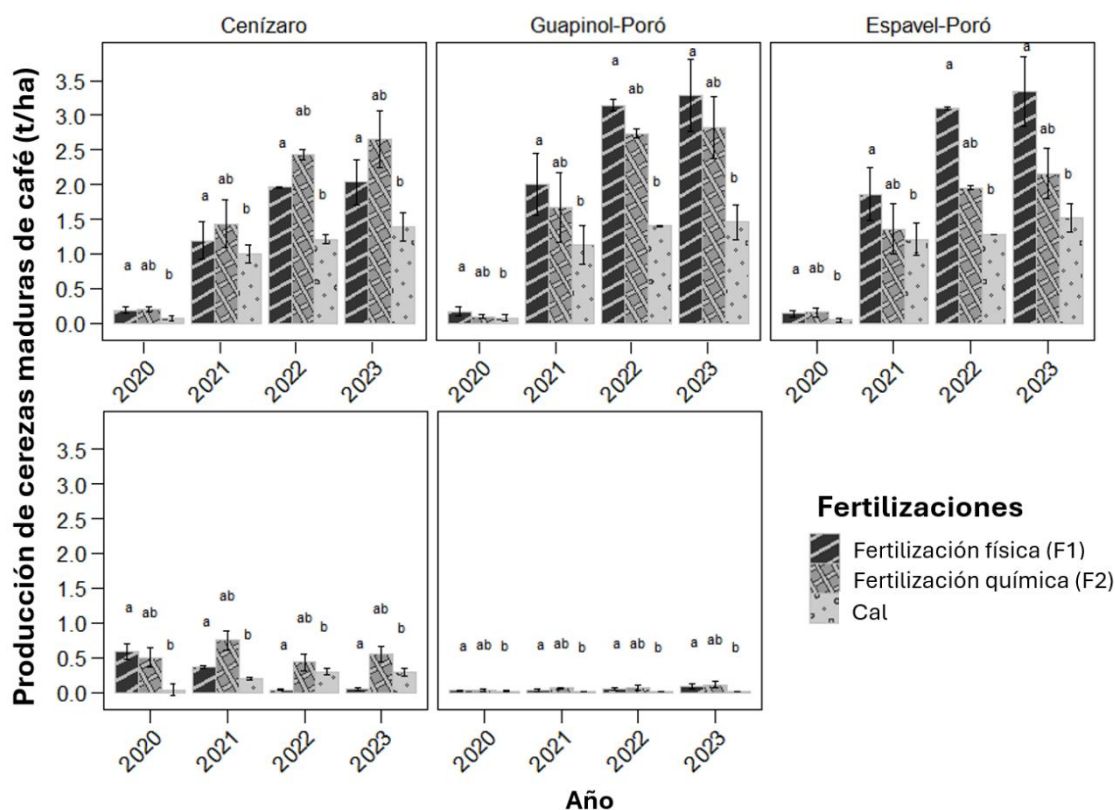


Figura 18. Producción de cerezas a nivel de asociaciones agroforestales y fertilizaciones diferenciadas

#### 4.4. Conclusiones

Después de realizar el análisis de varianza y comparaciones de medias de la prueba de Tukey, se observó que las diferencias entre los tratamientos y sub-tratamientos no son atribuibles a la variabilidad aleatoria del diámetro y la altura. Más bien, estas diferencias reflejan patrones genuinos dentro del diseño experimental.

La disposición de los componentes en el ensayo, así como los distintos niveles de sombra que proporcionan, desempeñan un papel fundamental en estas divergencias. Se destacó claramente el impacto de un alto porcentaje de sombra en las variables estudiadas, tal es el caso del Cenízaro, en comparación con la ausencia de sombra, como lo que se observa en los tratamientos a Pleno Sol. Los resultados sugieren que las coberturas arbóreas, especialmente el Cenízaro, tuvieron un impacto significativo en el porcentaje de sombra y, por lo tanto, en el crecimiento de los cafetos.

La mortalidad reportada es inferior a la que usualmente se espera en proyectos cafetaleros tradicionales con *C. arabica*, Rendón *et al.* (2008), reporta que sobre la base de 10.000 plantas de café por hectáreas la mortalidad esperada es de 15%, sin embargo, es posible que la escala del proyecto y el control experimental de las actividades sean los factores que actúen en la baja mortalidad.

Respecto al crecimiento, los cafetos que se encuentran bajo coberturas con bajos porcentajes de sombra registran las tasas de crecimiento absolutas más altas, pero experimentan luego de alcanzar esta, una desaceleración del crecimiento. Los cafetos que experimentan estos patrones de crecimiento tienden a ser los más prolijos en cuanto a producción de cerezas.

La cuantificación detallada de la producción de cerezas de café a lo largo del periodo 2020-2023 revela un progresivo incremento en la cosecha, lo que indica una mejora en la productividad a lo largo del tiempo. Los tratamientos Espavel-Poró y Guapinol-Poró se destacaron como los más productivos en términos de kilogramos de cerezas de café cosechados. Aunque Cenízaro mostró una producción más discreta, su significativa

cantidad de cerezas lo posiciona en tercer lugar en términos de producción. La fertilización basada en la mezcla física tuvo un efecto positivo en la producción de cerezas de café.

### Literatura citada

- Alonso Báez, M., Tijerina Chávez, L., Sánchez García, P., Martínez Garza, Á., Aceves Navarro, L. A., y Escalante Estrada, J. A. (2003). Modelo logístico: Herramienta para diagnosticar el cuánto y cuándo fertirrigar. *Terra Latinoamericana*, 21(2), 225-231. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57315595009.pdf>
- Arcila, J. (2007). Crecimiento y desarrollo de la planta de café. En J. Arcila, F. Farfán, A. Moreno, L. Salazar, y E. Hincapié, *Sistemas de Producción de Café en Colombia*. Cenicafé. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/720>
- Buresh, R., y Witt, C. (2007). *Fertilizer Best Management Practices: Site-specific nutrient management*. International Fertilizer Industry Association. Bruselas, Bélgica: IFA.
- Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG). (2024). Visor de mapas geológicos de Costa Rica. [Mapa interactivo]. Recuperado de <https://cicg.ucr.ac.cr/interactivo/visor-de-mapas-geologicos-de-costa-rica/>
- Cerda, R., Allinne, C., Gary, C., Tixier, P., Harvey, C. A., Krolczyk, L., Mathiot, C., Clément, E., Aubertoti, J. N., & Avelino, J. (2017). Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems. *European Journal of Agronomy*, 82, 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.019>
- Chanto Ares, E. (2017). *Diseño y Establecimiento de un Ensayo Agroforestal basado en Coffea arabica var. Esperanza (L4A5) con Tres Coberturas Maderables (Proyecto de Graduación)*. Universidad EARTH, Guácimo, Limón, Costa Rica.
- Chung, Y., Choi, S., Silva, R., Kang, J., Eom, J. H., y Kim, C. (2017). Case study: Estimation of sorghum biomass using digital image analysis with Canopeo. *Biomass and Bioenergy*, 105, 207-210. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.027>.
- DaMatta, F. (2004). Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: A review. *Field Crops Research*, 86(2-3), 99-114.
- Deheuvels, O., Ghazoul, J., y Dislich, C. (2019). Effects of shaded coffee management on biophysical ecosystem services in coffee agroforestry systems. *Environmental Management*, 63(2), 240-254.

- Encalada, M., Soto, F., y Morales, D. (2016). Crecimiento de posturas de cafeto (*Coffea arabica* L.) con cuatro niveles de sombra en dos condiciones edafoclimáticas de Ecuador1Cultivos Tropicales, 37(2), 72-782.
- Engels, C., Kirkby, E., & White, P. (2012). Chapter 5 - Mineral Nutrition, Yield and Source–Sink Relationships. En P. Marschner (Ed.), Mineral Nutrition of Higher Plants (pp. 85-133). Academic Press.
- Espinosa, J., y Molina, E. (1999). Acidez y encalado de los suelos (Primera edición). Quito, Ecuador. International Plant Nutrition Institute. <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/libros/Acidez%20y%20encalado%20de%20suelos,%20libro%20por%20%20J%20Espinosa%20y%20E%20Molina.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). E-agriculture in action: Drones for agriculture. Recuperado de <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/5d85a726-91df-47f2-b986-9970261a1ed4/content>
- Google. (2024). [Campus de la Universidad EARTH]. Recuperado el 31 de enero de 2024. <https://maps.app.goo.gl/ecMMzoe47Wf4cPkV6>
- Haggar, J., & Schepp, K. (2012). Shade management in coffee and cacao plantations. Agroforestry Systems, 84(1), 39-51. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9410-9>
- Henríquez, C., Cabalceta, G., Bertsch, F., y Alvarado, A. (2006). Principales suelos de Costa Rica: orígenes, características y manejo [En línea]. San José (CR): MAG. [http://www.mag.go.cr/biblioteca\\_virtual\\_ciencia/suelos-cr.html](http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/suelos-cr.html)
- Holdridge, L.R. 1967. Life zone ecology. San José, Costa Rica. Tropical Science Center. [https://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/holdridge\\_1966\\_-\\_life\\_zone\\_ecology.pdf](https://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/holdridge_1966_-_life_zone_ecology.pdf)
- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria de Costa Rica (INTA). (2015). Suelos de Costa Rica: orden Inceptisol (Boletín Técnico No. 5). <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1825.PDF>
- Jiménez, J. (2007). Fijación biológica de nitrógeno por leguminosas arbóreas para sombra de café en Puerto Rico. (Tesis de maestría). Universidad de Puerto Rico.

- Krishiviman. (2023, junio 1). How drones could be the future of Indian farming: A deep dive into Krishiviman's innovations. Krishiviman. Recuperado de <https://www.krishiviman.com/blog/how-drones-could-be-the-future-of-indian-farming-a-deep-dive-into-krishiviman-s-innovations/>
- Martins Silva, E. M., y Guzmán Domínguez, M. (2019). Respuesta Inicial de *Coffea arabica* var. Esperanza a la Fertilización Diferenciada en Suelos de Origen Aluvial del Caribe de Costa Rica (Proyecto de Graduación). Universidad EARTH, Guácimo, Limón, Costa Rica.
- Macher, R., Mackey, B., y Davis, K. (1991). Heteroscedasticity in whole plant growth curves developed from nonreplicated data. *Agronomy Journal*, 83, 417-424. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2134/agronj1991.0002196200830020031x>
- Meek, D. W., Hutmacher, R. B., Mackey, B. E., & Davis, K. R. (1991). Heteroscedasticity in Whole Plant Growth Curves Developed from Nonreplicated Data. *Agronomy Journal*, 83(2), 417. <https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300020031x>
- Montgomery, D. (2005). *Diseño y Análisis de Experimentos* (6a ed.). Wiley.
- Munsell® Color. (1994). Munsell® soil color charts [PDF]. New York (US). 29 p. <https://nishat2013.files.wordpress.com/2013/11/munsell-soil-color-charts-book.pdf>
- Lieth, J., H. Fisher y P.R. Heins. 1996. A phasic model for the analysis of sigmoid patterns of growth. *Acta Horticulturae*, 417: 113-118.
- Lin, B. (2007). Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144(1-2), 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.009>
- Ovalle-Rivera, O., Gómez-Arias, A., Ariza, M., Prinsen, E., y Medina, J. (2016). Shade management in coffee and cacao plantations for plant performance and environmental conservation in coffee and cacao plantations for plant performance and environmental conservation. *Journal of Environmental Management*. 183(Part 1), 395-405.
- Patrignani, A., y Ochsner, T. (2015). Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. *Agronomy Journal*, 107(6), pp.2312-2320. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/agronj15.0150>

- Perfecto, I., y Vandermeer, J. (2008). *Coffee agroecology: a new approach to understanding agricultural biodiversity, ecosystem services and sustainable development*. Routledge.
- Richard, F. (1959). A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany*. Oxford University Press. 10: 290-300.
- Rendón S., J. R., Arcila P., J., & Montoya R. E. C. (2008). Estimación de la producción de café con base en los registros de floración. *Cenicafé*, 59(3), 238-259. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc059\(03\)238-259.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc059(03)238-259.pdf)
- RStudio Team. (2023). RStudio: Integrated Development for R (Version: 2023.12.1+402) [Software]. RStudio. <https://www.rstudio.com/>
- Salisbury, F. y Ross, C. (1992). *Plant Physiology, Hormones and Plant Regulators: Auxins and Gibberellins*. 4th Edition, Wadsworth Publishing, Belmont, 357-381.
- Sancho, F., Mata, R., Molina, E., y Salas, R. (1989). Estudio de suelos. Finca de la Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda [documento interno]. Guácimo, Provincia de Limón.
- Schoeneberger, P.J.; Wysocki, D.A.; Benham, E.C. y Broderson, W.D. (2002). *Field book for describing and sampling soils, version 2.0*. Traducido por: SE. García, A.J. Gil y FA. Rodríguez. Nebraska (US): Natural Resources Conservation Services. 251 p.
- Sokal, R., y Rohlf, F. (2012). *Biometry: The principles and practice of statistics in biological research* (4th ed.)1. W.H. Freeman and Company.
- Universidad EARTH. (2024). Base de datos climáticos de la estación meteorológica institucional [documento en Excel].
- Vaast, P., y Bertrand, B. (2000). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry systems*, 50(2), 141-156.
- Villalobos, N. y Madrigal, Q. y Álvarez, L. (2017). *Árboles de Costa Rica / Trees of Costa Rica*. Editorial Tecnológica de Costa Rica. <https://libros.tec.ac.cr/arboles-de-costa-rica-79meu.html>
- Villarreyna, R., Avelino, J., & Cerda, R. (2020). Adaptación basada en ecosistemas: efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en cafetales. *Agronomía Mesoamericana*, 31(2), 499-516. <https://doi.org/10.15517/am.v31i2.37591>

Word Coffee Research (WCR). (2023b). Híbrido *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5.  
<https://varieties.worldcoffeeresearch.org/es/variedades/t5296>

**5. CAPITULO 2. FENOLOGÍA DE *Coffea arabica* var. ESPERANZA L4A5 A  
PLENO SOL Y EN ARREGLOS AGROFORESTALES CON  
FERTILIZACIONES DIFERENCIADAS EN LA REGIÓN CARIBE DE COSTA  
RICA.**

<https://doi.org/10.3390/agriculture14111988>

**Resumen**

**Introducción:** El estudio se centró en la fenología de *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5, un híbrido interespecífico F1 desarrollado mediante el cruce de variedades comerciales y genotipos silvestres de Etiopía y Sudán (Hidalgo Rodríguez, 2007). Este híbrido es conocido por su resistencia a nematodos y roya, así como por su excelente calidad de taza (Solano, 2020; Virginio Filho y Astorga Domian, 2021). Sin embargo, la mayoría de los estudios fenológicos de *Coffea arabica* se han realizado en zonas tradicionales de alta altitud, dejando un vacío en el conocimiento sobre su comportamiento en regiones no tradicionales, como el Caribe de Costa Rica a una altitud de 45 m.s.n.m. **Objetivo:** El objetivo del presente estudio fue generar una línea base del comportamiento fenológico del híbrido Esperanza L4A5 en el Caribe de Costa Rica, evaluando el efecto de diferentes coberturas arbóreas y fertilizaciones diferenciadas en condiciones de baja altitud. **Metodología:** El estudio se llevó a cabo utilizando un diseño experimental que incluyó tratamientos (asociación del híbrido bajo diferentes coberturas forestales) y sub-tratamientos (fertilizaciones diferenciadas). Los datos fenológicos se registraron durante cuatro años, documentando el crecimiento en biomasa, desarrollo fenológico y el impacto de factores meteorológicos como temperatura, humedad y lluvias. Las observaciones incluyeron el seguimiento de nudos florales, preantesis, anthesis y fructificación. **Resultados:** Durante el primer año de observación, los cafetos de Esperanza L4A5 mostraron un notable crecimiento en biomasa y desarrollo fenológico. Tras una adaptación de cuatro meses en vivero, fueron plantados en septiembre de 2019, y se llevaron a cabo cuidados regulares y fertilización según el diseño experimental. La inducción de la floración comenzó en enero de 2020, con dos picos en marzo y mayo, sin una floración uniforme debido a la variabilidad climática. En julio se observó el desarrollo inicial de los frutos, que continuaron madurando hasta finales de agosto. El desarrollo pleno de los frutos

se observó de agosto a septiembre, con la mayoría alcanzando la madurez entre octubre y noviembre, cuando se realizaron las cosechas selectivas. En el segundo año (2022), la inducción de la floración comenzó en enero, con un desfase de 11 días respecto al primer año, y se observó una mayor uniformidad en la floración y un aumento en el número de cafetos con flores abiertas. El llenado del fruto comenzó en agosto y se extendió hasta finales de octubre, con cosechas selectivas hasta enero de 2023. En el tercer año fenológico, se mantuvo la tendencia del patrón observado en los años anteriores, con mínimas variaciones en las etapas fenológicas. El análisis de regresión mostró que tanto las coberturas arbóreas como las fertilizaciones tuvieron efectos significativos en la presencia de nudos florales desarrollados y la producción de frutos. El tratamiento Pleno Sol 1 mostró un efecto positivo significativo, posiblemente debido a la influencia de coberturas cercanas de Cenízaro, creando condiciones óptimas para el desarrollo floral. En contraste, Pleno Sol 2 registró valores significativamente menores, evidenciando el efecto negativo de la falta de sombra. Los modelos de regresión múltiple indicaron que las fertilizaciones diferenciadas (F1 y F2) incrementaron significativamente el número de frutos, subrayando la importancia de prácticas de fertilización optimizadas para mejorar el rendimiento del café. **Conclusión:** El estudio concluye que el híbrido Esperanza L4A5 muestra un desarrollo fenológico viable en las condiciones atípicas del Caribe de Costa Rica.

## 5.1. Introducción

El cultivo de *Coffea arabica* es una de las principales fuentes de ingresos económicos para muchos países tropicales y subtropicales alrededor del mundo (Jimenez, 2013). En Costa Rica, el cultivo del café ha desempeñado un papel fundamental en su economía, siendo reconocido internacionalmente por la calidad y sostenibilidad de sus granos (Cafés Roma, 2021). Tradicionalmente, las plantaciones de café se han establecido en provincias cafetaleras con condiciones climáticas óptimas, principalmente en regiones montañosas de mayor altitud a 600 m.s.n.m. (ICAFE, 2015). Sin embargo, la búsqueda de nuevas áreas para la producción de café se hace cada vez necesaria debido a la presión generalizada sobre los recursos naturales y los cambios en las condiciones climáticas de muchas regiones.

El híbrido Esperanza L4A5 surge como una prometedora alternativa para la expansión del cultivo del café en nuevas zonas, debido a su capacidad de adaptación a condiciones menos convencionales (WCR, 2023). Este híbrido, resultado del cruzamiento de variedades comerciales y genotipos silvestres de Etiopía y Sudán (Hidalgo Rodríguez, 2007), ha mostrado resistencia a enfermedades como la roya y tolerancia a nematodos, además de mantener una calidad de taza sobresaliente (Solano, 2020; Virginio Filho y Astorga Domian, 2021). A pesar de su potencial, existe un vacío de información en cuanto a su comportamiento fenológico en áreas con características climáticas atípicas, como por ejemplo las regiones bajas del Caribe costarricense, donde las condiciones de temperatura, humedad y lluvias pueden influir de manera significativa en su desarrollo.

En este contexto, el presente estudio se centra en la fenología del híbrido de *C. arabica* Esperanza L4A5, establecido a pleno sol y bajo diferentes coberturas arbóreas en suelos de origen aluvial en el Caribe de Costa Rica. Mediante un diseño experimental que incorpora diferentes arreglos agroforestales y fertilizaciones diferenciadas, se pretende generar una línea base del comportamiento fenológico de este híbrido en esta zona poco convencional para el cultivo del café. No solo se pretende contribuir al entendimiento de la adaptabilidad del híbrido Esperanza L4A5 en condiciones ambientales de bajura, sino que también ofrecerá información valiosa para la toma de decisiones en la expansión y manejo del cultivo en la provincia de Limón, Costa Rica.

## **5.2. Materiales y métodos**

### **5.2.1. Ubicación del área del proyecto**

El ensayo agroforestal basado en híbridos de *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5 se encuentra ubicado en la provincia de Limón de Costa Rica, específicamente en los predios de la Finca Forestal en la Universidad EARTH, en el cantón Guácimo de la provincia de Limón-Costa Rica en las coordenadas 10°13'00.0"N 83°35'27.0"W (Google Earth, 2024) (Figura 19).

### 5.2.2. Clima

La temperatura promedio de la zona del experimento es de 25 °C, la cual se expresa entre los 20 °C y 33 °C (24 horas). Además, las precipitaciones anuales son de 3701,99 mm, con una humedad relativa promedio de 86 % y una radiación solar máxima de 0,85 MJ/m<sup>2</sup>-día (Universidad Earth, 2024).

### 5.2.3. Zona de vida y geomorfología

Según datos meteorológicos históricos y el sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge, el proyecto se encuentra situado en el corazón del Bosque Muy Húmedo Tropical (bmh-T) de la región Caribe de Costa Rica (Holdridge, 1967). Desde el punto de vista geomorfológico, los terrenos donde se ubica la EARTH se encuentran en la llanura aluvial entre las cordilleras del Valle Central y el mar Caribe que se extienden desde el río Colorado hasta la frontera con Panamá (CICG, 2024).

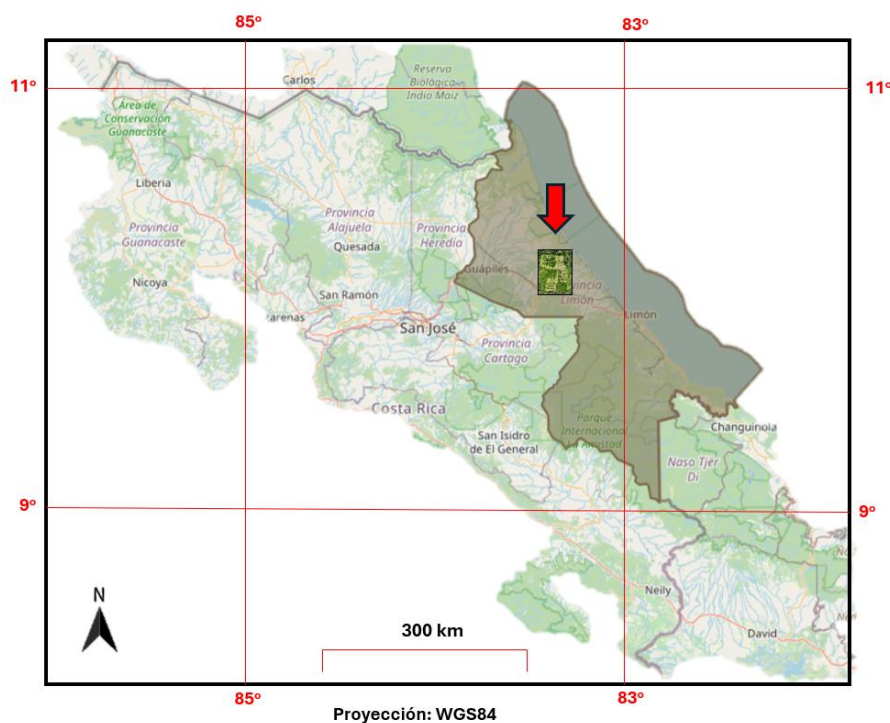


Figura 19. Ubicación del ensayo agroforestal basado en el híbrido Esperanza L4A5.

#### 5.2.4. Suelos

Los suelos presentes en la región de Guácimo se clasifican como Inceptisoles, específicamente del suborden Udepts. Estos se forman a partir de la meteorización de sedimentos aluviales y coluviales cuando no reciben aportes de sedimentos durante períodos prolongados. Algunas propiedades de los Inceptisoles de esta región suelen presentar un pH ácido, pueden contener arcillas amorfas; presentan alto contenido de materia orgánica y presentan diferenciación de horizontes en el subsuelo evidentes por cambios en estructura, color o contenido de arcillas. (INTA, 2015). Los Inceptisoles del valle del río Parismina son reconocidos por su destacado potencial agrícola en Costa Rica (Henríquez *et al*, 2006).

#### 5.2.5. Características del diseño experimental

El arreglo de los componentes del experimento se basó en un diseño de parcelas divididas con estructura de bloques completamente aleatorizados. La distribución se realizó considerando las características físicas del suelo y en función del recorrido del sol. A nivel de tratamientos (interacción árboles-café) se establecieron las interacciones: C = *Albizia saman* asociado a café, GP = *Hymenaea courbaril* + *Erythrina poeppigiana* asociado a café, y EP = *Anacardium excelsum* + *Erythrina poeppigiana* asociado a café. Se establecieron dos sectores sin interacción árboles-café denominados pleno sol 1 y pleno sol 2 (controles experimentales) (Figura 20a).

La estrategia de fertilización se enfocó en suministrar a las plantas de café la cantidad precisa de nutrientes para satisfacer sus necesidades fisiológicas y garantizar un crecimiento y desarrollo óptimos (Engels *et al*. 2012). Para lograr este objetivo, se desarrolló un enfoque que ofrecía diferentes cantidades de nutrientes, considerando su composición granulométrica. Como parte de este enfoque, se diseñaron dos paquetes tecnológicos distintos: uno basado en fertilización física (F1) y otro en fertilización química (F2). Se adiciono en todos los tratamientos un grupo de control experimental conocido como Cal, que se centró en el control de la acidez del suelo (Figura 20b).

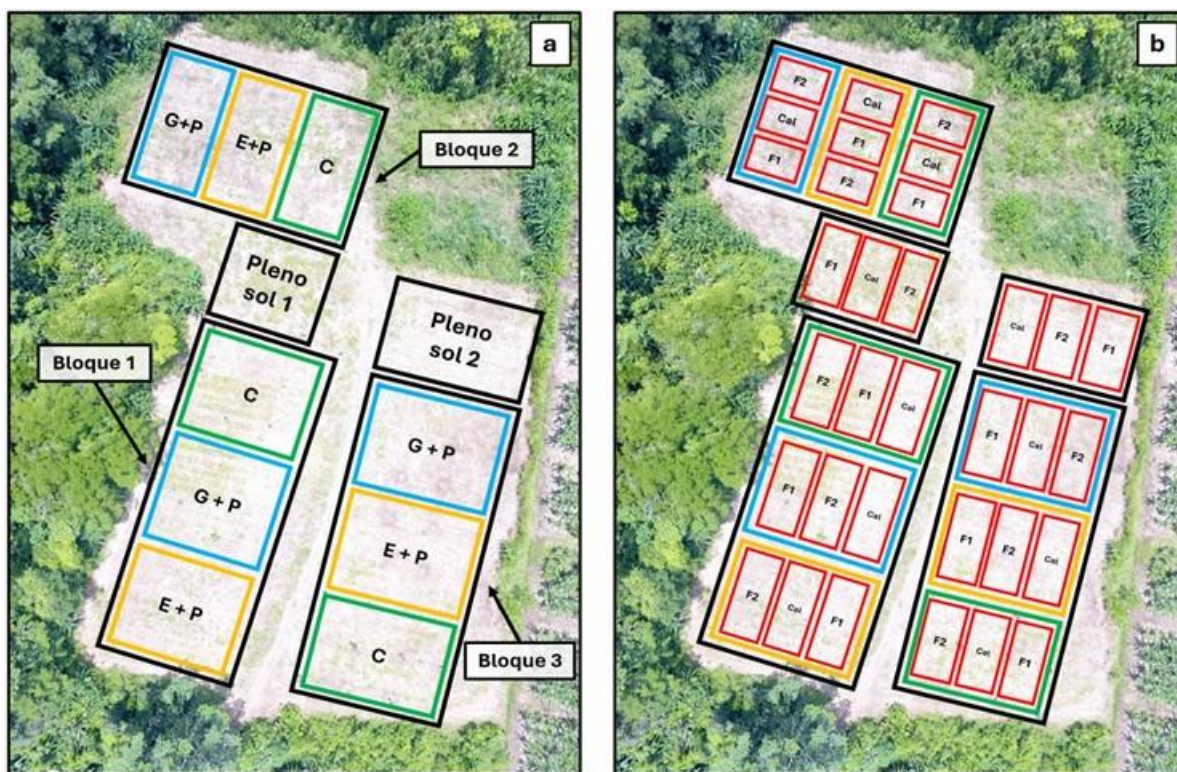


Figura 20. Arreglo espacial del ensayo agroforestal basado en el híbrido Esperanza L4A5. a) Ubicación espacial de los tratamientos (asociación agroforestal). b) Ubicación espacial de los sub-tratamientos (fertilización diferenciada).

La fertilización física (F1) incluía Cloruro de Potasio (KCL) (10.4 g/planta), Fosfato Monopotásico (MKP) (4.0 g/planta), Nitrato de Amonio (16.0 g/planta), Sulfato de Zinc (0.24 g/planta), y Sulfato de Cobre (0.096 g/planta), totalizando 30.74 g/planta. La fertilización química (F2) consistía en un compuesto NPK (45.6 g/planta), Sulfato de Cobre (0.096 g/planta), Sulfato de Zinc (0.232 g/planta), y Urea (33.6 g/planta), con un total de 79.53 g/planta. Además, se aplicó una enmienda de Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) con una dosis de 41.32 g/planta como control de acidez para 1936 plantas. Todos los valores están calculados en función de una fertilización, las cuales se fueron dando considerando las condiciones climáticas (Martins y Guzmán, 2019).

#### 5.2.6. Registro de datos

La observación y recopilación de datos se llevó a cabo en un periodo de 4 años, se tomaron en cuenta todos los cafetos del ensayo, considerando su ubicación bajo el sistema de coordenadas cartesianas en X y Y (Figura 21). El análisis se centró en las asociaciones

agroforestales, los cafetos sin interacción con árboles (cafetos a pleno sol) y las fertilizaciones diferenciadas establecidas en el marco del ensayo (Cuadro 15).

Durante los primeros años de estudio (2019-2021), se observaron las etapas de desarrollo que expresaron los cafetos. Al principio, los registros se enfocaron en las primeras fases de crecimiento vegetativo, la adaptabilidad y el desarrollo de estos. A medida que avanzó el tiempo, se notaron los eventos cruciales del desarrollo reproductivo, incluyendo floraciones precoces y la primera cosecha de cerezas que se dio a finales de 2020. El proceso fue seguido de cerca, prestando especial atención a la morfología de las yemas axilares y terminales, así como al desarrollo de los nudos florales donde se forman las flores. Los nudos son de vital importancia, ya que determinan los sitios de la futura producción de cerezas tras una floración exitosa. Se realizó una caracterización detallada de los órganos vegetativos aéreos, registrando el desarrollo de los nudos, así como las fases de preantesis y antesis para cada cafeto. Este seguimiento detallado permitió una comprensión profunda de los procesos fenológicos del cafeto en función de los diferentes arreglos agroforestales (Figura 22).

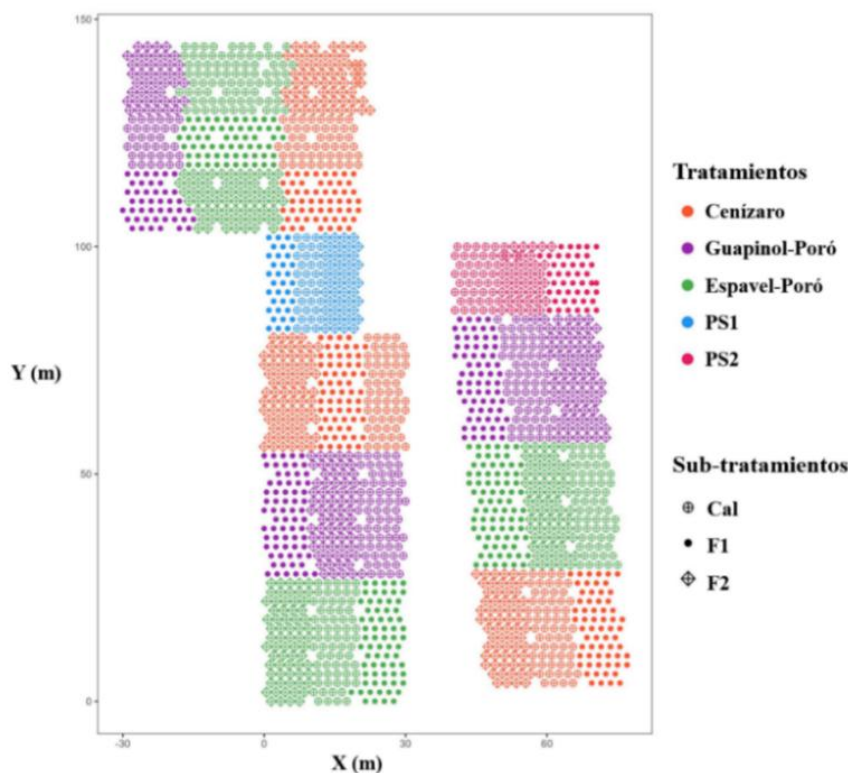


Figura 21. Ubicación en coordenadas XY de los cafetos del ensayo.

Cuadro 15. Numero de cafetos por tratamientos (asociación agroforestal).

Bloque	Tratamiento	Código	Cafetos por tratamiento
Bloque 1	<i>Albizia saman</i>	C	187
	<i>Anacardium excelsum</i> + <i>Erythrina poeppigiana</i>	EP	203
	<i>Hymenaea courbaril</i> + <i>Erythrina poeppigiana</i>	GP	198
Bloque 2	<i>Albizia saman</i>	C	169
	<i>Anacardium excelsum</i> + <i>Erythrina poeppigiana</i>	EP	208
	<i>Hymenaea courbaril</i> + <i>Erythrina poeppigiana</i>	GP	123
Bloque 3	<i>Albizia saman</i>	C	184
	<i>Anacardium excelsum</i> + <i>Erythrina poeppigiana</i>	EP	205
	<i>Hymenaea courbaril</i> + <i>Erythrina poeppigiana</i>	GP	209
PS1	Pleno sol	PS1	120
PS2	Pleno sol	PS2	130
<b>Total</b>			<b>1936</b>

Distanciamiento 2 m x 2 m (tresbolillo)

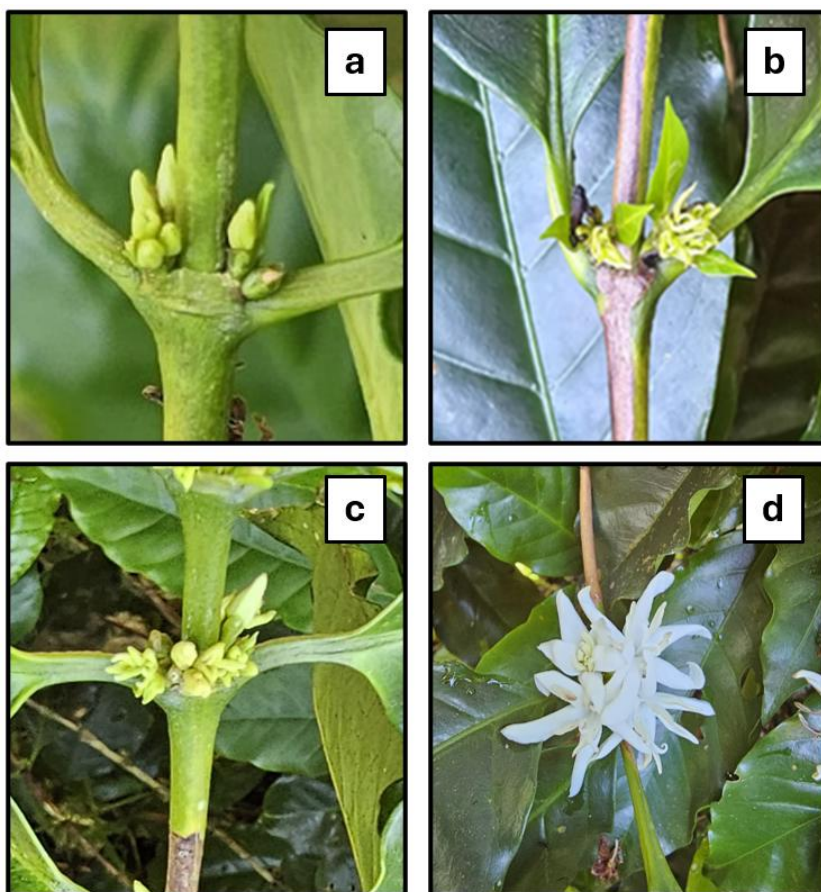


Figura 22. Caracterización de los órganos vegetativos aéreos. a) Nudo con la inflorescencia desarrollado. b) nudo con botones florales desarrollados. c) preantesis y d) antesis floral.

### 5.2.7. Análisis estadístico

Las observaciones de las diferentes etapas de desarrollo fenológico permitieron la determinación de los tiempos de ocurrencia. Se diagramaron las etapas en función de una línea de tiempo, lo que permitió tener una visión general de la fenología del híbrido.

Los datos extraídos del ensayo a nivel de la presencia de la condición fenológica en función del tiempo fueron analizados utilizando la ecuación general del modelo de regresión lineal múltiple:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

Donde:

$Y$  es la variable dependiente (la variable que se quiere explicar).

$\beta_0$  es el intercepto del modelo (el valor de  $Y$  cuando todas las variables independientes son cero).

$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \dots + \beta_n$  son los coeficientes de regresión correspondientes a las variables independientes  $X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n$ . Estos coeficientes representan el cambio esperado en  $Y$  dado un cambio unitario en la variable independiente correspondiente, manteniendo constantes las demás variables independientes.

$X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n$  son las variables independientes (los predictores o factores explicativos).

$\varepsilon$  es el término de error o residuo del modelo (la diferencia entre los valores observados y los valores predichos por el modelo).

Finalmente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para cada etapa fenológica: nudos florales desarrollados, preantesis, antesis y fructificación a nivel de presencia de cerezas maduras, con el propósito de evaluar la significancia de cada factor en cada etapa.

### 5.3. Resultados y discusión

#### 5.3.1. Caracterización fenológica de Esperanza L4A5 establecido en el Caribe de Costa Rica

##### Adaptación y primer año fenológico (2019-2021)

Durante el primer año de observación, se pudo apreciar tanto el crecimiento en biomasa como el desarrollo fenológico del híbrido. Los cafetos fueron establecidos en el vivero en mayo de 2019, donde pasaron cuatro meses de adaptación. Este período fue crucial para asegurar que las plantas pudieran sobrevivir y prosperar en su entorno natural una vez trasladadas al campo. En el vivero, se recrearon cuidadosamente las condiciones finales de establecimiento, proporcionando a los cafetos un ambiente óptimo para su desarrollo inicial (Figura 23a).

En septiembre de 2019, se realizó la plantación de los cafetos (Figura 23b). A partir de este momento se iniciaron los cuidados de las plantas y el mantenimiento general del área. Se implementaron actividades regulares de control mecánico de malezas para asegurar que las plantas tuvieran un entorno libre de competencia (Figura 23c). Paralelamente, se llevó a cabo la primera aplicación de fertilización, siguiendo el diseño experimental establecido para los diferentes sub-tratamientos (Figura 23d). Este enfoque cuidadoso y planificado garantizó que cada planta recibiera los nutrientes necesarios para un crecimiento saludable, adaptándose a las condiciones específicas del experimento. La combinación de estos esfuerzos creó un entorno óptimo para observar y documentar el desarrollo de los cafetos desde sus primeras etapas.

En enero de 2020 se realizaron las observaciones a nivel de desarrollo floral. Es en este mes cuando inicia la inducción de la floración en los cafetos, la cual se extiende hasta finales del mes de febrero donde se nota el desarrollo pleno de los botones florales en la mayoría de las plantas (Figura 23e). En este punto, se logra observar la forma característica de velón, con pétalos cerrados y blanco verdosos. La floración de los cafetos se presentó en dos momentos distintos. La primera floración ocurrió a mediados de marzo, cuando los cafetos comenzaron a exhibir flores abiertas. La segunda floración tuvo lugar a principios de mayo

(Figura 23f). Durante este primer año, no se observó una floración uniforme como la que se suele ver en las zonas cafetaleras tradicionales de Costa Rica. Esto puede deberse a las condiciones particulares del sitio de estudio, la adaptación inicial de las plantas a su nuevo entorno y la variabilidad climática (Vignola *et al.* 2018). Luego de la caída de las flores de la primera floración, la cual tuvo lugar a mediados de marzo, comenzó el proceso de llenado de los frutos. Los tamaños de los frutos variaron considerando las dos floraciones registradas: la primera a mediados de marzo y la segunda a principios de mayo (Figura 23g). En julio, se pudo observar un desarrollo inicial general de los frutos, con una clara diferenciación en sus tamaños (Figura 23h). Esta variación se debe a las diferentes etapas de floración descritas anteriormente. Hasta finales de agosto, los frutos continuaron su desarrollo, y se comenzaron a ver algunas cerezas maduras, aunque en cantidades limitadas pero notables. Durante este período, también se registraron floraciones esporádicas, lo que añade otra capa de complejidad al ciclo fenológico del cafeto.

El desarrollo pleno del fruto se observó desde mediados de agosto hasta septiembre (Figura 23i). Durante este período, los tamaños de los frutos comenzaron a uniformizarse, aunque todavía se podía ver una cantidad significativa de cerezas pequeñas y otras aún en proceso de llenado. Este desarrollo desigual es típico en etapas tempranas de adaptación de los cafetos a su entorno. Además, se volvieron a observar floraciones esporádicas, aunque en menor cantidad en comparación con las observadas en agosto.

Finalmente, entre octubre y noviembre de 2020, la mayoría de los frutos alcanzaron su madurez (Figura 23j). Al inicio de octubre, los frutos comenzaron a mostrar un color rojo, y a principios de noviembre, muchos de ellos adquirieron un intenso color carmesí. En noviembre, se llevaron a cabo las primeras cosechas selectivas, recogiendo únicamente los frutos que estaban completamente maduros. Este proceso de recolección continuó hasta finales de diciembre, marcando así el final de la temporada de cosecha. Cabe destacar que, a finales del mes de diciembre de 2020, simultáneamente a las cosechas, se observaron desarrollos florales.

En el primer año fenológico (2021), la inducción de la floración se observó desde diciembre del año anterior y se extendió hasta finales de febrero. Durante este período, los cafetos comenzaron a mostrar los primeros signos de formación de botones florales, los

cuales se desarrollaron plenamente entre abril y mediados de julio, fase que incluye tanto la preantesis como la antesis. En julio se comenzaron a notar los primeros indicios de llenado de frutos, y fue en octubre cuando se observó un desarrollo pleno y homogéneo de los mismos. Los frutos alcanzaron su madurez a finales de octubre, y las cosechas selectivas se llevaron a cabo desde este momento hasta las primeras semanas de enero del año siguiente.

#### Segundo y tercer año fenológico (2022-2023)

En el segundo año fenológico (2022), la inducción de la floración de los cafetos comenzó a mediados de enero y se extendió hasta principios del mes de marzo. En comparación a la inducción de la floración del primer año fenológico (2021), se notó un desfase de aproximadamente 11 días. No obstante, se observó mayor uniformidad en cuanto a las plantas con presencia botones florales y el característico velón, con pétalos cerrados y blanco verdosos. A nivel de floración se observó ligeramente más abundante comparado con el primer año. Se notó un aumento significativo en el número de cafetos con flores abiertas, con una sincronización de aproximadamente un 43% de las plantas del ensayo, superando así la sincronía del primer año.

En el segundo y tercer año fisiológico, se continuó evidenciando los efectos del desfase de 11 días que se dio en la inducción de la floración. Además, se registró una segunda ola de floración que abarcó el 28% de los cafetos, la cual se extendió hasta principios de julio. El llenado del fruto comenzó en agosto y se extendió hasta finales de octubre. En ese mismo tiempo también se notaron frutos en la etapa de desarrollo pleno, y en otros casos, ya estaban listos para ser cosechados, lo que permitió iniciar las cosechas selectivas. Este proceso continuó hasta principios de enero de 2023, donde finalizaron las cosechas. En el tercer año fenológico se observó la tendencia anual del patrón caracterizado en los años previos, la cual, a pesar de presentar variaciones de días se mantiene en cuanto a las etapas. La línea de tiempo general de los años fenológicas explica cómo se presentan las etapas.

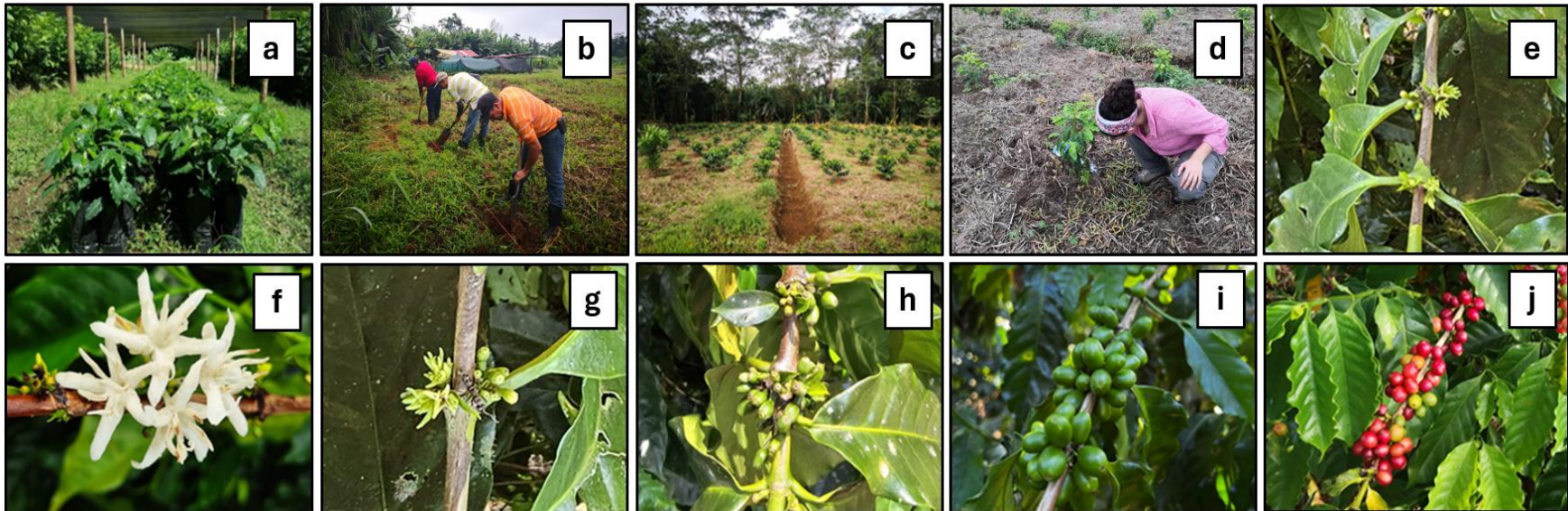


Figura 23. Caracterización fenológica del primer año. a) Etapa de adaptabilidad del material vegetal en el vivero. b) Establecimiento de los cafetos en el área del ensayo. c) Mantenimiento del área del ensayo a nivel de control de malezas. d) Primera fertilización de los cafetos considerando las fertilizaciones diferenciadas y las áreas de control experimental con solo encalado. e) Desarrollo pleno de los botones florales. f) Floración. g) Inicio del proceso de llenado de los frutos. h) Desarrollo general de los frutos. i) Desarrollo pleno del fruto. j) Madurez del fruto que da inicio al proceso de cosechas.

En resumen, durante el primer año fenológico, la inducción de la floración del híbrido Esperanza L4A5 comenzó en diciembre del 2020 y se extendió hasta finales de febrero de 2021. Este periodo es importante ya que marca el inicio del ciclo reproductivo del cafeto. La floración se da en general desde mediados de marzo, principios de abril hasta mediados o finales de julio, evidenciándose los estados de preantesis y antesis. Observaciones detalladas indicaron el inicio del llenado de frutos en julio-agosto, que continuó hasta que los frutos alcanzaron su desarrollo pleno en octubre-noviembre. La maduración de los frutos se notó a finales de octubre y principios de noviembre, y las primeras cosechas selectivas comenzaron en noviembre, extendiéndose hasta las primeras semanas de enero del siguiente año (Figura 24).

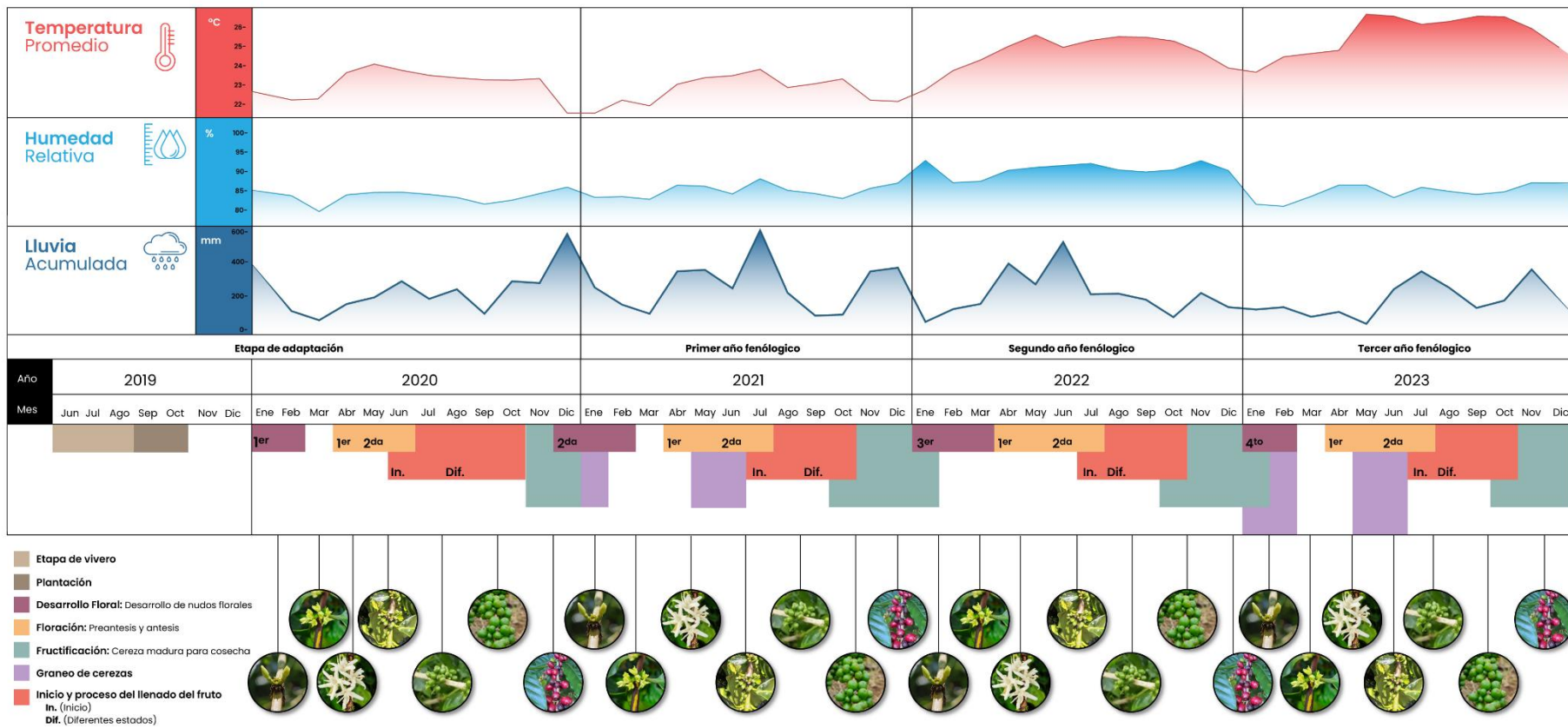


Figura 24. Patrón fenológico general del híbrido Esperanza L4A5 establecido en el Caribe de Costa Rica (2019-2023).

### 5.3.2. Aspectos relevantes del patrón fenológico de Esperanza L4A5 considerando los factores meteorológicos

#### Temperatura

Se notó que la temperatura varió notablemente entre los años (Figura 25a). En diciembre de 2020, se registró la temperatura más baja, la cual se mantuvo similar en enero de 2021. Este comportamiento es consistente con las variaciones estacionales típicas de la región Caribe, donde los meses de finales de noviembre, diciembre, enero e incluso parte de febrero suelen ser los más frescos del año.

Las temperaturas registradas durante estos meses en los cuatro años de estudio tienen una relación directa con el desarrollo de los botones florales. Estudios previos han demostrado que temperaturas más bajas pueden retrasar la floración, incidiendo en la sincronización y calidad de esta, lo cual explica las diferencias en los tiempos fenológicos con relación a las zonas altas (DaMatta, 2004; Muschler, 2001; Salazar, 1999). A partir de marzo, las temperaturas aumentan gradualmente hasta alcanzar un pico en los meses junio-julio donde ocurre la terminación de la floración e inicia el llenado del fruto. En septiembre las temperaturas decrecen en magnitud y en donde se consolida el llenado del fruto y se da la maduración de las cerezas para su consecuente cosecha. En general, las temperaturas aumentan gradualmente desde enero hasta alcanzar un pico en el mes de mayo cuando se comienza a observar una disminución que se estandariza hasta octubre. A partir de este, la temperatura disminuye hacia finales del año (noviembre y diciembre).

Durante los meses más cálidos (de mayo a octubre), se notó que las temperaturas favorecen el llenado de los frutos, promoviendo la acumulación de azúcares y otros compuestos beneficiosos, por otro lado, las temperaturas excesivamente altas pueden causar estrés térmico, afectando negativamente el rendimiento. Lo denotado en el ensayo ha sido ampliamente documentado en los estudios de DaMatta (2004) y Vaast y Bertrand (2003).

#### Humedad

La humedad relativa se mantiene comparativamente estable a lo largo de los años, con algunas variaciones (Figura 25b). Los años 2020, 2021 y 2023 registraron niveles de

humedad más bajos y similares a lo largo de los meses en comparación con el 2022 que mostró los niveles más altos de humedad relativa en varios meses, particularmente en enero y noviembre. La humedad relativa tiende a aumentar durante los meses de mayor precipitación (junio a octubre) y a disminuir en los meses más secos (enero a marzo). La humedad relativa cumple un rol importante en el crecimiento vegetativo. Una humedad estandarizada y dependiente de las lluvias ayuda a mantener la turgencia de las células y favorece la fotosíntesis. En la región Caribe, los meses con alta humedad coinciden con la temporada de lluvias, proporcionando condiciones ideales para el desarrollo de los cafetos. No obstante, una alta humedad relativa también puede aumentar la susceptibilidad a enfermedades fúngicas como la roya del café (Avelino et al. 2004).

### Lluvias

Durante los años de toma de datos, se registraron las siguientes precipitaciones anuales: 2709.5 mm en 2020, 3054.15 mm en 2021, 2410.9 mm en 2022 y 2089.34 mm en 2023. Estas cifras reflejan la variabilidad interanual de las lluvias en la región, con un notable descenso en la precipitación total en 2023 en comparación con los años anteriores. Esta disminución en la precipitación pudo influir significativamente en las etapas fenológicas del café, afectando desde la floración hasta el llenado y maduración de los frutos. La variabilidad en la cantidad de lluvia no solo afecta la sincronización de estos procesos, sino que también puede impactar en la productividad (Sakai *et al.* 2006; Villers *et al.* 2009; Chacón *et al.* 2021; Zapata, 2013).

Las lluvias se presentaron con mayor volumen entre los meses abril-julio, coincidiendo con la temporada de lluvias típica de la zona. No obstante, en el periodo de 4 años, hubo variaciones considerables entre un año y otro en cuanto a magnitudes mensuales (Figura 25c). El 2022 fue el año más lluvioso con los picos de precipitación más altos, especialmente en los meses de julio y septiembre. En todos los años y a nivel de meses, los periodos con menos lluvias se dan entre septiembre-octubre y febrero a marzo.

Los picos de lluvias están estrechamente relacionados con la floración de los cafetos. Cuando ocurren eventos de lluvia significativa, las plantas, que han estado pasando por un período de estrés hídrico, reabsorben el agua y esto induce la floración, un fenómeno

conocido como floración inducida por la lluvia. Fisiológicamente, se sabe que las plantas de café en hábitats tropicales húmedos experimentan este proceso. La rehidratación activa desencadena una serie de respuestas en las plantas, que culminan en la floración, asegurando así la reproducción bajo condiciones favorables (Villers *et al.* 2009; Chacón *et al.* 2021; Zapata, 2013). Los estudios destacan cómo las lluvias sincronizan los ciclos fenológicos del café, proporcionando una ventaja adaptativa en ambientes donde las condiciones hídricas pueden variar significativamente (Sakai *et al.* 2006). En el contexto del proyecto, y considerando la existencia de períodos con baja precipitación, se pueden observar diferentes etapas de desarrollo floral en los cafetos a lo largo del año. Las observaciones indican que incluso en momentos de escasa lluvia, los cafetos pueden experimentar floraciones esporádicas, lo cual subraya la resiliencia y adaptabilidad de estas plantas frente a las fluctuaciones climáticas (Vaast y Bertrand, 2003; DaMatta, 2004).

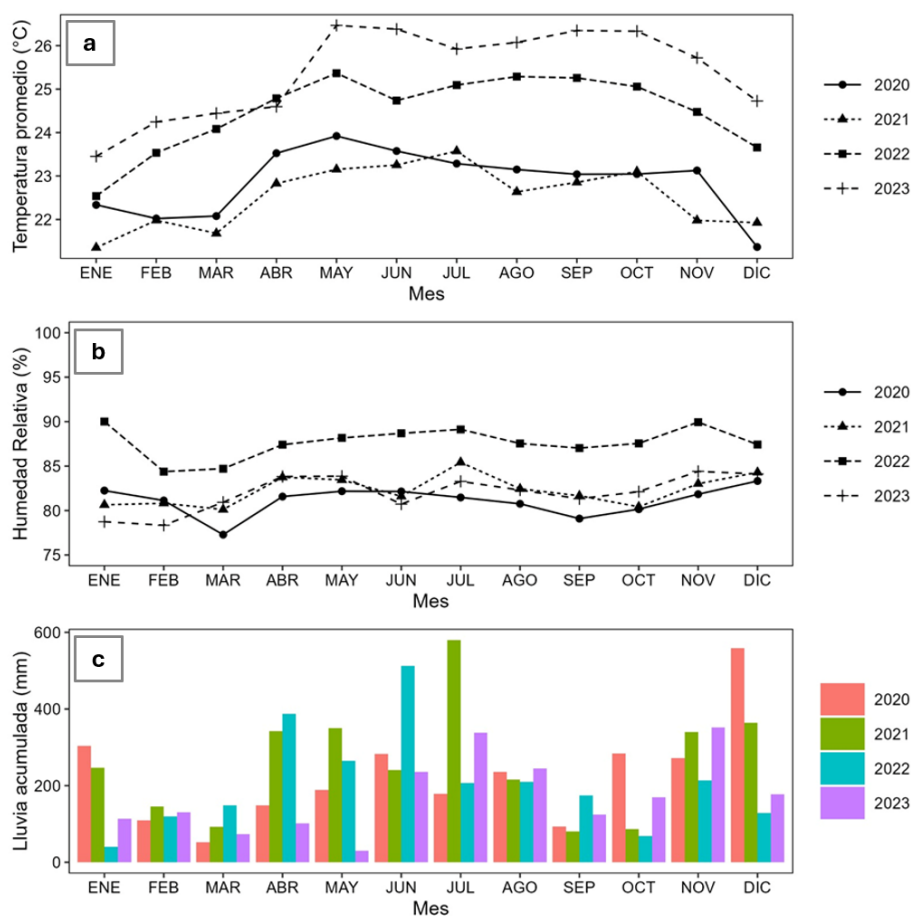


Figura 25. Variaciones mensuales de los factores meteorológicos (2020-2023): a) Temperatura promedio (°C), b) Humedad relativa (%) y c) Precipitación acumulada (mm).

La expresión fenológica del híbrido Esperanza L4A5 mostró un desarrollo creciente y estable a lo largo de los años. En el 2020 solo el 23,09% de los cafetos presentaron nudos en desarrollo. En cuanto a preantesis y antesis se registró un 7,8% y 3,56% respectivamente (Cuadro 16). A nivel de la fructificación en términos de cafetos con cerezas maduras para cosecha, se contabilizó un 10,33%. Al final de la temporada se registraron 192,43 kilogramos de cerezas cosechadas. Los resultados de este año están relacionados con el período de adaptación inicial de las plantas en el contexto general del ensayo.

Cuadro 16. Análisis cuantitativo del desarrollo fenológico del híbrido Esperanza L4A5 (2020-2023)

Año	Cafetos con presencia de nudos en desarrollo	% de cafetos con nudos en desarrollos	Cafetos con presencia de preantesis	% de cafetos con preantesis	Cafetos con presencia de antesis	% de cafetos con antesis	Cafetos con presencia de frutos maduros	% de cafetos con frutos
2020	447	23,09	151	7,80	69	3,56	200	10,33
2021	820	42,35	1106	57,12	481	24,85	745	38,48
2022	1035	53,47	851	43,96	841	43,44	751	38,79
2023	1083	55,95	940	48,55	674	34,81	852	44,02

### 5.3.3. Análisis cuantitativo general de la fenología del híbrido Esperanza L4A5

En 2021, hubo un aumento en la observación de nudos en desarrollo en los cafetos entre los meses enero y febrero, no obstante, en diciembre del año anterior (2020), se observó que otras plantas tenían nudos en etapas iniciales de desarrollo. Se registro un 42,35% de los cafetos del ensayo con presencia de nudos en desarrollo en diferentes etapas.

Ese mismo año, se evidenció un aumento importante en la preantesis con un 57,12% y se obtuvo un modesto 24,85% de cafetos en esta etapa. Considerando el porcentaje de cafetos con preantesis, la antesis se mostró significativamente baja. Entre la preantesis y antesis se pudo evidenciar lo que se conoce como aborto floral, la cual se refiere a la caída prematura de las flores antes de que puedan desarrollarse en frutos. El aborto de las flores en *Coffea arabica* es un fenómeno complejo influenciado por varios factores ambientales y fisiológicos. Entre las principales causas se encuentran las condiciones adversas de temperatura y humedad, la deficiencia de nutrientes, y la competencia interna entre las

flores y frutos en desarrollo (DaMatta *et al.* 2007; Villarreyna y Alcaraz, 2005; Willson, 1999). Además, estudios han demostrado que el estrés hídrico puede aumentar significativamente la tasa de aborto floral, afectando negativamente la producción final de café (Cannell, 1985). Particularmente, en el marco del ensayo, las intensas lluvias registradas entre los meses de abril y junio de 2021 pudieron haber exacerbado la caída de flores, ya que las precipitaciones excesivas pueden hacer caer físicamente las flores por el impacto de las gotas.

Posteriormente, en 2022, el porcentaje de observación de nudos en desarrollo aumentó a un 53,47%, lo que muestra una tendencia de aumento continuo en el desarrollo de los nudos. Sin embargo, el porcentaje de preantesis disminuyó ligeramente a 43,96% y en la observación de la antesis se duplicó a un 43,44% si se le compara con la temporada de antesis de 2021.

Finalmente, el año 2023 fue similar al 2022 en términos de momentos de ocurrencia de las diferentes etapas fenológicas. Se consolidó la tendencia de aumento de observación de nudos florales en desarrollo con un 55,95% de los cafetos, 48,55% de los cafetos con preantesis y 34,81% con antesis. En cuanto a presencia de frutos maduros, se registró un 44,04% de los cafetos del ensayo en producción de cerezas.

5.3.4. Análisis de la presencia de nudos florales desarrollados considerando las asociaciones agroforestales y a pleno sol, las fertilizaciones diferenciadas y los factores climáticos temperatura, humedad y lluvias

A lo largo del periodo 2020-2023, se observaron patrones consistentes en el desarrollo de los nudos florales en cuanto a los tiempos de ocurrencia. Los tratamientos Pleno Sol 1 y Cenízaro-Café registraron un número mayor de nudos florales en desarrollo entre los meses enero y febrero. No obstante, las asociaciones con Espavel-Poró y Guapinol-Poró manifestaron números ligeramente inferiores y siguiendo un patrón similar.

El análisis del modelo de regresión lineal reveló que tanto las coberturas como las fertilizaciones influyeron significativamente en la presencia de nudos florales desarrollados (Cuadro 17). Entre los tratamientos, el denominado "Pleno Sol 1" mostró un efecto positivo notable en el desarrollo floral. Como se discutió en el Capítulo 1 (ver Figura 12), los cafetos en esta área del ensayo se beneficiaron de la sombra proporcionada por las

coberturas de Cenízaro, que, debido a la aleatorización, quedaron ubicados en las proximidades. Esta sombra, establecida durante los cuatro años del estudio, creó condiciones relativamente idóneas para el desarrollo de los nudos florales en esta etapa. El tratamiento Pleno Sol 2 registró valores claramente inferiores en comparación con los demás tratamientos. Según el análisis, este tratamiento mostró un efecto marginalmente significativo y negativo. En este contexto, se evidenció claramente el impacto adverso de la falta de asociación agroforestal en el desarrollo de los nudos florales.

Cuadro 17. Resultados de la regresión lineal múltiple para el número de cafetos con nudos florales desarrollados

<b>Coefficiente</b>	<b>Estimación</b>	<b>Error Estándar</b>	<b>Valor t</b>	<b>Pr(&gt; t )</b>
(Intercepto)	43,87	46,45	0,945	0,3466
Cobertura Espavel-Poró	0,24	3,08	0,077	0,9385
Cobertura Guapinol-Poró	1,12	3,05	0,36	0,7191
Pleno_sol_1	7,41	3,14	2,359	0,0198
Pleno_sol_2	-6,03	3,21	-1,881	0,0621
Fertilizaciones F1	20,18	2,46	8,22	0,001***
Fertilizaciones F2	21,68	2,46	8,83	0,001***
Temperatura	-1,06	1,25	-0,851	0,3965
Humedad	-0,15	0,33	-0,453	0,6516
Lluvias	0,01	0,02	0,853	0,3951

**Significancia: \*\*\* p < 0,001**

A nivel de las fertilizaciones (F1 y F2) se denotó un aumento significativo en la cantidad de cafetos con nudos florales desarrollados lo que demostró que ambas fertilizaciones tuvieron una similar efectividad en cuanto a la formación de nudos florales.

El análisis de la varianza (ANOVA) reveló que la fertilización tuvo un efecto altamente significativo en la presencia de nudos florales desarrollados ( $F = 47,842$ ;  $\text{Pr}(>F) = 2,52e-16$ ), indicando que las diferencias entre los tratamientos de fertilización fueron muy marcadas y estadísticamente significativas. En contraste, otros factores como los arreglos agroforestales ( $F = 3,561$ ;  $\text{Pr}(>F) = 0,00859$ ), la temperatura ( $F = 2,233$ ;  $\text{Pr}(>F) = 0,13750$ ), la humedad ( $F = 0,693$ ;  $\text{Pr}(>F) = 0,40679$ ) y las lluvias ( $F = 0,728$ ;  $\text{Pr}(>F) = 0,39503$ ) no mostraron una significancia estadística comparable en su influencia sobre el desarrollo de los nudos florales. El modelo de regresión lineal explicó aproximadamente el 46,44% de la

variabilidad en la cantidad de cafetos con nudos florales desarrollados, sugiriendo que otros factores no considerados en este estudio podrían también estar influyendo en la fenología de los cafetos.

#### 5.3.5. Análisis de la presencia de preantesis considerando las asociaciones agroforestales y a pleno sol, las fertilizaciones diferenciadas y los factores climáticos temperatura, humedad y lluvias

Los cafetos en los tratamientos Pleno Sol 1 y Cenízaro registraron un número mayor de cafetos con preantesis en los meses de marzo y abril. Espavel-Poró y Guapinol-Poró mostraron números ligeramente inferiores, pero bajo el mismo patrón fenológico en cuanto a los tiempos de expresión. En algunos cafetos, en los meses en el que se expresa la preantesis se lleva a cabo un graneado de cerezas, la cual son el resultado de desarrollos fenológicos asíncronos que se dan durante todo el año.

El análisis del modelo de regresión lineal múltiple mostro que solo el tratamiento Pleno sol 1 tuvo un efecto positivo sobre la expresión de la preantesis (Cuadro 18). El resto de los socios no fueron significativos desde el punto de vista de la expresión de la preantesis. Se destaca el hecho de que el sector sin arboles asociados Pleno sol 2, tuvo un efecto negativo significativo sobre la preantesis, disminuyendo el número de cafetos en esta etapa. Las fertilizaciones (F1 y F2), resultaron ser altamente significativas en cuanto a la expresión de la preantesis. Complementariamente, el análisis de varianza (ANOVA) mostró que la fertilización tuvo un efecto altamente significativo en la presencia de preantesis ( $F = 41,041$ ;  $\text{Pr}(>F) = 1,61\text{e-}14$ ), subrayando la importancia de las diferencias entre los tratamientos de fertilización (F1 y F2).

El modelo de regresión lineal explicó aproximadamente el 44,5% de la variabilidad en la cantidad de preantesis, sugiriendo, al igual que en el caso de la presencia de nudos florales, que otros factores no considerados en este estudio podrían también estar influyendo en la fenología de los cafetos.

5.3.6. Análisis de la presencia de antesis considerando las asociaciones agroforestales y a pleno sol, las fertilizaciones diferenciadas y los factores climáticos temperatura, humedad y lluvias

En general se observó un aumento moderado en la frecuencia de antesis desde 2020 hasta 2023, lo cual podría estar relacionado con el proceso de adaptación de las plantas a las condiciones del ensayo y a su desarrollo fenológico progresivo. Tal aumento es consistente con las producciones de cerezas de café que se realizaron año tras año (ver Figura 18 del Capítulo 1).

Cuadro 18. Resultados de la regresión lineal múltiple para el número de cafetos con preantesis

<b>Coefficientes</b>	<b>Estimación</b>	<b>Error Estándar</b>	<b>Valor t</b>	<b>Pr(&gt; t )</b>
(Intercepto)	-40,88	41,49	-0,985	0,3263
Cobertura Espavel-Poró	0,35	3,41	0,102	0,9191
Cobertura Guapinol-Poró	0,24	3,38	0,071	0,9432
Pleno_sol_1	-1,89	3,38	-0,559	0,5772
Pleno_sol_2	-10,94	3,44	-3,178	0,00185**
Fertilizaciones F1	20,23	2,72	7,451	0,001***
Fertilizaciones F2	22,56	2,7	8,348	0,001***
Temperatura	-2,38	1,05	-2,271	0,02479*
Humedad	1,38	0,57	2,410	0,01736*
Lluvias	-0,03	0,01	-2,201	0,02950*

**Significancia: \*\*\* p < 0,001; \*p < 0,05**

El análisis del modelo de regresión lineal múltiple encontró que las áreas sin asociación agroforestal (Pleno sol 1 y Pleno sol 2), tienen efectos negativos significativos sobre la presencia de antesis en los cafetos. Una explicación basada en las observaciones en campo es el impacto de las gotas de las lluvias sobre la caída de estas. En particular, las lluvias excesivas e inclusive insuficientes pueden tener efectos adversos sobre el proceso de floración y fructificación de las plantas de café.

Durante periodos de lluvia intensa, las plantas de café pueden experimentar estrés hídrico, lo cual puede resultar en la caída prematura de las flores. Este fenómeno ocurre porque el exceso de agua puede anegar el suelo, reduciendo la disponibilidad de oxígeno para las

raíces y afectando negativamente la absorción de nutrientes esenciales. Por otro lado, la falta de lluvias, especialmente durante las etapas críticas de floración y fructificación, también puede causar estrés hídrico en las plantas de café. La insuficiencia de agua afecta directamente la capacidad de las plantas para mantener la turgencia celular lo que decanta en el aborto de flores. La variabilidad en la cantidad y distribución de las lluvias no solo afecta la sincronización de estos procesos fenológicos, sino que también puede impactar significativamente la productividad y la calidad del café (Sakai *et al.* 2006).

Con base a lo anterior, y basado en los resultados del modelo de regresión lineal múltiple, la estimación del efecto de las lluvias sobre la antesis es altamente significativa (-0,0039;  $p < 0.001$ ), lo que indica que un aumento en las lluvias tiene un efecto negativo sobre la presencia de antesis. En contraposición, se encontró que la temperatura y la humedad tienen un efecto positivo marginalmente significativo (1,64;  $p$ -valor de 0,0621 y 2,38;  $p < 0.001$ , respectivamente) (Cuadro 19). El modelo de regresión explicó aproximadamente el 71,98% de la variabilidad en la presencia de antesis, lo que es bastante eficaz para explicar la variabilidad en la antesis.

Cuadro 19. Resultados de la regresión lineal múltiple para el número de cafetos con antesis

<b>Coeficientes</b>	<b>Estimación</b>	<b>Error Estándar</b>	<b>Valor t</b>	<b>Pr(&gt; t )</b>
(Intercepto)	-219,337	32,721	-6,703	0,001***
Cobertura Espavel-Poró	-0,621077	3,019812	-0,206	0,8375
Cobertura Guapinol-Poró	-2,171077	3,019812	-0,719	0,4741
Pleno_sol_1	-8,026899	3,101399	-2,588	0,0113 *
Pleno_sol_2	-16,886223	3,102117	-5,443	0.001***
Fertilizaciones F1	24,87874	2,490817	9,988	0.001***
Fertilizaciones F2	26,42622	2,494302	10,595	0.001***
Temperatura	1,635802	0,865398	1,890	0,0621 .
Humedad	2,382578	0,329635	7,228	0.001***
Lluvias	-0,039693	0,007867	-5,045	0.001***

**Significancia: \*\*\*  $p < 0,001$ ; \* $p < 0,05$ ; .  $p < 0,1$**

### 5.3.7. Análisis de la presencia de frutos considerando las asociaciones agroforestales y a pleno sol, las fertilizaciones diferenciadas y los factores climáticos temperatura, humedad y lluvias

Se evidencio el aumento gradual en la frecuencia de fructificación desde 2020 hasta 2023. Cenízaro-Café y Pleno-Sol-1 mostraron frecuencias ligeramente superiores al resto de los tratamientos, sin embargo, Espavel-Poró y Guapinol-Poró siguieron una tendencia similar. Los cafetos sin interacción arbórea Pleno Sol 2 fueron los menos productivos. El análisis de regresión subraya la importancia de la fertilización en el aumento de la presencia de frutos en las plantas de café. Tanto la fertilización física (F1) (estimación: 16.30, error estándar: 1.67, valor t: 9.781, p-valor:  $< 2e-16$ ) como la química (F2) (estimación: 18.54, error estándar: 1.66, valor t: 11.178, p-valor:  $< 2e-16$ ) incrementaron significativamente el número de frutos (Cuadro 20).

Cuadro 20. Resultados de la regresión lineal múltiple para el número de cafetos con frutos

<b>Coefficientes</b>	<b>Estimación</b>	<b>Error Estándar</b>	<b>Valor t</b>	<b>Pr(&gt; t )</b>
(Intercepto)	-31,971	22,243	-1,437	0,153
Cobertura Espavel-Poró	-0,327	2,042	-0,160	0,873
Cobertura Guapinol-Poró	-0,239	2,042	-0,117	0,907
Pleno_sol_1	0,102	2,081	0,049	0,961
Pleno_sol_2	-14,875	2,132	-6,975	0,001***
Fertilizaciones F1	16,29500	1,666	9,781	0.001***
Fertilizaciones F2	18,53900	1,658	11,178	0.001***
Temperatura	0,19	0,504	0,378	0,706
Humedad	0,401	0,245	1,639	0,104
Lluvias	0,008	0,005	1,576	1,117

**Significancia: \*\*\* p < 0,001**

Entre los tipos de cobertura, Pleno Sol 2 (estimación: -14.88, error estándar: 2.13, valor t: -6.975, p-valor:  $1.39e-10$ ) tuvo un impacto negativo significativo, indicando que la falta de asociación agroforestal no es ideal para el desarrollo de los frutos. Desde el punto de vista de la temperatura (estimación: 0.19, error estándar: 0.50, valor t: 0.378, p-valor: 0.706) y las precipitaciones (estimación: 0.0086, error estándar: 0.0055, valor t: 1.576, p-valor: 0.117) no se encontraron efectos significativos, mientras que la humedad (estimación: 0.40,

error estándar: 0.25, valor t: 1.639, p-valor: 0.104) mostró una tendencia hacia la significancia. El modelo de regresión explicó aproximadamente el 60.95% de la variabilidad en la presencia de frutos, lo que es eficaz para explicar la variabilidad en la antesis.

La importancia de las coberturas y la fertilización en la producción de café ha sido ampliamente documentada en la literatura científica. La sombra proporciona un microclima más estable, reduciendo las fluctuaciones extremas de temperatura y humedad, lo que favorece el desarrollo de los cafetos y mejora la calidad del grano (Muschler, 2001). Además, la sombra reduce el estrés hídrico y protege las plantas de la radiación solar directa, lo cual puede disminuir la incidencia de plagas y enfermedades (Vaast *et al.* 2005).

En cuanto a la fertilización, estudios han demostrado que la aplicación adecuada de nutrientes es crucial para maximizar el rendimiento y la calidad del café. La fertilización física y química incrementa significativamente el número de frutos, mejorando la productividad del cultivo (DaMatta *et al.* 2007). La combinación entre la sombra y la fertilización es una opción real y necesaria para optimizar la producción de café en diversas condiciones ambientales (Perfecto *et al.* 2014).

#### **5.4. Conclusiones**

La fenología del café en el Caribe de Costa Rica presenta diferencias significativas en comparación con las zonas tradicionales cafetaleras de Costa Rica, principalmente debido a las variaciones climáticas y de altitud. En el Caribe de Costa Rica, la floración del híbrido Esperanza L4A5 se caracteriza por la presencia de dos picos distintivos. El primer pico de floración ocurre en marzo, seguido por un segundo pico en mayo. Este patrón de floración no es uniforme y muestra una variabilidad considerable entre los años. En el marco del estudio, durante el segundo año de observación, se notó un desfase en la inducción de la floración, que comenzó aproximadamente 11 días más tarde en comparación con el primer año. Esta variabilidad puede acuñarse a las condiciones climáticas específicas de la región, incluyendo fluctuaciones en la temperatura, la humedad y las precipitaciones. En contraste, con las zonas tradicionales cafetaleras de Costa Rica, como por ejemplo el Valle Central, la floración principal del café ocurre típicamente entre marzo y abril. Este período de

floración está altamente sincronizado con el inicio de la estación lluviosa. La transición de la estación seca a la lluviosa actúa como un estímulo ambiental que induce una floración más uniforme y sincronizada en los cafetos. La estabilidad del clima en estas zonas contribuye a un ciclo fenológico más predecible y estructurado.

En vista de lo anterior, en el Caribe de Costa Rica, la variabilidad en las etapas fenológicas puede requerir prácticas específicas como la selección de sombras adecuadas que permitan la aireación, la entrada de luz y garantice condiciones micro climáticas. Así mismo, desde el punto de vista de la fertilización, resulta viable el ajuste de las aplicaciones de insumos considerando las necesidades específicas de las plantas y las condiciones del microclima.

Desde el punto de vista de la condición meteorológica temperatura, se evidenció que esta presentó variaciones notables entre los años. Las temperaturas más bajas se registraron en diciembre de 2020 y enero de 2021, lo cual es consistente con las variaciones estacionales típicas de la región Caribe, donde los meses de noviembre, diciembre, enero e incluso parte de febrero suelen ser los más frescos del año. Estas bajas temperaturas durante los meses más fríos están estrechamente relacionadas con el desarrollo de los botones florales, ya que estudios previos han demostrado que temperaturas más bajas pueden retrasar la floración, afectando la sincronización y calidad de esta.

La humedad relativa mostró una estabilidad comparativa a lo largo de los años, con algunas variaciones notables. Los niveles de humedad fueron más bajos y similares en los años 2020, 2021 y 2023, mientras que el año 2022 mostró los niveles más altos de humedad relativa, especialmente en los meses de enero y noviembre. La humedad relativa tiende a aumentar durante los meses de mayor precipitación (junio a octubre) y a disminuir en los meses más secos (enero a marzo).

Durante los años de toma de datos, se registraron variaciones significativas en las precipitaciones anuales: 2709,5 mm en 2020; 3054,15 mm en 2021; 2410,9 mm en 2022 y 2089,34 mm en 2023. Esta variabilidad interanual de las lluvias tuvo un impacto notable en las etapas fenológicas del café, afectando desde la floración hasta el llenado y maduración de los frutos.

Finalmente, considerando las condiciones climáticas del Caribe de Costa Rica, la adopción de técnicas de agricultura de precisión permitirá ajustar las aplicaciones de insumos y las prácticas de manejo según las necesidades específicas de las plantas y las condiciones del microclima.

### **Literatura citada**

- Avelino, J., Zelaya, H., Merlo, A., Pineda, A., Ordoñez, M., & Savary, S. (2004). The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations. *Ecological Modelling*, 180(2-3), 301-314. <https://agritrop.cirad.fr/533318/>
- Cafés Roma. (2021). Tipos de café en Costa Rica. <https://cafesroma.com/tipos-de-cafe-en-costa-rica/>
- Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG). (2024). Visor de mapas geológicos de Costa Rica. [Mapa interactivo]. Recuperado de <https://cicg.ucr.ac.cr/interactivo/visor-de-mapas-geologicos-de-costa-rica/>
- Chacón, P., González, M., & Quiros, M. (2021). Impacto de las precipitaciones en la floración del café. *Revista de Agroecología y Desarrollo Rural*, 15(3), 45-59.
- Cannell, M. G. R. (1985). Physiology of the coffee crop. In M. N. Clifford & K. C. Wilson (Eds.), *Coffee: Botany, Biochemistry and Production of Beans and Beverage* (pp. 108-134). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6657-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6657-1_5)
- DaMatta, F. M. (2004). Exploring drought tolerance in coffee: A physiological approach with some insights for plant breeding. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 16(1), 1-6.
- DaMatta, F. M., Ronchi, C. P., Maestri, M., y Barros, R. S. (2007). Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 485-510. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400014>
- Engels, C., Kirkby, E., y White, P. (2012). Chapter 5 - Mineral Nutrition, Yield and Source–Sink Relationships. En P. Marschner (Ed.), *Mineral Nutrition of Higher Plants* (pp. 85-133). Academic Press.
- Google. (2024). [Campus de la Universidad EARTH]. Recuperado el 31 de enero de 2024. <https://maps.app.goo.gl/ecMMzoe47Wf4cPkV6>

- Henríquez, C., Cabalceta, G., Bertsch, F., y Alvarado, A. (2006). Principales suelos de Costa Rica: orígenes, características y manejo [En línea]. San José (CR): MAG. [http://www.mag.go.cr/biblioteca\\_virtual\\_ciencia/suelos-cr.html](http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/suelos-cr.html)
- Hidalgo Rodríguez, M. (2007). Información sobre los híbridos F1 obtenidos en el Programa de Mejoramiento Genético del arábica en Centroamérica. Heredia, Costa Rica: CIRAD/CATIE/PROMECAFE/IHCAFE/ANACAFE/PROCAFE/ICAFE, 5 p. Coordinador del Programa de Mejoramiento Genético, CICAPE.
- Holdridge, L.R. 1967. Life zone ecology. San José, Costa Rica. Tropical Science Center. [https://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/holdridge\\_1966\\_-\\_life\\_zone\\_ecology.pdf](https://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/holdridge_1966_-_life_zone_ecology.pdf)
- Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE). (2015). Regiones Cafetaleras de Costa Rica. <https://www.icafe.cr/nuestro-cafe/regiones-cafetalaras/>
- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria de Costa Rica (INTA). (2015). Suelos de Costa Rica: orden Inceptisol (Boletín Técnico No. 5). <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1825.PDF>
- Jiménez, A. (2013). El Café en Costa Rica (Primera edición). San José, Costa Rica: Editorial UCR.
- Martins Silva, E. M., y Guzmán Domínguez, M. (2019). Respuesta Inicial de *Coffea arabica* var. Esperanza a la Fertilización Diferenciada en Suelos de Origen Aluvial del Caribe de Costa Rica (Proyecto de Graduación). Universidad EARTH, Guácimo, Limón, Costa Rica.
- Muschler, R. G. (2001). Shade improves coffee quality in a sub-optimal coffee-zone of Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 51(2), 131-139.
- Perfecto, I., Vandermeer, J., y Philpott, S. M. (2014). Complex ecological interactions in the coffee agroecosystem. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 45, 137-158.
- Salazar, L. (1999). Fenología del café en diferentes altitudes. *Agronomía Mesoamericana*, 10(2), 37-45.
- Salazar, E. (1999) Calidad de *Coffea arabica* bajo sombra de *Erythrina poeppigiana* a diferentes elevaciones en Costa Rica. Tesis de maestría. CATIE, Turrialba, Costa Rica. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9871>

- Sakai, S., Momose, K., Yumoto, T., y Nagamasu, H. (2006). Plant reproductive phenology over four years including an episode of general flowering in a lowland mixed dipterocarp forest, Sarawak, Malaysia. *American Journal of Botany*, 93(4), 491-507. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10523283/>
- Universidad EARTH. (2024). Base de datos climáticos de la estación meteorológica institucional [documento en Excel].
- Word Coffee Research (WCR). (2023). Híbrido *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5. <https://varieties.worldcoffeeresearch.org/varieties/esperanza>
- Vaast, P., y Bertrand, B. (2000). Fruit quality and productivity of coffee in agroforestry systems vs. full sun cultivation. *Proceedings of the 19th International Conference on Coffee Science (ASIC)*, 14-18.
- Vaast, P., y Bertrand, B. (2003). Biophysical interactions between shade trees and coffee bushes in agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 57(2), 83-92.
- Vaast, P., Bertrand, B., Perriot, J. J., Guyot, B., y Genard, M. (2005). Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(13), 1977-1984.
- Virginio Filho, E. de M., y Astorga Domian, C. (2021). Estado del arte y manejo de los híbridos F1 (*Coffea arabica* L.) del Programa de Mejoramiento Genético de PROMECAFE. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Vignola, R., Watler, W., Poveda Coto, K., Vargas Céspedes, A., Mora Aguilar, M., y Rivera Vargas, P. (2018). Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de café en Costa Rica. CATIE. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8206.pdf>
- Villers, L., Etchevers, J., y Robledo, W. (2009). Dinámica del ciclo del agua en cafetales bajo diferentes sistemas de manejo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(4), 601-613.
- Villarreyna, A. M., & Alcaraz, G. (2005). Nutritional disorders in coffee. *Cenicafé*, 56(2), 125-134.

- Willson, K. C. (1999). Coffee, cocoa and tea. In M. N. Clifford & K. C. Wilson (Eds.), *Coffee, Cocoa and Tea: Market Prospects and Development Lending* (pp. 75-112). World Bank. <https://doi.org/10.1596/0-8213-4282-4>
- Zapata, J. (2013). Efectos de la precipitación en la fenología del cafeto en regiones tropicales. *Agronomía Mesoamericana*, 24(1), 103-112.

**6. CAPITULO 3. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL HÍBRIDO  
ESPERANZA (L4A5) A *Hemileia vastatrix* (ROYA) Y *Mycena citricolor* (OJO DE  
GALLO) ESTABLECIDOS BAJO DIFERENTES ARREGLOS  
AGROFORESTALES Y A PLENO SOL BAJO FERTILIZACIONES  
DIFERENCIADAS EN EL CARIBE DE COSTA RICA.**

**Resumen**

**Introducción:** El estudio se centró en evaluar la resistencia del híbrido *Coffea arabica* var. Esperanza (L4A5) a dos enfermedades prevalentes: la roya (*Hemileia vastatrix*) y el ojo de gallo (*Mycena citricolor*), en la región Caribe de Costa Rica, una zona no tradicional para el cultivo de café. **Objetivo:** Evaluar la resistencia de los híbridos Esperanza (L4A5) a la roya y al ojo de gallo mediante un censo completo de los cafetos, utilizando dos metodologías específicas para la cuantificación de la severidad de cada enfermedad. Se realizó la adaptación de la metodología descrita por Capucho *et al.* (2011) para determinar la severidad en hojas y a nivel de cafeto se utilizó la metodología propuesta por Eskes y Toma-Braghini (1989) a nivel de la planta. Para ojo de gallo se hizo uso de la escala diagramática de daño de la enfermedad ojo de gallo desarrollada por Pacheco (2012). **Metodología:** Utilizando un diseño experimental de parcelas divididas en bloques completamente aleatorizados, se implementaron diferentes tratamientos que incluyeron asociaciones con especies arbóreas (Cenízaro, Guapinol, Espavel, y Poró) y tres tipos de fertilización: física (F1), química (F2) y un control de acidez (Cal). El monitoreo de la severidad de las enfermedades se realizó mediante censos completos y el uso de la aplicación Leaf Doctor para desarrollar la escala de observación con mayor precisión. **Resultados:** Las asociaciones agroforestales y la fertilización diferenciada influyeron significativamente en la resistencia del café a las enfermedades. En general, las combinaciones con fertilización química mostraron una mayor incidencia de roya, mientras que las asociaciones con árboles maderables y de servicio ayudaron a reducir la severidad de ambas enfermedades. **Conclusión:** Estos hallazgos sugieren que, con prácticas de manejo adecuadas para la zona, es posible disminuir la presión de enfermedades y cultivar café en zonas poco tradicionales como el Caribe costarricense. La diversificación de la caficultura en zonas bajas es plausible.

## 6.1. Introducción

El cultivo de café es una actividad agrícola de gran importancia económica y social en muchos países tropicales. Tradicionalmente, el café se ha cultivado en regiones montañosas de altitud elevada, donde las condiciones climáticas favorecen su crecimiento y productividad (Jaramillo *et al.* 2011). Sin embargo, el cambio climático y la presión sobre los recursos naturales han llevado a explorar nuevas áreas para la producción de café, incluidas las zonas de baja altitud no tradicionales (Avelino *et al.* 2015).

*Coffea arabica* var. Esperanza (L4A5) es un híbrido mejorado que ha mostrado potencial en términos de resistencia a enfermedades y adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales. En el marco de la presente investigación, el híbrido Esperanza L4A5 se estableció en la región Cariba de Costa Rica, caracterizada por su clima cálido y húmedo, con temperaturas promedio de 25 °C y precipitaciones anuales elevadas, lo que representa un desafío y una oportunidad para la diversificación de la caficultura.

El diseño del ensayo agroforestal incluyó diferentes especies arbóreas asociadas con el café, como *Albizia saman*, *Hymenaea courbaril* y *Anacardium excelsum*, junto con *Erythrina poeppigiana* como árbol de servicio. Además, se evaluaron dos tipos de fertilización: física y química, con la existencia de un control experimental la cual se basó en el encalado.

Este estudio se basa en la evaluación de la resistencia de los híbridos Esperanza (L4A5) a dos enfermedades prevalentes del café: la roya (*Hemileia vastatrix*) y el ojo de gallo (*Mycena citricolor*). Para ello, se emplearon metodologías específicas y herramientas tecnológicas como la aplicación Leaf Doctor para cuantificar la severidad de estas enfermedades de manera precisa y confiable.

La investigación tiene como objetivo proporcionar una base para el manejo integrado del cultivo de café en zonas no tradicionales. Los resultados obtenidos pueden ofrecer nuevas estrategias para mejorar la productividad y la resistencia del café en diferentes condiciones ambientales, asegurando así la viabilidad a largo plazo de esta importante actividad agrícola.

## 6.2. Materiales y métodos

### 6.2.1. Ubicación del área del proyecto

El ensayo agroforestal basado en híbridos de *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5 se encuentra ubicado en la provincia de Limón de Costa Rica, específicamente en los predios de la Finca Forestal en la Universidad EARTH, en el cantón Guácimo de la provincia de Limón-Costa Rica en las coordenadas 10°13'00.0"N 83°35'27.0"W (Google Earth, 2024) (Figura 26).

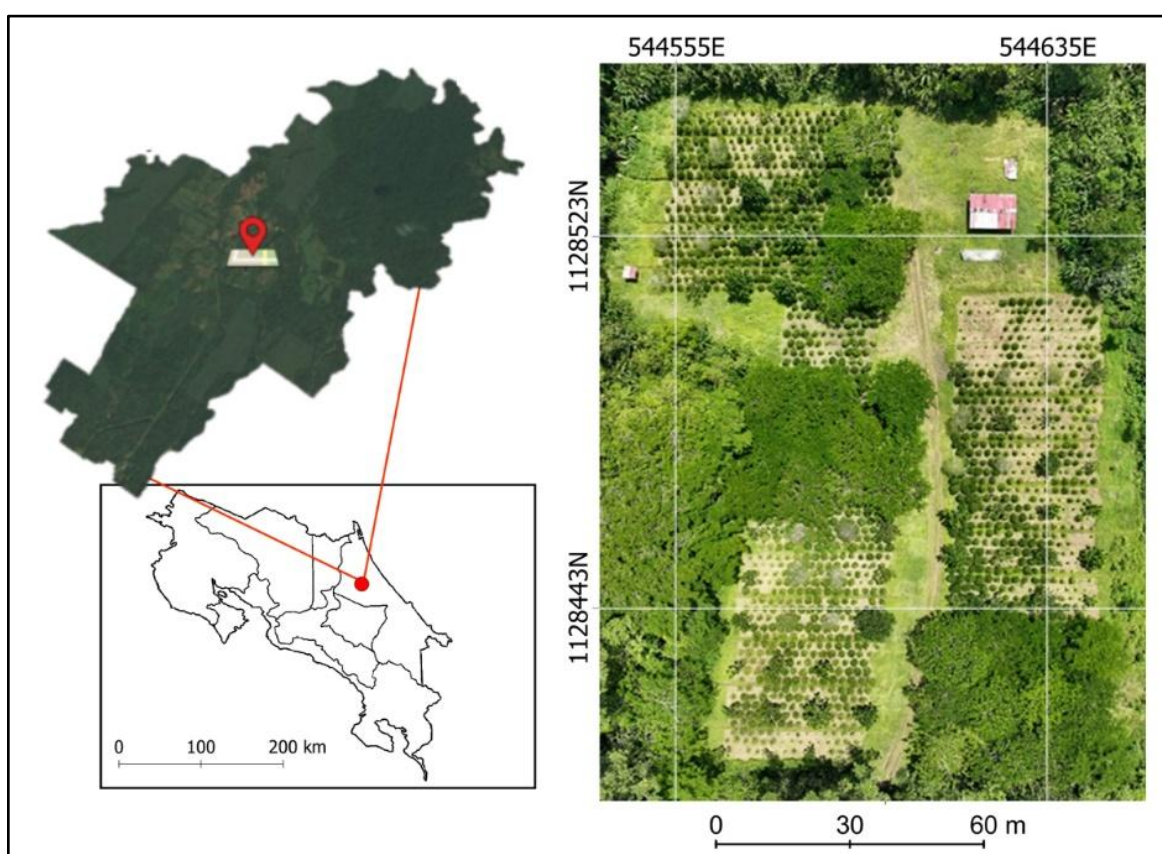


Figura 26. Ubicación del ensayo agroforestal a largo plazo basado en híbridos de *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5

### 6.2.2. Clima

La temperatura promedio de la zona del experimento es de 25 °C, la cual se expresa entre los 20 °C y 33 °C (24 horas). Además, las precipitaciones anuales son de 3701,99 mm, con

una humedad relativa promedio de 86 % y una radiación solar máxima de 0,85 MJ/m<sup>2</sup>-día (Universidad Earth, 2024).

### 6.2.3. Característica del ensayo agroforestal

El arreglo de los componentes del ensayo se llevó a cabo siguiendo un diseño de parcelas divididas con una estructura de parcelas en bloques completamente aleatorizados. Los tratamientos principales involucraron diferentes especies arbóreas asociadas a los híbridos de café, incluyendo Cenízaro (*Albizia saman*), Guapinol (*Hymenaea courbaril*), y Espavel (*Anacardium excelsum*), con Poró (*Erythrina poeppigiana*) como árbol de servicio. Los sub-tratamientos consistieron en tres tipos de manejo de fertilización diferenciada. Las subparcelas se dividieron en aquellas con café asociado o no a coberturas arbóreas, y fueron fertilizadas bajo diferentes esquemas. La fertilización física (F1) incluyó una mezcla de enmiendas orgánicas y minerales aplicadas manualmente. La fertilización química (F2) utilizó fertilizantes sintéticos para proporcionar los nutrientes necesarios. Finalmente, las áreas de control experimental recibieron únicamente tratamiento para el control de la acidez del suelo, sin adición de otros fertilizantes (Figura 27).

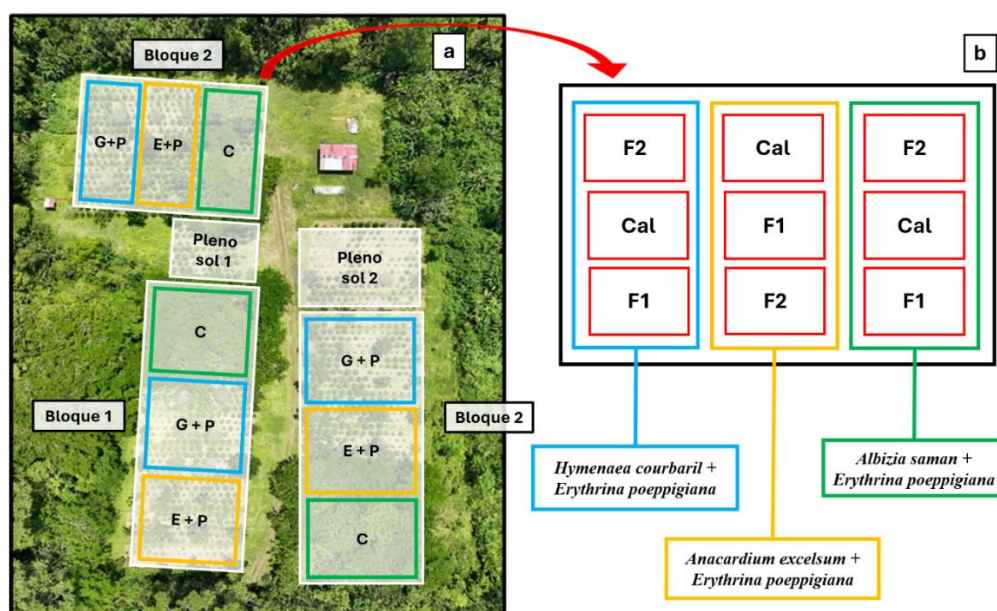


Figura 27. Diseño de parcelas divididas con estructura de parcelas en bloques completamente aleatorizados. a) Ubicación espacial de los bloques, tratamientos (asociación arboles-café) y las áreas con cafetos a pleno sol (Pleno sol 1 y Pleno sol 2). b) Diagrama de fertilizaciones en sub-parcelas dentro del tratamiento.

La fertilización física (F1) incluía Cloruro de Potasio (KCL) (10.4 g/planta), Fosfato Monopotásico (MKP) (4.0 g/planta), Nitrato de Amonio (16.0 g/planta), Sulfato de Zinc (0.24 g/planta), y Sulfato de Cobre (0.096 g/planta), totalizando 30.74 g/planta. La fertilización química (F2) consistía en un compuesto NPK (45.6 g/planta), Sulfato de Cobre (0.096 g/planta), Sulfato de Zinc (0.232 g/planta), y Urea (33.6 g/planta), con un total de 79.53 g/planta. Además, se aplicó una enmienda de Carbonato de Calcio (CaCO<sub>3</sub>) con una dosis de 41.32 g/planta como control de acidez para 1936 plantas (Martins y Guzmán, 2019). Todos los valores están calculados en función de una fertilización, las cuales se fueron dando considerando las condiciones climáticas.

#### 6.2.4. Prácticas de manejo de los componentes del ensayo

El enfoque de la investigación se centró en observar cómo crecía, se desarrollaba y se adaptaba el híbrido a las condiciones del Caribe de Costa Rica. Por esta razón, las prácticas de manejo se orientaron hacia cuatro aspectos fundamentales: 1) el control de malezas, 2) el mantenimiento de drenajes, 3) el control de plagas y 4) las podas de los árboles.

1.- El control de malezas se efectuó manualmente utilizando herramientas como moto guadañas, azadones y machetes. A medida que los cafetos fueron creciendo, el manejo de las malezas se concentró en un radio de 2 metros alrededor de cada planta. Desde el año 2022, el control de malezas se realizó exclusivamente con machetes (Figura 28). Estas prácticas fueron necesarias para asegurar el crecimiento saludable del café y evitar que las malezas compitan por nutrientes, agua y luz, lo cual puede afectar negativamente el rendimiento y la calidad del café (Singh *et al.* 2022). Además, las malezas pueden albergar patógenos y plagas que perjudican las plantas de café (Góngora *et al.* 2023).



Figura 28. Prácticas de control de malezas. a) Uso de moto guarañas para el control de las malezas. b) Uso de azadones para el deshierbe.

2.- El ensayo agroforestal cuenta con una red de drenajes diseñada para asegurar la salud radicular de los cafetos durante las temporadas de altas lluvias (Figura 29). Se implementaron sistemas de drenaje eficientes que evitan el encharcamiento y protegen las plantas de los daños por exceso de agua (USDA, n.d.). Además, se les proporcionó mantenimiento regular para garantizar su óptimo funcionamiento.



Figura 29. Construcción de la red de drenajes del ensayo. a) Vista frontal del trabajo de excavación para la construcción del sistema de drenajes del ensayo. b) Red final de drenajes construidos (2019)

3.- A nivel de plagas, solo se prestó atención a las hormigas de la especie *Atta cephalotes*, también conocidas como hormigas cortadoras de hojas. Estas hormigas desfolian los cafetos, lo que puede tener un impacto significativo en la salud y productividad de las plantas. *A. cephalotes* es una de las especies de hormigas más estudiadas en los trópicos

debido a su capacidad para formar colonias grandes y su comportamiento de forrajeo, que puede afectar negativamente a los cultivos agrícolas al eliminar hojas de las plantas, disminuyendo su capacidad fotosintética y, por ende, su rendimiento (Farji-Brener, 2020).

4.- La poda de los árboles se llevó a cabo teniendo en cuenta el potencial de cada especie en el sistema agroforestal (Figura 30). Se consideró la arquitectura del árbol para asegurarse de que estas contribuyeran a una formación adecuada en el contexto de la especie y de regular la cantidad de luz solar que llegaba a los cafetos. Los árboles de sombra y aquellos con potencial maderero pueden moderar las temperaturas extremas y minimizar la pérdida de agua, al mismo tiempo que incrementa la biodiversidad en el cafetal (Beer *et al.* 1998).



Figura 30. Poda de las coberturas asociadas a los híbridos de Esperanza L4A5. a) Poda de formación en Espavel (*A. excelsum*) b) Poda de ramas en Cenízaro (*A. saman*)

#### 6.2.5. Toma de datos

Desde el establecimiento del ensayo, se implementó un monitoreo trimestral de los cafetos con el propósito de detectar problemas fitosanitarios. *M. citricolor* se observó desde la etapa de vivero y continuó una vez que los cafetos fueron establecidos en el campo. El daño

de esta enfermedad no fue significativo, por lo que no se consideró necesario implementar medidas de control, además de que la naturaleza de la investigación no preveía tal control. En diciembre de 2021, se reportó por primera vez la presencia de *H. vastatrix*. A partir de ese momento, se monitoreó su ocurrencia utilizando una escala de ausencia y presencia, permitiendo una detección temprana de la roya del café (Koutouleas *et al.* 2022).

#### Determinación de la severidad de la roya en hoja y en el cafeto

Se realizó un censo sobre los cafetos del ensayo considerando la ubicación espacial de estos (Figura 31). Se utilizaron dos metodologías complementarias para evaluar la severidad de la roya: una a nivel de hojas y otra a nivel de cafeto completo. La severidad de la roya a nivel de la hoja se evaluó a través de la adaptación de la metodología descrita por Capucho *et al.* (2011) (Figura 32a) y a nivel de cafeto se utilizó la metodología propuesta por Eskes y Toma-Braghini (1989), la cual consiste en evaluar visualmente la severidad de la roya (Figura 32b).

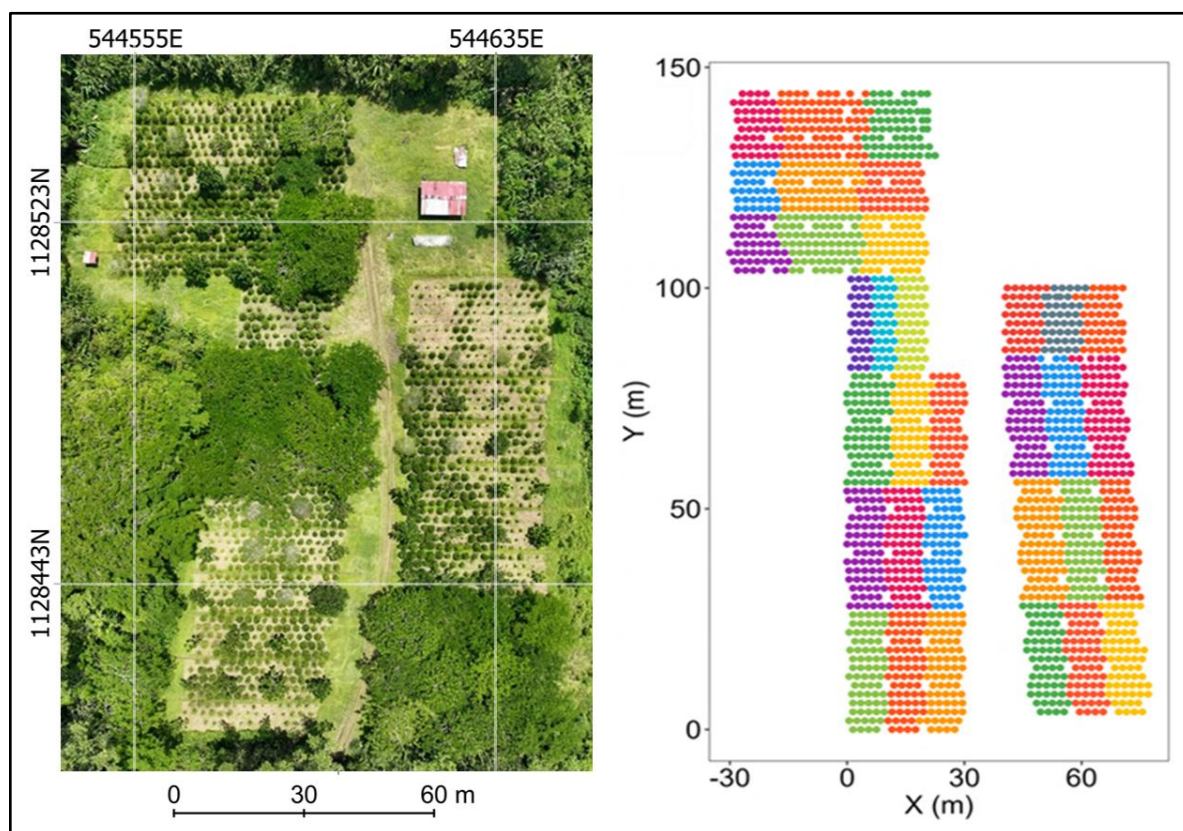


Figura 31. Ubicación espacial de los cafetos censados para la determinación de la incidencia de roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*)

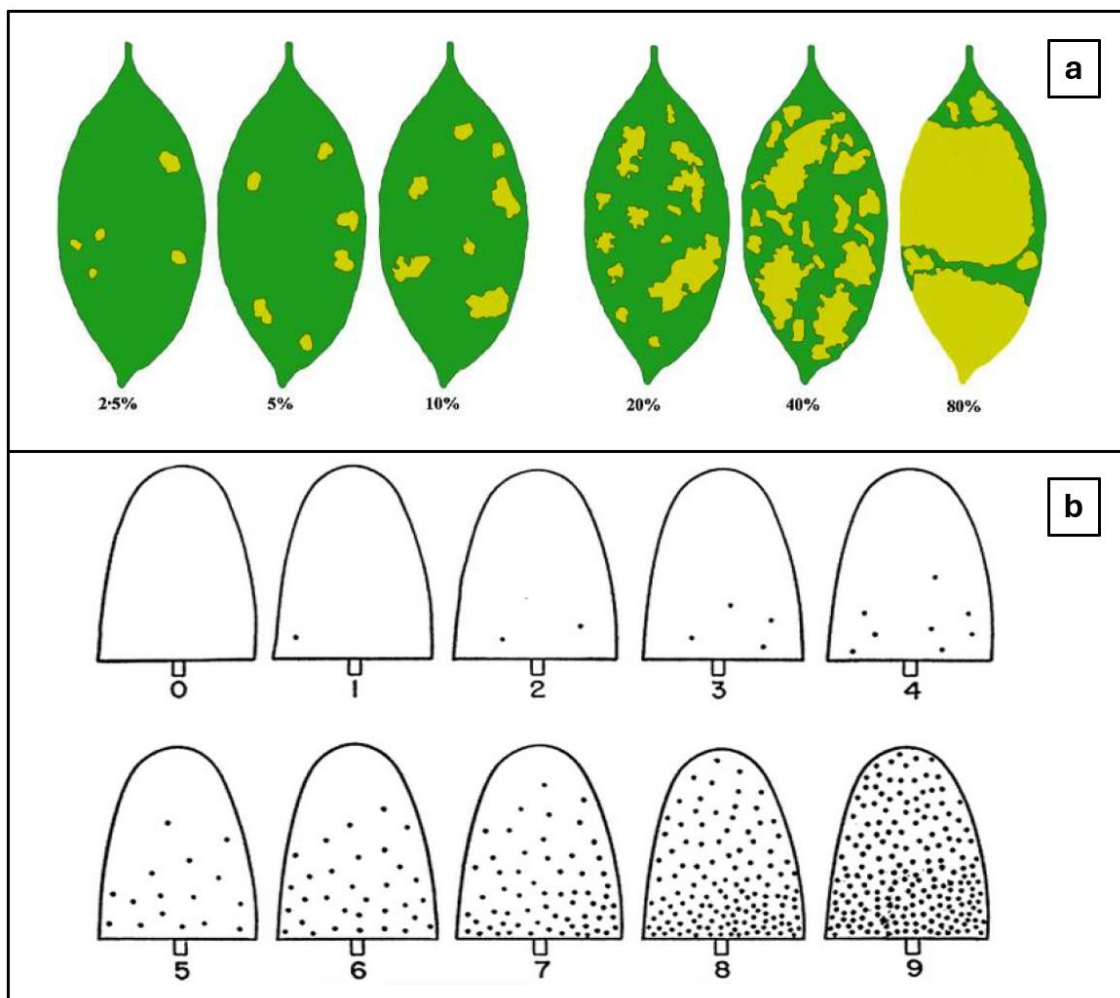


Figura 32. Determinación de la severidad de la roya en Esperanza L4A5. a) Escala para la evaluación de la severidad de la roya del café propuesta por Capucho *et al.* (2011). b) Categorías para la evaluación de la severidad de la roya del café en plantas propuestas por Eskes y Toma-Braghini (1989).

La adaptación de la metodología descrita por Capucho *et al.* (2011), se basó en la recolección exhaustiva de muestras de hojas con diferentes etapas de infección (en toda el área del ensayo). Posterior a la recolección de las muestras, se procedió a utilizar la aplicación Leaf Doctor, la cual permitió calcular el porcentaje de tejido enfermo para de esta manera generar una escala de observación adaptada que mejorara la precisión de los evaluadores durante el censo (Pethybridge y Nelson, 2015). Capucho *et al.* (2011) menciona que la tendencia a exagerar las observaciones de la severidad de la roya es un problema común cuando los evaluadores no tienen herramientas estandarizadas para cuantificar el área afectada.

Se contempló la posibilidad de utilizar la aplicación Leaf Doctor para ajustar la escala de observación en caso de encontrar plantas y hojas con niveles de severidad superiores a los previamente establecidos.

#### Determinación del daño de ojo de gallo en la hoja

El proceso para la determinación del daño de ojo de gallo, se utilizó la escala diagramática de la enfermedad ojo de gallo causada por *M. citricolor* propuesta por Pacheco (2012) (Figura 33). Se tomaron muestras de hojas con diferentes estados de daños y se procesaron en la aplicación Leaf Doctor. Se generó una escala de observación para los evaluadores durante el censo, considerando los componentes el diseño experimental. Al igual que en el caso de la escala de la severidad de la roya, se contempló el uso de la aplicación Leaf Doctor para ajustar la escala de observación en el caso de encontrar plantas y hojas con otros niveles de daño en la hoja.

#### 6.2.6. Análisis de los datos

Se identificaron patrones y tendencias de la severidad de la roya y daños de la enfermedad ojo de gallo causada por *M. citricolor* considerando los componentes del ensayo agroforestal: bloques, tratamientos y sub-tratamientos. El procesamiento de los datos se realizó en el software RStudio (RStudio Team, 2023).













CLASE 0	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3	CLASE 4	CLASE 5
					
PLANTA SANA	PLANTA CON DEFOLIACIÓN ENTRE 0.1 A 20 %	PLANTA CON DEFOLIACIÓN ENTRE 21 A 40 %	PLANTA CON DEFOLIACIÓN ENTRE 41 A 60 %	PLANTA CON DEFOLIACIÓN ENTRE 61 A 80 %	PLANTA CON DEFOLIACIÓN ENTRE 81 A 100 %
					
HOJA SANA 0 0	HOJA CON 0.35% DE DAÑO 0.01 - 2.49%	HOJA CON 2.70% DE DAÑO 2.46 - 5.35%	HOJA CON 10.15% DE DAÑO 5.36% - 11.28%	HOJA CON 17.15% DE DAÑO 11.29 - 22.23%	HOJA CON 24.74% DE DAÑO 22.24 - 35 %

Figura 33. Escala diagramática de daño de la enfermedad ojo de gallo causada por *Mycena citricolor* desarrollada por Pacheco (2012)

### 6.3. Resultados y discusión

#### 6.3.1. Análisis de la incidencia de *H. vastatrix* en los años 2022 y 2023

La primera detección de plantas afectadas por la roya se realizó en diciembre de 2021, lo que permitió iniciar el proceso de monitoreo de la enfermedad. Desde 2022, se registró la presencia o ausencia de la roya mediante la observación total de los cafetos, utilizando el sistema de coordenadas cartesianas para la ubicación precisa de los cafetos afectados. Por motivos operativos, el monitoreo general se llevó a cabo en las épocas de mayores lluvias (junio-noviembre). Posterior al registro de los cafetos con evidencia de roya, se realizó un control manual de la esta, la cual consistió en el retiro de las hojas con la enfermedad.

En junio de 2022, los cafetos asociados a Cenízaro (*A. saman*) mostraron la mayor incidencia de roya, especialmente bajo la fertilización física (F1) con 32 casos, seguido por la fertilización química (F2) con 25 casos y el control de acidez (Cal) con 10 casos. Espavel (*A. excelsum*) + Poró (*E. poeppigiana*) registró una incidencia moderada, con 15 casos bajo F1, 10 casos bajo F2 y 7 casos bajo Cal. Guapinol (*H. courbaril*) + Poró (*E. poeppigiana*) presentó una incidencia baja, con 8 casos tanto bajo F1 como F2, y 5 casos bajo Cal. Pleno Sol 1 (PS1) tuvo la menor incidencia, con 4 casos bajo F1, 3 casos bajo F2 y 2 casos bajo Cal. En noviembre de ese mismo año, la incidencia disminuyó significativamente en todos los tratamientos debido a la realización del control manual de la roya. Cenízaro (C) tuvo 7 casos bajo F1, 5 casos bajo F2 y 6 casos bajo Cal. Espavel + Poró (EP) mostraron 6 casos bajo F2, 5 casos bajo F1 y 3 casos bajo Cal. Guapinol + Poró (GP) se mantuvo bajo, con 3 casos bajo F1 y 2 casos bajo F2 y Cal. Pleno Sol 1 (PS1) tuvo una incidencia uniforme y baja, con 2 casos para cada sub-tratamientos (F1, F2 y Cal) (Figura 34a).

En junio de 2023, el tratamiento con Cenízaro (C) continuó mostrando la mayor incidencia, con 25 casos bajo F1, 18 casos bajo F2 y 12 casos bajo Cal. Espavel + Poró (EP) mostró una incidencia alta, con 18 casos bajo F1, y 10 casos bajo F2 y Cal. Guapinol + Poró (GP) tuvo una incidencia moderada, con 10 casos bajo F1, 8 casos bajo F2 y 7 casos bajo Cal. Pleno Sol 1 (PS1) mostró la menor incidencia, con 6 casos bajo F1, 3 casos bajo F2 y 4 casos bajo Cal. En noviembre de 2023, la incidencia disminuyó significativamente en todos los tratamientos. Cenízaro (C) tuvo 5 casos bajo F2, 4 casos bajo F1 y 3 casos bajo Cal.

Espavel + Poró (EP) mostró 3 casos bajo F1 y 2 casos bajo F2 y Cal. Guapinol + Poró (GP) tuvo 3 casos bajo F1 y 2 casos bajo F2 y Cal. Pleno Sol 1 (PS1) mostró la menor incidencia, con 2 casos bajo F1 y 1 caso bajo F2 y Cal (Figura 34b).

Los resultados indican que el tratamiento con Cenízaro tiene la mayor incidencia de roya en ambos años, especialmente bajo la fertilización física (F1). La fertilización física (F1) mostró una mayor incidencia de roya en casi todos los tratamientos y periodos, sugiriendo una posible asociación con una mayor susceptibilidad a la roya. Además, la incidencia de roya fue más alta en junio que en noviembre en ambos años, lo que indica una influencia estacional, posiblemente relacionada con las condiciones climáticas durante estos meses. Este hallazgo es consistente con estudios previos que sugieren que el exceso de sombra puede favorecer la multiplicación de la roya al proporcionar un ambiente húmedo y protegido, que es ideal para la proliferación del hongo (Avelino *et al.* 2004).

#### 6.3.2. Análisis de la severidad de *H. vastatrix* en hojas y planta

Con base a la escala de severidad en hojas establecida para la evaluación del ensayo (Figura 35) y la orientación de categorías de severidad en la planta propuesta por Eskes y Tomabraghini (1989), se censaron 1802 cafetos encontrándose que un 15,48% de estos, tenían evidencia de incidencia de *H. vastatrix* (279 de 1802 cafetos). En el Bloque 1 (B1), el tratamiento con Cenízaro mostró una mayor severidad tanto en hojas como en plantas para los sub-tratamientos F1 y F2 en comparación con el sub-tratamiento C (solo encalado). Específicamente, en hojas, el sub-tratamiento F2 presentó 26 plantas con severidad de 1-4%, 4 plantas con 4-8% y 1 planta con 8-12%, mientras que, en plantas, el mismo sub-tratamiento tuvo 16 plantas con severidad 1, 12 con severidad 2 y 3 cafetos con severidad 3.

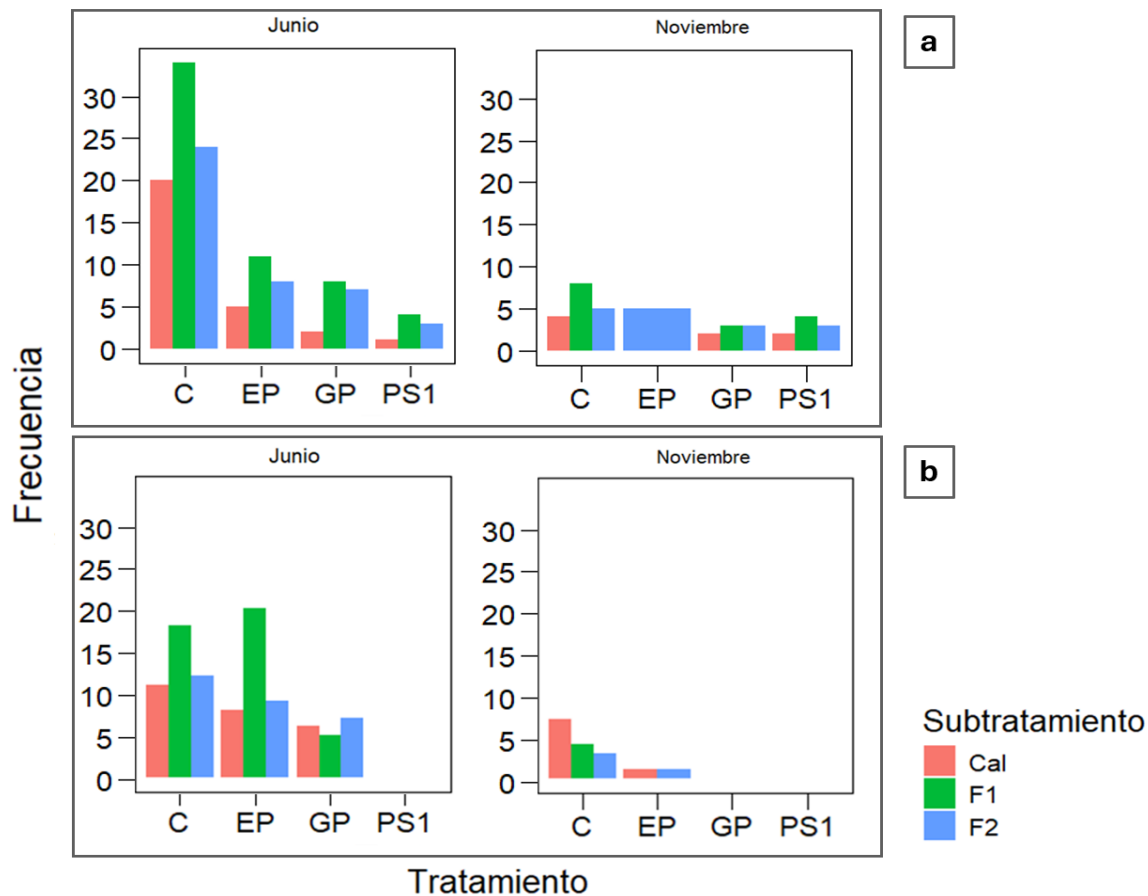


Figura 34. Frecuencias de Incidencia de *H. vastatrix* en los años 2022 y 2023

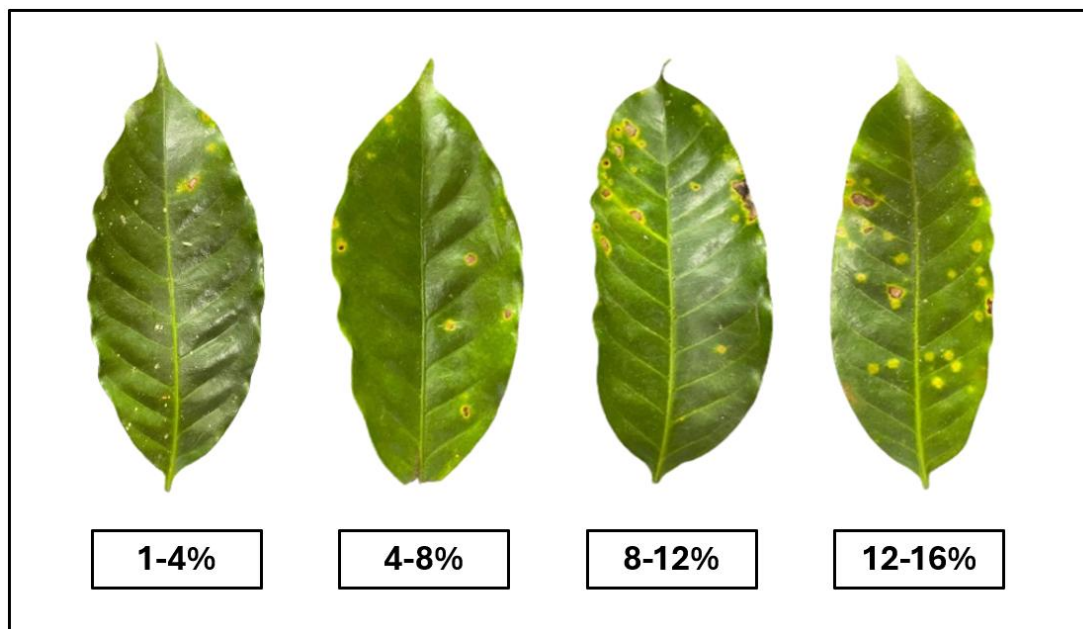


Figura 35. Escala de evaluación de severidad en hojas establecida a través del procesamiento con la aplicación Leaf Doctor

En los tratamientos Espavel + Poró y Guapinol + Poró se presentaron patrones similares a Cenízaro, pero significativamente menores. Para Espavel + Poró, se observó una mayor severidad en hojas bajo los sub-tratamientos C y F2, con 6 plantas cada uno con severidades en el orden de 1-4%, mientras que, en plantas, se observaron 2 cafetos en la categoría 4. En el caso de Guapinol + Poró, el sub-tratamiento F1 presentó 10 casos con severidad de 1-4%, 3 en 4-8% en hojas y 7 plantas con severidad 2 en plantas, indicando una mayor severidad comparado con el sub-tratamiento C y F2. No obstante, en C se presentó un cafeto entre el 12-15% de severidad en hojas y 5 en planta (el cafeto con mayor porcentaje de severidad en ambos casos).

En el Bloque 2 (B2), el tratamiento con Cenízaro bajo el sub-tratamiento C mostró una mayor cantidad de casos con roya. En hojas, se registraron 12 plantas con severidad en 1-4% y 8 plantas con severidad 3 a nivel de planta. En F1 se hallaron dos cafetos con el nivel más alto de severidad 12-16% en hojas uno en categoría 3 y otro en 4 a nivel de planta. El tratamiento Espavel + Poró solo reporto casos en los sub-tratamientos F1 y F2. En F1 se observó 8 casos en 1-4%, 3 cafetos en 4-8% y 2 en 12-16% de severidad en hojas. A nivel de plantas, 6 casos estuvieron catalogados en 2, 3 cafetos en 3 y 1 en 5, este último en los límites superiores tanto en hoja como en planta.

Guapinol + Poró registro 8 casos en el sub-tratamiento C en 1-4% de severidad en hojas, 5 y 3 cafetos en 2 y 3 en severidad a nivel de planta.





En el Bloque 3 (B3), el tratamiento con Cenízaro bajo el sub-tratamiento F1 mostró una mayor severidad en comparación con el sub-tratamiento C y F2. En hojas, se registraron 7 plantas con severidad de 1-4%, 4 plantas con 4-8% y 1 cafeto con 8-12%, mientras que en plantas se observaron 7 plantas con severidad 2 y 4 plantas con severidad 3. El tratamiento Espavel + Poró presentó una alta severidad bajo los sub-tratamientos F1 y F2, con 7 y 14 plantas respectivamente con severidad de 1-4% en hojas. Los sub-tratamientos F1 y F2 presentaron 6 y 12 casos de severidad en plantas en la categoría 2. Guapinol + Poró también mostró una alta severidad bajo los sub-tratamientos F1 y F2, con 13 plantas cada uno y C con 8 cafetos en 1-4%. A nivel de planta, solo F2 presento un cafeto en la máxima categoría 5. La mayoría de los cafetos presentaron severidad en la categoría 3.

Los bloques de control PS1 y PS2 mostraron una menor severidad en comparación con los otros bloques, indicando una mejor resistencia. En PS1, se observaron 2 plantas con severidad de 1-4% en hojas bajo el sub-tratamiento C y 2 plantas bajo el sub-tratamiento F2. A nivel de plantas se registraron 2 cafetos con severidad 1 bajo el sub-tratamiento C y 2 plantas con severidad 2 bajo el sub-tratamiento F2. En PS2, se observaron 2 plantas con severidad de 1-4% en hojas bajo el sub-tratamiento F1 y 1 planta bajo el sub-tratamiento F2, mientras que en plantas se registraron 1 planta con severidad 1 bajo el sub-tratamiento F1 y 1 planta con severidad 1 bajo el sub-tratamiento F2.

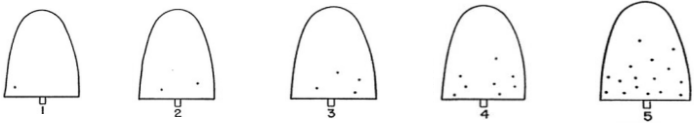
En resumen, el Bloque 1 mostró la mayor severidad en todos los tratamientos y sub-tratamientos, indicando una menor resistencia en comparación con otros bloques. El Bloque 2 demostró una resistencia moderada, con algunos tratamientos y sub-tratamientos mostrando niveles de severidad más bajos. El Bloque 3 presentó altos niveles de severidad, especialmente bajo los sub-tratamientos F1 y F2, sugiriendo una resistencia similar a la del Bloque 1. Los bloques de control (PS1 y PS2) mostraron los niveles más bajos de severidad, destacando una mayor resistencia en comparación con los otros bloques. La luz es un factor por considerar en ese contexto: a mayor luz, menor severidad.

En general, el tratamiento con Cenízaro mostró la mayor severidad tanto en hojas como en plantas, especialmente bajo los sub-tratamientos F1 y F2. El tratamiento con Espavel + Poró mostró una severidad moderada, presentándose la misma tendencia a nivel de F1 y F2. Guapinol + Poró presentó severidad variable, pero en general niveles más altos bajo F1 y F2.

Cuadro 21. Cuadro de frecuencias de la severidad en hojas de café considerando los componentes del ensayo (adaptación de Capucho *et al.* 2011)

Bloque	Tratamiento	Sub-tratamientos	1-4%	4-8%	8-12%	12-16%	Total sub-tratamiento	Total tratamiento	
									
B1	Cenízaro	C	9	2	0	0	11	61	
		F1	17	2	0	0	19		
		F2	26	4	1	0	31		
	Espavel + Poró	C	6	0	0	0	6		19
		F1	4	1	0	0	5		
		F2	6	1	1	0	8		
	Guapinol + Poró	C	11	0	0	1	12		36
		F1	10	3	0	0	13		
		F2	9	2	0	0	11		
B2	Cenízaro	C	12	0	0	0	12	18	
		F1	3	0	0	2	5		
		F2	1	0	0	0	1		
	Espavel + Poró	F1	8	3	0	2	13	17	
		F2	2	1	0	1	4		
	Guapinol + Poró	C	8	1	0	1	10	14	
F1		3	0	0	0	3			
F2		1	0	0	0	1			
B3	Cenízaro	C	6	2	0	2	10	28	
		F1	7	4	0	0	11		
		F2	6	0	0	1	7		
	Espavel + Poró	C	3	6	0	2	11	35	
		F1	7	1	0	1	9		
		F2	14	0	0	1	15		
	Guapinol + Poró	C	8	4	0	1	13	42	
		F1	13	0	0	0	13		
		F2	13	1	0	2	16		
Pleno sol (PS1)	C	2	0	0	0	2	6		
	F2	2	0	0	2	4			
Pleno sol 2 (PS2)	F1	2	0	0	0	2	3		
	F2	1	0	0	0	1			
Total por categorías de severidad en hojas			220	38	2	19	279		

Cuadro 22. Cuadro de frecuencias de la severidad en plantas de café considerando los componentes del ensayo (Eskes y Toma-Braghini, 1989)

Bloque	Tratamiento	Sub-tratamientos						Total sub-tratamientos	Total tratamientos	
			1	2	3	4	5			
B1	Cenízaro	C	5	5	1	0	0	11	61	
		F1	10	9	0	0	0	19		
		F2	16	12	3	0	0	31		
	Espavel + Poró	C	0	4	2	0	0	6		
		F1	1	1	1	2	0	5		
		F2	1	2	5	0	0	8		
	Guapinol + Poró	C	2	5	3	0	2	12		36
		F1	3	7	2	1	0	13		
		F2	2	3	6	0	0	11		
B2	Cenízaro	C	1	3	8	0	0	12	18	
		F1	0	3	1	1	0	5		
		F2	0	1	0	0	0	1		
	Espavel + Poró	F1	0	6	6	0	1	13		
		F2	0	0	4	0	0	4		
		C	0	5	4	1	0	10		
Guapinol + Poró	F1	0	1	2	0	0	3	14		
	F2	0	0	1	0	0	1			
	C	1	5	4	0	0	10			
B3	Cenízaro	F1	0	7	4	0	0	11	28	
		F2	2	4	1	0	0	7		
		C	1	2	8	0	0	11		
	Espavel + Poró	F1	1	6	2	0	0	9		
		F2	2	12	1	0	0	15		
		C	1	3	9	0	0	13		
Guapinol + Poró	F1	1	6	6	0	0	13	42		
	F2	2	9	4	0	1	16			
	C	0	2	0	0	0	2			
PS1	F2	0	1	2	1	0	4	6		
	F1	1	1	0	0	0	2			
PS2	F2	0	1	0	0	0	1	3		
	F1	1	1	0	0	0	2			
Total de severidad por categorías			53	126	90	6	4	279		

### 6.3.3. Análisis del daño por ojo de gallo causada por *Mycena citricolor*

Basado en los niveles generados a partir de la escala diagramática de daño de la enfermedad ojo de gallo causada por *Mycena citricolor*, desarrollada por Pacheco (2012) (Figura 36), se determinó que el 40,73% de los cafetos presentaban evidencia de daño por *M. citricolor* (734 de 1802 cafetos), de los cuales el 6,27% mostraron signos de defoliación moderada (Figura 37). Se tuvo en consideración que el impacto del ojo de gallo es la caída prematura de hojas (Avelino *et al.* 1995; Guerra, 2004; Barquero, 2007), debido a que produce una capa de hojarasca fresca constituida por follaje enfermo desprendido. El análisis del daño por ojo de gallo en hojas reveló que la mayoría de las observaciones se encuentran en el rango de daño 0,01-2% con 611 observaciones, seguida por 2,01-4% con 116 observaciones y 7 casos en 4,01-6%, sumando un total de 734 observaciones (Cuadro 23).

En el Bloque 1 (B1), el tratamiento Cenízaro presentó 65 observaciones, desglosadas en 16 casos en 0,01-2% y 4 casos en 2,01-4% para el sub-tratamiento C (control experimental). Para el sub-tratamiento F1 se registraron 19 en 0,01-2% y 3 cafetos con daños en 2,01-4%. F2 registro 18 cafetos en 0,01-2%, 4 en 2,01-4% y 1 cafeto con daño en 4,01-6%. El tratamiento Espavel + Poró en el mismo bloque tuvo 89 observaciones, distribuidas en 27 casos en 0,01-2% y 1 caso en 2,01-4% para el sub-tratamiento C. En F1 se hallaron 27 cafetos en 0,01-2% y 4 en 2,01-4%. Finalmente, en F2, se registraron 25 cafetos en 0,01-2% y 5 en 2,01-4%. El tratamiento Guapinol + Poró en B1 mostró 74 observaciones, repartidas en 17 cafetos en 0,01-2% y 6 casos en 2,01-4% y 0 en 4,01-6% para el sub-tratamiento C. El sub-tratamiento F1 reportó 17 casos en 0,01-2% y 6 en 2,01-4%. y 0 en 4,01-6%. En F2 se encontraron 20 cafetos en 0,01-2% y 6 en 2,01-4%.

En el Bloque 2 (B2), el tratamiento Cenízaro tuvo 61 observaciones, mientras que en Espavel + Poró y Guapinol + Poró presentaron 98 y 68 observaciones respectivamente. En el Bloque B3, Cenízaro registró 64 observaciones, Espavel + Poró 88 observaciones y Guapinol + Poró 79 observaciones.

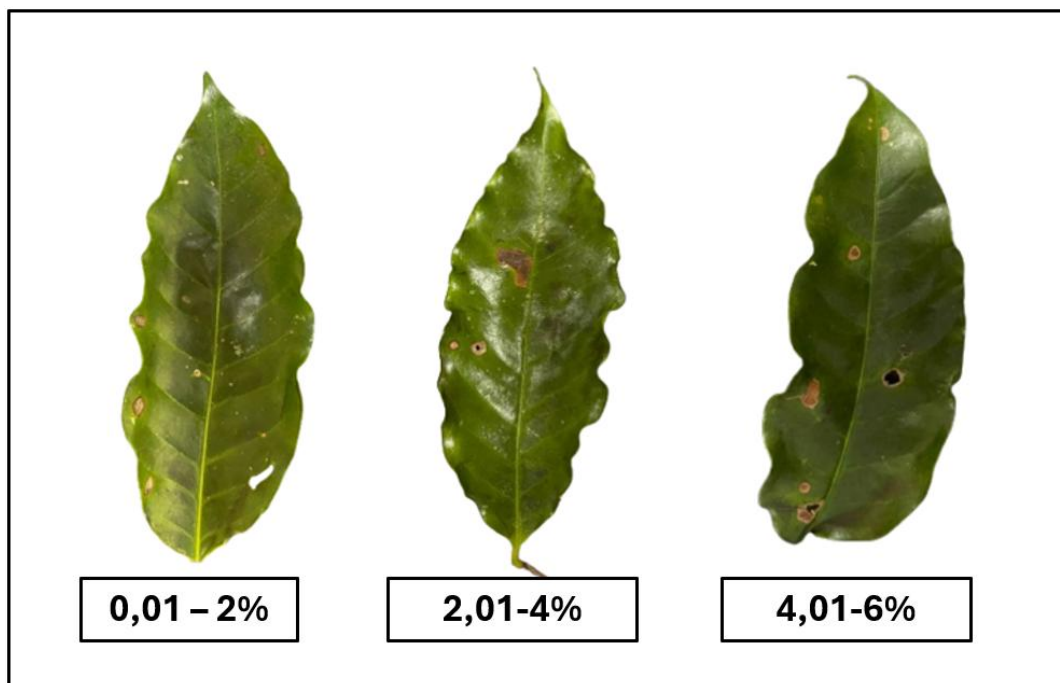


Figura 36. Escala de daño de la enfermedad ojo de gallo establecida a través del procesamiento con la aplicación Leaf Doctor



Figura 37. Cafeto con evidencia de defoliación asociada a *M. citricolor*

Cuadro 23. Cuadro de frecuencias de daño a partir de la escala diagramática de daño de la enfermedad desarrollada por Pacheco (2012)

Bloque	Tratamiento	Sub-tratamiento	Rangos de daños (%)			Cafetos / sub-tratamiento	Cafetos / tratamiento
			0,01-2%	2,01-4%	4,01-5		
B1	Cenízaro	C	16	4	0	20	65
		F1	19	3	0	22	
		F2	18	4	1	23	
	Espavel + Poró	C	27	1	0	28	89
		F1	27	4	0	31	
		F2	25	5	0	30	
	Guapinol + Poró	C	17	6	0	23	74
		F1	17	8	0	25	
		F2	20	6	0	26	
B2	Cenízaro	C	18	1	0	19	61
		F1	7	3	0	10	
		F2	26	6	0	32	
	Espavel + Poró	C	32	5	0	37	98
		F1	23	4	0	27	
		F2	28	6	0	34	
	Guapinol + Poró	C	22	13	1	36	68
		F1	4	0	0	4	
		F2	22	6	0	28	
B3	Cenízaro	C	16	2	0	18	64
		F1	22	2	0	24	
		F2	19	3	0	22	
	Espavel + Poró	C	21	4	0	25	88
		F1	32	4	0	36	
		F2	23	4	0	27	
	Guapinol + Poró	C	22	2	0	24	79
		F1	20	3	0	23	
		F2	30	2	0	32	
PS1	C	1	0	0	1	10	
	F1	4	0	0	4		
	F2	4	1	0	5		
PS2	C	8	3	1	12	38	
	F1	11	1	2	14		
	F2	10	0	2	12		
<b>Totales</b>			<b>611</b>	<b>116</b>	<b>7</b>	<b>734</b>	

Por último, en los bloques PS1 y PS2 se observaron 10 y 38 observaciones respectivamente. En términos generales, el daño por ojo de gallo en hojas y plantas de café es predominantemente leve, dado que la mayoría de lo reportado se encuentra con porcentajes de daño en el rango 0,01-2%.

Estudios previos han mostrado patrones similares de daño por ojo de gallo en plantaciones de café. Por ejemplo, Avelino *et al.* (2006) reportaron que las áreas con alta humedad y sombra densa tienden a presentar mayores incidencias de *M. citricolor*, lo que sugiere que las condiciones micro climáticas pueden influir significativamente en la severidad del daño. Además, Chaves y Escobar (2003) encontraron que la implementación de prácticas de manejo integrado, como el uso de fungicidas y la poda regular, puede reducir considerablemente la incidencia de la enfermedad.

## **6.4. Conclusiones**

### **6.4.1. Incidencia de roya**

Durante 2022 y 2023, se observó que los cafetos asociados con Cenízaro (*A. saman*) mostraron la mayor frecuencia de apariciones de roya, especialmente bajo la fertilización física (F1). La fertilización física puede estar asociada con una mayor susceptibilidad a la roya. Otro aspecto para resaltar respecto a la incidencia de la enfermedad es que es más alta en los meses de junio, posiblemente debido a las condiciones climáticas favorables para el hongo.

Cenízaro (C) presentó la mayor incidencia de roya, con un total de 154 casos repartidos entre 20.13% en el sub-tratamiento Cal, 44.16% en F1 y 35.71% en F2. En segundo lugar, se encuentra el tratamiento EP con 89 incidencias, distribuidas en 24.72% en Cal, 42.70% en F1 y 32.58% en F2. Por su parte, GP registra 66 casos, con un 28.79% en Cal, 31.82% en F1 y 39.39% en F2. Finalmente, el tratamiento PS1 muestra la menor incidencia con 34 casos en total, repartidos en 26.47% en Cal, 41.18% en F1 y 32.35% en F2.

#### 6.4.2. Severidad de roya en hojas y plantas

Los cafetos asociados con Cenízaro mostraron la mayor severidad tanto en hojas como en plantas, especialmente bajo los sub-tratamientos F1 y F2. No obstante, las asociaciones de café con Espavel + Poró y Guapinol + Poró, también se vieron afectados, pero con una mejor resistencia comparativa. Los bloques de control (PS1 y PS2) presentaron la menor severidad, indicando resistencia, lo que subraya la importancia de considerar el manejo de la luz y la sombra.

Complementando lo anterior, la severidad se evaluó en rangos del 1-4%, 4-8%, 8-12% y 12-16%. Cenízaro en el bloque 2 bajo fertilización física y en el bloque 3 bajo cal se destacó por tener individuos en los niveles más altos de severidad en el rango del 12-16%. Además, los sub-tratamientos Espavel + Poró en el bloque 3 bajo cal, Guapinol + Poró en el bloque 3 bajo fertilización química y los cafetos a Pleno sol fertilizados bajo la mezcla química, también mostraron valores en esta categoría (12-16%).

#### 6.4.3. Daño por Ojo de Gallo

La evaluación del daño por ojo de gallo reveló que el 40,73% de los cafetos tenían evidencia de la enfermedad, con la mayoría de las observaciones en el rango de daño de 0,01-2%. Los cafetos bajo Cenízaro presentaron más daño, especialmente bajo los sub-tratamientos F1 y F2. Los cafetos bajo Espavel + Poró y Guapinol + Poró también mostraron daño, aunque en menor medida que en Cenízaro. En los rangos de 0,01-2%, 2,01-4% y 4,01-5%, se encontró que Cenízaro y Espavel + Poró presentaron la mayor cantidad de cafetos con daños en esas escalas, mientras que Guapinol + Poró mostró un número notable de cafetos con daños moderados. Los bloques B1 y B3 tendieron a tener más cafetos con daños leves, indicando una menor severidad en comparación con otros bloques. En contraste, los bloques PS1 y PS2 presentaron una menor cantidad de cafetos afectados.

Los estudios previos sugieren que las áreas con alta humedad y sombra densa tienden a presentar mayores incidencias de ojo de gallo, lo que indica que las condiciones micro climáticas pueden influir significativamente en la severidad del daño (Sequeira y Griffin

2004), lo cual es consistente con las evidencias de este estudio. Una opción de control de la enfermedad puede estar orientado al manejo manual, Maldonado *et al.* (2017) exploraron el impacto del del hongo en la productividad del café, demostrando que la eliminación manual de hojas enfermas puede ser una estrategia efectiva para reducir la incidencia de la enfermedad y mejorar el rendimiento del cultivo.

### **Literatura citada**

- Avelino, J., J.C. Toledo, y B. Medina. 1995. Desarrollo del ojo de gallo (*Mycena citricolor*) en una finca del norte de Guatemala y evaluación de los daños provocados por esta enfermedad. En: IICA-PROMECAFE, editores, XVI Simposio de Caficultura Latinoamericana. IICA-PROMECAFE, Managua, NIC. p. 1-8. <https://goo.su/xfenG>
- Avelino, J., Willocquet, L., y Savary, S. (2004). Effects of crop management patterns on coffee rust epidemics. *Plant Pathology*, 53(5), 541-547. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2004.01067.x>
- Avelino, J., Willocquet, L. y Savary, S. (2006). Effects of crop management patterns on coffee rust epidemics. *Plant Pathology*, 55(5), 620-630. <https://bsppjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-3059.2004.01067.x>
- Avelino, J., Zelaya, H., Merlo, A., Pineda, A., Ordoñez, M., & Savary, S. (2015). The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations. *Ecological Applications*, 25(3), 471-484. <https://doi.org/10.1890/14-0984.1>
- Barquero, M. 2007. Algunas consideraciones sobre el ojo de gallo. *Rev. Informe ICAFE* 1:11-15.
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D., y Somarriba, E. (1998). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*, 38(2-3), 139-164. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9008-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9008-2_6)
- Chaves, G. M., Escobar, M. (2003). Integrated Management of Coffee Leaf Rust (*Hemileia vastatrix*) and Coffee Berry Disease (*Colletotrichum kahawae*). In *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production*, edited by Jean Nicolas Wintgens, 573-592.

- Farji-Brener, A. (2020). Functional significance of the leaf-cutting ant *Atta cephalotes* (Formicidae) in coffee plantations: An enemy or an ally? *Biotropica*, 27(2), 250-256. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2000.00134.x>
- Google. (2024). [Campus de la Universidad EARTH]. Recuperado el 31 de enero de 2024. <https://maps.app.goo.gl/ecMMzoe47Wf4cPkV6>
- Góngora, Carmenza E., Zulma Nancy Gil, Luis Miguel Constantino y Pablo Benavides. (2023). Sustainable Strategies for the Control of Pests in Coffee Crops. *Agronomy* 13, no. 12: 2940. <https://doi.org/10.3390/agronomy13122940>
- Granados-Montero, M., Jiménez, R., González, J., y Salas, C. (2020). Leaf litter and *Mycena citricolor* inoculum on the American leaf spot epidemic. *Agronomía Mesoamericana*, 31(1), 77-94. <https://doi.org/10.15517/am.v31i1.36614>
- Guerra, B. 2004. Experiencias del manejo de las enfermedades fungosas presentes en el cultivo de café (*Coffea arabica*) en finca de pequeños caficultores en la aldea La Montaña, Moyuta, Jutiapa. Tesis Lic., Universidad de San Carlos, San Carlos, GTM. [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01\\_2061.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_2061.pdf)
- Jaramillo, J., Muchugu, E., Vega, F. E., Davis, A., Borgemeister, C., y Chabi-Olaye, A. (2011). Some like it hot: The influence and implications of climate change on coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) and coffee production in East Africa. *PLOS ONE*, 6(9), e24528. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024528>
- Koutouleas, A., Sarzynski, T., Bordeaux, M., Bosselmann, A. S., Campa, C., Etienne, H., Turreira-García, N., Rigal, C., Vaast, P., Cochicho Ramalho, J., Marraccini, P., y Ræbild, A. (2022). Shaded-Coffee: A Nature-Based Strategy for Coffee Production Under Climate Change? A Review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.877476>
- Maldonado, M., Torres, J., y Gómez, P. (2017). Manual control of *Mycena citricolor* and its impact on coffee yield. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 124(2), 181-188.
- Martins Silva, E. M., y Guzmán Domínguez, M. (2019). Respuesta Inicial de *Coffea arabica* var. Esperanza a la Fertilización Diferenciada en Suelos de Origen Aluvial del Caribe de Costa Rica (Proyecto de Graduación). Universidad EARTH, Guácimo, Limón, Costa Rica.

- Pacheco, A. (2012). Epidemiología de la enfermedad ojo de gallo del café (*Coffea arabica*) causada por el hongo *Mycena citricolor* Berk. & Curt. en el área centro occidental de Guatemala, C.A. Universidad de San Carlos de Guatemala, Instituto de Investigaciones Agronómicas. <https://core.ac.uk/download/pdf/94668766.pdf>
- Pethybridge, S. J., y Nelson, S. C. (2015). Leaf Doctor: A new portable application for quantifying plant disease severity. *Plant Disease*, 99(10), 1310-1316. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0319-RE>
- RStudio Team. (2023). RStudio: Integrated Development for R (Version: 2023.12.1+402) [Software]. RStudio. <https://www.rstudio.com/>
- Universidad EARTH. (2023). Base de datos climáticos de la estación meteorológica institucional [documento en Excel].
- USDA (National Agroforestry Center). (n.d.). Agroforestry practices. U.S. Department of Agriculture. <https://www.fs.usda.gov/nac/practices/index.shtml>
- Sequeira, R., y Griffin, G. F. (2004). Factors Impacting American Leaf Spot Disease Incidence and Intensity in Coffee. *Phytopathology*, 94(2), 127-135. [https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/167259/Su%2C%20Chenyang\\_Thesis.pdf](https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/167259/Su%2C%20Chenyang_Thesis.pdf)
- Singh, M., Kukal, M. S., y Jhala, A. J. (2022). Water Use Characteristics of Weeds: A Global Review, Best Practices, and Future Directions. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.794090>

## 7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN GENERAL

### 7.1. Discusión general

#### 7.1.1. Crecimiento y productividad de *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5

En el capítulo 1 se estudió el crecimiento y la productividad del híbrido *Coffea arabica* var. Esperanza (L4A5) en un entorno agroforestal no tradicional en la región Caribe de Costa Rica. La elección de esta región se debió a que tradicionalmente las plantaciones de café se establecen en zonas de mayor altitud. Por tal razón, el presente estudio aporta datos valiosos sobre el comportamiento de una variedad mejorada de café en suelos de origen aluvial asociados con especies arbóreas maderables y de servicio y a baja altitud.

Los resultados obtenidos indican que las condiciones agroforestales tienen un impacto significativo en el crecimiento y la productividad del híbrido Esperanza L4A5. Las asociaciones con árboles como *Albizia saman*, *Hymenaea courbaril* y *Anacardium excelsum*, junto con *Erythrina poeppigiana* como árbol de servicio, demostraron ser beneficiosas para el desarrollo del café si se aborda desde la perspectiva de la sobrevivencia. Una evidencia importante respecto a la mortalidad es que fue mayor en las zonas expuestas a pleno sol, lo que refuerza la necesidad de implementar sistemas de sombra adecuados. La sombra proporcionada por los árboles no sólo ayuda a mitigar el estrés hídrico y térmico, sino que también mejora la calidad del suelo al aumentar la materia orgánica y fomentar la actividad microbiana (Beer *et al.* 1998; Muschler, 2001).

Los tratamientos con Espavel + Poró (2020: 28 kg, 2021: 398,65 kg, 2022: 604,17 kg, 2023: 628,30 kg) y Guapinol + Poró (2020: 28,67 kg, 2021: 368,17 kg, 2022: 526,01 kg, 2023: 582,88 kg) mostraron aumentos importantes de producción de cerezas de café durante los cuatro años, lo que sugiere que estas combinaciones arbóreas proporcionan condiciones favorables. Cenízaro se colocó en el puesto tres en producción (2020: 37,58 kg, 2021: 300,85 kg, 2022: 464,94 kg, 2023: 504,76 kg).

Así mismo, el estudio reveló y reforzó que la fertilización es crucial para maximizar el rendimiento del café. Las parcelas con fertilización física (F1) y química (F2) mostraron diferencias significativas en términos de crecimiento y productividad, lo que subraya la

importancia de ajustar las prácticas de fertilización a las condiciones específicas del suelo y las necesidades nutricionales de las plantas (Van Der Vossen, 2009).

Respecto al crecimiento de las plantas en términos de diámetro y altura, se observó un patrón donde las combinaciones que alcanzaron las tasas máximas de crecimiento más rápido también experimentaron una desaceleración más pronunciada en comparación con aquellas que tardaron más en alcanzar su tasa máxima. Por ejemplo, las combinaciones Espavel-Poró + fertilización química y Cenízaro sin fertilización mostraron tasas máximas de crecimiento en la semana 50 y 75, respectivamente, pero su crecimiento se desaceleró rápidamente después de alcanzar estos picos. Este patrón se repitió en el crecimiento en altura, donde la combinación Cenízaro bajo fertilización química alcanzó la tasa máxima de crecimiento en la semana 65 con 0,0147 m de crecimiento, seguido de una desaceleración similar.

#### 7.1.2. Fenología de *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5 a pleno sol y en arreglos agroforestales con fertilizaciones diferenciadas en la Región Caribe de Costa Rica.

El capítulo 2 establece la fenología del híbrido Esperanza L4A5 en la región Caribe de Costa Rica ofreciendo una visión integral sobre el comportamiento de este híbrido en condiciones no tradicionales para el cultivo de café. Los resultados indican que Esperanza L4A5 presenta adaptabilidad a las condiciones de baja altitud en la región Caribe. Durante el primer año, se observó un notable crecimiento en biomasa y desarrollo fenológico, lo cual hace notar lo sobresaliente que puede llegar a ser desde el punto de vista productivo. La floración, que es una fase crítica en la fenología del cafeto, mostró picos en marzo y mayo, con una variabilidad en la uniformidad debido a las condiciones climáticas específicas del sitio de estudio. Esta variabilidad en la floración y fructificación es atribuible a las diferencias en temperatura, humedad y precipitaciones a lo largo del año (Vignola *et al.* 2018).

Con base a lo anterior, la fenología del café en el Caribe de Costa Rica difiere significativamente de las zonas tradicionales cafetaleras del país, principalmente debido a las variaciones climáticas y de altitud. En el Caribe, la floración del híbrido Esperanza L4A5 se caracterizó por dos picos distintivos: uno en marzo y otro en mayo. Este patrón de

floración no fue uniforme y mostró una considerable variabilidad entre los años. Se denotó desfases en la inducción de la floración, que comienzan aproximadamente en 11 días más tarde. Esta variabilidad puede atribuirse a las condiciones climáticas específicas de la región, incluyendo fluctuaciones en la temperatura, humedad y precipitaciones.

El análisis de regresión mostró que tanto las coberturas arbóreas como las fertilizaciones tuvieron efectos significativos en la presencia de nudos florales desarrollados y la producción de frutos. Los sectores con fertilización física (F1) y química (F2) mostraron diferencias significativas en términos de crecimiento y productividad comparado con el control experimental. La idea de que la aplicación adecuada de nutrientes es esencial para maximizar el rendimiento del café, queda respaldada y especialmente en suelos de origen aluvial donde la disponibilidad de nutrientes puede variar considerablemente (Van Der Vossen, 2009).

7.1.3. Evaluación de la resistencia de los híbridos Esperanza (L4A5) a *Hemileia vastatrix* (roya) y *Mycena citricolor* (ojo de gallo) establecidos bajo diferentes arreglos agroforestales y a pleno sol bajo fertilizaciones diferenciadas en el Caribe de Costa Rica.

Los cafetos asociados con Cenízaro no sólo mostraron una mayor incidencia de roya, sino también una mayor severidad tanto en hojas como en plantas, particularmente bajo los sub-tratamientos F1 y F2. Sin embargo, las asociaciones de café con Espavel (*Anacardium excelsum*) + Poró (*Erythrina poeppigiana*) y Guapinol (*Hymenaea courbaril*) + Poró presentaron una mejor resistencia comparativa a la enfermedad. Los bloques de control (PS1 y PS2) mostraron la menor severidad de roya, indicando una mayor resistencia. Estos resultados subrayan la importancia de considerar el manejo de la luz y la sombra en las plantaciones de café, ya que una exposición adecuada a la luz puede reducir la severidad de la roya.

La evaluación del daño por ojo de gallo (*Mycena citricolor*) mostró que el 40,73% de los cafetos tenían evidencia de la enfermedad, con la mayoría de las observaciones en el rango de daño de 0,01-2%. Los tratamientos con Cenízaro presentaron un daño significativo, especialmente bajo los sub-tratamientos F1 y F2. Espavel + Poró y Guapinol + Poró también mostraron daño, aunque en menor medida. Estudios previos sugieren que las áreas

con alta humedad y sombra densa tienden a presentar mayores incidencias de ojo de gallo, indicando que las condiciones microclimáticas pueden influir significativamente en la severidad del daño (Sequeira y Griffin, 2004). Una estrategia de control para esta enfermedad puede estar orientada al manejo manual. Maldonado *et al.* (2017) exploraron el impacto del manejo manual en la productividad del café, demostrando que la eliminación manual de hojas enfermas puede ser una estrategia efectiva para reducir la incidencia de la enfermedad y mejorar el rendimiento del cultivo.

## **7.2. Conclusiones generales**

El híbrido Esperanza L4A5 mostró una adaptabilidad prometedora y rendimientos sostenidos en términos de crecimiento y producción de cerezas en la región Caribe de Costa Rica. Este resultado es alentador.

Desde la perspectiva del crecimiento considerando las diferentes coberturas y fertilizaciones, y unido al conocimiento detallado de la fenología del híbrido, esta información permite orientar las prácticas de manejo bajo las condiciones específicas del Caribe costarricense.

Se refuerza la idea de que la fertilización es fundamental para optimizar el crecimiento y la productividad del café en suelos de origen aluvial. Ajustar las dosis y tipos de fertilizantes según las condiciones específicas del suelo y la interacción agroforestal puede mejorar significativamente los resultados encontrados en esta investigación.

La implementación de coberturas de sombra es esencial para reducir la mortalidad de los cafetos y mejorar su rendimiento. Se demuestra que el cultivo de *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5 en sistemas agroforestales en la región Caribe de Costa Rica es viable y podría ser sostenible.

A nivel de resistencia a las enfermedades, los resultados de este estudio destacan la importancia de las prácticas de manejo agronómico y las asociaciones agroforestales en la mitigación de enfermedades como la roya y el ojo de gallo en el café. La fertilización física parece estar asociada con una mayor susceptibilidad a la roya, mientras que las asociaciones con árboles como Espavel y Poró pueden ofrecer una mejor resistencia.

Además, el manejo de la luz y la sombra juega un papel crucial en la severidad de la roya. Para el control del ojo de gallo, el manejo manual de las hojas enfermas se presenta como una estrategia efectiva para reducir la incidencia de la enfermedad y mejorar la productividad del café.

Así mismo, este estudio representa la línea base para futuras investigaciones en la caficultura de bajura y en estudios sobre la fenología del café en zonas no tradicionales. Los resultados sugieren que, con prácticas de manejo adecuadas, como las asociaciones agroforestales y la fertilización, es posible cultivar café en términos de productividad en regiones de baja altitud. Esto no solo contribuye a la diversificación de la producción, sino también a la sostenibilidad agrícola en estas áreas, mejorando así la resiliencia y mitigación de la caficultura frente a las condiciones climáticas cambiantes.

### **Literatura citada**

- Beer, J., Muschler, R., Kass, D., y Somarriba, E. (1998). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*, 38(2-3), 139-164. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9008-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9008-2_6)
- Maldonado, M., Torres, J., y Gómez, P. (2017). Manual control of *Mycena citricolor* and its impact on coffee yield. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 124(2), 181-188.
- Muschler, R. G. (2001). Shade improves coffee quality in a sub-optimal coffee-zone of Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 51(2), 131-139.
- Van Der Vossen, H. (2009). The importance of good agricultural practices in coffee cultivation. *Better Crops*, 93(2), 14-17.
- Vignola, R., Watler, W., Poveda Coto, K., Vargas Céspedes, A., Mora Aguilar, M., y Rivera Vargas, P. (2018). Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de café en Costa Rica. CATIE. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8206.pdf>
- Sequeira, R., y Griffin, G. F. (2004). Factors Impacting American Leaf Spot Disease Incidence and Intensity in Coffee. *Phytopathology*, 94(2), 127-135.